





CORSO DI DOTTORATO DI RICERCA IN  
INGEGNERIA MECCANICA E INDUSTRIALE -XXX Ciclo

# Le vibrazioni nelle attività estrattive: impatto sull'uomo e sull'ambiente

Gianluca Coltrinari

---

Prof. Guido Alfaro Degan

---

Prof. Edoardo Bemporad

---

1	STATO DELL'ARTE .....	15
1.1	SEZIONE I- L'IMPATTO DELLE VIBRAZIONI SULL'UOMO .....	15
1.1.1	Introduzione.....	15
1.1.2	Normativa di riferimento .....	17
1.1.2.1	Inquadramento delle norme .....	17
1.1.2.2	Metodologie di calcolo .....	19
1.1.2.3	Caratteristiche delle frequenze di vibrazione .....	22
1.1.2.4	Ampiezza e durata della vibrazione.....	27
1.1.2.5	Limiti d' esposizione alle vibrazione.....	30
1.1.3	Effetti dell'esposizione alla vibrazione .....	33
1.1.3.1	Patologie del rachide lombare .....	33
1.1.3.2	Disturbi cervico-brachiali .....	35
1.1.3.3	Disturbi digestivi .....	35
1.1.3.4	Effetti sull'apparato riproduttivo.....	36
1.1.3.5	Disturbi circolatori.....	36
1.1.3.6	Effetti cocleo-vestibolari .....	36
1.1.4	Fattori determinanti l'esposizione .....	37
1.1.4.1	Sorgente vibratoria .....	37
1.1.4.2	Peso del mezzo .....	37
1.1.4.3	Manutenzione del mezzo .....	38
1.1.4.4	Il sedile .....	39
1.1.4.5	Sospensioni del sedile e della cabina.....	41
1.1.4.6	Le gomme del veicolo .....	42
1.1.4.7	Condizioni al contorno .....	43
	a) <i>Condizioni della strada</i> .....	43
	b) <i>Velocità</i> .....	44
1.1.4.8	Soggetto esposto.....	44
	a) <i>Competenze e comportamento</i> .....	44
	b) <i>Posizione del guidatore</i> .....	45
	c) <i>Peso del guidatore</i> .....	46
	d) <i>Esperienza del guidatore</i> .....	47
1.1.5	L'esposizione alla WBV nel settore estrattivo .....	47
1.2	SEZIONE II- L'IMPATTO DELLE VIBRAZIONI SULL'AMBIENTE NELLE ATTIVITA' ESTRATTIVE.....	49
1.2.1	Le attivita' estrattive.....	49
1.2.2	L'operazione di scavo.....	51
1.2.3	L'esplosivo e il suo impiego.....	53
1.2.4	Le onde sismiche generate da fenomeni dinamici.....	54

1.2.4.1	Parametri del terreno .....	55
1.2.5	Operazione di brillamento .....	56
1.2.6	Il meccanismo di propagazione delle onde.....	56
1.2.6.1	Propagazione delle onde.....	59
a)	<i>Onde di volume</i> .....	62
b)	<i>Onde di superficie</i> .....	64
1.2.7	Effetti dell'esplosione nel terreno.....	66
1.2.7.1	Energia di vibrazione.....	69
1.2.8	Metodologie d'accoppiamento trasduttore-terreno.....	70
1.2.9	La misura delle vibrazioni meccaniche .....	75
1.2.9.1	Le vibrazioni meccaniche.....	75
1.2.9.2	Oscillazioni libere.....	79
1.2.9.3	Vibrazioni libere smorzate.....	80
1.2.9.4	Vibrazioni forzate .....	83
1.2.10	Riferimenti normativi in tema di vibrazioni .....	84
1.2.10.1	UNI 9614 – Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo .....	86
1.2.10.2	UNI 9916 – Criteri di misura e valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici. ....	87
2	CAPITOLO- CAMPAGNE SPERIMENTALI.....	93
2.1	SEZIONE I-CAMPAGNA SPERIMENTALE SULL'ESPOSIZIONE ALLA VIBRAZIONE A CORPO INTERO .....	93
2.1.1	Campagna sperimentale in ambito estrattivo.....	93
2.1.1.1	Sito di svolgimento della campagna.....	93
a)	<i>Area di studio</i> .....	95
b)	<i>Inquadramento geologico generale</i> .....	95
2.1.1.2	Descrizione delle sorgenti vibratorie .....	97
2.1.1.3	Descrizione della campagna .....	106
2.1.1.4	Operatori dei mezzi .....	107
2.1.1.5	Strumento di misurazione.....	108
2.1.1.6	Risultati.....	112
2.1.2	Campagna sperimentale su autovetture blindate .....	140
2.1.2.1	Prima campagna .....	141
c)	<i>Metodologia di prova</i> .....	145
d)	<i>Caratterizzazione della sorgente</i> .....	145
e)	<i>Risultati</i> .....	149
2.1.2.2	Seconda campagna di misurazione.....	151
a)	<i>Le vetture impiegate</i> .....	151
b)	<i>Sede dei test</i> .....	152
c)	<i>Metodologia di prova</i> .....	153



d) <i>Caratterizzazione della sorgente vibratoria</i> .....	154
e) <i>Risultati</i> .....	154
2.1.3 Campagna sperimentale su mezzi adibiti al trasporto pubblico .....	170
2.1.3.1 Mezzi oggetto della campagna di misurazione.....	170
2.1.3.2 Campagna di misure .....	179
2.1.3.3 Caratterizzazione della sorgente e descrizione del sito .....	180
2.1.3.4 Procedura di misurazione .....	185
2.1.3.5 Elaborazione dati .....	186
2.1.3.6 Metodo di calcolo applicati .....	187
2.1.3.7 Organizzazione della campagna: le giornate di misura .....	189
2.1.3.8 Funzioni di trasferimento.....	193
2.1.3.9 Risultati.....	205
2.2 PROVE SPERIMENTALI SULLE METODOLOGIE D'ACCOPIAMENTO TERRENO- TRASDUTTORE .....	210
2.2.1 Introduzione.....	210
2.2.2 Campagna di misura in ambiente urbano .....	210
2.2.2.1 Tipologia di sorgente.....	211
2.2.2.2 Descrizione del sito .....	212
2.2.2.3 Strumentazione impiegata .....	213
2.2.2.4 Acquisizione ed elaborazione dati.....	215
a) <i>Valutazione della funzione nella sezione 1</i> .....	216
2.2.2.5 Analisi delle curve ottenute .....	223
2.2.2.6 Analisi degli errori e rette di regressione lineari delle sezioni di calcolo.....	227
2.2.2.7 Confronto tra le sezioni .....	228
2.2.2.8 Confronto con i valori ammessi della normativa 9916:2004.....	236
2.2.2.9 Propagazione del moto nel terreno .....	237
2.2.2.10 Metodi di misurazione .....	237
2.2.2.11 Elaborazione misure per il confronto con i valori imposti .....	238
a) <i>Analisi delle misure</i> .....	238
b) <i>Confronto valori</i> .....	242
2.2.3 Campagna di misurazione in ambiente rurale .....	244
2.2.3.1 Sviluppo della campagna di misurazione .....	244
2.2.3.2 I profilati metallici .....	245
2.2.3.3 Prove sperimentali .....	249
a) <i>Identificazione della sorgente</i> .....	250
b) <i>Scelta del sito</i> .....	251
c) <i>Strumentazione impiegata</i> .....	253
2.2.3.4 Le giornate di misura.....	254

<i>Missione I</i> .....	254
<i>Missione II</i> .....	257
<i>Missione III</i> .....	258
2.2.3.5 Risultati.....	259
<i>Missione I</i> .....	259
<i>Missione II</i> .....	270
<i>Missione III</i> .....	276
2.2.4 Campagna di misura in ambiente estrattivo.....	281
2.2.4.1 Caratterizzazione del terreno.....	281
▪ <i>Caratterizzazione terreno tramite sorgente da sorgente mobile</i> .....	281
▪ <i>Caratterizzazione terreno tramite sorgente fissa</i> .....	290
2.2.4.2 Confronto delle metodologie d'accoppiamento seppellimento- sacco.....	300
▪ Campagna di prova.....	300
<i>Missione di prova</i> .....	301
<i>Missione I</i> .....	305
▪ Prima campagna di misurazione.....	307
<i>Fase I</i> .....	307
<i>Fase II</i> .....	310
▪ Seconda Campagna di misurazione.....	317
<i>Fase I</i> .....	318
<i>Fase II</i> .....	319
▪ Risultati.....	320
▪ <i>Prima campagna di misurazione</i> .....	320
▪ <i>Seconda campagna di misurazione</i> .....	322
▪ Prova sperimentale a 6 canali.....	325
3 ANALISI DEI RISULTATI OTTENUTI.....	327
3.1 SEZIONE I -CAMPAGNA SPERIMENTALE SULL'ESPOSIZIONE ALLA VIBRAZIONE A CORPO INTERO.....	327
3.1.1 Campagna sperimentale in ambiente estrattivo.....	327
3.1.2 Campagna sperimentale su autovetture blindate.....	329
3.1.2.1 Prima campagna di misurazione.....	329
3.1.2.2 Seconda campagna di misurazione.....	331
3.1.3 Campagna sperimentale su mezzi adibiti al trasporto pubblico.....	333
3.2 METODOLOGIE D'ACCOPIAMENTO TERRENO-TRASDUTTORE.....	334
3.2.1 Campagna di misurazione in ambiente urbano.....	334
3.2.2 Campagna di misurazione in ambiente rurale.....	335
3.2.3 Campagna di misurazione in ambiente estrattivo.....	336
3.2.3.1 Caratterizzazione del terreno.....	336

	<i>Vibrazioni indotte da sorgente gommata</i> .....	336
	<i>Vibrazioni da sorgente fissa</i> .....	336
3.2.3.2	Confronto delle metodologie d'accoppiamento seppellimento- sacco .....	337
▪	Campagna di prova.....	337
▪	Prima campagna di misurazione.....	338
▪	Seconda campagna di misurazione.....	339
4	CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI.....	341
5	BIBLIOGRAFIA .....	343
5.1	BIBLIOGRAFIA WBV.....	343
5.2	BIBLIOGRAFIA ACCOPPIAMENTO TERRENO TRASDUTTORE.....	348
▪	<i>Appendice A : Caratteristiche del sito</i> .....	358
▪	<i>Appendice B: Grafici misurazioni su veicoli in ambiente estrattivo</i> .....	398
▪	<i>Appendice C: Grafici misurazioni in ambiente urbano - vetture in configurazione standard</i> ..	402
▪	<i>Appendice D: Grafici misurazioni in ambiente urbano - vetture in configurazione blindata</i> ..	416
▪	<i>Appendice E: Risultati misurazioni in ambiente urbano svolte sui mezzi pubblici</i> .....	429
▪	<i>Appendice F: Campagna sperimentale in ambiente urbano</i> .....	456
▪	<i>Appendice G: Grafici delle misure per il confronto con i valori imposti dalla normativa</i> .....	465
▪	<i>Appendice H: Grafici simulazioni del profilato metallico</i> .....	467
▪	<i>Appendice I: Grafici misurazioni dell'impianto di lavorazione</i> .....	473
▪	<i>Appendice L : Grafici delle misurazioni delle volate 1°campagna di misurazione Fase I</i> .....	478
▪	<i>Appendice M: Grafici delle misurazioni delle volate 1°campagna di misurazione Fase II</i> .....	486

# Introduzione

La presenza dei movimenti oscillatori meccanici, definiti vibrazioni, viene riscontrata in modo chiaro e inequivocabile nelle attività umane e in tutti i più diversificati processi tecnologici. Tale fenomeno fisico produce effetti che possono avere ripercussioni sia negative che positive sull'uomo e sull'ambiente. Le sollecitazioni vibratorie sono caratterizzate sia dall'ampiezza del segnale che dal contenuto in frequenza e vengono impiegate in ambito medico per la riabilitazione dei pazienti al fine di sollecitare la risposta biodinamica del soggetto e poter avere un effetto terapeutico. Questo perché il tessuto muscolare, stimolato ad una precisa frequenza caratteristica sia del tipo di muscolo che del soggetto, riesce a riacquistare e/o rinforzare la propria tonicità. Non sempre, però, una sorgente vibratoria può apportare effetti benefici all'organismo umano; vibrazioni con elevati valori d'ampiezza del segnale e al di fuori delle frequenze efficaci per una positiva stimolazione muscolare, generano rilevanti effetti negativi che possono portare all'insorgenza di patologie estremamente dannose e spesso irreversibili. Questa problematica è particolarmente rilevante tra i lavoratori i quali, per lo svolgimento della propria mansione, sono spesso a contatto diretto con sorgenti vibratorie di vario tipo (ad esempio automezzi con diverse caratteristiche) e per tempi prolungati. Gli effetti di tale esposizione, purtroppo a volte estremamente dannosi, si manifestano nel lungo periodo e, molto spesso, quando non è più possibile intervenire. Il problema dell'esposizione alle vibrazioni viene trattato nel testo unico della sicurezza Dgls 81/08 (Titolo VIII "agenti fisici", Capo II, Art. 199-205) distinguendo due tipologie di sollecitazioni vibratorie:

- vibrazioni trasmesse al sistema mano-braccio (Hand-Arm Vibration, HAV)

*« le vibrazioni meccaniche che se trasmesse al sistema mano-braccio nell'uomo, comportano un rischio per la salute e la sicurezza dei lavoratori, in particolare disturbi vascolari, osteoarticolari, neurologici o muscolari »*

- vibrazioni trasmesse al corpo intero (Whole-Body Vibration, WBV)

*« le vibrazioni meccaniche che, se trasmesse al corpo intero, comportano rischi per la salute e la sicurezza dei lavoratori, in particolare lombalgie e traumi del rachide »*

In questo lavoro si è voluto approfondire come il fenomeno vibratorio impatti sull'uomo e sull'ambiente; per quanto riguarda il primo aspetto di ricerca, ci si è focalizzati sul problema dell'esposizione alle vibrazioni dell'intero corpo (Whole - Body -Vibration) per i conducenti dei mezzi in quanto ritenuta una tematica di grande interesse nell'ambito della prevenzione. Questa

problematica è stata analizzata negli anni passati da molti ricercatori i quali hanno studiato le complesse relazioni che legano questo fenomeno alla salute umana, cercando di trovare una correlazione tra l'esposizione all'agente fisico e l'insorgenza di patologie. Già nel 2000 una ricerca condotta nel Regno Unito aveva evidenziato un potenziale di 7.2 milioni di uomini e 1.8 milioni di donne esposti alla vibrazioni a corpo intero, prendendo come tempo di riferimento una settimana lavorativa, mentre nel 2003 venivano stimati 95.000 casi di donne e 444.000 di uomini con problemi di tipo lombare attribuibili all'esposizione alla WBV. Negli ultimi anni le malattie professionali dovute all'esposizione a vibrazioni sono aumentate vertiginosamente, con, ad esempio, le malattie professionali imputabili alla sindrome del tunnel carpale stimate da 4.473 (2010) a 6.221 (2014). Nel quinquennio 2012-2016 sono state denunciati presso l'INAIL 1493 casi di malattia professionale legati all'esposizione mano braccio (HAV), 58 soltanto nel comparto estrattivo e 46 nel settore dei trasporti. A partire dall'anno 2000 fino al 2016 sono stati denunciate 11.692 casi di malattia professionale legati alla WBV, soltanto 3.704 negli anni 2010-2016. Bisogna evidenziare che il monitoraggio di tale fenomeno è risultato spesso difficile e complesso, sia a livello nazionale che internazionale, perché la mancanza di una correlazione univoca esposizione - malattia non ha permesso di classificare in modo certo i casi analizzati. Gli effetti dell'esposizione si possono manifestare attraverso l'insorgenza di diverse patologie, come ad esempio danni al rachide, alla zona lombare e a tutta la regione spinale. Studi scientifici hanno dimostrato che il prolungato contatto con una sorgente vibratoria può generare danni a diversi organi come l'apparto intestinale, quello riproduttivo e al sistema respiratorio, o portare all'insorgere di problemi come sensazioni di nausea, perdita d'equilibrio e insonnia. Lo stato delle conoscenze riguardanti gli effetti patologici conseguenti all'esposizione vibratoria è ancora in fase di studio; alcuni dati, riguardanti i danni per la salute, possono essere ritenuti affidabili per poter definire la risposta biodinamica di un soggetto ad una sorgente vibratoria ma molti aspetti non sono ancora chiari a causa della vastità della problematica. La struttura del corpo umano può essere descritta, dal punto di vista meccanico, come un articolato sistema avente un particolare grado di complessità in quanto composto da una molteplicità di definiti sottosistemi, ognuno avente specifiche proprietà meccaniche e al tempo stesso costantemente interagenti l'uno con l'altro. In altri termini, proseguendo con l'analogia meccanica, il corpo umano può essere considerato come un insieme di più sistemi massa-molla-smorzatore, ognuno con le proprie caratteristiche in termini di massa, costante elastica e smorzamento. Tutto il sistema biodinamico, quando è a contatto con una sorgente vibratoria, come ad esempio il corpo di un operatore seduto su un sedile di un mezzo di trasporto, risponde in modo differente in base alle caratteristiche del segnale della forzante (spettro in frequenza e ampiezza del segnale), alle proprie proprietà massive corporee e a una molteplicità di fattori di vario tipo: la forma d'onda del segnale

della forzante, il tempo di esposizione del guidatore durante tutta la sua attività lavorativa, la posizione durante la guida, la tipologia del sedile impiegata, le caratteristiche strutturali del veicolo, la velocità di marcia, lo stile di guida del conducente e le condizioni al contorno in cui esso opera. Gli studi passati, pur comprendendo come la configurazione corporea svolga un ruolo rilevante sulla risposta biodinamica del soggetto, fino ad oggi non sono riusciti a identificare una relazione univoca che leghi tra loro i valori d'accelerazione a cui viene esposto il lavoratore, il tempo totale d'esposizione e le sue caratteristiche corporee. Per comprendere meglio questo concetto basti pensare che differenti operatori a contatto con la medesima sorgente vibratoria, nelle identiche condizioni al contorno, sono esposti a una differente dose d'esposizione complessiva diversa, che, in alcuni casi, può essere molto significativa. In questo lavoro si è cercato d'approfondire la tematica dell'esposizione alla Whole-Body-Vibration, concentrandosi sull'influenza che hanno le caratteristiche antropometriche (peso e altezza del soggetto) sull'esposizione totale ed effettuando uno studio preliminare per l'implementazione dei metodi finalizzati alla valutazione della dose d'esposizione giornaliera. Per poter realizzare tale lavoro si è partiti da tre campagne di misurazione svolte in differenti contesti lavorativi;

- A. Campagna di misurazione su veicoli per uso urbano adibiti al trasporto di persone con differenti configurazioni dei telai
- B. Campagna di misurazione su macchine impiegate in ambito estrattivo
- C. Campagna di misurazione su mezzi adibiti al trasporto pubblico in città.

La realizzazione delle misure, come è facilmente intuibile, ha richiesto tempi prolungati e il superamento di numerose difficoltà di carattere operativo; esse, una volta realizzate, sono state accuratamente analizzate in tutti i loro aspetti più significativi, sia in termini di valori assoluti che di spettro in frequenza. Tale processo d'analisi dei dati si è sviluppato in due fasi principali; nella prima si è cercato di valutare come le caratteristiche strutturali del mezzo, che costituisce il segnale della sorgente vibratoria, e le condizioni al contorno in cui esso opera, possano influenzare la dose d'esposizione alla WBV. Nella seconda fase, invece, è stata integrata la formula per la previsione della dose d'esposizione, in funzione dei parametri antropometrici del soggetto esposto, modificando il termine d'accelerazione e aggiungendo un fattore correttivo che tiene conto del peso e dell'altezza del guidatore. Come già accennato, la prima campagna di misure è stata realizzata su autovetture progettate per l'utilizzo urbano, confrontando l'esposizione per due versioni di uno stesso identico modello d'auto, uno con il telaio in configurazione standard mentre l'altro modificato con l'inserimento della blindatura antiproiettile. L'obiettivo di questa parte lavoro è stato quello di valutare la variazione della dose d'esposizione al variare delle caratteristiche della sorgente vibratoria

(il telaio della vettura) con l'inserimento di materiali balistici. I risultati ottenuti hanno fornito interessanti spunti di riflessione e così si è deciso d'implementare il lavoro con ulteriori prove, sempre sulla stessa tipologia d'auto, al fine di poter definire una funzione sperimentale per la previsione della dose d'esposizione, legata alle caratteristiche antropometriche del guidatore, per una tipologia di categoria professionale. Sono state svolte delle misurazioni impiegando le medesime autovetture della campagna precedente, implementando, però, il campione di riferimento con un maggior numero di soggetti guidatori. Partendo dai dati ottenuti, il lavoro è stato portato avanti con altre campagne di misurazioni effettuate, però, su mezzi operanti nel comparto estrattivo, progettati per specifiche tipologie di lavorazioni e movimentazione del terreno; in questa fase sono stati acquisiti un vasto numero di dati che hanno permesso di comprendere l'estrema variabilità della dose d'esposizione in funzione delle caratteristiche del mezzo, delle condizioni al contorno e delle attività svolte durante la giornata lavorativa. L'ultima campagna di misurazione, infine, è stata effettuata su diversi autisti di autovetture adibite al trasporto pubblico nelle condizioni effettive d'esercizio all'interno del contesto urbano, testando diverse tipologie di modelli di mezzi. L'intera raccolta di dati, come già accennato precedentemente, ha permesso un tentativo d'implementazione della metodologia di calcolo proposta dalla normativa ISO2631-1; quest'ultima prevede la definizione dell'accelerazione a cui è sottoposto il soggetto attraverso il metodo del *worst axis* (asse peggiore), ossia considerando solo la direzione di maggior sollecitazione secondo il sistema di riferimento standard definito dalla normativa stessa. Il lavoro si basa sulla modifica di quest'ultima, calcolando l'esposizione attraverso la somma vettoriale e l'inserimento di un parametro correttivo definito dal rapporto tra l'altezza e il peso del guidatore, normalizzati rispetto al parametro standard (BMI-Body Mass Index). Lo scopo di questo studio, svolto nell'ambito della salute e sicurezza sul lavoro, consiste proprio nella definizione preliminare di tale fattore di correzione, note le caratteristiche fisiche soggetto, al fine di poter effettuare una previsione della dose d'esposizione prescindendo dalla realizzazione delle misurazioni. In particolare l'obiettivo dell'implementazione è quello di poter prevedere, fissato il parametro accelerazione (anche dati professionali PAF), noto il tempo d'esposizione (organizzazione dell'attività lavorativa) e sulla base delle caratteristiche antropometriche, quale sia il discostamento dalla previsione d'esposizione, rispetto a un soggetto standard senza dover effettuare una campagna di misurazioni. I risultati hanno evidenziato la complessità della problematica in oggetto e le difficoltà per raggiungere tale finalità. All'inizio dell'elaborato si è accennato al fatto che i fenomeni vibratorii impattano anche sull'ambiente; numerose sono le attività svolte nei contesti industriali, come ad esempio siti di produzione o attività estrattive, che generano un'immissione nel terreno di sollecitazioni vibratorie, le quali possono avere ripercussioni dannose sulle fondamenta delle strutture prossime ai siti di lavorazione. Per questa

ragione, parallelamente alla tematica precedentemente esposta, si è deciso di sviluppare un lavoro di ricerca sulla propagazione delle vibrazioni generate dall'esplosioni nell'ambito delle attività estrattive, dette volate, e sulle relative tecniche di misurazione adottate. Una delle metodologie ancora ampiamente utilizzata per la coltivazione del materiale consiste nell'impiego degli esplosivi; l'enorme vantaggio consiste nel poter rimuovere rilevanti volumi di roccia, in tempi relativamente brevi, dalla loro sede naturale e, nella maggior parte dei casi, frammentarlo in parti di dimensioni ridotte. L'aspetto critico riguarda il momento dell'esplosione, definito brillamento, dove in un tempo brevissimo, vengono generate sollecitazioni meccaniche che si propagano rapidamente nel terreno anche a rilevanti distanze dal punto in cui si opera, diventando, così, potenziale fonte di disturbo per le persone e di pericolo per le strutture limitrofe al punto d'immissione. Diverse normative sono state elaborate al fine di prevenire potenziali danni e poter soddisfare la necessità di un monitoraggio accurato dei livelli vibratori durante l'attività di processo. Un aspetto estremamente importante per una corretta valutazione delle misurazioni riguarda il sistema d'accoppiamento dello strumento al terreno, ossia le modalità di fissaggio con cui viene vincolato il trasduttore. Operando in contesti nei quali vengono generate sollecitazioni con elevati valori d'accelerazione, deve essere garantita, da un lato l'aderenza del dispositivo di misurazione al terreno, evitando spostamenti relativi che porterebbero all'invalidazione della misura, e dall'altro, una buona trasmissibilità del segnale vibratorio che deve essere acquisito. In generale, la presenza stessa del dispositivo di misurazione sul terreno altera la misura poiché quando un'onda sismica investe un sistema d'accoppiamento, si verificano due fenomeni fisici dovuti all'impatto dell'onda stessa sul strumento; il primo consiste nella generazione di una vibrazione indotta nel sistema di montaggio dello strumento come risposta all'onda incidente e che può essere considerata come una sorgente secondaria che re-irradia energia nel terreno, ossia una risposta irradiante vibratoria. Il secondo meccanismo si basa sulla dispersione elastica dell'onda (scattering) generata dal sistema di montaggio stesso a causa del contrasto tra l'impedenza acustica del materiale costituente il dispositivo su cui è montato lo strumento e quella del suolo circostante al punto di misurazione. Lo stato dell'arte mostra che ciascuno dei diversi sistemi d'accoppiamento, impiegati nella pratica, presenta grandi vantaggi ma al tempo stesso significativi limiti; quello più affidabile sembra essere indicato dalla norma UNI 9916 la quale, quando i valori d'accelerazione previsti superano il valore di  $1g$ , suggerisce il seppellimento del trasduttore ad una profondità pari a tre volte la dimensione principale del sistema supporto-trasduttore al fine di garantire un efficiente contatto tra lo strumento e il suolo. Altre tecniche impiegate prevedono il vincolo del dispositivo tramite la resina, il cemento oppure posizionando sacchi di materiale al di sopra d'esso o persino tramite cinture di fissaggio. In merito alla previsione dei valori di sollecitazione, la letteratura scientifica mostra l'estrema complessità che si incontra per



la definizione di un modello previsionale univoco che permetta una valutazione a priori, poiché l'onda sismica, generata dall'esplosione, si propaga nel terreno in base alle caratteristiche di quest'ultimo, che chiaramente sono differenti per ciascun sito estrattivo e di conseguenza le formule previsionali sperimentali possono avere un elevato margine d'incertezza. Scopo di questo lavoro è quello di confrontare l'affidabilità di diverse metodologie d'accoppiamento in termini di PPV (Peak Particle Velocity) e spettri in frequenza, testando alcune modalità di fissaggio nel terreno. Come per la prima parte del lavoro, anche qui si è riscontrata la necessità di raccogliere dati sperimentali e così si è deciso di svolgere diverse campagne di misurazione in differenti contesti. Il punto di partenza è stato quello di comprendere i fenomeni di trasmissione vibratoria nel terreno, realizzando una campagna di misurazione in ambiente urbano al fine di poter definire una legge di trasferimento sperimentale per la valutazione delle vibrazioni indotte da traffico tramviario. La tecnica d'accoppiamento utilizzata è stata quella del vincolo del trasduttore al terreno per sola gravità. Successivamente si è pensato di modificare la tipologia di supporto su cui fissare il dispositivo con l'obiettivo di formare un incastro con il terreno; dopo aver ricercato tutte le possibili soluzioni, si è optato per la realizzazione di profilati metallici con sezione ortogonale ad L. Attraverso l'utilizzo di un software FEM (Finite Element Method), sono state effettuate simulazioni con diverse configurazioni geometriche di questo tipo di supporto al fine di poter definire le frequenze proprie del profilato e caratterizzarne la risposta dinamica. Questa parte di lavoro è stata svolta sotto l'ipotesi che l'incastro del profilato nel terreno sia perfetto, senza alcun difetto, e i risultati sono stati analizzati in termini di auto-frequenze, ipotizzando diverse profondità d'inserimento nel terreno. Alle simulazioni è seguita una prima campagna sperimentale impiegando questo tipo di supporto in un contesto rurale con sorgente vibratoria ferroviaria; in particolare sono stati impiegati profilati metallici con identica forma e differente lunghezza su cui sono stati fissati i trasduttori. Dai risultati è stato possibile avere un primo riscontro sulla risposta che si ottiene con questo tipo d'accoppiamento, riscontrando alcuni primi vantaggi e, al tempo stesso, limiti d'impiego. L'utilizzo di tali supporti è proseguito attraverso un'ampia campagna sperimentale in ambito estrattivo, la quale è stata suddivisa in due macro fasi; nella prima sono state effettuate misurazioni per la caratterizzazione del terreno con diverse sorgenti vibratorie (movimento di mezzi per il trasporto di materiale, sorgente continua di una macchina perforatrice e dell'impianto di trasporto e frantumazione del materiale coltivato) al fine di poter effettuare uno studio preliminare sulla risposta dinamica del terreno. Nella seconda sono state testate differenti tipologie d'accoppiamento in più giornate di misurazione; nel primo step dei lavori sono stati confrontati i segnali acquisiti contemporaneamente da due trasduttori, prima vincolati tramite seppellimento nel terreno ad una profondità prestabilita e successivamente fissati tramite un sacco di materiale posto al di sopra d'essi. Nel secondo step si è proseguito con lo stesso criterio di confronto

impiegando profilati metallici, identici a quelli della precedente campagna di misurazione. Sono stati rilevati gli impulsi vibratorii generati dalla volata, acquisendo contemporaneamente il segnale con un trasduttore vincolato tramite sacco e l'altro fissato sul profilato metallico inserito stabilmente nel suolo adiacente al confine di cava. La tecnica di fissaggio del profilato è stata modificata nel corso della campagna, vincolando inizialmente il supporto direttamente nel terreno a bordo cava (terra disciolta), e successivamente fissandolo nel terreno roccioso del piazzale di cava tramite materiale cementizio per assicurarne la corretta stabilità nel tempo. Lo scopo di questa parte del lavoro è stato quello di comprendere meglio vantaggi e limiti di ciascuna metodologia al fine di poter cercare di capire quali siano le vie migliori per aumentare il grado d'accuratezza delle misurazioni. Le due tematiche fino a qui descritte, legate dall'analisi del fenomeno fisico vibratorio, sono state sviluppate parallelamente, e ciascuna è stata trattata separatamente in ogni capitolo. L'elaborato di seguito esposto è stato strutturato in modo tale da descrivere nel miglior modo più corretto lo sviluppo del lavoro svolto; il primo capitolo fornisce un quadro della ricerca bibliografica per avere una visuale completa dello stato dell'arte delle tematiche trattate, il secondo descrive tutte le campagne sperimentali svolte nei differenti contesti lavorativi e mentre, negli ultimi due, si riportano i risultati con le conclusioni a cui si è giunti. Per facilitare la lettura dell'elaborato e per una rapida consultazione, i grafici delle misurazioni assieme alle tabelle dei risultati sono riportati in specifici allegati alla fine del documento. Si evidenzia che per motivi di segreto industriale non è stato possibile reperire alcuni dati inerenti alle caratteristiche dei mezzi e dei processi produttivi, ma di non particolare rilevanza ai fini della realizzazione del lavoro.

# 1 STATO DELL'ARTE

## 1.1 SEZIONE I- L'IMPATTO DELLE VIBRAZIONI SULL'UOMO

### 1.1.1 Introduzione

È noto che l'esposizione umana alle vibrazioni meccaniche può essere una potenziale sorgente di rischi per i lavoratori esposti ad esse. Nell'anno 2000 si è stimato che solamente in Inghilterra oltre 9 milioni di lavoratori fossero esposti alla WBV, e di questi, 374.000 autisti dei camion superavano i limiti imposti dalla normativa molto di più rispetto agli altri lavoratori (Palmer et al, 2000). Essa rappresenta nel nostro paese una delle maggiori cause di malattia professionale indennizzata dall'INAIL (4-5% delle malattie professionali indennizzate dall'INAIL, dati però non confermati dalle fonti ufficiali) e ancora non sono state definite disposizioni normative specifiche in materia di rischio da esposizione a vibrazioni, che definiscano una politica generale di prevenzione in termini di misure tecniche, organizzative e procedurali tese alla tutela dei lavoratori esposti a vibrazioni. Questa tipologia d'esposizione professionale si può presentare sia coinvolgendo l'intera corporatura del lavoratore, (Whole Body Vibration) che solamente gli arti superiori (Hand Harm Vibration) e può portare all'insorgere di malattie come angiopatia e osteoartropatia da vibranti (entrambe riconosciute come malattie professionali dalla Commissione dell'Unione Europea (90/326/EEC, Annex I, voci 505.01 e 505.02) e anche dalla legislazione del nostro Paese (D.P.R. 336/94)). A differenza di quanto accade nella local vibration, vibrazione locale, che coinvolge parti specifiche dell'organismo, come braccia, mani o testa, la Whole Body Vibration si manifesta quando il lavoratore, per poter svolgere la sua mansione, viene a contatto con una sorgente vibratoria per un periodo prolungato su tutto l'intero corpo intero, il quale viene quindi sottoposto ad una prolungata sollecitazione meccanica. Infatti il termine stesso di Whole Body Vibration implica che l'intero corpo è sottoposto alla vibrazione e agli effetti della stessa. In funzione di diversi parametri che verranno approfonditi di seguito, come ad esempio le proprietà antropometriche della persona, l'ampiezza e la frequenza del segnale vibratorio, gli effetti biodinamici che si manifestano sul soggetto possono essere estremamente variegati e complessi, con anche differenti patologie. La letteratura scientifica mostra numerosi e diversificati contesti in cui si verifica l'esposizione alla WBV per i soggetti. Una grande quantità di lavori sono stati svolti sui più diversificati veicoli per poter caratterizzare la tipologia d'esposizione in relazione agli effetti patologici: veicoli di trasporto (bus, taxi, pullman), mezzi di trasporto operanti

in aria (aerei ed elicotteri) che in acqua (navi e imbarcazioni), macchine di movimentazione terra e carichi (camion, ruspe, pale meccaniche, escavatori), veicoli del settore agricolo (trattori, macchine agricole per l'aratura, carrelli elevatori), mezzi delle forze dell'ordine (vetture predisposte per il pattugliamento del territorio), mezzi operanti nelle attività estrattive (dumper, pale gommate, escavatori di elevate dimensioni) e conduttori di trasporto di mezzi su rotaia (tram e treni). Inoltre alcuni lavori scientifici sono di particolare interesse poichè è stata analizzata l'esposizione alle vibrazioni in alcune particolari attività professionali, come gli istruttori dei cavalli. Questa problematica della trasmissione del segnale vibratorio da un autoveicolo, o più in generale, da un mezzo di lavoro, al corpo umano è da molto tempo l'oggetto di studi e ricerche finalizzati all'individuazione degli effetti connessi all'esposizione del soggetto a tali sollecitazioni. I ricercatori si sono focalizzati su due tematiche principali: l'esposizione diretta e quella indiretta. La prima si concentra sulle valutazioni mediche relative ai danni al fisico conseguenti all'esposizione alla sorgente vibratoria e sull'elaborazione di modelli previsionali. La seconda ricerca la definizione di una modellistica, sia meccanica che matematica, finalizzata alla stima delle sollecitazioni trasmesse dal piano stradale al sedile e dunque all'individuo. La stima della dose d'esposizione a cui è sottoposto un individuo è una delle problematiche più complesse poiché non si è riusciti ancora a definire una relazione univoca tra l'effettivo livello d'esposizione, la tipologia di sorgente e le caratteristiche antropometriche del soggetto. Bovenzi e Hulshof, (1998), Lings e Leboeuf-Yde, (2000) sostengono proprio che le cause dell'insorgenza di questa malattia professionale è dovuta a più fattori che influenzano l'esposizione, tra cui la postura del conducente Kittusamy e Buchholz, (2004 ). In altri termini lo stesso soggetto che svolge la sua mansione su differenti veicoli o sullo stesso veicolo ma in condizioni al contorno differenti assorbirà una differente energia vibratoria. Viceversa, se su uno stesso identico veicolo nelle medesime condizioni operative misurassimo l'esposizione di diversi soggetti, molto probabilmente otterremo valori diversi. Un metodo di valutazione molto spesso utilizzato per comprendere gli effetti sui lavoratori dell'esposizione è quella di ricorrere a dei questionari compilati dai lavoratori stessi. Hendriek et al.1989 svolsero una campagna di raccolta informazioni tra 577 lavoratori impiegati in una compagnia che utilizzava dei trattori agricoli. L'obbiettivo era quello d'analizzare la correlazione tra la stima del tempo impiegato sui mezzi e la rilevazione di tutte le malattie al rachide lombare. Il risultato ha mostrato una prevalenza di circa il 10 % di problemi riportati alla schiena tra i lavoratori esposti alle vibrazioni meccaniche rispetto a quelli non esposti. La dose d'esposizione, e la relativa magnitudo, è stata calcolata per ciascun mezzo ed all'aumentare di quest'ultima è corrisposto un aumento delle problematiche riportate dai lavoratori. In altre parole il lavoro svolto, pur riconoscendo una probabile non perfetta accuratezza della stima, evidenzia che una posizione seduta prolungata nel tempo e la postura aumentano gli

effetti negativi sulla salute. Altro aspetto importante è che già da allora si individuano diverse forme più o meno gravi di problematiche alla schiena. Questa tesi di una correlazione tra esposizione ed insorgenze di problemi di salute, è rafforzata nel lavoro di Bovenzi e Betta, (1994) svolto con una campagna di misurazione su 53 trattori dove è stata misurata l'esposizione alle vibrazioni, sempre in accordo con la ISO 2631-1. L'elemento interessante che si evidenzia è che il danno al rachide è molto più probabilmente correlato alla durata dell'esposizione che non alla effettiva magnitudo, poiché è emerso un aumento della probabilità d'insorgenza delle malattie muscolo-scheletriche all'aumentare delle ore passate alla guida dei mezzi. Questo risultato ha rafforzato sempre di più l'idea della possibile correlazione danni-dose d'esposizione. Da un punto di vista fisico il punto essenziale dell'analisi è quantificare l'effettiva impedenza del corpo umano lungo le tre direzioni principali direzioni di sollecitazione stabilite dal sistema di riferimento standard. Infatti il corpo umano è anisotropo, ossia non risponde allo stesso modo in ciascuna direzione e questo significa che in base a come esso viene sollecitato gli effetti saranno differenti. Di seguito verrà illustrato come l'organismo sia paragonabile ad un insieme di sistemi massa molla, dove ciascuna parte del corpo possiede una propria specificità meccanica, ossia una propria frequenza di risonanza. La condizione in cui si verificano i maggiori danni sull'organismo umano si ha quando il segnale generato dalla sorgente vibratoria (forzante) possiede un contenuto in frequenza prossimo alle frequenze di risonanza delle singole parti del corpo. Ad esempio le frequenze di VB Hz sono quelle più pericolose per l'intestino, quelle di BN Hz per le gambe .

## 1.1.2 Normativa di riferimento

Questa sezione dell'elaborato è dedicata ad una panoramica sulle principali norme internazionali che riguardano la valutazione del rischio da vibrazioni. Si partirà dalla ISO 2631 nella prima sua prima edizione (1985) e seconda (1997), poi la BS 6841 e infine la ISO 2631-5 del 2004. Ognuna di esse propone delle differenti metodologie di calcolo della vibrazione e verranno illustrate le caratteristiche di ciascuna.

### 1.1.2.1 Inquadramento delle norme

- *ISO 2631*

Nel 1966 vennero gettate le fondamenta della stesura della ISO 2631 ma bisogna aspettare il 1976 per la sua prima stesura ufficiale, a cui seguì la ripubblicazione nel 1978, con alcune modifiche

editoriali di correzione di alcune tavole e figure. La norma, come tutte le innovazioni, richiedeva miglioramenti e modifiche che arrivarono nel 1982 e successivamente nel 1985, con una ripubblicazione caratterizzata da sostanziali modifiche, a partire dal titolo : “Valutazione dell'esposizione dell'uomo alle vibrazioni - parte 1: requisiti generali”. La caratteristica principale è di tutte le versioni della ISO 2631 precedenti a quella del 1997è che esse hanno come pilastro portante la radice quadratica media (r.m.s.) dell'accelerazione, la conoscenza di dipendenza temporale ampia e complessa (da 1 min fino a 24 h) e infine le due frequenze filtranti (definite tra 1 e 80 Hz da rette su un grafico logaritmico dell'accelerazione in funzione della frequenza).

- *BS 6841 (1987): guida alla misurazione e alla valutazione dell'esposizione dell'uomo alle vibrazioni meccaniche*

La problematica del trovare una norma che definisse i criteri per la valutazione dell'esposizione a copro intero era una necessità sentita in tutta Europa. Ovviamente non si riuscì a trovare immediatamente un punto d'incontro comune. Quando nel 1974 venne proposta l'adozione della ISO 2631, la Gran Bretagna votò contro ma, nel medesimo anno, pubblicò una bozza di una norma diversa nella forma ma contenuti molto simili a quelli della ISO 2631 stessa. Negli anni successivi, tra il 1979 e il 1987, la ISO 2631 venne profondamente revisionata e il Regno Unito giocò un ruolo di primo piano. Questo lungo processo di correzione diede i suoi primi frutti a partire dal 1984, anno in cui la bozza 5 della revisione era stata ritenuta sufficientemente completa da poter essere utilizzata da alcune compagnie multinazionali dei trasporti. Al tempo stesso diverse pubblicazioni, di elevato livello scientifico, iniziarono a prendere come riferimento tale documento. Ma ovviamente il lungo iter dei cambiamenti non era finito; come risposta al crescente uso del metodo definito nella bozza 5, il British Standard Institute pubblicò una nuova norma nel 1987, anno a partire dal quale i successivi cambiamenti apportati non furono sostanziali ma solo finalizzati a migliorarne la chiarezza. In che cosa si differenziavano le due normative? Di fatto, la BS 6841 (1987) è filosoficamente differente dalla ISO 2631 del 1985. Il primo punto di divergenza è che essa cerca di definire procedure per la misurazione e la valutazione della gravità della vibrazione e degli shock impattivi. Il secondo punto è il suo campo d'applicabilità; possono essere valutate con essa sia le vibrazioni multi assiali, sia stazionarie che non, in un campo di frequenza definito tra 0.5 e 80 Hz. Il terzo punto è che in essa viene definito un metodo per quantificare la gravità delle oscillazioni verticali nel range di frequenza tra 0.1 e 0.5 Hz con riguardo alla probabilità di insorgere di mal di moto. Inoltre, lì dove il fattore di cresta sia basso (rapporto tra il picco e valore della r.m.s dell'accelerazione pesata in frequenza), la valutazione si potrebbe basare sul valore r.m.s. delle misure (eccetto nel caso in cui i valori di picco

sono utilizzati per capire la percettibilità della vibrazione). Invece, qualora siano presenti fattori di cresta elevati (maggiori di 6), allora si ritiene necessario l'utilizzo del valore di dose della vibrazione (VDV). Inoltre, per esposizioni superiori alle 24 ore, il legame tra il fattore temporale e gli effetti della vibrazione sulla salute, viene quantificato utilizzando il VDV critico. Per quanto riguarda le frequenze filtranti, ne vengono introdotte una serie, denominate da  $W_a$  a  $W_g$ . Infine, ultima differenza non trascurabile, la BS 6841 propone una metodologia per la valutazione delle vibrazioni rotazionali e di quella trasmesse alla schiena e ai piedi di una persona seduta.

- *ISO 2631 (1997): valutazione dell'esposizione umana alle vibrazioni meccaniche e agli shock*

Già nel 1979, pochi anni dopo la sua uscita, iniziò il lavoro di revisione completa della ISO 2631 per poi arrivare alla pubblicazione della nuova norma nel 1997. La revisione strutturale, piuttosto che la rettifica, era stata necessaria in quanto la vecchia normativa era incentrata attorno a dei limiti di vibrazione legati ad una dipendenza temporale che risultava non adeguata. Da qui si decise di modificare il range delle frequenze filtranti definite nella vecchia normativa, poiché esse non si estendevano su un range di frequenza ritenuto sufficiente. Inoltre alcuni punti della norma ritenuti poco chiari e accurati vennero modificati. Le analogie e le differenze tra la ISO 2631-1997 le diverse norme (ISO 2631-1985 e la BS 6841-1987) non sono facili da riassumere ma sicuramente è possibile affermare che la ISO 2631-1997 si riunisce le filosofie che hanno ispirato la stesura delle altre due normative precedentemente descritte

### 1.1.2.2 Metodologie di calcolo

- *ISO 2631*

Nella prima versione della ISO 2631 del 1985 venivano considerate solamente le vibrazioni lungo i tre assi coordinati di traslazione, il cui centro si trovava all'altezza del cuore della persona. Il problema che emerse rapidamente era che le misurazioni eseguite in questa posizione non erano particolarmente pratiche né tantomeno veritiera della reale esposizione del soggetto: i valori limite della vibrazione imposti da codesta norma si ritenevano essere assunti esattamente al punto d'ingresso della vibrazione nel corpo. Il sistema di coordinate è stato definito solidale con il corpo del soggetto esposto alla vibrazione; nel momento in cui avviene un cambiamento di posizione, l'asse longitudinale (asse  $z$ ) coincide esattamente con la direzione delle vibrazioni verticali per i soggetti che si trovano in posizione seduta o in piedi, mentre qualora la posizione del corpo fosse quella supina, si ha un cambiamento di riferimento. L'asse che individua la direzione delle vibrazioni verticale diventa quello  $x$  e gli altri assi, essendo ortogonali tra loro, vengono definiti di conseguenza. Questa differenza

implica, dal punto di vista biodinamico, una sensibilità minore alle medie e alle alte frequenze delle vibrazioni che sono state determinate sperimentalmente. Per quanto riguarda gli effetti delle vibrazioni rotazionali, la normativa parte dal presupposto che esse sono adeguatamente rappresentati dalle componenti traslatorie, che vengono generate lontano dai loro centri di rotazione. Invece, in merito alla valutazione della vibrazione sul sedile, sullo schienale e sul poggiatesta non viene fornita nessuna indicazione mentre, per le vibrazioni multi assiali, i limiti vengono applicati separatamente alle componenti in ciascuno dei tre assi. Inoltre quelli imposti nella normativa per gli assi di vibrazione  $x$  e  $y$  hanno valori inferiori rispetto ai valori indicati per l'asse  $z$ . Questo fatto impedisce un confronto diretto tra le sollecitazioni sul piano orizzontale,  $x$  e  $y$ , e quelle sul piano verticale,  $z$ . La normativa, in particolare, sottolinea che, quando si impiega il metodo della frequenza filtrante, deve essere utilizzato un fattore moltiplicativo pari a 1.4 per gli assi  $x$  e  $y$  mentre per l'asse  $z$  non ve ne è nessuno. Risulta evidente quindi, che per un confronto sensato tra i valori di accelerazione tra i vari assi non si deve tenere conto del fattore moltiplicativo. Per poter valutare la gravità relativa delle vibrazioni a cui l'individuo viene sottoposto, si decide di introdurre nel 1982 una procedura per calcolare del “valore globale dell’accelerazione filtrata lungo i tre assi”; l’obbiettivo è quello di ottenere una valida misura della vibrazione e, al tempo stesso, stabilire i limiti di esposizione oltre i quali si rischiano danni per la salute. Tale valore viene stabilito, secondo la teoria di Griffin [17], da:

$$A(8) = \sqrt{(1.4 \cdot a_{wx})^2 + (1.4 \cdot a_{wy})^2 + (a_{wz})^2}$$

- *BS 6841 (1987)*

Invece con la BS 6841 si ha una profonda modifica dei criteri con cui vengono fatte le misurazioni: vengono stabiliti differenti fattori moltiplicativi e diverse frequenze filtranti per poter valutare la sollecitazione vibrazionale lungo 12 diversi assi quando il soggetto esposto si trova in posizione seduta. Nella figura 1 sopra vengono rappresentati i nuovi sistemi di riferimento dove tre sistemi rappresentano il moto di traslazione e mentre uno quello di rotazione. In particolare i tre assi cartesiani di traslazione e quelli di rotazione vengono fissati tra il sedile e il fondo schiena, tre assi di traslazione sono messi tra il sedile e la schiena ed infine gli ultimi tre assi di traslazione servono per la misurazione di quando il soggetto si trova in piedi. La scelta di una metodologia più articolata e complessa permette di valutare in modo standard tutte le tipologie di vibrazione, indipendentemente dalla direzione e dal punto di contatto tra sorgente vibratorio e corpo. Dal momento che la stima di tutti questi effetti risulta assai complessa, per cercare di rispondere all’esigenza pratiche d’effettuare



la stima degli effetti sulla salute dell'esposizione alle vibrazioni, le misurazioni possono essere eseguite soltanto rispetto all'asse x del busto ( utilizzato per indicare il movimento in avanti e indietro del busto stesso quando vien sollecitato dalle vibrazioni ) e rispetto ai tre assi di traslazione centrati sulla superficie d'appoggio della persona (il sedile quando l'individuo è seduto, i piedi quando una persona si trova in posizione eretta). Ci si è posti anche il problema di valutare le vibrazioni per una persona quando si trova in posizione supina e per questo si è cercato d'elaborare una procedura apposita. In questa norma un altro cambiamento molto significativo riguarda le frequenze filtranti, che sono state modificate rispetto a quelle ISO 2631 (1985); l'obbiettivo parziale era quello di eliminare la valutazione della vibrazione occorrente nei tre assi principali su una superficie portante e rimuovere le potenziali confusioni quando si riportano i valori pesati. Per ottenere ciò si è ricorso all'eliminazione della dipendenza dai fattori moltiplicativi per le vibrazioni orizzontali (si veda la sezione 2.1.3). Resta però sempre il problema principale della valutazione della pericolosità della vibrazione; per fare ciò viene introdotto il calcolo del VDV (valore di dose della vibrazione) che, sempre secondo Griffin, viene definito da:

$$VDV = \left( \int_0^T a_w^4 dt \right)^{1/4}$$

e del VDV globale:

$$\text{overall VDV} = \left[ \sum (VDV_i)^4 \right]^{1/4}$$

Questa ultima formula, rappresenta dal punto di vista fisico un punto, un elemento di grande importanza; se il livello di vibrazione lungo due o più assi è approssimativamente simile, allora l'effetto globale della sollecitazione viene aumentato. Al contrario, qualora la sollecitazione maggiore si verificasse lungo una sola direzione rispetto alle altre, il suo contributo sarebbe rilevante a tal punto da non risentire dell'influenza dei restanti due assi. Quanto detto costituisce un nodo essenziale nella valutazione poiché deve far indurre nel valutatore sempre uno spirito critico nelle metodologie di calcolo.

- *ISO 2631 (1997)*

L'elaborazione di questo documento normativo, pur avendo nobili intenzioni di migliorare le tecniche di valutazione dell'esposizione, è risultata per certi versi equivoca e non lineare. Gli aspetti che non sono chiari risultano essere sostanzialmente tre: la definizione degli assi che devono essere tenuti in considerazione quando si effettuano le misurazioni, la combinazione d'essi e quale siano le posture principali che devono essere prese in esame. La prima ambiguità si manifesta quando viene indicata come necessaria la valutazione delle vibrazioni lungo ciascuna delle tre direzioni di traslazione, senza però poi specificare altro. Poi un altro nodo nevralgico è il chiarimento sulle differenze delle varie posture che la persona può assumere; una nota informativa annessa alla norma evidenzia che la normativa stessa è basata principalmente sulla ricerca effettuata su soggetti seduti sottoposti a vibrazioni e questo può indurre a pensare che tutta la trattazione sia incentrata principalmente sui soggetti esposti in posizione seduta. Inoltre la valutazione dell'esposizione alla vibrazione viene definita indipendente lungo ogni asse, e applicando il principio dell'*asse peggiore*, ossia valutando l'accelerazione filtrata in frequenza, lungo ogni asse secondo il sistema di riferimento posto sul sedile che presenta il valore maggiore. Viene però evidenziato che questo metodo potrebbe sottostimare l'esposizione; per questo, qualora i valori dell'accelerazione lungo due o più assi sono confrontabili tra loro, per poter valutare in modo completo l'intensità vibratoria può essere utilizzata la somma vettoriale dei valori lungo tali assi. Fino a questo momento si è parlato di valutazioni basate sulla misura delle vibrazioni effettuate sul sedile; per quanto riguarda quelle effettuate sullo schienale, esse sono incoraggiate dalla normativa, ma tale riscontro non deve poi essere inclusa nell'accertamento della gravità della vibrazione ai fini della salute. L'elemento di continuità è invece rappresentato, rispetto alla vecchia normativa ISO 2631, i fattori moltiplicativi pari a 1.4 per gli assi orizzontali. Tale elemento è essenziale poiché un impiego o meno di tale parametro potrebbe condurre ad un errore fino al 40%.

### 1.1.2.3 Caratteristiche delle frequenze di vibrazione

Per ogni asse di sollecitazione vengono utilizzati degli appositi filtri di ponderazione per poter valutare l'esposizione del soggetto alla vibrazione: ognuno d'essi viene definito in uno specifico range di frequenze in cui manifesta la propria azione.

Tabella 1 : intervallo di frequenze dei filtri di ponderazione

$W_b$	$0.5 < f < 2.0$	$W(f) = 0.4$
	$2.0 < f < 5.0$	$W(f) = f / 5.0$
	$5.0 < f < 16.0$	$W(f) = 1.0$
	$16.0 < f < 80.0$	$W(f) = 16.0 / f$
$W_c$	$0.5 < f < 8.0$	$W(f) = 1.0$
	$8.0 < f < 80.0$	$W(f) = 8.0 / f$
$W_d$	$0.5 < f < 2.0$	$W(f) = 1.0$
	$2.0 < f < 80.0$	$W(f) = 2.0 / f$
$W_e$	$0.5 < f < 1.0$	$W(f) = 1.0$
	$1.0 < f < 20.0$	$W(f) = 1.0 / f$
$W_g$	$1.0 < f < 4.0$	$W(f) = (f / 4)^{1/2}$
	$4.0 < f < 8.0$	$W(f) = 1.0$
	$8.0 < f < 80.0$	$W(f) = 8.0 / f$

- *ISO 2631 (1985)*

La valutazione del rischio d'esposizione viene fortemente condizionata da due parametri: i filtri di ponderazione e i fattori moltiplicativi. I primi vengono definiti nel dominio della frequenza e intervengono nello spettro del segnale acquisito, i secondi utilizzati per effettuare una pesatura dei dati ottenuti nelle diverse direzioni, tenendo conto della risposta del corpo umano. In questa normativa vengono identificati due tipi di filtri, campo compreso tra 1 e 80 Hz, per tutte le tipologie di posizione: sia le persone sedute, sia quelle in piedi che quelle in posizione supina. Per gli assi  $x$  ed  $y$ , viene individuato il filtro  $W_d$ , tipo passa basso che permette il passaggio del segnale in pieno per le frequenze comprese tra 1 e 2 Hz, mentre per le frequenze tra 2 Hz e 80 Hz filtra i valori dell'accelerazione in modo inversamente proporzionale al valore della frequenza. Per l'asse  $z$ , invece, è definito un filtro  $W_g$  che opera in modo differente rispetto al precedente, sempre variando l'accelerazione in funzione della frequenza ma in intervalli diversi. Per i valori di frequenza compresi tra 1 Hz e 4 Hz, l'accelerazione aumenta in modo proporzionale con il valore della radice quadrata della frequenza. Per il range di valori compresi tra 4 e 8 Hz, il filtro si comporta come un passa banda che lascia inalterati i valori di accelerazione mentre per le frequenze superiori agli 8 Hz ed inferiori ad 80 Hz, l'accelerazione, come nell'altro filtro, viene filtrata in modo inversamente proporzionale al valore della frequenza. Il processo di valutazione dell'intensità vibratoria, però, richiede, dopo

l'operazione di filtraggio la moltiplicazione dei valori dell'accelerazione per un fattore moltiplicativo pari a 1.4. per i valori di vibrazione ottenuti lungo gli assi  $x$  ed  $y$ . Un limite di questa normativa è che non viene definito nessun asse di vibrazione per lo schienale, pur essendo la posizione seduta, quella di maggiore interesse per i lavoratori esposti.

- *BS 6841 (1987)*

Questa normativa presenta un importante punto di innovazione poiché viene introdotto un valore di tolleranza per la risposta dei filtri, le metodologie per la loro implementazione, sia a livello analogico che digitale, e il loro uso nella limitazione della banda passante. In questa norma vengono definiti quattro differenti filtri in frequenza, chiamati  $W_b$ ,  $W_c$ ,  $W_d$ ,  $W_e$ . Il loro impiego è finalizzato per la ponderazione dei valori d'accelerazione lungo gli assi definiti nello stesso standard. Essi sono 12 in totale e vengono suddivisi nel seguente modo: tre di traslazione e tre di rotazione per gli assi posti sul sedile; tre di traslazione per gli assi posti sul busto; tre di traslazione per i piedi. La norma però non prevede un impiego totale d'essi per la stima degli effetti sulla salute; i livelli vibratorii vengono valutati soltanto lungo le tre direzioni di traslazione sulla superficie d'appoggio, la quale nel caso di una persona seduta è costituita dal sedile, mentre, qualora il soggetto esposto sia in piedi, essa è rappresentata dal pavimento per, e, infine, lungo la direzione longitudinale del busto, definita dall'asse  $x$ . Ovviamente anche qui vengono indicati dei filtri per ciascuna specifica direzione. In particolare i filtri utilizzati per queste quattro direzioni privilegiate sono:  $W_d$  per gli assi  $x$  ed  $y$  posti sul sedile;  $W_b$  per l'asse  $z$  centrato sul sedile;  $c W_c$  per l'asse  $x$  posto sul busto. Il valore della dose di vibrazione è dato da:

$$VDV = \left( \int_0^T a_w^4(t) dt \right)^{1/4}$$

dove  $a_w(t)$  è l'accelerazione filtrata in frequenza;  $T$  è il periodo di esposizione alla vibrazione;  $VDV$  è espresso dimensionalmente in  $m \cdot s^{-1.75}$ . Rispetto alla normativa ISO 2631 (1985) la differenza più rilevante è nel filtro in frequenza  $W_b$  che viene utilizzato per la valutazione delle sollecitazioni verticali lungo il sedile. Le modalità di ponderazione in base al range di frequenze sono differenti: in un primo intervallo, per frequenze tra 0.5 e 2 Hz, il filtro è costante e vengono attenuati i valori per un fattore pari a 0.4; in un secondo intervallo, tra 2 Hz e 5 Hz, si ha un incremento proporzionale al valore della frequenza; nel terzo intervallo, tra 5 Hz e 16 Hz, il filtro si comporta come un passa banda, ossia per questo intervallo di frequenza non modifica nessuna parte del segnale mentre nell'ultimo range, tra 16 e 80 Hz, i valori dei livelli vibratorii vengono attenuati in modo inversamente proporzionale al valore della frequenza. Inoltre risulta definire in modo specifico le caratteristiche del

filtro  $W_b$  in modo tale da garantire la compatibilità con i filtri utilizzati per le vibrazioni orizzontali sul sedile ( $W_d$ ) e per quelle longitudinali sul busto ( $0.8W_d$ ). Le tipologie di filtro che vengono impiegati sono vengono definite sulla base degli studi effettuati sulla trasmissione della vibrazione sulla spina dorsale; si ritiene che, per frequenze al di sotto dei 5 Hz, una rapida riduzione della trasmissione della vibrazione viene considerata non efficace. Al tempo stesso, la ricerca clinica ha mostrato, nella risposta del soggetto alle vibrazioni verticali, una elevata sensibilità alle frequenze al di sopra dei 5 Hz. Il problema emerso è che non vi sono attualmente una quantità di dati sperimentali tali per poter definire in modo univoco gli effetti del disagio dovuti a tali differenze. Sulla base di quanto detto e in assenza di dati certi, risulta molto delicato l'impiego dello stesso tipo di filtro sia per il calcolo del non comfort che per i rischi sulla salute. L'altra tipologia di filtro,  $W_c$ , utilizzato lungo l'asse longitudinale,  $x$ , del busto ha le caratteristiche di un passa basso, lasciando inalterati i valori di accelerazione nel range di frequenza tra 0.5 e 1 Hz, ed effettuando un'attenuazione dei valori dell'accelerazione per valori tra 1 Hz e 80 Hz. Per l'asse  $z$ , la BS 6841, rispetto al filtro definito nella ISO 2631 (1985), valuta anche frequenze al di sotto di 1 Hz, trascura le frequenze nel range tra 1 e 5 Hz ed esalta le frequenze più elevate (178% a 20 Hz, 200% da 40 a 80 Hz). Infine per gli assi orizzontali del sedile, il filtro utilizzato  $W_d$ , è analogo a quello della ISO 2631 (1985) ma non si considera alcun fattore moltiplicativo.

- *ISO 2631 (1997)*

Ciò che caratterizza tutte le normative esposte fino a questo momento esposte, è il principio d'impiegare filtri in frequenza per la stima delle vibrazioni multi-direzionali e casuali. Ciò che differenzia questa norma dalle altre, risiede nella stima degli effetti della vibrazione sulla salute del corpo umano, assumendo un carattere molto restrigente. Le principali novità sono:

- nel caso dell'analisi di persone sedute, vi è una restrizione nei criteri di valutazione;
- nel caso di persone sedute, vengono considerate soltanto le vibrazioni verticali;
- nel caso di valutazione di vibrazioni verticali, vengono impiegati differenti fattori moltiplicativi;
- sempre per la valutazione delle vibrazioni verticali, il filtro  $W_b$  viene sostituito dal filtro  $W_k$

Bisogna evidenziare che la differenza tra i due filtri di ponderazione tutto sommato non è particolarmente significativa; nel range delle frequenze intermedie i due filtri sono praticamente identici, invece il filtro  $W_k$  pesa di meno sulle alte frequenze (circa il 25%) mentre incide in modo

rilevante sulle basse frequenze (circa 20%). Considerando, infine, i campi di tolleranza, e il livello di differenza, è possibile il segnale analizzato con l'uno possono anche coincidere con quello filtrato con l'altro. Il filtro  $W_d$ , viene utilizzato per la valutazione delle vibrazione lungo gli assi  $x$  ed  $y$  posti sul sedile. Un principio essenziale di questa norma è che vengono distinti i casi di valutazione del disagio indotto dalle vibrazioni da quello cui si volesse stimare il pericolo per la salute. In quest'ultimo caso, per poter raggiungere prima la soglia di pericolo per la salute rispetto a quella di disagio, si utilizza un fattore moltiplicativo pari a 1.4 per aumentare del 40% i valori di accelerazione. Ecco perché spesso viene messo il fattore 1.4. Infine, per la valutazione delle vibrazioni longitudinali del busto questa norma suggerisce, l'utilizzo di un fattore moltiplicativo pari a 0.8, assieme al filtro  $W_c$  dato dalla BS 6841.

#### ASSI BARICENTRICI DEL CORPO UMANO

- |                      |                         |                       |
|----------------------|-------------------------|-----------------------|
| a) Posizione seduta  | A Schienale del sedile  | X Rollio ( $r_x$ )    |
| b) Posizione eretta  | B Superficie del sedile | Y Rollio ( $r_y$ )    |
| c) Posizione distesa | C Piedi                 | Z Imbardata ( $r_z$ ) |

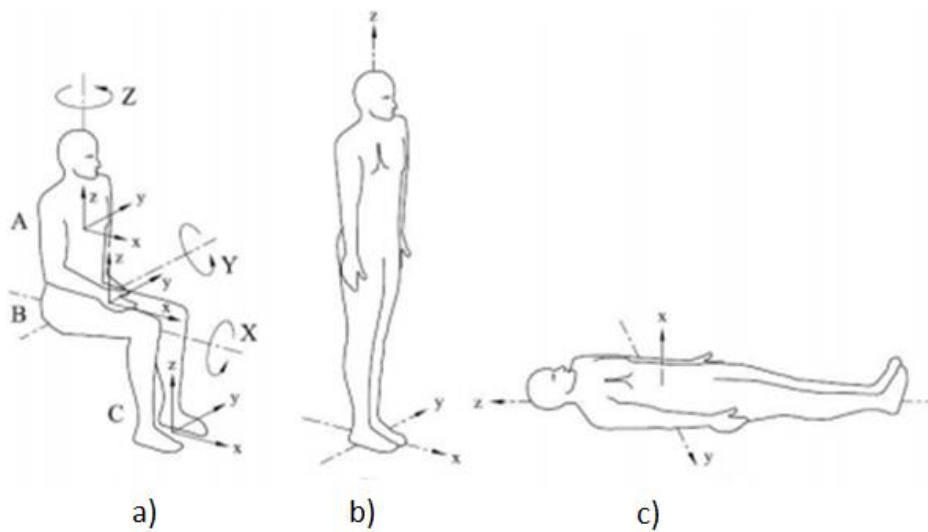


Fig. 1: assi basicentrici del corpo umano secondo la norma UNI 2631-1

### 1.1.2.4 Ampiezza e durata della vibrazione

Fino a questo momento si è parlato di valutazione della dose d'esposizione e dei livelli vibratori, sia in termini di direzione che di ponderazione. Adesso si entra nel merito della quantificazione della gravità della vibrazione a cui viene esposto il soggetto. Risulta fondamentale definire un metodo per calcolare dell'ampiezza del segnale vibratorio (e quindi il valore della vibrazione) e il tempo di durata dell'esposizione. Un primo aspetto nevralgico che bisogna evidenziare è che non è affatto semplice definire un metodo di misurazione della magnitudine media vibratoria da poter confrontare, successivamente, con un limite estrapolato da un grafico magnitudine dell'accelerazione - tempo di esposizione. Generalmente il tempo di esposizione alle vibrazioni è legato all'ampiezza del segnale vibratorio, il quale, però, è variabile nel tempo. Infatti molto spesso il segnale può contenere impulsi improvvisi, periodi con magnitudini diverse e periodi transitori. Questo evidenzia come la valutazione della metodologia da utilizzare deve, necessariamente, definire i criteri di quantificazione delle esposizioni alle differenti magnitudini, ai transitori e agli shock. La normativa ISO mostra una certa dimestichezza nell'uso della radice quadratica media della magnitudine della vibrazione, il cui valore che viene fornito poi deve essere confrontato con valori limite che sono stati elaborati e definiti in apposite tabelle. L'utilizzo di questo approccio riesce a fornire due dipendenze temporali: la dipendenza temporale del limite presentato nelle tavole di confronto e l'implicita relazione accelerazione e tempo nel calcolo della radice quadratica media.

- *ISO 2631 (1985)*

Quanto descritto nella norma precedente, mostra una standard internazionale che propone un legame con il tempo in una forma molto articolata ed esalta l'impiego della radice quadratica media (r.m.s.) dell'accelerazione. Il presupposto da cui parte la norma è che per tempi compresi in un intervallo tra 1 minuto e 4 minuti gli effetti della vibrazione sono indipendenti dalla durata per poi diminuire in modo tale che il valore limite dell'accelerazione per un tempo di esposizione di 24 ore è pari a 1/20 del valore dell'accelerazione per un tempo di 1 minuto. Per cercare di semplificare questa dipendenza tempo-vibrazione, nel 1982 venne elaborata una nuova versione della norma dove si assume che, per tempi d'esposizione tra 1 minuto e 10 minuti, non c'è alcun cambiamento nel valore limite della r.m.s. dell'accelerazione. Invece, per periodi compresi tra 10 minuti e 480 minuti (poi esteso fino a 24 ore), si ha una riduzione dell'accelerazione tollerabile inversamente proporzionale al tempo di esposizione.

In altre parole all'aumentare di quest'ultimo diminuisce il livello di vibrazione a cui può essere esposto un soggetto.

$$a_t = a_1 \quad t \leq 10 \text{ min}$$

$$a_t = a_1 \cdot \sqrt{\frac{t_0}{t}} \quad 10 \text{ min} \leq t \leq 24 \text{ h}$$

dove  $a_1$  è il livello d'accelerazione tollerabile per una esposizione pari a 1 minuto;  $a_{10}$  è pari a 10 minuti;  $a_t$  è il livello d'accelerazione tollerabile per un tempo  $t$ .

- *BS 6841 (1987)*

Anche in questa normativa la radice quadratica media dell'accelerazione pesata viene indicata come la quantità più importante per valutare e indicare la magnitudine della vibrazione. Però, sottolinea pure che tale metodo non valuta correttamente i moti che presentano intermittenze o contengono valori di picco occasionalmente elevati (i quali vengono sottostimati). Per la valutazione dell'esposizione alla con riguardo alla salute la BS 6841 definisce che quando il fattore di cresta è maggiore di 6.0, o la magnitudine della vibrazione è variabile, oppure il moto contiene picchi occasionali, od è intermittente si deve utilizzare la procedura del valore della dose della vibrazione (VDV)”

La formula seguente indica il valore della dose di vibrazione

$$VDV = \left( \int_0^T a_w^4(t) dt \right)^{1/4}$$

$a_w(t)$  = l'accelerazione filtrata in frequenza

T = periodo di esposizione alla vibrazione;

VDV è espresso dimensionalmente in  $m \cdot s^{-1.75}$

Una caratteristica molto importante di questo parametro è che, se fosse noto soltanto il valore della r.m.s. e non si conosce l'andamento temporale dell'accelerazione  $a(t)$ , si può risalire al valore stimato della dose della vibrazione (eVDV), così definito da Griffin

$$eVDV = \left[ (1.4 \cdot a_{r.m.s.})^4 \cdot t \right]^{1/4}$$

$t$  è la durata dell'esposizione espressa in secondi



Per quanto riguarda il fattore di correzione, pari a 1.4, la sua definizione è avvenuta in modo empirico e dà un valido contributo quando il fattore di cresta ha un valore al di sotto di 6.0 mentre per valori superiori si possono riscontrare degli errori non trascurabili nei valori ottenuti. Quanto esposto ci fa comprendere che l'elaborazione dei due parametri avviene in modo differente e ognuno dei due fattori avrà delle proprie peculiarità. Generalmente si preferisce il calcolo del VDV poiché esso permette di eliminare alcune problematiche che si creavano con l'impiego dell'accelerazione r.m.s. con la ISO 2631, riuscendo a semplificare la dipendenza della vibrazione dal tempo. Inoltre la relazione che lega accelerazione e tempo viene identicamente impiegata sia per la valutazione che per la stima, per qualsiasi intervallo temporale e quindi, aspetto fondamentale, può essere impiegata per la valutazione delle componenti impulsive. La differenza principale rispetto alla metodologia adottata nella ISO 2631 è che il VDV può essere utilizzato indifferentemente sia per lunghi periodi con basso magnitudo vibrazionali che, al contrario, per elevati valori del livello di vibrazione ma per brevi periodi.

- *ISO 2631 (1997)*

Come già accennato più volte, una delle problematicità che si hanno nella valutazione del rischio d'esposizione alle vibrazioni è quello di definire in modo univoco una metodologia per la valutazione del livello vibratorio. Tutte quelle finora esposte mostrano punti di forza e punti di debolezza, poiché vi è una estrema variabilità della tipologia di sorgente vibratoria. La norma ISO 2631 non fornisce una procedura di valutazione coerente con la valutazione della gravità della vibrazione e propone una combinazione non proprio lineare dei due metodi precedentemente descritti (r.m.s. e VDV). In altre parole viene suggerito un metodo di calcolo in funzione del valore del fattore di cresta. Quando esso è inferiore o uguale a 9, viene considerato adeguato il calcolo del valore r.m.s. Invece, qualora questo non avvenisse e fossero presenti componenti impulsive rilevanti tali da far assumere al fattore di cresta un valore superiore a 9, allora vengono suggerite due diverse metodologie alternative.

- Metodo del r.m.s. corrente

Esso può essere ottenuto in due modi differenti

- ✓ Metodo della media lineare

$$a_w(t_0) = \left\{ \frac{1}{\tau} \int_{t_0-\tau}^{t_0} [a_w(t)]^2 dt \right\}^{1/2}$$

a (t) l'accelerazione istantanea filtrata in frequenza,

$\tau$  è il tempo d'integrazione per la media corrente,

$t$  è il tempo e  $t_0$  è il tempo istantaneo;

✓ Metodo della media esponenziale

$$a_w(t_0) = \left\{ \frac{1}{\tau} \int_{-\infty}^{t_0} [a_w(t)]^2 \cdot e^{-\frac{t-t_0}{\tau}} dt \right\}^{1/2}$$

- Metodo della quarta potenza della dose di vibrazione (esattamente analogo al VDV).

Le due differenti metodologie, come viene logico pensare, possono portare anche a differenti risultati; per particolari tipi di moto si possono avere differenze persino superiori al 30%. Questo fattore ha un notevole impatto sulla valutazione del rischio poiché si possono avere grandi differenze sulla durata dell'esposizione accettabile (fino al 186% usando il metodo del VDV e fino al 69% usando il metodo r.m.s.). Per cercare di risolvere questa problematica è stato introdotto parametro MTVV, definito come “valore transitorio massimo di vibrazione”, che rappresenta la più elevata magnitudine del r.m.s. corrente ottenuta durante il periodo di misurazione. Bisogna però sottolineare che la norma, dopo il calcolo di tale fattore, non fornisce una chiara e univoca delucidazione sul suo impiego poiché la comparazione del suo valore con la zona di guardia del VDV o del r.m.s. può risultare molto fuorviante e portare a conclusioni errate. Ciò nasce dal fatto che esso viene calcolato nel peggior intervallo temporale di un secondo su tutto il periodo di misurazione e quindi non rappresenta in modo realistico la gravità dell'esposizione alla vibrazione poiché evidenzia sempre la peggior situazione che si potrebbe avere. In termini strettamente pratici si avrebbe una valutazione del rischio penalizzante poiché si raggiungerebbe il tempo di esposizione limite molto prima che con gli altri metodi (VDV e r.m.s.).

### 1.1.2.5 Limiti d' esposizione alle vibrazione

La complessità della valutazione dell'esposizione per comprendere gli effetti sulla salute umana del soggetto esposto, gli elementi determinanti che incidono la gravità di un preciso disturbo sono le variabili dipendenti o la durata limite dell'esposizione all'agente fisico. Cercare di comprendere il loro ruolo è fondamentale per poter prevenire danni alla salute o disturbi che si possono manifestare nel lungo periodo. Il problema più rilevante è che, essendo limitata conoscenza degli effetti sulla

salute delle vibrazioni, le normative non offrono procedure definite e dettagliate per poter predire in modo univo tali effetti nocivi. Quello però che viene indicato con una buona approssimazione, sono diverse vie che indicano quando una esposizione alle vibrazioni diventa inaccettabile. Per calcolare il tempo limite dopo il quale si raggiunge il valore di  $15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1.75}$  del VDV, noto il VDV dopo un tempo  $t$ , espresso in secondi, d'esposizione si può utilizzare la seguente formula tratta da Neil :

$$t_{\text{lim}} = \left( \frac{15}{\text{VDV}} \right)^4 \cdot t$$

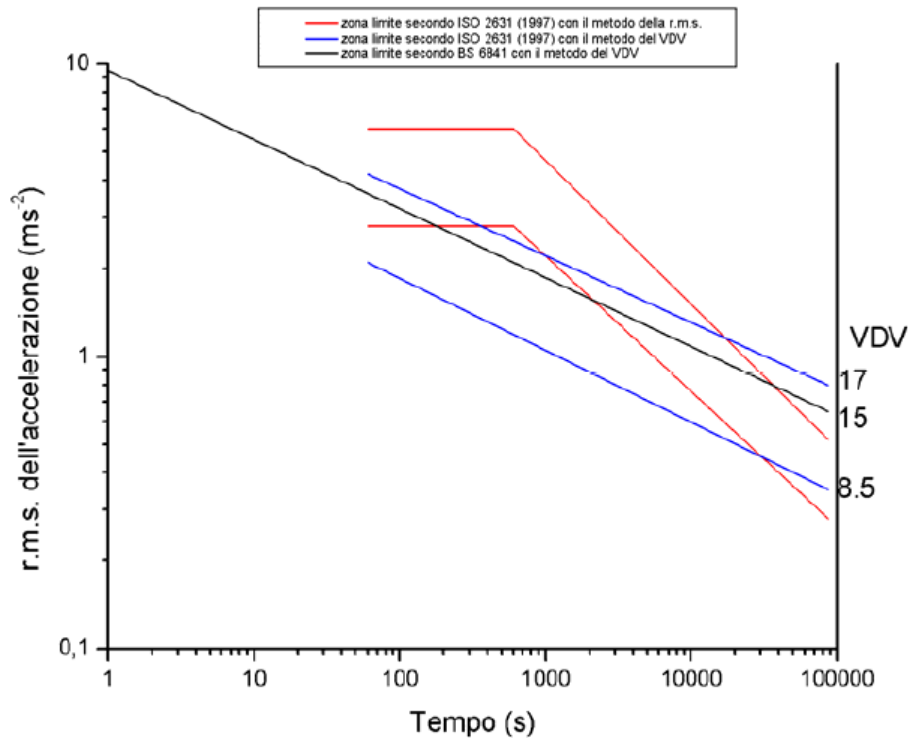


Fig. 2: grafico delle zone di tolleranza della vibrazione (Norma UNI 2631-1)

Per molti anni, il problema principale nella valutazione del rischio d'esposizione all'agente vibratorio è stata l'identificazione di una specifica e definita legge che identificasse in modo univoco criteri di misura e limiti da rispettare. Ad esempio questo problema è stato risolto nell'ambito dell'esposizione al rumore negli ambienti lavorativi con delle prescrizioni precise riportate nel D.Gls 81/08 (Titolo VII, Capo II, Art.187-198). Di conseguenza, per poter risolvere il problema, poiché il datore di lavoro è obbligato ad effettuare la valutazione del rischio, risulta necessario ricorrere alle norme di buona tecnica. Per la misurazione e la valutazione del rischio di esposizione professionale alle vibrazioni al sistema mano-braccio, il principale riferimento è costituito dallo standard ISO 5349: 2001 mentre per le vibrazioni al corpo intero, il riferimento tecnico per la misurazione e la valutazione del rischio di esposizione professionale è costituito dallo standard ISO 2631-1: 1997. Come descritto sopra la WBV si manifesta con un'esposizione totale del corpo alla sorgente vibratoria e questo tipo di rischio è

riscontrabile nelle attività lavorative svolte a bordo di veicoli di qualsiasi tipologia. Il parametro essenziale che permette al datore di lavoro d'effettuare la valutazione del rischio è la dose d'esposizione, il quale tiene conto di due elementi essenziali: l'intensità della vibrazione e il tempo d'effettiva esposizione. La dose è ovviamente fortemente influenzata dalle condizioni al contorno del soggetto esposto, poiché al variare di quest'ultime, cambiano radicalmente le caratteristiche della sorgente vibratoria (sistema terreno - struttura macchina) che agisce sul lavoratore e conseguentemente gli effetti sul lavoratore stesso. Il punto essenziale è che la metodologia suggerita dalla ISO 2631-1 (1997), definita anche 'dell'asse peggiore' suggerisce di utilizzare il valore maggiore di accelerazione ponderata in frequenza sollecitazione tra i tre assi. Questo valore viene moltiplicato per un opportuno coefficiente correttivo e sulla base di questo si calcola il parametro A (8). Altre linee guida, ad esempio british Standard BS 6841 (1987), suggeriscono di utilizzare un approccio multi assiale che consiste nel valutare come valore d'accelerazione la somma vettoriale di tutte e tre le componenti d'accelerazione. Questo perché dal confronto tra le due metodologie di valutazione è emerso che quello suggerito dalla ISO 2631-1 (1997) tende a sottostimare il rischio d'esposizione. Paddan e griffin, 2002, hanno quantificato questa sottostima in un valore pari a circa il 12% in particolare questa sottostima è maggiormente rilevante per le vibrazioni sul piano orizzontale, asse X e Y, nella valutazione del rischio. Sebbene la ISO non richieda l'impiego del metodo della somma vettoriale, molti ricercatori concordano nel ritenere questa tecnica di calcolo meno conservativa e più accurata nella valutazione della reale potenzialità del rischio generato dalla vibrazione. Una delle problematiche maggiori che si hanno nell'esposizioni alle vibrazioni sul lungo periodo, sono quelle sollecitazioni meccaniche che contengono shock multipli, ossia impulsi caratterizzati da brevissima durata, ordine dei ms, e elevata intensità, si possono raggiungere tranquillamente valori dell'ordine dei  $m/s^2$ . Questo tipo di sollecitazione è presente in molte attività lavorative, in modo assoluto sui mezzi operanti nel comparto estrattivo (dumper per il trasporto, carico e scarico del materiale) e delle costruzioni (escavatori, camion, ruspe, ecc), ed è stata identificata, se prolungata nel tempo, come causa di problemi rilevanti per la colonna lombare. Sollecitazioni multiple possono generare effetti molto diversificati sia sui muscoli vertebrali, che sui dischi intervertebrali e sui legamenti paraspinali. Questi effetti patologici sono dovuti ad un aumento dello sforzo meccanico causato dalla posizione di postura quando si è seduti, alla risposta biomeccanica diversa del corpo umano al variare delle diverse posture, ai violenti impulsi che subiscono i dischi intervertebrali a cui potrebbero seguire improvvisi cedimenti, ai cambiamenti di pressione meccanica tra un disco e l'altro e ai potenziali cambiamenti del sistema di controllo neuromuscolare che controlla la stabilizzazione attiva e passiva. Inoltre un improvviso e inaspettato caricamento sulla schiena potrebbe causare una sovra-compensazione del tronco spinale che potrebbe

portare ad una incapacità del sistema di controllo neuromuscolare di rispondere in modo coordinato agli sforzi. Per poter quantificare questi shocks la ISO 2631-1 definisce il fattore di cresta CF come rapporto tra il valore di picco massimo istantaneo dell'accelerazione rms e il valore dell'accelerazione media ponderata in frequenza. Qualora questo parametro superi 9, la norma suggerisce un'analisi ulteriore poiché, essendo il termine massimo superiore ben nove volte rispetto al valore efficace, il solo metodo rms non risulta adeguato per poter valutare la presenza di componenti impulsive poiché un singolo picco su una lunga misurazione viene "perso" nel valore medio in rms. Di conseguenza se venisse adottato per la valutazione dell'esposizione si avrebbe una sottostima di rischio per la salute. Il metodo indicato consiste nell'utilizzare il parametro VDV (Vibration Dose Value) il quale permette un'analisi più accurata del segnale che contiene picchi di sollecitazione poiché riesce a quantificare un transiente impulsivo e quindi permette una migliore previsione dell'esposizione. La normativa ISO 2631-5 (2004) fornisce una metodologia per poter quantificare l'esposizione a corpo intero per tutte quelle attività che contengono shock multipli sulla base della risposta biodinamica della colonna vertebrale di un individuo che presenta buone condizioni di salute e nessun problema alla spina lombare. Il processo di valutazione dell'esposizione è articolato su tre fasi la prima fase consiste nel calcolo della risposta della spina dorsale, successivamente nella conteggio del numero dei picchi e nell'individuazione del valore di ciascuno d'essi e infine il calcolo della dose d'accelerazione utilizzando un modello basato sulla teoria dell'affaticamento di Palmengreen-Miner. Questo modello però è ancora oggetto di grande discussione e deve essere validato scientificamente e quindi si effettua sempre la valutazione con la ISO 2631-1 inizialmente, se poi rileva un fattore di cresta maggiore di 9 allora si procede con l'analisi ulteriore dettata dalla ISO 2631-5. Ancora però non è stato definito in modo univoco se per la valutazione del rischio sia più affidabile il metodo VDV oppure quello suggerito dalla ISO 2631-5. È bene evidenziare che sottolineare che l'impiego di quest'ultima normativa è ancora oggetto di un ampio dibattito sulla sua effettiva.

## 1.1.3 Effetti dell'esposizione alla vibrazione

### 1.1.3.1 Patologie del rachide lombare

Si è accennato precedentemente agli effetti negativi che può avere l'esposizione alle vibrazioni sul corpo umano; essi quasi sempre si manifestano dopo un lungo periodo, a volte purtroppo, quando i sintomi sono talmente evidenti che non è più alcun possibilità d'intervento. I numerosi epidemiologici disponibili allo stato attuale mostrano come patologie più frequenti le alterazioni degenerative della

colonna vertebrale (spondiloartrosi, spondilosi, osteocondrosi intervertebrale), le lombalgie e lombosciatalgie, le discopatie e ernie discali lombari e/o lombosacrali. Questi effetti cronici si manifestano nell'ambito industriale molto più frequentemente tra quei lavoratori adibiti alla conduzione di veicoli e di mezzi di trasporto rispetto a gruppi di soggetti non esposti alle vibrazioni meccaniche. Questo dato permette di dedurre che sussiste una sufficiente evidenza epidemiologica tra il rischio di insorgenza di patologie del rachide lombare e l'esposizione alla vibrazione; in particolare gli effetti sono più rilevanti all'aumentare della durata e dell'intensità dell'esposizione a vibrazioni trasmesse al corpo intero. Dal punto di vista pratico, questa correlazione assume rilevanza poiché, alcune patologie del rachide del tratto lombare, se sorte in specifiche condizioni di intensità e di durata d'esposizione, vengono considerate malattie d'origine professionale e quindi suscettibili di indennizzo (questo avviene già in alcuni Stati membri dell'Unione Europea, come Belgio, Francia, Germania, Olanda). Non è ancora completamente chiaro come le vibrazioni intervengano nella etiopatogenesi delle alterazioni del rachide lombare: poiché la guida di macchine o veicoli comporta non solo l'esposizione a vibrazioni potenzialmente dannose ma anche a fattori di stress ergonomico quali ad esempio una prolungata postura in posizione seduta oppure frequenti movimenti di flessione e torsione del rachide. Inoltre, vi sono alcune categorie di autisti, come gli addetti a lavori di trasporto in vari settori commerciali, che oltre alla normale attività di guida, possono svolgere ulteriori mansioni come il sollevamento e spostamento di carichi manuali, operazione che rappresenta ovviamente un'ulteriore fattore di stress per il tratto lombare del rachide. Importanti variabili predittive per la comparsa di disturbi al rachide, e in particolare di lombalgie, sono le caratteristiche individuali del soggetto (età, indice di massa corporea, abitudine al fumo di tabacco, aspetti costituzionali), i pregressi traumatismi alla schiena e i fattori di natura psicosociale. Conseguentemente emerge in modo chiaro ed evidente come negli autisti di macchine o veicoli si possono manifestare sintomi muscolo-scheletrici e lesioni al rachide lombare, le quali sono costituite da un complesso di alterazioni di origine multifattoriale nella cui etiopatogenesi intervengono diversi fattori di natura sia occupazionale sia extra-occupazionale. I possibili meccanismi che possono portare le vibrazioni ad essere un fattore d'insorgenza per le lesioni all'apparato muscolo-scheletrico del rachide sono: un'eccessiva risposta contrattile dei muscoli paravertebrali causata da intenso stimolo vibratorio, con conseguenti fenomeni di sforzo e affaticamento muscolare, e il sovraccarico meccanico dovuto a fenomeni di risonanza della colonna vertebrale nell'intervallo di frequenza delle vibrazioni tra 3 e 10 Hz, con conseguente danno strutturale a carico dei corpi vertebrali, dischi e articolazioni intervertebrali. Quanto esposto conferma l'estrema complessità nel distinguere, qualora insorga e/o si aggravi una problematica del rachide, il contributo che viene dato dalle vibrazioni rispetto a quello di altri fattori di rischio individuale ed ergonomico.

### 1.1.3.2 Disturbi cervico-brachiali

Come accennato precedentemente, quando il contenuto in frequenza della forzante è prossimo a quello di risonanza di alcune parti dell'organismo si possono verificare pericolosi effetti d'amplificazione e quindi valori d'esposizione estremamente pericolosi. Questo fenomeno si può facilmente manifestare nella regione collo-spalla dove la risposta muscolare può portare ad un'aumentata occorrenza di disturbi cervico-brachiali. Tale evidenza è stata riscontrata in diversi studi svolti nei conducenti di automezzi: in particolare i ricercatori si sono focalizzati sul contributo che danno sulla dose d'esposizione diversi fattori ergonomici, quali i movimenti di rotazione e torsione del capo, i movimenti ripetitivi del sistema mano-braccio-spalla per azionare i comandi dei veicoli e l'effettiva esposizione del soggetto alle vibrazioni meccaniche. Tuttavia si è dimostrata una debole associazione tra esposizione alla vibrazione e disturbi cervico-brachiali.

### 1.1.3.3 Disturbi digestivi

L'attività gastro-intestinale risente in modo rilevante dell'esposizione acuta a vibrazioni meccaniche; infatti alcuni studi epidemiologici hanno messo sotto osservazione i conducenti di veicoli, evidenziando un'aumentata prevalenza di disturbi gastro-intestinali, gastrite e ulcera peptica. Bisogna però precisare che l'associazione tra l'esposizione a vibrazioni meccaniche e disturbi dispeptici risulta, tuttavia, debole anche perché alcuni lavori non presentano un sistematico e attento controllo su tutti quei fattori di possibile influenza, come il fumo di tabacco, assunzione di bevande alcoliche, abitudini alimentari, turni lavorativi, stress. Si può concludere che il problema della correlazione tra esposizione a vibrazioni e disturbi digestivi rimane ancora aperto: tuttavia, è altamente probabile che i disturbi digestivi rappresentino un effetto minore dell'esposizione a vibrazioni trasmesse al corpo intero.

### 1.1.3.4 Effetti sull'apparato riproduttivo

Anche su questa problematica non vi è una certezza scientifica evidente che correli questo tipo di patologia con l'esposizione e sono necessari lavori ulteriori per confermare quanto di seguito esposto. Si può ritenere che l'esposizione a vibrazioni meccaniche possa causare alcuni effetti nocivi sull'apparato riproduttivo femminile: donne esposte a vibrazioni con frequenze tra 40 e 55 Hz hanno mostrato effetti negativi come processi infiammatori, disturbi del ciclo mestruale e anomalie del parto. In un studio epidemiologico di popolazione su aborto spontaneo e mortalità prenatale senza malformazioni congenite, quest'ultimo evento presentava un'incidenza maggiore di quella attesa in donne lavoratrici esposte a vibrazioni nel settore dei trasporti.

### 1.1.3.5 Disturbi circolatori

Si ritiene che l'esposizione alle vibrazioni possa agire come fattore concorrente, in combinazione con la prolungata postura assisa tipica dei conducenti di automezzi e veicoli, nell'insorgere di emorroidi e varici venose degli arti inferiori. Infatti un'elevata pressione intra-addominale sembra anche avere un ruolo nel meccanismo patogenetico di tali affezioni ma si trattano comunque di un'evidenza piuttosto deboli.

### 1.1.3.6 Effetti cocleo-vestibolari

È noto che l'esposizione al rumore può portare all'insorgenza di malattie come l'ipoacusia, perdita di percezione sonora e difficoltà di comprensione del parlato. Se a questo fattore si va ad aggiungere una prolungata esposizione alle vibrazioni meccaniche, sembra che si possa essere un aggravamento dell'ipoacusia. Quindi la combinazione d'esposizione alle vibrazioni e al rumore sembra generare uno spostamento temporaneo della soglia uditiva alle alte frequenze (6-10 kHz) maggiore di quello provocato dall'esposizione al solo rumore. Il meccanismo patogenetico di tale effetto sinergico sull'organo dell'udito non è stato ancora chiarito anche se una iporeflettività vestibolare ed una più elevata prevalenza di turbe vestibolari sono state descritte in lavoratori esposti a vibrazioni trasmesse al corpo intero. Anche in questo caso un'associazione tra vibrazioni e disturbi vestibolari rimane però in grande dubbio.



## 1.1.4 Fattori determinanti l'esposizione

### 1.1.4.1 Sorgente vibratoria

La tipologia di veicolo su cui si trova seduto o in piedi una persona, rappresenta la sorgente vibratoria che sollecita la struttura corporea. L'ampiezza e il contenuto in frequenza del segnale vibratorio dipende fortemente dalla tipologia del veicolo. Numerosi lavori sono stati svolti nel corso degli anni al fine di evidenziare come le caratteristiche strutturali del mezzo e il suo impiego, influenzano l'esposizione del soggetto. Cann et al. (2004) hanno svolto un lavoro mostrando che l'asse z e la somma vettoriale dei valori di accelerazione rms ottenuti da misurazioni svolte su diversi tipi di camion (differenti posizioni delle cabine, differenza degli assi e delle tipologie di gomme montate) hanno un significativo peso sull'esposizione del conducente. Nei taxi, tuttavia, Chen et al. (2003) trovano una significativa riduzione della dose d'esposizione, mentre Rehn et al. (2005) ha rilevato una significativa riduzione della magnitudo confrontando diverse misurazioni effettuate sui veicoli degli spedizionieri durante i viaggi di trasporto in configurazione di veicolo carico e scarico. Il cambiamento della tipologia di propulsione del mezzo cambia notevolmente il tipo di sollecitazione; Malchaire et al., (1996) e Ozkaya et al., (1997) hanno portato a scoprire una significativa riduzione delle vibrazioni sui carrelli elevatori con differente tipologia di motore; in particolare i carrelli elevatori elettrici mostrano un livello d'esposizione alla vibrazione notevolmente inferiore rispetto ai carrelli elevatori diesel. Un analogo risultato è stato ottenuto anche sui treni che operano sulla linea metropolitana; i treni realizzati con una tecnologia all'avanguardia mostrano una sollecitazione vibratoria notevolmente inferiore rispetto a quelli realizzati con criteri costruttivi più antiquati

### 1.1.4.2 Peso del mezzo

Il carico del veicolo è un elemento fondamentale che influisce sulle caratteristiche della vibrazione della struttura; ciò avviene poichè l'aumento della massa complessiva del veicolo, dovuta all'aggiunto del carico, riduce la frequenza di risonanza e, conseguentemente, diminuisce l'esposizione all'agente vibratorio del conducente. Rehn et al., (2005) ha svolto un lavoro su 7 mezzi per la movimentazione del materiale su 11 differenti tipologie di terreno, in configurazione di carico e scarico del materiale. Dai risultati ottenuti dalle misurazioni su 11 differenti operatori, la considerazione più interessante è quella che una notevole riduzione della dose d'esposizione all'aumentare del peso del mezzo, ossia quando viaggia in configurazione di carico. Risultati analoghi li hanno ottenuti Malchaire et al., 1996

con i conducenti dei carrelli elevatori. Anche (Nishiyama et al., 1998) arrivano a conclusioni molto simili: in una campagna di misurazione svolta sui trattori utilizzati per la movimentazione dei carichi di merce evidenziano una tendenza alla diminuzione del livello vibratorio quando all'aumentare del peso del veicolo, ma nella valutazione complessiva si nota che tale effetto non ha avuto un ruolo particolarmente significativo. Come accennato più volte, le condizioni al contorno in cui opera la sorgente vibratoria, hanno una notevole influenza sulla sorgente vibratoria (il mezzo) e conseguentemente sulla dose d'esposizione. Questo si evidenzia quando in altri contesti operativi la variazione del peso del mezzo non incide in modo significativo sulla WBV. Ozkaya et al. (1994) hanno svolto una imponente campagna di misurazione sulle linee metropolitane, andando a ad analizzare in modo accurato per tratto e stazione 48 viaggi compiuti dalle vetture metropolitane per un totale di oltre 100 ore di misurazione, raccolte e analizzate secondo la ISO 2631-1. I risultati hanno mostrato un superamento dei valori limiti di soglia per alcune linee, ma il parametro più influente sull'esposizione risulta essere la velocità, trascurando quindi le condizioni di carico del mezzo. Anche Piette e Malchaire (1992) non hanno trovato una connessione significativa tra la magnitudo dovuta alle vibrazioni e il carico del mezzo nel loro lavoro svolto a bordo delle gru mobili. Nelle misurazioni svolte, sia sul pavimento della cabina di conduzione che sul sedile di movimentazione, a bordo di 21 differenti tipologie di gru; lo studio ha mostrato che i livelli d'accelerazione sono fortemente legati alla condizione della pista di movimentazione e l'aumento dei livelli vibratori si ha all'aumentare della campata della gru. Inoltre è emerso che la velocità di movimentazione e la posizione della cabina hanno un ruolo abbastanza rilevante, mentre il sistema di sospensione della canina e la tipologia di sedile sono risultati essere inefficaci per la riduzione dell'esposizione. La variazione del peso della struttura, quindi, è stata considerata ininfluente sulla WBV.

#### 1.1.4.3 Manutenzione del mezzo

La manutenzione del mezzo deve essere garantita al fine di preservare le prestazioni di quest'ultimo nel tempo. Qualora essa non venga effettuata, oppure venga effettuata ma non secondo le corrette tempistiche, si possono verificare significative alterazioni del segnale vibratorio prodotto dal mezzo. Uno studio condotto (Ozkaya et al., 1994) ha determinato che la manutenzione era un fattore estremamente importante, perché diverse vetture ferroviarie dello stesso tipo di treno trasmettevano vibrazioni misurate al sedile molto diverse in differenti condizioni di manutenzione.

#### 1.1.4.4 Il sedile

Durante l'attività lavorativa, un soggetto posto alla guida di un mezzo è sottoposto a dei movimenti lungo tre direzioni (verticale, trasversale e longitudinale) e a tre movimenti rotativi (rollio, beccheggio e imbardata). Queste differenti tipologie di sollecitazioni hanno ovviamente differenti effetti sul corpo del guidatore. L'esposizione alle vibrazioni è spesso collegata alla postura prolungata, ad un posizionamento della schiena inclinata in avanti e all'essere seduti con o senza schienale. Risulta perciò un elemento essenziale al fine di limitare l'esposizione il sedile. L'impiego di una determinata tipologia può influenzare notevolmente l'esposizione della vibrazione e la conseguente magnitudo del danno. Paddan & Griffin (1988) hanno realizzato un lavoro di un gruppo di 12 lavoratori, analizzando gli effetti del movimento ripetitivo di rotazione della testa, effettuato sia con lo schienale che senza. Il movimento è avvenuto maggiormente in direzione longitudinale, verticale e lungo l'asse di rollio. È emerso che la trasmissibilità della vibrazione dal sedile alla testa è risultata rilevante in tutte le direzioni per frequenze superiori ai 25 Hz, sia con lo schienale che senza. Viene individuato come angolo ottimale, un'inclinazione del sedile pari a 13° rispetto all'asse verticale. Gli autori affermano, quindi, che la trasmissibilità attraverso il sedile alla testa del guidatore, deve essere valutata con molta cautela. Essi evidenziano una elevata variabilità delle misure di trasmissibilità attraverso il sedile, deducendo che lo spettro in frequenza del segnale vibratorio è soltanto uno degli elementi che influenzano tale trasmissione. Di conseguenza è imprudente affermare univocamente quali siano gli effetti al variare dello spettro poiché ciò dipende dalle condizioni al contorno in cui avviene la trasmissione e dalla risposta biodinamica del soggetto. Anche Hinz et al (2002), hanno concentrato la loro attenzione sulle differenze nei sedili con e senza schienale. Uno studio svolto su 39 soggetti di sesso maschile è stato condotto misurando i livelli di vibrazione su due sedili forniti di sistema di sospensione, di cui soltanto uno fornito di schienale. Per poter quantificare l'energia assorbita dalla colonna vertebrale del soggetto, è stato definito un modello ad elementi finiti in due dimensioni che simula la risposta biodinamica del soggetto che si trova su un sedile fornito di sospensione. Nel modello sono state considerate le funzioni di trasferimento tra la base del sedile e il sedile stesso, così come tra lo schienale e la base del sedile per valutare l'energia trasmessa, rispettivamente, ai glutei e alla schiena. I dati ottenuti ed elaborati hanno mostrato valori medi di picchi di trasmissibilità del sedile significativamente maggiori nei sedili con lo schienale mentre quelli senza hanno mostrato valori maggiori per la trasmissione del segnale vibratorio dal sedile alla testa del soggetto. Essi concludono che da quanto ottenuto deve indurre ad avere una particolare attenzione durante la valutazione del rischio sia alla postura del soggetto che alle condizioni di contatto schiene-sedile. Al fine di attenuare la sorgente vibratoria, sono stati realizzati dei sedili con

dei cuscini d'aria e spessori realizzati in schiuma. La presenza del cuscino d'aria permette l'attenuazione della magnitudo per particolari lavoratori, autisti dei camion, a certe frequenze, come descritto da Houston et al. (1999). Invece Kolich et al.(2005) si sono concentrati sugli effetti dello spessore della schiuma, confrontando l'efficacia tra quella più rigida e quella più flessibile. La capacità del sedile di poter smorzare il segnale vibratorio può essere analizzato anche attraverso il parametro SEAT (Seat Effective Transmissibility Factor), fattore di trasmissibilità effettiva, definito come il rapporto tra l'accelerazione misurata sul pavimento e l'accelerazione misurata sul sedile ( $\alpha_{\text{floor}} / \alpha_{\text{seat}}$ ). (Houston et al., 1999; Hinz et al., 2002; Kolich et al.,2005) hanno utilizzato questo parametro per poter quantificare la riduzione della magnitudo nei risloro rispettivi lavori. Anche le dimensioni del sedile possono avere una notevole influenza; Kolich et al. (2005) mettono in evidenza come un sedile sottile e meno vincolato porti a valori d'esposizione vibratoria maggiori. Chen e t al, 2003 sulla base di una vasta campagna di misurazione realizzata misurando la WBV su 247 guidatori di taxi per un totale di oltre 400 misure, hanno utilizzato un metodo di approccio statistico, scoprendo una significativa riduzione nella vibrazione della magnitudo grazie all'inserimento di un cuscino un cuscino sotto il sedile.Non sempre però il sedile riesce ad avere quell'effeto benefico di smorzamento della vibrazione. Johanning et al (2002) hanno analizzato differenti tipologie di montaggio del sedile del conducente sul treno attraverso misurazione effettuate sia sul sedile stesso che alla base. Le sollecitazioni sono risultate rilevanti in tutte le direzioni con elevati valori dell'accelerazioni di picco, in particolare, basandosi sul parametro di riferimento SEAT, le sollecitazioni sul pavimento hanno evidenziato valori minori lungo l'asse  $x$  e  $y$  mentre le vibrazioni lungo l'asse  $z$  sono state più rilevanti. In questo caso si è evidenziato che nessun tipo di sedile ha un effetto d'attenuazione considerevole. Diversi risultati sono stati invece ottenuti da Wijaya and Joensson (2003); in prove sperimentali su carrelli elevatori sono stati confrontati due diversi tipi di sedili (uno fisso e un altro scorrevole in direzione orizzontale) variando la postura di guida, la velocità di marcia e le tipologie d'ostacoli incontrati durante il tragitto. I risultati, utilizzando il parametro VDV e MTTV, mostrano che i sedili scorrevoli, rispetto a quelli fissi, attenuano le vibrazioni al sedile e ed effettuano un ruolo di contenimento sulle vibrazioni transienti in direzione orizzontale. Particolare invece è quello che ha scoperto Ozkaya et al. (1996); attraverso una campagna di rilevamenti sui sedili dei treni della metropolitana, evidenziano che i livelli di vibrazione registrati sui sedili più moderni (possibilità di regolazione della posizione di guida e differenti modalità di montaggi) erano dal 5% al 19% maggiori rispetto a quelli tradizionali.

#### 1.1.4.5 Sospensioni del sedile e della cabina

Molti ricercatori hanno individuato, come strategia per la riduzione dell'esposizione, la modifica dei dispositivi delle sospensioni del sedile e della cabina. Questa tipologia d'intervento risulta molto controversa in quanto sono stati trovati dei risultati molto spesso contrastanti tra di loro. Risultati positivi sono stati ottenuti inserendo un corretto sistema di sospensione del sedile su varie tipologie di mezzi, come trattori, camion macchine forestali. Gli studi condotti da Malchaire et al., (1996) e Ozkaya et al. (1997) hanno ottenuto risultati positivi con una considerevole diminuzione della magnitudo sul sedile di guida, effettuando campagne di misura su treni e carrelli elevatori, forniti di sistema di sospensione rispetto a quelli non dotati. Sulla stessa direzione Sankar e Afonso, (1993) evidenziano buoni risultati nell'ottenere una significativa diminuzione della risposta di accelerazione ( $(m/s^2)/Hz$ ) confrontando i valori ottenuti alla base del sedile rispetto a quelli misurati sul piano d'appoggio delle cabine dei camion. Anche il lavoro di Paddan e Griffin (2002) mostra buoni risultati in termini di riduzione del parametro SEAT, confrontando ai sedili dotati di sistema di sospensione pneumatico rispetto a quelli convenzionali. Ad un simile risultato giungono anche Nishiyama et al., (1998), riscontrando una riduzione sull'asse  $x$  sui sedili dotati di molla in acciaio. Come anticipato prima, una tipologia d'intervento di questo tipo non sempre porta effetti benefici. Ozkaya et al. (1996) mostrano proprio il contrario di quanto visto fino ad ora, evidenziando come l'impiego di complessi sedili possono aumentare il livello d'esposizione del conducente. I lavori svolti da Boileau e Rakheja (1990) e da Anttonen e Niskanen (1994) non hanno trovato risultati soddisfacenti al fine di diminuire la dose d'esposizione. Confrontando valori di vibrazione o del parametro SEAT misurati su diversi tipi di sedili nelle macchine forestali e sulle motoslitte, non si riesce ad ottenere un effetto benefico nel ridurre il segnale vibratorio che giunge al guidatore. Anche la modifica della tipologia di sospensione seduta può non avere alcun effetto significativo sulla riduzione dell'esposizione. (Burdorf e Swuste, 1993; Johanning et al., 2002; Cann et al., 2004). Nei trattori, nei camion e nelle locomotive il confronto tra le misurazioni effettuate al sedile e alla base di quest'ultimo mostrano che non vi è alcun effetto d'attenuazione. Addirittura bisogna porre una particolare attenzione poiché si può manifestare un effetto di amplificazione del segnale (Boileau e Rakheja, 1990). Per quanto riguarda il sistema di sospensione della cabina, una sua modifica può portare a una notevole riduzione dell'effetto d'esposizione. Poco si sa sull'effetto del cambiamento o dell'ottimizzazione del sistema di sospensione della cabina per ridurre le vibrazioni. Un interessante lavoro svolto da (Lemerle et al., 2002) sui carrelli elevatori sembra attenuare l'intensità delle vibrazioni, misurate alla base del sedile e sul telaio, di oltre il 50%, attraverso l'implementazione di un sistema di sospensione della cabina ottimizzato nello smorzamento delle sollecitazioni. Una evidente riduzione dell'esposizione è stato

ottenuto nei trattori, dove, modificando i sistemi di supporto si è ottenuta una considerevole riduzione dell'esposizione del lavoratore. Un aspetto problematico che risulta determinate per poter seguire questo tipo di strategia è la non linearità del sistema di sospensione passivo (Hansson, 1995). Inoltre anche l'asse di sospensione della cabina rispetto allo spazio richiesto può portare a elevati valori d'esposizione. Infine è fondamentale individuare correttamente la posizione del baricentro della cabina di sospensione. Anche la posizione della cabina di guida su una struttura in movimento può incidere sull'esposizione del lavoratore. Piette e Malchaire (1992) hanno studiato se la posizione della cabina delle gru mobili scoprendo che posizionando la cabina della gru nella parte finale del binario di scorrimento, rispetto ad una posizione centrale, sia può ottenere una significativa riduzione d'esposizione

#### 1.1.4.6 Le gomme del veicolo

La gomma rappresenta un elemento essenziale per la stabilità del veicolo e per garantire il controllo di esso durante la guida. Le numerose tipologie di pneumatici e le modalità d'installazione vengono scelte in funzione dell'impiego del veicolo (percorso su strade asfaltate, terreno instabile, presenza di sassi, ecc). I parametri per il montaggio e i valori di gonfiaggio sono generalmente definiti in modo univoco dalle case costruttrici, ma molto spesso, nelle reali condizioni d'impiego, si possono verificare delle variazioni d'essi. La più comune è una modifica della pressione gonfiaggio, (gomma in sovrappressione o in sotto pressione) che logicamente influenza la stabilità del veicolo e le condizioni di guida. In merito all'esposizione alla vibrazione a corpo intero diversi ricercatori hanno analizzato la correlazione tra quest'ultima e i pneumatici, in particolare focalizzandosi su come essa possa influenzare il segnale vibratorio in base alla tipologia di pneumatico e alle sue effettive condizioni d'impegno. Malchaire et al. (1996) hanno svolto una campagna di misurazione sui carrelli elevatori in diverse configurazioni dei veicoli: mezzo carico e scarico, quattro tipi differenti di pneumatico e diverse condizioni della pavimentazione di movimento. L'obiettivo è stato quello di trovare un legame tra i diversi parametri. I risultati hanno mostrato che tutti i fattori precedentemente descritti hanno una notevole influenza sull'esposizione ma in particolare si è rilevato che la tipologia di pneumatico non fornisce un contributo particolarmente rilevante. Le misurazioni effettuate sul sedile e sulla sua base con il mezzo dotato prima di gomme ammortizzate e poi di quelle più rigide, non hanno mostrato differenze significative. Sebbene sia noto che i pneumatici gonfiati tendano ad incrementare il livello di vibrazione rispetto a quelli ammortizzati, hanno riscontrato, però, che sui carrelli elevatori l'aumento di vibrazione sia dovuto univocamente alla frequenza di taglio del segnale

misurato sul sedile. In ogni caso rimane preferibile l'impiego di pneumatici gonfiati quando il sedile anti-vibrante impiegato sul mezzo è caratterizzato da una bassa frequenza di risonanza. Per di più quando vengono impiegati in combinazione entrambi i tipi di pneumatici (gonfiati o ammortizzati), le vibrazioni aumentano in modo estremamente rilevante. Sherwin et al. (2004) mostra che l'aumento della pressione genera un notevole incremento dell'esposizione alle vibrazioni; effettuando rilevamenti sul soggetto guidatore di una macchina mietitrice in diverse posizioni, si è riscontrato un aumento dei valori rilevati nelle direzioni  $x$  e  $z$ . Inoltre anche le misure effettuate sul telaio della cabina della macchina hanno mostrato lo stesso effetto lungo tutte e tre le direzioni di riferimento. Quanto esposto è stato confermato poiché ad una diminuzione della pressione di gonfiaggio dei pneumatici, è corrisposta una diminuzione considerevole del parametro SEAT, evidenziando quindi un effetto benefico in termini d'esposizione. Appare evidente, quindi, che la diminuzione dell'effetto di smorzamento del pneumatico dovuto ad un gonfiaggio eccessivo comporta un aggravio in termini di sollecitazione meccanica. Anche, lo studio di Malchaire et al. (1996), svolto sui sedili dei carrelli elevatori mostra una tendenza d'aumento della sollecitazione vibratoria all'aumentare della pressione del pneumatico.

#### 1.1.4.7 Condizioni al contorno

##### *a) Condizioni della strada*

La condizione del manto stradale su cui si muove il veicolo determinano la sollecitazione della struttura del mezzo e, per logica conseguenza, anche il livello d'esposizione del guidatore. Se condizioni superficiali sono buone, ossia lisce senza rilevanti ostacoli, si ha un'effettiva riduzione dei livelli vibratori rispetto a una strada con asperità e buche. Una valida relazione tra la condizione del manto stradale e il livello di vibrazione misurata al sedile è stata individuata da studi (Malchaire et al., 1996; Hostens e Ramon, 2003; Cann et al., 2004; Rehn et al., 2005). In particolare (Malchaire et al., 1996) è riuscito anche ad individuare un legame con la base su cui poggia il sedile. Questa correlazione tra i due fattori viene confermata da Hostens e Ramon (2003) in termini di VDV misurato sul sedile e anche da (Piette e Malchaire, 1992; Anttonen e Niskanen, 1994; Johanning et al., 2002), sempre con misurazioni effettuate sui sedili.

## *b) Velocità*

Il fattore della velocità di guida rappresenta un parametro tutt'altro che trascurabile nell'influenza sull'esposizione alle vibrazioni. Quattro differenti lavori realizzati su taxi, carrelli elevatori, treni e trattori (O' zkaya et al., 1994; Malchaire et al., 1996; Chen ed altri, 2003; Hostens e Ramon, 2003) hanno mostrato una significativa influenza della velocità di guida sulla vibrazione che interessa il guidatore. Hostens e Ramon (2003) hanno trovato valori di livelli vibratori, espressi in VDV, significativamente più elevati in test realizzati con elevate velocità su strade asfaltate rispetto a quelli fatti a velocità minori su percorsi stradali rurali. Da quanto esposto, la velocità sembra essere un elemento più importante rispetto alle condizioni della superficie del manto stradale. Nello stesso lavoro, in accordo con i criteri d'identificazione dei valori del VDV, il tempo necessario per raggiungere i  $15 \text{ m/s}^{1.75}$  (¼ valore limite, Basato su ISO 2631) è nettamente minore quando si hanno velocità più elevate. Analoghi risultati sono stati scoperti da (Wijaya e Joensson, 2003) che hanno la stessa tipologia di relazione vibrazione-velocità, espressa in termini di MTVV misurati al sedile di guida. Tre studi (Piette e Malchaire, 1992; Anttonen e Niskanen, 1994; Sorainen e Ryttonen, 1999) evidenziano un aumento del livello vibratorio sia sul sedile che alla sua base, cosa riscontrata in tutti e tre gli studi. Park et al 2013, hanno svolto un lavoro effettuando delle misurazioni su due differenti tipi di trattori (differenti per tonnellaggio) e su una jeep per il trasporto di persone in differenti condizioni di superficie della strada e a diverse velocità di guida. I risultati evidenziano come l'aumento di quest'ultima, da un valore minimo di 40 Km/h a un valore massimo di 120 Km/h, non sembri influenzare l'esposizione del guidatore mentre incidono notevolmente le condizioni del manto stradale. Inoltre, un prolungato tempo d'esposizione, ossia superiore alle 8 ore di riferimento, nel caso dei conducenti di trattore porta a livelli d'esposizione con un'elevata probabilità d'insorgenza d'effetti negativi sulla salute mentre sulla jeep questo non si verifica.

### 1.1.4.8 Soggetto esposto

#### *a) Competenze e comportamento*

Fino a questo momento si è sempre parlato del lavoratore senza mettere in evidenza quali siano le sue caratteristiche che incidono sulla dose d'esposizione e in che modalità. Il corpo umano può essere schematizzato come un complesso sistema massa-molla, dove ogni parte del corpo costituisce un



elemento a sé e avrà quindi una propria risposta dinamica. Di conseguenza le caratteristiche antropometriche, come il peso e l'altezza, svolgono un ruolo fondamentale nella recezione da parte del soggetto dell'energia vibratoria. Il peso del guidatore ha una notevole rilevanza; infatti al suo aumentare si manifesta una riduzione della magnitudo della vibrazione (Burford and Swuste, 1993, Degan, Houston et al.,1999). Lavori svolti su autisti di camion, muletti hanno evidenziato valori di SEAT considerevoli n nei soggetti più

### *b) Posizione del guidatore*

La posizione del guidatore è un aspetto che molto spesso viene erroneamente trascurato mentre invece esso ha una rilevanza estremamente significativa. Molto spesso il soggetto tende a mantenere una posizione non corretta perché considerata più comoda, portando così la colonna vertebrale ad assumere una posizione tale da amplificare gli effetti negativi delle sollecitazioni. Una posizione non perfettamente verticale sul sedile, inclinando il busto in avanti o indietro può far insorgere complessi problemi, evidenziati da valori considerevoli del SEAT (Hinz et al.,2002). Sotto i 6 Hz, quando il soggetto si posiziona con il bacino all'indietro, la trasmissibilità della vibrazione dal sedile di guida alla testa (STHT,  $\alpha_{\text{seat}} / \alpha_{\text{head}}$ ), aumenta significativamente rispetto a quando viene mantenuto un orientamento neutro o in avanti (Zimmerman and Cook, 1997. Questo aspetto viene confermato da Demec et al, (2002) che hanno trovato un incremento del parametro STHT all'aumentare dell'angolo d'inclinazione dello schienale, cioè variando l'angolo rispetto all'asse verticale da un valore di 0° a un valore massimo di 14°. Invece non appare essere di significativa importanza il contatto con lo schienale per poter ridurre l'esposizione (Magnusson et al., 1993). Un sensibile aumento della magnitudo della vibrazione è possibile rilevarlo quando il guidatore non mantiene il contatto con lo schienale, confrontato con gli autisti che invece si appoggiano in modo corretto su di esso. Anche il posizionamento degli arti superiori sul bracciolo può avere un effetto benefico; appoggiandosi durante la guida sul bracciolo si riesce ad avere una riduzione dell'esposizione (Wilder et all,1994). Da El-Khatib et al. (1998), Johanning et al. (2002) e Wijaya e Joensson (2003). El-Khatib et al. (1998) ha condotto un curioso e particolare esperimento: per studiare l'influenza della posizione di guida sull'esposizione al fenomeno vibratorio, ha utilizzato dei cadaveri imbalsamati che ha posizionato in due differenti modi: posizione perfettamente eretta e posizione leggermente inclinata, come spesso si usa in macchina, entrambe senza supporto lombare. I risultati hanno mostrato che un valore maggiore di circa il 10% per quelli seduti in una posizione da auto non corretta rispetto alla posizione perfettamente eretta. Questa significativa differenza è stata rilevata con lo schienale inclinato

all'indietro di 25° rispetto alla verticale e il sedile alzato verso l'alto di 7° rispetto al piano orizzontale. Johanning et al. (2002) hanno evidenziato, inoltre, che quando l'autista si appoggia leggermente in avanti e a sinistra, per poter intervenire sui pannelli di controllo della locomotiva, si ha un effetto di maggiorazione dell'intensità vibratoria rispetto a quei conducenti che svolgono la loro mansione in posizione seduta neutrale. Anche i conducenti dei carrelli elevatori che mantengono una posizione correttamente dritta e con le spalle perfettamente a contatto con lo schienale del sedile, hanno avuto una significativa riduzione dell'esposizione al segnale vibratorio misurato in termini di VDV rispetto a coloro che si appoggiavano all'indietro, non mantenendo una corretta postura (Wijaya e Joensson, 2003). Quanto esposto può essere spiegato dall'aumento della frequenza naturale quando la posizione è perfettamente dritta rispetto a quando ci si inclina in avanti o indietro. Ciò è dovuto al fatto che tali posizioni portano il conducente ad essere, dal punto di vista biomeccanico, un sistema più rigido. (Wilder et al., 1994) si focalizza su questo punto, spiegando che quando il soggetto è seduto correttamente in posizione verticale, l'asse spinale della parte superiore del soggetto è allineato con la direzione verticale dell'accelerazione mentre quando ciò non avviene, ossia quando il guidatore si posiziona con la schiena non correttamente, l'asse spinale risulta distante da quello dell'accelerazione verticale.

### *c) Peso del guidatore*

Come già accennato precedentemente, la risposta biodinamica del guidatore è variabile per ogni soggetto. Un elemento fondamentale per la sua variazione è il peso che determina la risposta biodinamica dell'uomo al segnale vibratorio. Questo aspetto è stato dimostrato da due lavori svolti da (Malchaire et al., 1996; Chen et al., 2003) che hanno evidenziato come la vibrazione misurata sul sedile del conducente sia stata fortemente influenzata dal peso di quest'ultimo. E' necessario sottolineare che quanto appena detto risulta valido solo per i conducenti di tutti quei veicoli che hanno una massa relativamente piccola, come ad esempio i carrelli elevatori o i taxi. Nei guidatori con una massa corporea maggiore, è stata rilevata una frequenza di risonanza minore nel sistema di sospensioni sia del sedile che del camion. Conseguentemente l'esposizione alla magnitudo della vibrazione per il conducente è risultata minore. Sulla stessa linea un altro articolo di Boileau e Rakheja, 1990 mostra le stesse identiche considerazioni dei lavori citati precedentemente, con una correlazione tra peso, intensità del segnale vibratorio e il SEAT, ma appare una certa incoerenza tra i risultati ottenuti.

#### *d) Esperienza del guidatore*

L'influenza dell'esperienza del guidatore sull'esposizione alla vibrazione è un aspetto dibattuto: Cann et al. (2004), sostengono che non sussista alcuna relazione tra i due fattori. (Chen et al., 2003; Rehn et al., 2005) invece hanno scoperto che l'esperienza di guida incida sull'esposizione all'agente fisico delle vibrazioni; conducenti di taxi e treni con maggiore esperienza di guida, sono esposti a una ridotta magnitudo delle vibrazioni. Questo è stato confermato Rehn et al. (2005) ma solo nella condizione in cui il veicolo opera in configurazione carica e non scarica. Un altro studio di (O'zkaya et al., 1994) mostra una riduzione della magnitudo di vibrazione misurata sui sedili dei conducenti dei mezzi per le spedizioni commerciali ma questi risultati non hanno mostrato una particolare rilevanza scientifica

### 1.1.5 L'esposizione alla WBV nel settore estrattivo

Il comparto estrattivo per le sue caratteristiche di lavorazione presenta numerosi rischi per la salute e la sicurezza dei lavoratori. Per quanto riguarda l'esposizione a corpo intero vi sono numerosi spunti di lavoro poiché sono impiegato numerosi mezzi dalle caratteristiche completamente diverse che espongono quotidianamente i guidatori a livelli di vibrazione considerevoli. Numerose campagne di misurazione sono state realizzate nelle cave e nelle miniere per poter caratterizzare i mezzi come sorgenti vibratorie e soprattutto per comprendere le caratteristiche dell'esposizione nelle diverse attività. Village e Morrison, 1989 hanno svolto una vasta campagna di misurazione in due mine sotterranee sui mezzi impiegati per il caricamento, trasporto e lo scarico del materiale, definiti comunemente LHD, Load-Haul-Dump. I mezzi su cui sono state effettuate le misurazioni sono di peso differente e chiaramente anche capacità di carico diversa. Il lavoro mette in evidenza che le sollecitazioni maggiori non sempre avvengono lungo lo stesso asse, generalmente quello verticale  $z$ : i mezzi dal tonnellaggio minore generano elevatissimi valori d'accelerazione ponderata in frequenza sia lungo  $z$  che lungo  $x$ , calcolata secondo le linee guida, , specialmente durante le operazioni di trasporto a carico e a vuoto. Inoltre elevati valori di picchi istantanei sono stati registrati lungo l'asse  $z$  in direzione verticale, con considerevoli fattori di cresta. L'aspetto però più importante è che i valori limite dell'esposizione in quasi tutte le misurazioni sono stati superati sia nella direzione verticale, considerando 6 ore d'esposizione, che in tutte e tre le direzioni, ipotizzando un tempo d'esposizione che eccede le 6 ore. L'analisi in frequenza delle misurazioni, sempre ovviamente effettuata per bande d'ottava, mostra un elevato contenuto energetico alle basse frequenze, 1.16-2 Hz in direzione  $x$  e  $y$  e

3.15 Hz in direzione  $z$ , dovuto, probabilmente, alla combinazione di diversi fattori esterni, come le condizioni del terreno, la velocità di trasporto, e le modalità di carico. Gli autori, dopo aver evidenziato che i calcoli dei valori d'accelerazione rms e di picco sono stati eseguiti secondo le linee guida di riferimento, pongono l'attenzione su tre aspetti importanti. Il primo riguarda il superamento dei valori limite, in quanto il metodo del vettore somma impiegato per il calcolo dell'accelerazione può portare facilmente ad una sovrastima del valore. Il secondo è che il legame tra effetti patologici sulla salute dell'uomo ed Whole-Body-Vibration e le conseguenze dovute al superamento dei valori limite, sono evidenziati dal fatto che il gruppo di guidatori oggetto della ricerca ha mostrato numerosi problemi di salute al rachide lombare e alla schiena. Terzo e ultimo aspetto riguarda la difficoltà di poter quantificare la relazione tra WBV e fattore di cresta. Questa estrema complicatezza nell'identificare in modo univoco i parametri che determinano l'esposizione del soggetto, ha stimolato numerosi studi d'approfondimento con vaste e articolate campagne sperimentali all'interno del settore industriale. Cann e al.(2004) svolgono una consistente campagna di misurazione su 67 veicoli del compartimento industriale costruttivo che prendevano a campione 14 differenti tipi di lavorazioni pesanti, scoprendo che tutti i conducenti dei mezzi di trasporto erano esposti a livelli vibratorii che eccedevano i limiti. Questo risultato ha incentivato la ricerca concentrata sull'esposizione sui mezzi di trasporto e sulle differenti operazioni che essi svolgono. Kumar 2004 realizza una campagna di misure sui mezzi pesanti per il trasporto di materiale differenti per tonnellaggio, andando a valutare i livelli d'esposizione dei conducenti nelle quattro fasi del ciclo di produzione: carico del materiale, viaggio del mezzo pieno, scarico del materiale e viaggio vuoto. I risultati mostrano che l'asse  $z$  è stato quello più sollecitato, ma soprattutto che il viaggio in configurazione scarica ha fatto registrare i livelli d'accelerazione maggiori, a cui sono seguiti il viaggio carico, la fase di caricamento e infine quella di scarico. Anche in questo caso i limiti imposti dalla norma sono stati superati e si è concluso che quando la massa del mezzo diminuisce e aumenta la sua velocità, il livello dell'accelerazione registrato tende ad aumentare, in particolar modo nel viaggio a vuoto. Inoltre si conferma che la velocità di guida e le condizioni del terreno hanno una notevole influenza sulla dose d'esposizione.

## 1.2 SEZIONE II- L'IMPATTO DELLE VIBRAZIONI SULL'AMBIENTE NELLE ATTIVITA' ESTRATTIVE

### 1.2.1 Le attività estrattive

La cava viene definito come un elemento del territorio-sistema mediante il quale le risorse minerali in esso presenti vengono valorizzate, lavorate e dall'uomo per diversi scopi. La presenza di una cava nel territorio genera inevitabilmente un impatto ambientale, economico e sociale estremamente rilevante. In funzione delle caratteristiche del territorio stesso, si possono avere degli aspetti non desiderati che possono portare a un forte contrasto da parte della popolazione locale. Quanto maggiore è la richiesta di tutela dell'ambiente in quell'area, tanto più sarà complesso il rapporto territorio cava, con il rischio dello sviluppo di un contrasto che possa portare ad un punto di rottura tra parte sociale ed parte industriale. Ecco perché è assolutamente necessaria un'attenta e professionale analisi delle interazioni tra i diversi sottosistemi che compongono il territorio al fine di realizzare gli accorgimenti sia in sede progettuale che gestionale idonei alla limitazione dei riflessi negativi dell'attività estrattiva (Piga e Pinzari,1978). Ecco perché le attività estrattive rappresentano, per le proprie caratteristiche, un compartimento produttivo con una rilevante varietà di metodologie di lavorazione, ognuno delle quali caratterizzata da una propria specificità, in termini d'efficienza produttiva, di tempi di lavorazione e di rischi, sia per l'ambiente che per l'uomo. La progettazione e pianificazione di un'attività estrattiva è estremamente articolata e complessa poiché deve far collimare diverse esigenze; da una parte la necessità di dimensionare e definire gli spazi entro i quali l'attività estrattiva deve svilupparsi, con aree e volumi destinati alla trasformazione, e al tempo stesso salvaguardare e conservare l'ambiente per motivi di ordine diverso sia culturali che economici. L'obiettivo principale è quindi quello di massimizzazione della produttività dello spazio, ovvero una minor quantità di volume di materiale interessato dall'escavazione (cercando di concentrare i cantieri in per poter ridurre i costi) e la restituzione dei terreni bonificati in tempi brevi e al tempo stesso una maggiore e rapida dinamica di coltivazione (Pinzari, 1979). Innanzitutto, per comprendere quale possano l'incidenza che ha l'attività sull'ambiente, bisogna classificare la tipologia d'attività estrattiva. (Pinzari, 2006) definisce gli elementi essenziali per poter classificare un'attività : la tipologia di cava e il metodo di coltivazione. Le tipologie possono essere di tre tipologie:

- Cave di monte - inserite in contesto montuoso o collinare
- Cave pedemontane - collocate alla base dei rilievi collinari o montuosi

- Cave a mezza costa - aperte sul fianco di un pendio nella sua zona mediana
- Cave culminali - si trovano sulla zona sommitale dei rilievi
- Cave di pianura - inserite in un ambito morfologico tutto pianeggiante molto esteso rispetto a zona dei rilievi
- Cave in fossa - la cava è caratterizzata da un elevato numero di piste o rampe che collegano i piazzali, anche uno solo, di lavorazione con il livello della pianura
- Cave in pozzo - sono quelle cave dove è possibile accedere ai piazzali inferiori di lavorazione esclusivamente mediante mezzi verticali di sollevamento

I metodi di coltivazione, definiti come la sequenza spazio-temporale secondo la quale vengono estratti via via i singoli volumi elementari, si suddividono in due macro-categorie:

- Metodi di coltivazione per rocce ornamentali
  - ✓ Metodo a gradone unico
  - ✓ Metodo a gradoni multipli
  - ✓ Splatemento su gradone unico
  - ✓ Splatemento su più gradoni
  - ✓ Fette verticali
- Metodi di coltivazione per rocce ornamentali
  - ✓ Grandi bancate
  - ✓ Gradino basso
- Metodi di coltivazione dei blocchetti

I metodi per prodotti granulari hanno come obiettivo la frantumazione del materiale per poterlo successivamente trattare e ottenere così il prodotto finito, mentre quelli per rocce ornamentali vengono utilizzati quando si vogliono ottenere blocchi di considerevoli dimensioni e forme regolari. La scelta di un determinato metodo di coltivazione è condizionata dalle condizioni in situ ma soprattutto la produttività è strettamente dipendente dalle tecnologie che vengono impiegate. Generalmente per la produzione di rocce ornamentali vengono particolari tecniche che riescono a tagliare in modo preciso la roccia secondo le dimensioni e le forme desiderate.

- Il taglio con il filo diamantato

La roccia viene tagliata per abrasione attraverso un filo diamantato, costituito da un cavetto di acciaio a più trefoli sul quale sono inseriti gli utensili consistenti in anellini portanti la pasta diamantata e posizionati con diverse modalità (Capuzzi e Pinzari, 1980). Tale filo è movimentato da una macchina,

definita tagliatrice, costituita essenzialmente da due sezioni: la sezione motrice e la centraline comando. Tale caratteristica permette il controllo della macchina a distanza da parte dell'operatore.

- Il taglio con acqua in pressione

Con questa metodologia viene impiegato un getto d'acqua per la demolizione di rocce: le metodologie sono estremamente diversificate e si caratterizzano in funzione dei parametri che determinano il getto, come la pressione di alimentazione, forma e dimensioni dell'ugello e alle condizioni dell'ambiente circostante. Le principali tipologie di getto sono:

- getto stazionario
- getto intermittente
- getto autocavitante
- getto modulato o pulsante
- getto a cavitazione indotta
- getto abrasivo

Ognuno d'essi presenta una massima efficienza per le proprie caratteristiche tecnologiche in funzione del materiale su cui viene impiegato (Ciccu e Pinzari, 1986-1987). L'attività estrattiva incide nell'ambiente limitrofo attraverso quattro fattori: generazione di polveri (Piras, L., Dentoni, 2014 Alfarò Degan G, Lippiello D, 2005), di rumore, di vibrazione, sia sull'uomo che sull'ambiente (Dentoni, 2013), e per il suo impatto visivo (Dentoni e Massacci, G, 2013, Dentoni e Massacci, ,2007, Dentoni et al., 2014)

## 1.2.2 L'operazione di scavo

Per poter asportare rocce o terreni dalla loro posizione naturale vengono realizzati i cosiddetti lavori di scavo, i quali sono di numerosissime tipologie e si differenziano per le loro innumerevoli caratteristiche; essi si distinguono per il mezzo in cui lo scavo viene svolto (terra o roccia), l'ambiente in cui esso viene realizzato (savi a cielo aperto, in sotterraneo e o subacquei) (Oreste, P. ,2014) e le diverse finalità (scavi civili o estrattivi) (Cardu, M., Dipietromaria,S., Oreste,P., 2016). Ovviamente questa è una classificazione molto generica, ma vale la pena sottolineare che lo scopo dello scavo può condizionare l'esecuzione del lavoro, infatti in alcuni casi il materiale viene escavato per poter poi essere utilizzato (settore estrattivo), oppure si vuole sfruttare la cavità prodotta (opere civili) oppure entrambe le finalità (Oreste, P.,1995). Ad esempio da un certo volume di roccia si vuole ricavare il volume di una trincea, oppure materiale per produrre pietrisco o ancora ricavare blocchi di dimensioni

regolari e predefinite. La dimensione dell'elemento che viene abbattuto viene definita pezzatura, ma molto spesso vengono indicate soltanto alcune caratteristiche del materiale che si vuole ottenere, come la dimensione massima, il volume, il massimo peso, o a volte anche la composizione percentuale e la granulometria. Ciò che influenza in modo determinante le operazioni di scavo è il mezzo in cui esso deve essere effettuato; generalmente si possono distinguere i mezzi incoerenti (sabbia sciolta in cui bisogna solo vincere la forza peso e le forze d'attrito), i mezzi coerenti a comportamento plastico (dove si ha la deformazione progressiva del materiale sotto sforzo molto prima che si giunga a rottura e al distacco) e infine i mezzi a comportamento fragile (essi offrono una minima deformazione alle sollecitazioni applicate fino a quando non cedono improvvisamente e si fratturano). Questa classificazione sommaria ovviamente non tiene conto di tutti quei materiali che hanno un comportamento intermedio. Per poter effettuare le operazioni di scavo è necessario imprimere elevatissime sollecitazioni unitarie attraverso l'impiego di attrezzi di varia natura oppure attraverso l'utilizzo d'esplosivo, il cui impiego richiede numerosi e dettagliati accorgimenti sia in fase di progettazione che in quella d'esecuzione (Cardu, M.,2012). Nel primo caso bisogna attentamente valutare l'usura delle attrezzature dovuta all'abrasività del mezzo (fattore che ha una notevole influenza sulla produttività in termini economici) mentre nel secondo le fasi di esecuzione dei fori e rimozione del materiale richiedono una complessa progettazione. Un altro elemento fondamentale durante i lavori è la geometria dello scavo (intendendo con essa le dimensioni e la forma considerate) poiché la presenza di una sola superficie libera, o a fondo cieco, o di più superfici, cambia radicalmente i criteri di progettazione (Oreste, P.,2009). Nelle attività estrattive viene indicato con il termine *fronte d'abbattimento* quella porzione di superficie che delimita la roccia da abbattere rispetto al vuoto (oppure rispetto all'atmosfera) e l'operazione sarà tanto più semplificata quanto maggiori saranno le superfici liberi presenti. In alcuni casi vengono effettuate delle cosiddette *operazioni d'attacco*, ossia una parte di lavorazione in cui si ha l'obiettivo di realizzare di creare nuovi superfici libere per poter meglio favorire le operazioni di scavo; ad esse seguono le *operazioni di distacco*, svolte per poter rimuovere dalla propria sede naturale la roccia. Ovviamente questa distinzione non è sempre così netta e distinta e in molti casi le due operazioni si sovrappongono. In ogni caso, sia che il lavoro abbia un carattere continuo o discontinuo, un'operazione tipica di scavo di roccia compatta attraverso l'impiego d'esplosivo viene suddivisa in quattro fasi: a) *fase d'attacco*, in cui vengono predisposti i fori da mina in posizione adeguata b) *fase di distacco*, nella quale viene effettuata l'operazione di brillamento e una porzione di roccia della parete o della bancata viene frantumata e proiettata sul piazzale c) *abbattimento secondario*, vengono utilizzate ulteriori cariche per frantumare i blocchi che hanno dimensioni eccessive ) il materiale abbattuto viene rimosso dal



piazzale attraverso mezzi d'opera (dumper, camion a cassoni ribaltabile, ecc) per poter essere poi portato ai luoghi di lavorazione (frantoi, impianti, ecc.), (Cardu, M., Oreste, P.,2012)

### 1.2.3 L'esplosivo e il suo impiego

Con il termine esplosione viene indicati vari fenomeni fisici che hanno tutti in comune un rilascio d'energia estremamente notevole in un tempo molto breve. Generalmente viene associata l'esplosione all'impiego di particolari sostanze, dette esplosive, ma questo non è sempre detto poiché esse si possono verificare, ad esempio, anche con una pentola il cui fluido all'interno viene portato ad una elevata temperatura e di conseguenza anche di pressione: quando la differenza tra la pressione interna e quella esterna è tale da generare un cedimento del contenitore, si ha un rilascio d'energia in tempi brevissimi, detta appunto esplosione. Vi sono in natura delle sostanze che, se opportunamente stimolate dal punto di vista energetico, avviano una reazione tale da generare un'esplosione. Più in generale si può definire un esplosivo come *una sostanza (sia un composto sia una miscela) allo stato condensato (solido o liquido) che, se opportunamente stimolata in un punto localizzato (impiegando un cosiddetto innesco) avvia una reazione esotermica in un tempo brevissimo con dei prodotti finali totalmente, o almeno in gran parte, allo stato gassoso ad una temperatura pari a quella raggiunta nella reazione.* La definizione sopra esposta non è esaustiva di tutta la casistica delle sostanze esplosive; sono presenti delle miscele di solidi (miscela alluminio/ossido di ferro impiegata per le operazioni di saldatura), di gas e solidi (aria/segatura) e gas (ad esempio ossigeno/idrogeno, ossigeno/metano) che, se opportunamente innescate, reagiscono come un esplosivo vero e proprio ma non vengono classificate come tali poiché o non si trovano allo stato gassoso o a quello condensato. Inoltre negli esplosivi molto spesso sono contenute delle sostanze, cosiddetti *inerti*, che non prendono parte alla *reazione* e altre che reagiscono formando dei cosiddetti residui solidi. Un parametro che permette la classificazione delle esplosioni è la velocità con cui esse avvengono; quando la velocità è inferiore a quella del suono (subsonica) l'esplosione viene definita *deflagrazione* mentre quando è superiore (supersonica) prende il nome di *detonazione*. L'una o l'altra modalità d'esplosione non sono vincolate esclusivamente alla tipologia d'esplosivo ma dipendono dalle modalità con cui la reazione viene innescata; in ogni caso, basandosi sulla facilità con cui avviene l'una o l'altra modalità, vengono individuate due categorie, 1° per esplosivi deflagranti e 2° per i detonanti. Dal punto di vista fisico la detonazione avviene grazie ad un aumento improvviso di pressione, e quindi di temperatura, che riesce a creare le condizioni ottimali affinché incominci la reazione, la quale genera un aumento di pressione nello strato adiacente alla sostanza dove si genera nuovamente lo stesso fenomeno e così

via. Esso si sviluppa alla velocità di propagazione delle onde di pressione, appunto quella sonora. Al contrario la deflagrazione è basata su un altro principio: la combustione di una singola particella produce gas caldi che generano un innalzamento della temperatura, fino a quella di reazione, nelle particelle adiacenti e così si propaga il fronte di fiamma. Le velocità d'esplosione sopra descritte hanno dei valori estremamente variabili; esse rappresentano la velocità con cui si propaga il consumo dell'esplosivo stesso e non la velocità dei gas prodotti dalla reazione (pur essendoci una correlazione tra i due fenomeni). I valori di velocità generalmente vengono forniti dai costruttori, i quali dichiarano le prestazioni di velocità in prove di condizioni standard ma essi devono essere valutati come valori estremamente orientativi; nell'applicazione pratica si possono avere notevoli differenze di prestazione perché le condizioni al contorno hanno una notevole influenza sulla propagazione, ad esempio il diametro della carica, l'innesco, il confinamento della carica ( se in foro di roccia, se dentro un tubo oppure se carica nuda) , la densità, ecc.. (Cardu, 2015) La prova standard di riferimento è quella Dautriche che si basa sul principio del confronto tra una miccia detonante la cui velocità di detonazione è nota e la miccia di cui si vogliono conoscere le proprietà. Un limite che ha questa metodologia è che il valore della velocità che viene fornito è un valore medio mentre non vengono rilevate le variazioni che possono manifestarsi lungo la carica stessa.

## 1.2.4 Le onde sismiche generate da fenomeni dinamici

Come descritto precedentemente nelle attività estrattive l'impiego dell'esplosivo è una delle metodologie più utilizzate per frammentare la roccia, definita anche opera di comminazione; attraverso essa, un elemento di roccia solido e compatto viene trasformato in una distribuzione frammentata di elementi che verranno successivamente processati in modo diverso a seconda del prodotto finale che si vuole ottenere. L'energia rilasciata dall'esplosivo può essere suddivisa in due gruppi principali: il primo è costituito da gas che, durante l'esplosione, raggiungono elevate pressioni che riescono a generare delle sollecitazioni sulla roccia tali da portare alla loro fratturazione. Il secondo gruppo, invece, racchiude tutti quei prodotti della combustione, come calore, rumore e vibrazioni, che impiegano energia rilasciata dall'esplosivo senza però fratturare la roccia. Inoltre l'impiego d'esplosivo è estremamente delicato e complesso poiché le problematiche conseguenti all'esplosione possono essere estremamente pericolose, ossia oltre agli effetti voluti, la frammentazione e/o il distacco di un certo volume di roccia da processare, si possono verificare dei cosiddetti effetti collaterali non desiderati con rilevanti conseguenze, come proiezione di frammenti a notevoli distanze, fratturazione, distacco o danneggiamento di materiale roccioso che non doveva

essere coinvolto nella lavorazione, elevati livelli di pressione sonora, il cui effetto si ripercuote sia sugli operatori in cava che sulla popolazione limitrofa al sito, e vibrazioni che si propagano nel terreno anche a rilevanti distanze dal punto d'esplosione. Per poter contenere la proiezione dei frammenti e avere un corretto abbattimento del materiale, si interviene in fase di progettazione della volata ed esecuzione del tiro, mentre il solo sistema per contenere gli effetti vibratori è quello di ridurre la carica d'esplosivo. Da quanto esposto si capisce la necessità di adottare una metodologia di monitoraggio del fenomeno sismico che sia accurata al fine di valutare i livelli vibratori indotti da una volata. Più in generale, vengono monitorati, oltre ai fenomeni sismici indotti dalle attività umane, anche quelli naturali come i terremoti. L'importanza di valutare accuratamente i livelli di vibrazione è fondamentale per la stima dell'impatto ambientale che avrà l'abbattimento della parete, per una corretta progettazione della volata e per un attendibile monitoraggio delle vibrazioni in corso d'opera. Questo poiché le vibrazioni che si propagano nel terreno possono causare delle lesioni permanenti alle fondamenta delle case e/o degli edifici limitrofi al sito estrattivo. Per poter realizzare ciò, si possono utilizzare sia modelli teorici (leggi matematiche che si basano sulla teoria dell'elasticità) che modelli basati sui dati ricavati da complesse e articolate campagne sperimentali (modelli empirici) (Oreste, P., 2014, Oreste, P., 2015). Bisogna evidenziare che gli effetti sui cui si vuole andare ad effettuare un'azione di contenimento vengono designati in modo generico *effetti sismici*, e sono trattati con una formalità scientifico-matematica nello stesso identico modo di quelli naturali, basandosi su un modello di oscillazione di un singolo elemento del suolo (particella elementare) scomponibile in tre differenti direzioni di moto d'oscillatore smorzato, che vengono definiti come verticale (perpendicolare al suolo), radiale (secondo la direzione che considera la congiungente tra il punto considerato e il punto d'esplosione) e trasversale (ortogonale alla radiale e appartenente allo stesso piano). La stima dei livelli vibratori del terreno è molto complessa poiché la propagazione dell'onda meccanica è influenzata da numerosi elementi, che possono essere suddivisi in due categorie: quelli dipendenti dalla natura del terreno e quelli legati alla volata.

#### 1.2.4.1 Parametri del terreno

Come è noto la struttura del terreno è molto eterogenea, ci possono essere dei vuoti al suo interno, spaccature in profondità, fratturazioni superficiali o improvvisi cambiamenti strutturali del terreno che possono alterare significativamente la propagazione dell'onda. Tale discontinuità del mezzo di propagazione è uno degli elementi più problematici per la definizione dei modelli previsionali delle vibrazioni. Un terreno compatto, ad esempio roccioso, permette una rapida propagazione dell'onda, al contrario invece di un terreno disciolto, ad esempio terreno rurale. Qualora un'onda incontri

durante il suo percorso una discontinuità, ad esempio una frattura, il mezzo di propagazione cambia e si verifica, quindi, un fenomeno di diffrazione, argomento che verrà trattato nel dettaglio in seguito.

## 1.2.5 Operazione di brillamento

La progettazione della volata è di fondamentale importanza per limitare gli effetti vibratorii indotti nel terreno (Cardu,2015). I parametri essenziali per cui regolarsi nella progettazione sono;

- il numero di mine
- il numero di file
- i parametri geometrici dei fori
- la tipologia d'esplosivo
- la quantità impiegata

## 1.2.6 Il meccanismo di propagazione delle onde

Il fenomeno della propagazione delle onde richiede come conoscenza essenziale la meccanica del continuo; tale materia è molto complessa e articolata e in questa parte si cercherà di illustrare i principi basilari per comprendere il fenomeno. E' noto che il passaggio di un'onda in un mezzo genera una perturbazione, ovvero uno spostamento, rispetto alla configurazione d'equilibrio, delle singole particelle costituenti il mezzo. Per poter descrivere il fenomeno in modo puntuale vengono fatte due ipotesi: piccole deformazioni e linearità tra uno sforzo e la deformazione. La prima tiene conto del fatto che le onde generano spostamenti di particelle sempre di lieve entità e quindi l'ipotesi semplificativa di piccoli spostamenti riesce a descrivere tale aspetto. La seconda, invece, è quella di considerare una relazione di linearità tra sforzo applicato ad un materiale e la conseguente deformazione; ciò deriva dalle legge di Hooke che regola il comportamento dei materiali sottoposti a piccole deformazioni. Per poter quantificare in modo analitico i movimenti a cui sono sottoposte le particelle di materia interessate dal transito di un onda, è fondamentale comprendere bene i concetti di sforzo, deformazione e il legame esistente tra loro. Il termine sforzo (detto anche stress) definisce una quantità fisica che rappresenta una forza rispetto all'unità di superficie. Se viene preso un qualsiasi corpo continuo  $C$  (definito continuo se preso un qualsiasi punto materiale  $P \in C$ , in un suo piccolo a

piacere intorno I(P) esistono altri punti materiali), su di esso agiranno forze di volume e forze di superficie.

- La forze di volume sono quelle che agiscono su tutti gli elementi del volume del corpo C, come ad esempio la forza di gravità o quella elettromagnetica.
- Le forze di superficie sono le forze che agiscono sulla superficie delimitante il volume del corpo considerato, nel nostro caso il corpo C, come ad esempio la forza del vento, la forza di attrito tra due corpi e la pressione atmosferica

Con il termine deformazione, invece, si intende il caso in cui un materiale soggetto a sforzi subisce un cambiamento della sua forma e delle sue dimensioni. L'ipotesi che viene fatta è che non ci sia né lacerazione né compenetrazione della materia. Il complesso e intimo legame esistente tra piccoli spostamenti e piccole deformazioni di un punto materiale può venire scomposto in una traslazione, una rotazione rigida ed una deformazione. Da qui, sotto opportune ipotesi, si può ritenere valido il principio di sovrapposizione degli effetti, ovvero la deformazione risultante come somma delle singole deformazioni. Nella sua forma generalizzata, la legge di Hooke afferma che ciascuna componente dello sforzo in ogni punto del corpo è una funzione lineare delle componenti indipendenti della deformazione. Questo concetto, in altre parole, afferma che applicando uno sforzo ad un materiale si ha una deformazione proporzionale ad un parametro e il legame esistente tra sforzi e deformazioni (stress-strain relationship) si esprime come di seguito riportato

$$\sigma = E\epsilon$$

Bisogna evidenziare che  $\sigma$  e  $\tau$  possono essere espressi come vettori composti rispettivamente da sei componenti indipendenti di un tensore delle tensioni  $T$  e di un tensore delle deformazioni  $D$ , dove x,y e z rappresentano le componenti di un sistema di riferimento standard

$$\sigma = [\sigma_x \sigma_y \sigma_z \tau_{xy} \tau_{xz} \tau_{yz}]^T$$

$$\epsilon = [\epsilon_x \epsilon_y \epsilon_z \gamma_{xy} \gamma_{xz} \gamma_{yz}]^T$$

Generalmente, in un materiale anisotropo, sono necessarie 21 costanti indipendenti per descrivere questo legame. Nel caso invece di un materiale isotropo ed elastico lineare, il numero delle costanti si riduce a due, e vengono così definite le costanti elastiche di Lamé,  $\lambda$  e  $\mu$  (modulo di taglio o modulo di rigidità).

A partire dalle costanti di Lamé, vengono definite le altre costanti elastiche, riassunte in seguito

- Modulo di Young E : Esprime la resistenza di un materiale alla deformazione lineare sotto l'azione di sforzi di compressione o dilatazione

$$E = \frac{\sigma_x}{\varepsilon_x} = \frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu}$$

- Rapporto di Poisson : Esprime il rapporto tra le componenti di deformazione ortogonale e parallela allo sforzo agente e si esprime secondo la seguente formula

$$\nu = \left| \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} \right| = \left| \frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_x} \right| = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)}$$

- Modulo di incompressibilità K : Esprime la resistenza di un materiale al cambiamento di volume per effetto di uno sforzo idrostatico

$$K = \lambda + \frac{2}{3}\mu$$

La descrizione dei parametri sopra esposti permette di caratterizzare il comportamento di un materiale sottoposto a sforzo; la legge di hooke rappresenta il caposaldo da prendere a riferimento ed essa, unitamente alla seconda legge della dinamica, è possibile derivare l'equazione che determina lo spostamento di una particella in un mezzo elastico sottoposto a sforzo. Si consideri il caso di equilibrio dinamico, per cui il cubetto elementare è sottoposto ad una deformazione di piccola entità per la quale è valida l'ipotesi di elasticità lineare. Inoltre si supponga che il cubetto sia sufficientemente lontano dalla regione in cui si è prodotta la causa della perturbazione di sforzo (sorgente) in modo da poter considerare il contributo della sorgente trascurabile ai fini del calcolo del campo degli spostamenti. Dal bilancio delle forze agenti sulla faccia anteriore e posteriore del cubetto si ottiene

$$\rho dx dy dz \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \left( \sigma_x + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} dx \right) dy dz - \sigma_x dy dz + \left( \tau_{xy} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} dy \right) dx dz - \tau_{xy} dx dz + \left( \tau_{xz} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} dz \right) dx dy - \tau_{xz} dx dy$$

La semplificazione della formula sopra permette d'ottenere

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = \nabla T t$$

Dove il simbolo  $\nabla$  indica l'operatore differenziale vettore nabla. Attraverso una serie di passaggi si giunge alla definizione di

$$\rho \frac{\partial^2 s}{\partial t^2} = (\lambda + 2\mu) \nabla(\nabla \cdot s) - \mu(\nabla \times \nabla \times s)$$

espressione che rappresenta l'equazione del moto cercata. Il primo termine a secondo membro che compare nell'equazione, essendo a rotore nullo, è un termine di tipo irrotazionale, mentre il secondo termine, essendo a divergenza nulla, è di tipo solenoidale. L'equazione elastodinamica è un'equazione differenziale del secondo ordine a coefficienti costanti che descrive lo spostamento nel tempo delle particelle materiali di un cubetto elementare di un mezzo (continuo alla Cauchy ed elastico lineare) sottoposto ad una variazione infinitesima di sforzo, trascurando l'effetto della sorgente della perturbazione (ipotesi di campo lontano), altrimenti sarebbe necessario aggiungere nell'equazione di cui sopra un termine di sorgente che rappresenti una forza impulsiva (descrivibile mediante una funzione delta di Dirac) ed unidirezionale, e la soluzione dell'equazione prenderebbe il nome di funzione di Green elastodinamica, come nel caso elettromagnetico. La soluzione analitica della equazione sopra descritta è ottenibile solo per un mezzo omogeneo, isotropo e illimitato, condizioni che permettono la propagazione delle onde di volume.

### 1.2.6.1 Propagazione delle onde

Per poter comprendere gli effetti di un'esplosione nel terreno è necessario avere una panoramica generale sul meccanismo che regola la propagazione delle onde. La soluzione dell'equazione

$$\frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 s}{\partial t^2} = \nabla^2 s$$

descrive l'evoluzione delle perturbazioni che si propagano nello spazio e nel tempo. Si consideri per semplicità il caso in cui  $s(u, v, w, t) = u(x; t)$ , ovvero il caso in cui la sola componente non nulla dello spostamento è funzione della sola coordinata spaziale  $x$ , ossia corrisponde al caso di una bacchetta lunga e sottile di materiale elastico, e allora l'equazione (1.34) diventa :

$$\frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \nabla^2 u = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$$

Da questa equazione è possibile verificare, applicando una sostituzione diretta, che una qualunque funzione delle variabili spazio-temporali ( $x \pm vt$ ) è soluzione della (1.37) e quindi la soluzione generale dell'equazione d'onda può scriversi come la somma di due termini

$$u(x,t) = f(vt - x) + g(vt + x)$$

bisogna evidenziare che il primo termine a secondo membro rappresenta fisicamente un' onda progressiva, mentre il secondo un' onda regressiva. Ricordando il teorema di Fourier, che afferma che un segnale generico può venire scomposto in una somma infinita di segnali armonici, è possibile affermare che se la sollecitazione è, appunto, di tipo armonico, risulta conveniente adottare espressioni equivalenti di  $f(vt - x)$ :

$$f(vt - x) = f\left(\frac{\lambda}{T}t - x\right) = f(\omega t - kx)$$

avendo indicato con

$$\lambda = \frac{v}{T} \text{ la lunghezza d'onda}$$

$T$  il periodo dell'onda

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \text{ la pulsazione}$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \text{ il numero d'onda}$$

Da notare che il numero d'onda sta alla lunghezza d'onda come la pulsazione sta al periodo. Si è detto che la soluzione (1.38) si riferisce ad un onda che si propaga in una sola direzione, ovvero un onda piana. In questo tipo di onde non avviene il fenomeno della divergenza geometrica, ovvero della diminuzione dell'ampiezza dell'onda all'aumentare della distanza dalla sorgente vibratoria. Si ricorda che ad un onda si associa un trasporto di energia<sup>21</sup>, quindi un onda sferica che si propaga in un mezzo omogeneo generata da una sorgente puntiforme dovrà avere lo stesso contenuto energetico in due istanti di tempo diversi<sup>22</sup>, ovvero se si chiamano  $A_1; A_2$  le ampiezze della stessa onda in istanti di tempo  $t_1; t_2$  cui corrispondono i raggi  $r_1; r_2$ , poichè l'energia è proporzionale al quadrato dell'ampiezza dell'onda, risulta:

$$A_1^2 r_1^2 = A_2^2 r_2^2 \quad \frac{A_2}{A_1} = \frac{r_1}{r_2} \quad A = f(r^{-1})$$



Quanto detto vale per una sorgente puntiforme. Altri tipi di sorgente possono essere una linea (sorgente lineare) o una superficie (sorgente superficiale). Durante la sua propagazione, un'onda può incontrare una superficie di discontinuità. In questo caso, un'onda di volume incidente la superficie genera quattro onde: due riflesse e due trasmesse. A causa delle diverse caratteristiche meccaniche che possiedono in generale i materiali, un'onda trasmessa viene anche rifratta. Quest'ultimo fenomeno viene descritto sinteticamente dalla legge di Snell-Descartes, che nella sua forma generalizzata può venire espressa mediante le successive uguaglianze

$$p = \frac{\sin i}{v_i} = \frac{\sin r}{v_i} = \frac{\sin t}{v_t}$$

dove con  $p$  si è indicato il parametro d'onda. Vale il principio di conservazione dell'energia tra raggio incidente e raggi riflessi, quindi l'energia complessiva dei raggi uscenti dovrà essere uguale a quella del raggio incidente. L'energia si ripartisce tra i raggi in funzione dell'impedenza acustica  $Z$  che caratterizza i due materiali. L'impedenza è definita:

$$Z = \rho v$$

avendo indicato con  $\rho$  la densità e  $v$  la velocità di propagazione dell'onda nel mezzo. Nel caso particolare di un'onda incidente verticalmente sulla superficie di discontinuità, dove le componenti tangenziali dello sforzo e dello spostamento si annullano, l'energia dell'onda incidente ( $E_i$ ) si ripartisce tra le due onde riflesse ( $E_r$ ) e trasmessa ( $E_t$ ) secondo le relazioni:

$$\frac{E_r}{E_i} = \left( \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2 = \left( \frac{A_r}{A_i} \right)^2 = \left( \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \right)^2$$

$$\frac{E_t}{E_i} = \frac{4Z_2Z_1}{(Z_2 + Z_1)^2} = \left( \frac{A_t}{A_i} \right)^2 = \frac{4\gamma^2}{(\gamma + 1)^2}$$

avendo indicato con  $\gamma$  il rapporto dell'impedenza del mezzo in cui si propaga l'onda incidente (identificata dal pedice 1) all'impedenza del mezzo in cui si propaga l'onda trasmessa (identificata dal pedice 2). Dalla prima delle (1.43) si vede che per massimizzare la trasmissione dell'onda bisogna effettuare il bilancio delle impedenze, ovvero bisogna porre  $Z_1 = Z_2$ , mentre per impedenze molto diverse si verifica la totale riflessione. Le leggi dell'ottica geometrica della riflessione e rifrazione

sono valide nelle ipotesi di lunghezze d'onda dell'onda che si propaga molto minori della dimensione degli ostacoli e quando le due lunghezze diventano paragonabili hanno luogo fenomeni di diffusione, ovvero di propagazione delle onde secondo leggi diverse da quelle previste dall'ottica geometrica. Nelle figura di riferimento si mostra l'onda incidente con angolo di incidenza (i), onda riflessa con angolo di rifrazione (r), onda trasmessa con angolo di rifrazione(t)

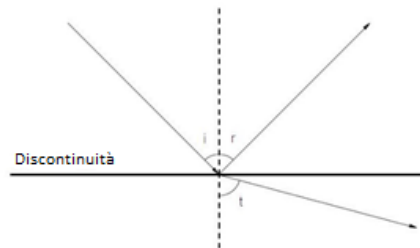


Fig. 3: Onde riflesse e trasmesse a causa di un'onda P (sinistra) o onda S (destra) incidenti (Terremoti ed onde, Zollo,2003)

### a) Onde di volume

Partendo dall'equazione elastodinamica è possibile analizzare i due termini (irrotazionale e solenoidale) che compaiono al secondo membro dell'equazione; essi rappresentano moti con diverse proprietà di polarizzazione (per polarizzazione di un onda si intende la direzione del vettore spostamento che corrisponde alla direzione di oscillazione della particella che subisce la sollecitazione). In generale, la soluzione dell'equazione è un campo di spostamenti delle particelle del volume elementare con polarizzazione qualunque. Per poter arrivare a una soluzione, si considerino i casi limite, per i quali, alternativamente, si considerano nulli il termine irrotazionale e solenoidale.

- Onda P :

quando  $s$  è irrotazionale ( $\Delta \times S = 0$ ) si ottiene l'equazione del moto associata alla componente onda P, o onda primaria, o onda di compressione:

$$\rho \frac{\partial^2 s_p}{\partial t^2} = (\lambda + 2\mu) \nabla s_p \quad \text{con } s_p = \nabla \phi$$

avendo indicato con il pedice  $p$  che ci si riferisce all'onda primaria.

- Onda S.

quando  $s$  solenoidale e si ottiene l'equazione del moto della componente onda S, o onda secondaria, o onda di taglio:

$$\rho \frac{\partial^2 s_s}{\partial t^2} = \mu \nabla^2 s_s \text{ con } s_s = \nabla \times \psi$$

avendo indicato con il pedice  $s$  che ci si riferisce all'onda secondaria. L'onda S è polarizzata ortogonalmente alla direzione del moto, quindi esistono due onde polarizzate ortogonalmente tra loro e di solito vengono studiate in onde polarizzate sul piano orizzontale (SH) o sul piano verticale (SV).

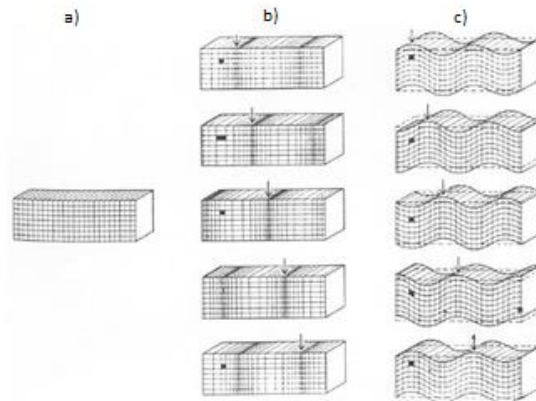


Fig. 4: propagazione delle onde nel terreno (Terremoti ed onde, Zollo, 2003)

La figura sopra riportata rappresenta le deformazioni successive subite da un elemento di volume unitario di materiale (a) per effetto della propagazione delle onde P ed S. La sequenza avanza nel tempo procedendo dall'alto verso il basso e l'onda sismica attraversa il blocco da sinistra a destra. Le frecce indicano il punto di cresta dell'onda ad ogni istante di tempo considerato. Le rappresentazioni evidenziano le differenze dell'effetto delle due onde. Al passaggio dell'onda P sia il volume che la forma della zona ombreggiata cambiano (b). Al passaggio dell'onda S il volume della zona ombreggiata resta invariato e la regione è soggetta solo ad una rotazione (c).

Le equazioni precedentemente descritte vengono definite come equazioni d'onda ed hanno entrambe una forma del tipo:

$$\frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 s}{\partial t^2} = \nabla^2 s$$

il termine  $v$  ha le dimensioni di una velocità e rappresenta proprio la velocità che ha l'onda attraverso il mezzo di propagazione. Attraverso una serie di combinazione dell'equazioni descritte si arriva alla definizioni della  $V_p$  e  $V_s$  secondo le seguenti formule

$$v_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}$$

$$v_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

Le formule rappresentano le componenti di onda P ed onda S dello spostamento soluzione dell'equazione elastodinamica. La  $v_p$  è nota come onda P, o primaria, in quanto rappresenta l'onda che si propaga più velocemente ed è quindi il primo arrivo osservabile su di un sismogramma. Le altre definizioni usuali di onda longitudinale o di compressione si riferiscono alla direzione di oscillazione delle particelle associate all'onda P (polarizzazione) che è parallela a quella di propagazione. L'onda S è detta anche secondaria, trasversale o di taglio. Essendo  $\lambda$  una quantità positiva, la velocità delle onde P è sempre maggiore di quella delle onde S. Il moto delle particelle associato ad un'onda S è un'oscillazione in direzione ortogonale a quella di propagazione (Figura 2.7c) che avviene senza variazione di volume. Come visto in precedenza, l'ampiezza delle onde di volume, in un mezzo elastico omogeneo, si attenua con la distanza seguendo una legge di potenza inversa e, a distanze dalla sorgente corrispondenti a poche lunghezze d'onda ( $R > \lambda$ ), i termini di onde P ed S diventano dominanti rispetto a quello di campo vicino, che è associato a moti di particelle che risultano dalla combinazione complessa di moti P ed S. L'ampiezza delle onde di volume è controllata, oltre che dalla divergenza geometrica, da diversi fattori quali il meccanismo di radiazione alla sorgente e l'effetto di anelasticità della Terra. Considerando tuttavia mezzi di propagazione elastici e trascurando l'effetto di sorgente, ci si attende che, a parità di distanza, l'ampiezza delle onde S sia maggiore di quella dell'onda P a causa della dipendenza inversa dal quadrato della velocità.

### *b) Onde di superficie*

Le onde di superficie sono onde che si formano quando il mezzo non è illimitato, ovvero in presenza di discontinuità di velocità nel mezzo. In presenza di queste discontinuità, le onde di volume sono soggette a ai fenomeni citati di riflessione, rifrazione e conversione in altri tipi di onde. Questi fenomeni sono descritti dalle leggi specifiche, quindi può verificarsi che, dovendo il parametro d'onda  $p$  rimanere costante, può verificarsi che per le onde generate risulti  $p_1 = v$ , condizioni di incidenza critica e supercritica che mostrano la non validità della legge di Snell-Descartes in queste condizioni. Le onde così generate tendono a rimanere connate sulla superficie di discontinuità e subiscono, oltre all'attenuazione geometrica, un'attenuazione dell'ampiezza all'aumentare della distanza dalla superficie di discontinuità; proprio per questo motivo queste onde vengono chiamate onde inomogenee o onde di superficie. Diverse sono le onde di superficie, ma quelle più conosciute e di interesse pratico sono due, elencate in seguito.

- L'onda di Rayleigh. Si dimostra matematicamente la formazione di questa onda a partire da un modello di semispazio omogeneo e si forma sulla superficie libera, ovvero sulla superficie di separazione tra la terra e l'aria. In questa zona si verificano i fenomeni di riflessione e conversione, ma non di rifrazione<sup>25</sup>. Altre condizione al contorno di cui tener conto nella propagazione di quest'onda è che, stando sulla superficie libera, dovranno risultare nulli gli sforzi  $x$ ;  $xy$ ,  $xz$ . L'onda di Rayleigh è composta dalla risultante di due moti dovuti a due onde: P ed SV, Il moto dell'onda è di tipo ellittico retrogrado sulla superficie, progrado a partire da una data profondità, dove avviene l'inversione del moto parallelo alla direzione di propagazione. La polarizzazione è sul piano verticale parallelo alla direzione di propagazione. L'attenuazione geometrica di questa onda è di gran lunga inferiore a quella delle onde di volume: per sorgenti di tipo puntuale, mentre per sorgenti di tipo lineare l'onda si mantiene costante, a meno di effetti dissipativi o dispersivi. La velocità dell'onda è di pochi percento inferiori a quella delle onde S ( $v_r = :92v_s$  per solidi ideali).
- L'onda di Love. L'esistenza di questo tipo di onda è stato dimostrato da Love nel 1911 con un modello matematico composto da uno strato omogeneo che poggia su un semispazio infinito. Un'onda S proveniente dal semispazio può eccitare un'onda di superficie sullo strato superiore, un'onda che si propaga con velocità compresa tra le velocità di taglio dei due mezzi. Quest'onda è polarizzata linearmente sul piano orizzontale, produce un moto delle particelle analogo a quello dell'onda di taglio SH e decade in modo esponenziale allontanandosi dalla superficie di discontinuità che l'ha generata. Si ricorda che quest'onda si forma sulle discontinuità interne alla terra.

In base a quanto detto, l'onda di Rayleigh risulta quella più interessante ai nostri fini, ma anche ai fini della sismologia sperimentale in quanto si propaga proprio sullo strato di terreno dove si fanno le misure di vibrazioni. Si è accennato al fenomeno della dispersione di questo tipo di onda. Con dispersione si intende una dipendenza della velocità di propagazione dell'onda dalla frequenza dell'onda stessa. Grazie alla teoria di Fourier si può rappresentare il moto associato ad un'onda superficiale come la sovrapposizione di moti oscillatori monocromatici, ciascuno caratterizzato da specifici valori di ampiezza, frequenza e fase. Ad ogni frequenza ( $f$ ) è associata una lunghezza d'onda:

$$\omega = 2\pi f = 2\pi \frac{v_f}{\lambda}$$

Se si definisce profondità di penetrazione dell'onda quel valore  $z_0$  per cui l'ampiezza verticale dell'onda si riduce di un fattore  $e^{-1}$  (circa il 40% del valore massimo), tenendo conto della (1.44) e della (1.45) si ottiene la seguente relazione tra profondità di penetrazione e lunghezza d'onda:

$$\omega \alpha z_0 = 1 \quad 2\pi \frac{v_f}{\lambda} \alpha z_0 = 1 \quad z_0 = \frac{\lambda}{2\pi \alpha v_f}$$

Dall'ultima equazione si vede chiaramente che le componenti in cui è stata scomposta l'onda superficiale cammineranno su spessori diversi della terra, spessori che hanno parametri elastici medi diversi, quindi velocità di propagazione diverse. Quando un mezzo è dispersivo, per un'onda si può distinguere tra velocità di fase ( $v_f$ ) e velocità di gruppo ( $v_g$ ), ovvero tra velocità della componente monocromatica dell'onda e velocità con cui si muove il gruppo di onde monocromatiche in cui si è scomposta l'onda generica. Se si caratterizza il gruppo mediante l'onda il segnale di ampiezza massima, si può misurare lo spazio percorso da questo nell'unità di tempo e quindi caratterizzare la  $v_g$ . Si può dimostrare che

$$v_g = \frac{d\omega}{dk} = \frac{d(vk)}{k} = v + k \frac{dv}{dk}$$

con le quantità  $dv$  e  $dk$  che esprimono le variazioni di frequenza e numero d'onda nell'intorno della frequenza associata all'impulso di energia dominante del gruppo.

## 1.2.7 Effetti dell'esplosione nel terreno

La trattazione descritta precedentemente fornisce un quadro generale dei fenomeni fisici che avvengono quando un'onda meccanica si propaga nel terreno. Quando avviene l'esplosione nel terreno la roccia viene sottoposta a due differenti tipologie d'azione: quelle dinamiche e quelle quasi statiche. Le prime si caratterizzano per essere delle componenti impulsive della durata dell'ordine dei  $\mu s$  mentre le seconde sono pressioni che perdurano nel tempo per vari ms. Entrambe interessano tutto il volume di materiale che si vuole abbattere ma le prime lo attraversano a velocità elevatissime, dell'ordine di diversi km/s (che quindi risultano superiori alla velocità sonica), dove gli elementi singoli del materiale sono sollecitati per un tempo brevissimo con un'intensità elevatissima. Tale velocità, però, è talmente elevata che può verificarsi una non completa fratturazione della roccia, ossia le linee di frattura per potersi sviluppare, hanno bisogno di un determinato intervallo di tempo (velocità subsonica, quindi si parla di qualche Km/s) e l'onda, pur avendo intensità superiore alla

resistenza della roccia, non riesce ad esercitare la sua azione distruttrice. Però l'azione della sollecitazione impulsiva, riesce a creare un danneggiamento alla struttura morfologica della roccia tale da permettere all'azione dell'onda quasi-statica, che arriva successivamente, di riuscire a fratturare completamente il materiale. L'onda viene generata da un'esplosione nel terreno che trasmette un impulso estremamente elevato ed è possibile individuare tre regioni dello spazio che vengono interessate, in modo differente, da tre differenti fasi dell'esplosione: la zona di detonazione, la zona di frantumazione e la zona elastica a cui vengono legate rispettivamente la fase di scoppio, dell'onda d'urto e delle onde elastiche. Richiamandoci alle ipotesi sopra menzionate viene considerato un mezzo isotropo, omogeneo e indefinito. Si assuma che un elemento di spazio all'interno della roccia a forma sferica venga riempito d'esplosivo e all'inizio della carica esplosiva ci sia un'onda di detonazione. Il mezzo di propagazione in cui è posto l'esplosivo rimane indisturbato fino a quando tutto il materiale non è stato convertito in un gas ad elevata temperatura e pressione. Questa zona interessata da tale fenomeno viene definita zona di detonazione ed ha un volume pari a quello dell'esplosivo impiegato. Inoltre la velocità di propagazione avviene in funzione della tipologia d'esplosivo impiegato e rappresenta uno dei parametri caratteristici per il suo impiego. I gas prodotti dall'esplosione si espandono rapidamente e generano tensioni che portano alla distruzione della roccia e alla sua riduzione allo stato di polvere, conseguente ad una complessa e articolata frantumazione. Questo avviene poiché un'esplosione nel suolo genera una zona di compressione attorno al centro della carica e il terreno viene violentemente spostato sotto l'effetto di un'ulteriore espansione dei gas dalla zona di compressione. Questa prima zona è caratterizzata, come avviene nei gas e nei liquidi, dall'aver la trasmissione di un'onda d'urto che ha una velocità maggiore di quella che caratterizza il meccanismo di fratturazione della roccia. La velocità dell'onda d'urto è inoltre maggiore di quella delle onde elastiche proprie del mezzo ed è condizionata dall'intensità dell'esplosione e, al crescere della distanza, diminuisce. Accanto a questa zona di compressione il materiale circostante continua a subire gli effetti dell'espansione dei gas, con spostamenti e deformazioni che portano alla formazione di fratturazioni, sia di tipo radiali che trasversale. Questa zona viene definita zona di distruzione, la cui estensione è variabile in funzione delle caratteristiche fisiche del mezzo, da un valore minimo di 2000 a massimo di 6000 volte il volume della carica che esplose. Accanto a questa zona si ha un ulteriore processo di sollecitazione del terreno con così detta onda d'esplosione (indicata anche come onda d'urto) dove il mezzo è soggetto a grande deformazione, accompagnata, ad una certa distanza dal centro della, carica, da un ulteriore meccanismo di fratturazione. Questa regione del mezzo è interessante sia come regione di residue deformazioni sia come regione di formazione delle onde sismiche, con notevoli spostamenti e velocità delle particelle del suolo. Essa è di particolare importanza poiché l'effetto delle onde d'esplosione

(indicate anche come onde d'urto) non si limita alla sola compressione e deformazione residua; si può verificare che nelle più remote zone del mezzo di propagazione, l'onda d'esplosione genera delle deformazioni governate dalle leggi della teoria dell'elasticità e quindi l'onda d'esplosione (d'urto) si muta in onde sismiche elastiche. Per poter comprendere meglio il concetto, si consideri il punto in cui avviene l'esplosione; la tensione diminuisce all'aumentare della distanza dall'origine ed arriva ad un certo valore, definito distanza critica, tale per cui essa diventa uguale ai limiti elastici del mezzo e la perturbazione diviene un'ordinaria onda elastica, che si propaga con velocità condizionata dalle costanti elastiche del mezzo. Questa regione dello spazio viene definita classica, o zona elastica, poiché qui può essere applicata la classica (lineare) teoria dell'elasticità. Dal punto di vista fisico l'aspetto più importante è che in prossimità del punto dello scoppio, non possono essere applicate le leggi valide per descrivere il fenomeno in un mezzo perfettamente elastico. In questa regione spaziale, il mezzo è soggetto al violento aumento della pressione dovuto all'esplosione, che provoca nel mezzo varie tipologie di anormali fenomeni. Il primo fra tutti è quello concernente la relazione tensione-deformazione (stress-strain), che in queste condizioni non può più essere valutata come una relazione lineare. Questo fatto fa sì che in questa regione spaziale siano presenti onde d'urto o onde elasto-plastiche anziché le onde elastiche. L'analisi di questa tipologia d'onde è talmente complessa e articolata che non lascia molti margini per la comprensione completa del fenomeno. Da qui si evince un interesse soltanto per il campo in cui vengono valgono le leggi che regolano il comportamento delle onde elastiche. In termini pratici la rottura della roccia avviene per effetto di schiacciamento solo in prossimità del punto d'esplosione mentre la parte restante del volume viene fratturata grazie ad un meccanismo di trazione. Questo aspetto è importantissimo perché si cerca di progettare la volata in modo tale da sfruttare al massimo questo fenomeno fisico: quando avviene l'esplosione le onde generate si propagano nel terreno e ad un certo punto impattano con le cosiddette superfici libere del mezzo, ossia delle superfici che sono di confine tra il mezzo stesso ed un mezzo che ha una resistenza di fatto nulla, come l'atmosfera, l'acqua o un cumulo di materiale già frammentato. A questo punto la pressione generata riesce a creare degli sforzi di trazione attraverso due meccanismi; il primo consiste nel trasformare l'impulso di compressione in un impulso di trazione grazie alla riflessione che avviene sulla superficie libera (valido ovviamente solo per carichi impulsivi) mentre il secondo si basa sul principio di trasformazione di una pressione su una superficie cilindrica in una forza di trazione circonferenziale, detto anche modello del recipiente in pressione. Un altro fenomeno che risulta importantissimo per la fratturazione del materiale è il cosiddetto effetto d'incuneamento dei gas in pressione, che consiste nella penetrazione del gas in qualsiasi frattura si possa aprire sulle pareti e che amplifica l'effetto d'apertura del materiale roccioso. Le fratture visibili su una superficie rocciosa sono diverse in funzione delle caratteristiche del materiale:



- Attorno al foro vi sono delle fratturazioni finissime, a volte difficili da distinguere visivamente, che in pratica sono polverizzate
- Fratture che sono state generate da volate avvenute precedentemente a quella che deve essere realizzata. È bene sottolineare che l'abbattimento della parete avviene in modo sistematico secondo un determinato programma di lavori e conseguentemente la volata, tranne all'inizio della coltivazione, non avviene mai su un terreno vergine.
- Fratture parallele, o quasi, alle superfici libere che vengono generate dall'effetto di riflessione. Queste non sono quasi mai presenti alle spalle del foro mentre si trovano in prossimità delle superfici libere
- Le fratture radiali; esse sono convergenti sull'asse del foro e sono fitte in prossimità d'esso e si sviluppano in modo rilevante in più verso la superficie libera che non verso il massiccio roccioso. Chiaramente in fase di progettazione della volata si cerca di rendere massimo il numero delle superfici libere al fine di aumentare al massimo l'effetto dell'esplosione

### 1.2.7.1 Energia di vibrazione

I segnali trattati e analizzati nell'ambito estrattivo sono generati da fenomeni vibratorii di varia natura, come ad esempio volate, martelli demolitori, macchine operatrici; l'analisi di un segnale richiede una trattazione molto ampia e articolata, estremamente complessa e in questa parte verranno identificati gli aspetti principali che permettono la valutazione di un segnale acquisito. Solitamente il valore che viene ritenuto d'interesse è il valore massimo ( $U_{\max}$ ) oppure il valor efficace ( $A_{\text{rms}} = A/\sqrt{2}$ ). Quando una sorgente in superficie produce inizia ad oscillare emette un'energia vibrazionale ( $E_k$ ) che è legata alla massa vibrante e può essere definita come

$$E_k = \frac{1}{2} m u_{\max}^2 = \frac{1}{2} m (2\pi f A)^2$$

$$E_k = m \pi^2 f^2 A^2$$

Sulla base di quanto sopra esposto, sulla base dell'ipotesi di conoscenza del legame tra l'ampiezza d'oscillazione e la distanza dalla sorgente  $A(r)$ , e ricordando che l'ampiezza di un segnale vibratorio è strettamente legata alla profondità e alla frequenza, si riesce a definire una funzione matematica che definisce l'energia come una generica funzione del tipo  $A(f, z, r)$ , ossia essa esprime l'energia come una grandezza fortemente dipendente dell'ampiezza della vibrazione dalla frequenza, dalla profondità e dalla distanza. Da quanto esposto si può affermare che per poter calcolare l'energia di deformazione

$E_k$  in un generico punto, bisogna considerare la somma di contributi energetici di  $n$  oscilloscopi armonici secondo la seguente espressione:

$$E_k = \sum_{x=1}^n E_{kx}$$

$$E_{kx} = \iint 2\pi^2 f_x^2 \rho 2\pi A(r, z) r z dr dz$$

Per poter valutare il contributo energetico nel calcolo dell'integrale devono essere considerate tutte le distanze dalla sorgente vibratoria considerata fino alla posizione in cui si intende effettuare la rilevazione, considerando una profondità massima pari a  $z$ , dove  $z$  è uguale a  $z/\lambda x=2$ . Questo perché oltre tale profondità è possibile ritenere l'ampiezza delle onde  $R$  di valore trascurabile. Quanto esposto è uno dei metodi che possono essere utilizzati per poter calcolare in modo approssimato l'energia di vibrazione ed avere così un'indicazione di massima per poter definire una legge di trasferimento che possa creare una correlazione tra le vibrazioni indotte in un generico punto con la distanza generica dalla sorgente sismica  $A(r)$ . Tutte le considerazioni fatte, sono servite per definire una metodologia approssimativa in quanto, non tengono conto dei contributi energetici che vengono rilasciati e dissipati sotto forma di calore e che in un fenomeno esplosivo non sono trascurabili.

## 1.2.8 Metodologie d'accoppiamento trasduttore-terreno

Al fine di garantire un efficace contattato terreno-trasduttore affinché quest'ultimo segua correttamente il movimento del terreno l'accuratezza delle misurazioni, come già detto precedentemente è un aspetto fondamentale poiché deve garantire la trasmissibilità del segnale vibratorio dal terreno allo strumento di misurazione. Per poter vincolare il dispositivo al terreno tramite dei sistemi di fissaggio come la resina o colle può risultare a volte molto complesso e di impossibile applicazione. Basti pensare a tutte le asperità superficiali che si possono trovare in un terreno rurale o roccioso e che impediscono l'aderenza dello strumento al materiale. Per questo motivo molti ricercatori e anche le guida linea suggeriscono per misurazioni di livelli vibratorii in alta frequenza o lì dove il terreno sia disciolto (ad esempio un terreno di campagna o di cava). Teoricamente il dispositivo è progettato per fornire un output del segnale che sia proporzionale al movimento del terreno che deve misurato; nella pratica la funzione di trasferimento tra il punto di sollecitazione e il punto di misurazione e, al tempo stesso, tra la velocità della particella del terreno e la tensione d'uscita dello strumento, risulta essere non lineare e complessa da definire. Ciò costituisce

un aspetto estremamente rilevante da cui sorgono numerose problematiche nella misurazione dei livelli vibratori del terreno. In primo luogo lo strumento stesso, ad esempio nel caso di un velocimetro, ha una funzione interna di trasferimento che, al di sotto della frequenza di risonanza della molla, smorza il segnale ingresso. Poi l'onda che dal terreno si trasmette allo strumento, può essere distorta dal sistema d'accoppiamento che vincola lo strumento stesso al terreno. Quando un'onda sismica impatta su un sistema d'accoppiamento si verificano due fenomeni fisici dovuti alla presenza stessa del dispositivo di misurazione nel terreno che disturba il campo d'onda in ingresso. Il primo è una vibrazione indotta nel sistema di montaggio dello strumento come risposta all'onda incidente e può essere considerata come una sorgente secondaria che re-irradia energia nel terreno, ossia una risposta irradiante vibratoria. Il secondo meccanismo consiste dispersione elastica dell'onda (scattering) causato dal sistema di montaggio stesso ed è dovuto al contrasto delle impedenze acustiche del materiale costituente il dispositivo su cui è montato lo strumento e il suolo circostante al punto di misurazione. Da ciò ne deriva una riduzione dell'impulso energetico che arriva allo strumento e quindi una diminuzione del livello di sollecitazione misurato in funzione di come avviene la risposta all'onda (Mita et al., 1989). Se per ipotesi le proprietà elastiche del sistema di montaggio fossero esattamente le stesse del terreno circostante il punto di misurazione, si avrebbe un'uguaglianza d'impedenza che porterebbe ad una perfetta misurazione del movimento del terreno e qualsiasi sistema di fissaggio dello strumento garantirebbe una misurazione corretta. Ovviamente tale ipotesi non è applicabile alla realtà poiché l'impedenza del materiale è differente da quella del sistema di montaggio, in particolare questo avviene in quei terreni che hanno scarsa compattezza, detti anche terreni disciolti, i quali presentano un valore d'impedenza minore rispetto a quello del supporto, il quale risulta essere ovviamente più rigido. La qualità della misurazione di un segnale vibratorio può essere espressa come una funzione in frequenza determinata dal parametro  $T(f)$ , definito trasmissibilità, costituito dal rapporto tra la velocità di output  $V(f)$  del simografo e la quella del movimento del terreno  $V_{gr}(f)$  (de Silva, 2007). Tale trasmissibilità costituisce una misura dell'errore presente nella misura, mostrando l'accuratezza della misura alla frequenza d'interesse. Definendo  $V_m(f)$  la velocità dei sensori montati sul supporto, la trasmissibilità del segnale vibratorio può essere divisa in due termini principali:  $T_c(f)$  è il parametro che definisce la trasmissibilità tra il sistema d'accoppiamento e il terreno e  $T_{geo}(f)$  che tiene conto di tutte le componenti d'errore dovute alle parti meccaniche ed elettriche.

$$T(f) = \frac{V(f)}{V_{gr}(f)} = \frac{V_m(f)}{V_{gr}(f)} \frac{V(f)}{V_m(f)} = T_c(f) \cdot T_{geo}(f)$$

Questo parametro di trasmissibilità viene definito per via sperimentale vincolando saldamente lo strumento ad una piastra eccitante che simula il movimento del terreno, detta anche eccitatrice e di solito è fornito dal costruttore. Poiché di strumenti ne esistono diverse tipologie, ognuno dei quali ha una propria procedura di calibrazione, vi sono degli appositi standard di progettazione per i sismografi utilizzati per le misurazione delle esplosioni, che definiscono i limiti di tolleranza della trasmissibilità dell'apparecchio in funzione della frequenza. Le condizioni ideali di misura sono quelle in cui il vincolo dello strumento al suolo in modo perfetto e il terreno in oggetto non presenti nessuna fratturazione,(Blair, 1987), ma ovviamente nella realtà, come descritto precedentemente, le condizioni del suolo sono estremamente variabili a causa di molti fattori naturali; le proprietà geomorfologiche del materiale che costituisce il mezzo di propagazione, i vuoti, le spaccature superficiali e in profondità, la stratigrafia, sono tutti fattori che influenzano in modo tutt'altro che trascurabile la propagazione delle onde sismiche nel terreno. Questo fa sì che molto spesso la realizzazione dell'accoppiamento dello strumento al terreno sia difficoltosa. Sebbene vi sia un accordo generale sull'importanza delle modalità di vincolo del sensore al suolo, la trasmissibilità dei vari metodi utilizzati fino ad oggi è ancora oggetto di numerose controversie e dibattiti, sia riguardo le tecniche sperimentali sia per quelle proposte dalle linee guida (la maggior parte dei quali derivano da un lavoro già classico del Bureau of Mines degli Stati Uniti - Nichols et al., 1971). La scelta delle tecniche d'accoppiamento con le quali il trasduttore viene fissato al terreno dipende da due fattori fondamentali: le caratteristiche del terreno in cui deve essere effettuata la misurazione e i livelli d'accelerazione previsti. Infatti, valori elevati possono portare, se non vi è un buon sistema d'accoppiamento, allo spostamento relativo dello strumento rispetto al terreno e quindi all'invalidazione della misurazione. I metodi suggeriti in funzione del range dei valori sono sintetizzati nella seguente tabella

**Table 1**  
Coupling methods for measurements on rock.

Coupling	Expected vibration level		Source
	Qualitative	Quantitative <sup>a</sup>	
Free placed	Low	$a < 0.2 \text{ g}$	ISEE (2009); ISRM (1992)
Sandbagged	Very low	Non-defined	Instantel (2008)
	Low, medium	$a < 1.0 \text{ g}$	Konya and Walter (1991), ISEE (2009)
Anchored	Any	Any	Instantel (2008); ISEE (2009); ISRM (1992)

<sup>a</sup> a: acceleration.

Fig. 5: estratto delle metodologie d'accoppiamento (*Performance of some coupling methods for blast vibration monitoring, Segarra*)

Il sistema di supporto con cui si vincola il dispositivo al terreno, condiziona la risposta del segnale a determinate frequenze. Ciò è stato dimostrato in campagne sperimentali dove segnali provenienti

dalla stessa esplosione, hanno dato risultati diversi negli stessi punti di misura su dispositivi montati con differenti sistemi di montaggio. Le variazioni della PPV (Peak Particle Velocity) possono spaziare dal 75 fino al 140 %. Anche variando la tipologia di sperimentazione, ossia stesse identiche modalità di montaggio ma rilevamenti in differenti punti d'acquisizione, sono emerse considerevoli variazioni sia dei picchi dei valori assoluti che degli spettri in frequenza, e, di conseguenza anche sui valori di trasmissibilità interna, ottenuti. Da qui si è capito come le variazioni delle condizioni di contatto trasduttore-terreno, ad esempio la porzione d'area di contatto dello strumento con il terreno, possono influenzare notevolmente i risultati. Un aspetto molto complesso e articolato riguarda lo studio di questa problematica attraverso la ricerca basata su modelli teorici svolti e risultati sperimentali ottenuti con esperimenti realizzati in laboratorio. Il limite di base è che le sperimentazioni di laboratorio possono descrivere solo casi limitati, poiché le reali condizioni del suolo, come le proprietà superficiali, i gradienti di densità, la non linearità della risposta del terreno, la qualità del sistema di montaggio, il contenuto di umidità del suolo, la compattazione del terreno intorno al punto di misura, influenzano la trasmissibilità del segnale ma sono molto complessi da replicare. Pertanto, sebbene alcuni di questi parametri possano essere analizzati attraverso modelli teorici e sperimentazione in laboratorio, risulta molto difficile poter definire dei modelli univoci per l'individuazione di un modello corretto. Una tecnica utilizzata per studiare il comportamento del sistema di montaggio è quello dello shaker-test dove viene riprodotta una piccola porzione di terreno che viene messa in vibrazione per replicare in scala il movimento sismico. Questo tipo di test è molto utile perché permette di studiare il re-irraggiamento dell'onda che impatta sullo strumento posizionato su un sottile strato di terreno sovrastante lo strato roccioso ed essa è legata alla profondità dello strato (Blair, 1989). Il problema di tale metodologia è che si genera una complessa interazione tra il materiale che delimita lo shaker e il materiale stesso di simulazione, ossia vengono introdotte delle risonanze che nella realtà delle propagazioni nel campo non sono presenti. Sulla base di questa problematica si è sviluppata una ricerca volta a definire una metodologia che permetta di ottimizzare l'esigenza d'avere una buona trasmissibilità del segnale tra il terreno e lo strumento e al tempo stesso l'aderenza fra i due al fine d'evitare eventuali slittamenti che porterebbero all'invalidazione della misurazione. Un'altra tecnica consiste nell'effettuare delle prove in situ movimentando il sistema di montaggio stesso al fine di eliminare l'influenza del contenitore dello shaker e poter studiare la risposta di re-irraggiamento del dispositivo. L'ampiezza della risonanza della risposta d'irraggiamento del dispositivo potrebbe essere ridotta diminuendo la massa del geofono, che equivale ad aumentare lo smorzamento del sistema d'accoppiamento terreno-trasduttore. Purtroppo questo metodo, pur eliminando il problema delle riflessioni delle pareti, non permette, però, uno studio del fenomeno dello scattering. Per cercare d'ovviare a queste problematiche cercando d'avere una condizione il più

realistica possibile tra l'onda che viaggia nel terreno e il sistema di montaggio del trasduttore, sono stati realizzati dei test sperimentali in piccola scala; questa tipologia di test può essere utilizzata in prima approssimazione solo per una valutazione delle prestazioni del sistema di montaggio in considerazione ma non è possibile definire una risposta univoca in quanto il limite fondamentale è che è nota soltanto la risposta del sistema ma rimane sconosciuta la sorgente, a differenza dei test con lo shaker dove il segnale di input è noto sia come ampiezza che come contenuto in frequenza (Johnson, 1962, Grant, 1983). Un'ultima modalità di simulazione consiste nell'effettuare delle simulazioni in scala piena con delle mine per riprodurre gli effetti dell'esplosione delle mine nel terreno. Tuttavia anche in questo caso risulta complicato l'individuazione di un modello poiché risulta difficile riuscire a mantenere le condizioni di contatto trasduttore-terreno, concludendo che il sistema di montaggio deve essere posto in un in una largo e profondo scavo, e lo strumento deve essere vincolato compattando attentamente tutto il terreno attorno al supporto. In conclusione di quanto esposto solamente la tecnica del piccolo shaker da campo sembra che possa fornire risultati attendibili sulla risposta di re-irraggiamento dell'onda sul sistema di montaggio. Le altre forme di metodologia sperimentale hanno il grande limite di introdurre delle riflessioni delle pareti che non sono presenti nella realtà e la difficoltà nel determinare la risposta di un sistema dovuta alla non conoscenza del segnale di input. Infine è sempre difficile poter riprodurre le onde piane che poi effettivamente vanno ad impattare sul sistema di montaggio e quindi poter ottenere delle misurazioni dove sia possibile separare e distinguere i diversi contributi d'energia vibratoria. Per poter comprendere meglio le problematiche dell'accoppiamento sul terreno, sono stati svolti test in laboratorio con varie modalità di montaggio. Uno riferimento importante è lo studio realizzato da (Segarra et al, 2014) dove sono state realizzate prove con i trasduttori, due sismografi, vincolati su una piastra vibrante, che costituisce la sorgente vibratoria, attraverso differenti modalità di fissaggi. In un caso sono stati posizionati liberamente, in un altro fissati tramite un sacco posto al di sopra d'essi e infine ancorati alla superficie per mezzo del nastro adesivo. L'analisi dei dati è avvenuta su un ampio spettro in frequenza, dai 2 ai 200 Hz, e con diversi livelli di sollecitazione (5 mm/s o 20 mm/s), evidenziando come l'accoppiamento libero e con il sacco risultano modalità d'accoppiamento alterano la trasmissibilità del segnale dipende dal movimento del terreno sia in termini di velocità di picco che di spettro in frequenza. Solamente alle basse frequenze (17 Hz per il vincolo libero e 10 Hz per l'utilizzo del sacco) e con velocità contenute (valori inferiori ai 20 mm/s) le misure sono risultate avere un accettabile grado d'accuratezza. In particolare quando il dispositivo è appoggiato liberamente, fino ai 50 Hz il segnale risulta amplificato con un errore atteso massimo di 1 dB, mentre al di sopra di tale valore il segnale risulta smorzato, con un errore fino a 7.5 dB sopra i 100 Hz. Quando il vincolo è costituito dal sacco posto sullo strumento, si ha un errore atteso di 1.6dB alle

frequenze sopra i 100 Hz mentre si ha un effetto di smorzamento al di sotto dei 40Hz con un errore atteso di 1.47 dB. Invece ancorando il dispositivo al terreno, indipendentemente dalle modalità di montaggio e dai livelli di vibrazioni misurati, le condizioni di vincolo permettono un'ottima trasmissibilità del segnale (i valori  $T_c$  sono quasi prossimi ad uno).

## 1.2.9 La misura delle vibrazioni meccaniche

### 1.2.9.1 Le vibrazioni meccaniche

Con il termine vibrazione ci si riferisce in generale ad una oscillazione attorno ad un punto d'equilibrio. Alcuni esempi di fenomeni vibratorii sono la luce, il suono, il calore, le onde elettrodinamiche. Le vibrazioni di natura meccanica possono essere vantaggiosamente utilizzate quando programmate in modo opportuno (trapani ultrasuoni, macchine di abrasione, di vagliatura), ma possono diventare particolarmente nocive quando siano presenti con ampiezze elevate e con particolari frequenze in tutti i settori della meccanica, ma anche alle persone o agli edifici. Oscillazione e vibrazione sono termini che indicano lo stesso fenomeno fisico, perciò sono sinonimi, tuttavia solitamente con oscillazione si indicano fenomeni più lenti, come il periodo di oscillazione del pendolo, mentre con vibrazione, termine più moderno, si intendono fenomeni più rapidi, come la vibrazione di un diapason. Il modo forse più semplice per descrivere i parametri caratteristici di una vibrazione fa riferimento al sistema massa ( $m$ ) molla ( $k$ ) mostrato in Figura 2.1. La molla è vincolata a deformarsi elasticamente in una sola direzione (sistema ad 1 gdl) fino a raggiungere una configurazione di equilibrio statico. Successivamente la massa viene allungata di  $A$  e il sistema viene lasciato libero di evolvere, descrivendo un moto armonico del tipo:

$$x(t) = x_M \sin(\omega t)$$

essendo  $\omega$  la pulsazione, legata al periodo  $T$  e alla frequenza  $f$  dalle relazioni già illustrate precedentemente ;  $f = T^{-1}$  e  $\omega = 2\pi f$ .

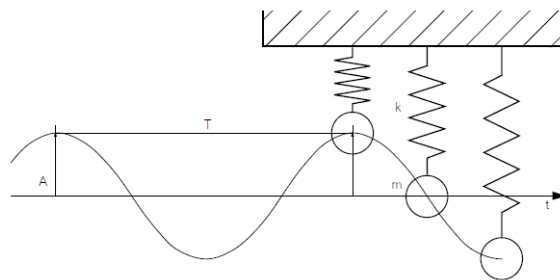


Fig. 6: moto di oscillazione libera di una massa  $m$  collegata ad una molla  $k$ . In evidenza l'ampiezza di picco ( $A$ ) e il periodo ( $T$ )

Due vibrazioni diverse che sollecitano lo stesso punto interagiscono componendosi tra loro seguendo il principio di sovrapposizione degli effetti, si parla allora di interferenza, costruttiva quando si sommano, distruttiva quando si elidono. Se due vibrazioni hanno frequenza molto simile tra loro, si verifica il fenomeno dei battimenti, ovvero l'ampiezza del moto risultante varia con una frequenza dipendente dalla differenza della frequenza delle due vibrazioni. Interessante risulta la composizione di due vibrazioni su due direzioni ortogonali con la stessa frequenza sfasate tra loro di  $\pi/2$  radianti: il moto risultante è ellittico, come quello descritto dalle onde di Rayleigh.

### 2.1.1 Serie di Fourier

Se una funzione periodica  $f(x)$  di periodo  $(0; 2\pi)$  non è armonica come la (2.1), può essere rappresentata da una serie infinita di funzioni armoniche multiple della fondamentale, la serie di Fourier:

$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(nx) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(nx)$$

essendo  $a_n$ ;  $b_n$  le ampiezze dei moti armonici con frequenze multiple della fondamentale ed  $a_0$  il valore medio della funzione, di seguito definiti

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(x) dx$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \cos(nx) dx$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \sin(nx) dx$$

Si può estendere il concetto di serie di Fourier anche a funzioni non periodiche. Tenendo presente che il periodo di una funzione periodica è il più piccolo intervallo dopo di cui la funzione si ripete, si può pensare ad una funzione non periodica come una funzione periodica con periodo  $T$  infinito, in questo caso si parla di trasformata di Fourier. Demodulando un segnale nelle sue componenti armoniche si può analizzare il suo contenuto energetico in frequenza.



### 2.1.2 Caratterizzazione di una vibrazione

In generale frequenza e ampiezza non sono costanti nel tempo, quindi per caratterizzare una vibrazione nel dominio del tempo si usano diversi parametri, tra i quali si ricordano:

- valore istantaneo, ovvero il valore  $x(t)$  che la variabile  $x$  assume all'istante  $t$
- ampiezza o valore di picco o valore massimo  $x_M$  che la variabile  $x$  assume nell'intervallo di tempo  $T$
- valore di doppio picco, o ampiezza picco-picco, la distanza tra due picchi opposti tra loro, nel moto sinusoidale è  $2x_M$
- valore medio  $x_m$ , la media dei valori istantanei:

$$x_m = \frac{1}{T} \int_T x(t) dt \text{ per segnali continui}$$

$$x_m = \frac{\sum_i^N x_i}{N} \text{ per segnali discreti}$$

Nel caso di moto sinusoidale ha senso parlare di media sul semiperiodo, nel qual caso risulta

$$x_m = :637x_M$$

- valore efficace, o  $RMS^2$ , introdotto in elettronica per stimare il calore prodotto per effetto Joule, rappresenta quel valore che causerebbe lo stesso effetto di un valore modulato nel tempo. L'RMS è la misura più significativa di ampiezza in quanto tiene conto della storia dell'onda nel tempo e dà un valore di ampiezza direttamente correlata al contenuto energetico della vibrazione.

$$x_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [x(t)]^2 dt} \text{ per segnali continui}$$

$$x_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_i^N x_i^2}{N}} \text{ per segnali discreti}$$

Nel moto sinusoidale, risulta  $x_{RMS} = :707x_M$ .

I livelli di vibrazione possono essere espressi, oltre che in unità metriche, in grandezze logaritmiche; la scala impiegata è quella del decibel (dB), ovvero il decimo del bel (B), definito come il logaritmo base dieci del rapporto fra due valori assunti da una stessa grandezza, quindi il dB è un parametro

adimensionale. Nelle misure di vibrazioni si usa rapportare i quadrati dei livelli efficaci di due grandezze, di cui una di riferimento ( $x_0$ ), come di seguito riportato:

$$dB = 10 \log_{10} \left( \frac{x}{x_0} \right)^2 = 20 \log_{10} \left( \frac{x}{x_0} \right)$$

I livelli di riferimento sono definiti in normativa dallo standard ISO 1683:2008 e sono riassunti nella tabella 3.1. L'impiego di scale logaritmiche per la rappresentazione delle vibrazioni è molto d'uso nella pratica di misura se il segnale è espresso in banda larga (banda d'ottava o 1/3 di banda d'ottava), in particolare se occorre applicare particolari filtri di pesatura in frequenza come quelli imposti dalle normative ISO 2631 e 5349. Uno dei vantaggi offerti è quello di poter comprimere entro una scala ragionevolmente ridotta una gamma di valori molto estesa; si sortisce, infatti, l'effetto di dilatare sul grafico le frequenze o i valori di ampiezza più bassi e di comprimere quelli più elevati, dando così la stessa percentuale di risoluzione sull'intero grafico, pur mantenendo le dimensioni entro limiti ragionevoli. Si è accennato alle bande di ottava e ai terzi di banda di ottava. La banda di ottava è un modo per dividere lo spettro in frequenza di una misura in intervalli di frequenze, le bande, definite dalle formule:

$$f_s = f_i ; f_c = \sqrt{f_s f_i}$$

per i terzi di ottava valgono le stesse relazioni, solo si avranno tre bande all'interno della banda di ottava. Con riferimento alla figura 7, la natura di una vibrazione può essere prevedibile a partire dalla conoscenza di precedenti ricorrenze, allora si parla di fenomeno deterministico, o può essere caratterizzata dall'aver parametri che dipendono da leggi statistiche, si parla in tal caso di moto stocastico o di vibrazioni random. Tra i moti oscillatori deterministici periodici rientrano, ad esempio, le vibrazioni generate dalle macchine, caratterizzate da componenti armoniche con pulsazioni multiple della velocità di rotazione degli alberi rotanti. Tra i moti random con caratteristiche stazionarie rientrano, ad esempio, il moto ondoso, il vento o la variazione altimetrica dovuta alle irregolarità dell'asfalto nei profili stradali. Tra i fenomeni non periodici rientrano gli urti nelle varie forme o le vibrazioni che si manifestano nei transitori di avvio o di arresto delle macchine. Alle vibrazioni deterministiche si sovrappongono di solito delle vibrazioni casuali, che potranno essere considerate come disturbi (o rumore). I segnali di vibrazione, deterministici o random, presentano solitamente molteplici componenti armoniche aventi differente frequenza e fase; la rappresentazione di una vibrazione nel dominio del tempo consente solo di stimare alcuni parametri di sintesi (picco, picco-picco, RMS, etc.) e l'analisi in frequenza si rende indispensabile per potere stimare il contributo fornito dalle singole armoniche.

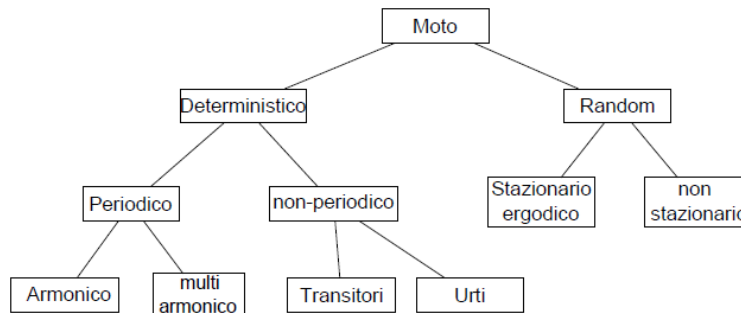


Fig. 7: classificazione delle tipologie di vibrazioni

### 1.2.9.2 Oscillazioni libere

Si consideri l'esempio della figura 6, dove una molla con rigidezza  $k$  collegata ad una massa  $m$  viene lasciata libera di oscillare in una sola direzione, discostandosi di  $x$  dal suo punto di equilibrio. Ricordando la seconda legge della dinamica  $F = ma$  e la forza di richiamo elastica  $F = -kx$ , l'equazione di equilibrio dinamico tra la massa inerziale e la forza di richiamo elastica si scrive:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -kx$$

che nella sua forma implicita si scrive:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + kx = 0$$

che è l'equazione ridotta del moto, differenziale ordinario del secondo ordine a coefficienti costanti. La soluzione generale della precedente formula, espressa nella forma esponenziale, è data da:

$$x(t) = Ae^{x_1 t} + Be^{x_2 t}$$

dove con  $e$  si intende la base dei logaritmi neperiani,  $A; B$  due costanti arbitrarie che dipendono dalle condizioni iniziali del moto (spostamento e velocità) e con  $x_1$  ed  $x_2$  le radici dell'equazione ausiliaria  $mx^2 + k = 0$ , ovvero:

$$x_{1,2} = \pm i \sqrt{\frac{k}{m}} = \omega$$

dove con  $\omega$  si è indicata la pulsazione del sistema massa-molla. La soluzione generale dell'equazione del moto può essere riscritta nella seguente forma:

$$x(t) = Ae^{i\omega t} + Be^{-i\omega t}$$

tenendo da conto le relazioni di Eulero qui riportate:

$$e^{i\omega t} = \cos(\omega t) + i \sin(\omega t)$$

$$e^{-i\omega t} = \cos(\omega t) - i \sin(\omega t)$$

e si può riscrivendo tutto in forma trigonometrica si ha:

$$x(t) = A \sin(\omega t + \varphi) + B \cos(\omega t)$$

Ponendo come condizioni iniziali lo spostamento massimo  $A = X_M$  e la velocità nulla  $B = 0$ , si ottiene:

$$x(t) = x_M \sin(\omega t + \varphi)$$

la stessa equazione introdotta all'inizio del precedentemente. Le derivate sono la velocità e l'accelerazione istantanee:

$$\frac{dx(t)}{dt} = \omega x_M \cos(\omega t + \varphi)$$

$$\frac{d^2x(t)}{dt^2} = -\omega^2 x(t)$$

Sostituendo un processo di sostituzione si ottiene la relazione  $-m \omega^2 + kx = 0$ , da cui si ottiene la soluzione cercata:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

con  $\omega_0$  la pulsazione naturale di un sistema elastico non smorzato, ad un grado di libertà, legata alla frequenza propria  $f_0$  del sistema dalla solita relazione  $\omega = 2\pi f_0$ . La pulsazione naturale di un sistema rappresenta l'oscillazione naturale di un qualsiasi sistema elastico ideale perturbato dalla condizione di quiete, oscillazione che in assenza di smorzamento di mantiene per un tempo indefinito.

### 1.2.9.3 Vibrazioni libere smorzate

L'ipotesi delle equazioni precedenti sono quelle di sistema ideale che non tiene conto dello smorzamento, ovvero degli effetti dissipativi che causano una progressiva riduzione delle ampiezze massime di oscillazioni successive. Le resistenze dissipative sono, nella maggior parte dei casi,

dovute ad attrito, ossia lo sfregamento delle parti che compongono il sistema vibrante (massa e molla) contro solidi, liquidi, aria o anche tra le molecole costituenti il materiale di cui sono composti gli elementi vibranti. Lo smorzamento prodotto da questo tipo di resistenza è detto di tipo viscoso; questa resistenza costituisce una forza che è diretta sempre in senso contrario al moto ed è, in ogni istante, proporzionale alla velocità del movimento. Tenendo conto della forza smorzante sopra introdotta, si può riscrivere l'equazione del moto nella forma:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + kx = -c \frac{dx}{dt} = -c \dot{x}$$

essendo  $c$  il coefficiente di smorzamento. Nella forma implicita l'equazione del moto ha un nuovo termine e diventa:

$$m \ddot{x} + c \dot{x} + kx = 0$$

la soluzione generale della (2.19) è la (2.10) che si riscrive nel modo seguente:

$$x = Ae^{r_1 t} + Be^{r_2 t} = Ce^{r t}$$

essendo  $r_1; r_2$  le radici dell'equazione ausiliaria ottenuta sostituendo nella prima equazione le derivate prima e seconda della formula sopra si ottiene :

$$r_1 = -\zeta + \sqrt{\zeta^2 - \omega_0^2}$$

$$r_2 = -\zeta - \sqrt{\zeta^2 - \omega_0^2}$$

Essendo  $\omega_0$  la pulsazione naturale già definita e  $\zeta$  il fattore di smorzamento così definito:

$$\zeta = \frac{c}{2m}$$

Osservando i radicandi si nota che possono esistere tre possibilità:

1.  $\zeta > \omega_0$  allora  $r_1; r_2$  sono radici reali e negative e non è possibile alcun moto oscillatorio. Il sistema è sovrasmorzato e lo smorzamento si dice ipercritico, ottenendo

$$x(t) = Ae^{-r_1 t} + Be^{-r_2 t}$$

e mostra chiaramente che  $x$  decresce senza cambiare mai di segno;

2.  $\zeta = \omega_0$  condizione di smorzamento critico. In questo caso  $r_1 = r_2 = -\omega_0$  e il sistema si smorza molto rapidamente senza vibrazione libera.

Si ottiene così:

$$x = (C + Dt)e^{-\zeta t}$$

3.  $\zeta < \omega_0$  in questo caso si può procedere come già fatto, ottenendo:

$$r_{1,2} = -\zeta \pm i\omega_d$$

essendo  $\omega_d$  la pulsazione smorzata, definita

$$\omega_d = \sqrt{\omega_0^2 - \zeta^2}$$

e rappresenta la velocità di vibrazione di un sistema smorzato, sempre minore della pulsazione naturale (e così anche le relative frequenze), ottenendo:

$$x = e^{-\zeta t} x_M \cos(\omega_d t - \varphi)$$

equazione che mette in evidenza che l'ampiezza  $x$  di una vibrazione di un sistema vibrante avente fattore di smorzamento  $\zeta$ , frequenza angolare smorzata  $\omega_d$  e ampiezza massima  $x_M$  è soggetta ad una riduzione esponenziale nel tempo, secondo l'esponenziale  $e^{-t}$ .

Per valutare lo smorzamento di un sistema vibrante si usa il decremento logaritmico, definito come

$$\delta = \frac{c\pi}{m\omega_d} = \log_e \frac{x(t)}{x(t + T_d)} = 2.3 \log_{10} \frac{x_n}{x_{n+1}}$$

e corrisponde al logaritmo naturale del rapporto tra le ampiezze di due oscillazioni successive del sistema smorzato. In realtà questa è un'unità di misura troppo piccola che può portare a grossi errori, quindi usualmente si misura il rapporto logaritmico tra misure lontane tra loro e si divide per il numero di oscillazioni. Si possono misurare le caratteristiche dissipative di un sistema vibrante anche misurando l'intervallo di tempo  $\Delta t$  durante il quale l'ampiezza dell'oscillazione smorzata si riduce di un certo valore, per esempio come si fa in acustica con il tempo di decadimento  $\theta$ , ovvero il tempo richiesto da una vibrazione smorzata a diminuire la sua ampiezza di mille volte, analogo al tempo di riverberazione usato in acustica architettonica:

$$\theta = \frac{\log_e 1000}{f_d \delta}$$

### 1.2.9.4 Vibrazioni forzate

Con vibrazione forzata si intende una vibrazione imposta ad un sistema, del quale si studia la risposta. Il modo più semplice per descrivere un sistema vibrante è attraverso l'esempio del sistema massa-molla smorzatore ad un grado di libertà, descritto in figura 6. Quando il sistema viene sottoposto ad una forzante  $F$ , le forze inerziale, smorzante e elastica non si bilanciano più tra loro e l'equazione del moto diventa

$$m \ddot{x} + c \dot{x} + kx = F$$

La soluzione generale di questa equazione differenziale ordinaria di secondo ordine a coefficienti costanti è:

$$x = x_c + x_p$$

dove:

- $x_c$  è detta soluzione complementare dell'equazione omogenea
- $x_p$  è la soluzione particolare dell'equazione

la soluzione particolare di una forzante di tipo sinusoidale  $F = F_M \cos \omega t$  è:

$$x_p(t) = \frac{F_M \cos(\omega t - \varphi)}{\sqrt{\omega^2 c^2 + (k - m\omega^2)^2}} \quad \text{con} \quad \text{tg} \varphi = \frac{c\omega}{k - m\omega^2}$$

mentre nel caso di un impulso a gradino vale  $x_p = F_M/k$ . Lo sfasamento  $\varphi$  rappresenta lo sfasamento  $\phi$  tra la vibrazione della forzante e la vibrazione del sistema. Un modo più interessante di vedere la (2.32) è il seguente:

$$x_p(t) = x_M \cos(\omega t - \varphi) = \frac{F_M \cos(\omega t - \varphi)}{\sqrt{(1 - n^2)^2 + (2n\zeta_r)^2}} \quad \text{con} \quad \text{tg} \varphi = \frac{2n\zeta_r}{1 - n^2}$$

Essendo

- $n = \omega/\omega_0$  il rapporto della frequenza della forzante alla frequenza della naturale;
- $\zeta_r = \zeta/\omega_0$  il fattore di smorzamento ridotto.

Le relazioni descritte sono tra le più importanti nello studio delle vibrazioni meccaniche perché permettono di definire la curva di risposta di un sistema vibrante quando venga sottoposto all'azione

di una forza eccitante esterna si tipo sinusoidale. Negli studi sulle vibrazioni meccaniche si usa spesso l'impedenza meccanica per indicare con immediatezza quale sia la resistenza opposta da un sistema elastico ad essere posto in vibrazione. Il valore di questa grandezza è espresso dalla relazione:

$$Z = \frac{F_M}{\dot{X}_M}$$

dove:

- $Z$  è il valore complesso dell'impedenza;
- $F_M$  è il vettore che indica il valore massimo della forza eccitante
- $\dot{X}_M$  è il valore complesso della velocità del moto vibratorio  $\dot{X}_M = I \omega X_M$

L'impedenza meccanica è stata così definita per la sua analogia con la grandezza omonima usata in elettrotecnica ed in valore assoluto è definita nel modo seguente:

$$Z = \sqrt{c^2 + \left(\omega m - \frac{k}{\omega}\right)^2}$$

Se  $\omega m > k/m$  l'impedenza viene detta massiva, se  $\omega m < k / \omega$  viene detta elastica, mentre se entrambi i termini si equivalgono l'impedenza diventa uguale al coefficiente di smorzamento  $Z = c$  e ci si trova in condizione di risonanza e la velocità della massa del sistema elastico assume un valore molto elevato che trova un limite dovuto solo allo smorzamento  $c$ .

## 1.2.10 Riferimenti normativi in tema di vibrazioni

La problematica dell'impatto ambientale dei fenomeni vibratorii è stata oggetto di molti studi nel corso degli anni poiché i danni conseguenti alle strutture dovuti a sollecitazioni meccaniche possono essere permanenti e tutt'altro che trascurabili. Si è cercato d'identificare, sulla base delle vaste esperienze in ambito di ricerca e professionale, di stabilire dei criteri di sicurezza basati su valori limiti di soglia al fine d'evitare danni alle strutture o disturbo agli abitanti delle zone limitrofe alla sorgente vibratoria, come una linea ferroviaria per il passaggio dei tram e dei treni, un sito industriale oppure estrattivo. Ovviamente definire dei parametri univoci che garantiscano in modo assoluto la tutela delle strutture in oggetto non è stato semplice né immediato. Le normative nazionali ed internazionali hanno stabilito che tali limiti debbano prendere in considerazione diversi parametri caratteristici dell'onda vibratoria: il range di frequenze, l'ampiezza del segnale, il numero di eventi transitori, come



si sviluppa nel tempo il fenomeno (continuo o transitorio), il tempo di esposizione, l'influenza del suolo. La velocità massima è il parametro che più di tutti viene preso a riferimento poiché descrive nel modo più accurato la sollecitazione che può essere causa di spostamenti differenziali di fondazioni, innesco di frane in zone caratterizzate da fondazioni in equilibrio limite, e, per valori più elevati, fratture negli ammassi rocciosi che potrebbero portare a successivi crolli. Conseguentemente a queste motivazioni appena esposte le normative vigenti esprimono i massimi livelli di sollecitazione vibratoria in termini di massima componente di velocità delle particelle, ossia come massimo vettore di sollecitazione. La commissione vibrazioni dell'UNI ha elaborato una serie di norme, recepite da quasi tutti i paesi, che, pur con qualche punto di scarsa chiarezza, coprono l'intera problematica delle vibrazioni negli edifici: esse trattano la valutazione del disturbo indotto alle persone presenti nei locali, la valutazione dei possibili danni strutturali, e forniscono alcune indicazioni sull'implementazione della metodica di misura. Il sistema normativo italiano fornisce un quadro generale per poter effettuare una valutazione delle misure di vibrazioni, prendendo come elemento di riferimento gli standard internazionali definiti in questo ambito. Purtroppo alcuni elementi ancora risultano essere non chiari, generando così alcune lacune metodologiche di valutazione; una delle più rilevanti è sicuramente l'assenza di un metodo di stima dei valori che tenga in considerazione le caratteristiche morfologiche del terreno in cui avviene la propagazione. Oltre a ciò non vi sono vincoli sulla scelta della modalità di accoppiamento tra trasduttore e superficie di misura, che costituisce un importantissimo elemento della catena di misura. Un importante ed esauriente riferimento normativo è costituito dalla norma ISO 4866, dove le disposizioni e le linee guida adottate come principale riferimento nella maggior parte delle normative nazionali, vengono definite e illustrate nei loro contenuti e applicazioni. Le uniche norme di carattere specifico a cui far riferimento sono pertanto tecniche ISO ed UNI (Ente Italiano di Unificazione) ovvero DIN, e riguardano la strumentazione di misura, la metodologia di indagine, nonché dei valori limite scaturiti da prove tecniche e criteri di valutazione dei livelli vibrazionali a partire dagli effetti provocati da queste sulle strutture edilizie.

Per gli scopi del seguente lavoro sono stati presi in considerazione:

- UNI 9614 – marzo 1990 – “Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo”.
- UNI 9916 – novembre 1991 – “Criteri di misura e valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici”.
- UNI 11048:2003 “Vibrazioni meccaniche ed urti – Metodo di misura delle vibrazioni negli edifici al fine della valutazione del disturbo”
- DIN 4150 e BS 7385

Di queste, risultano fondamentali, le norme UNI 9614 ed UNI 9916.

### 1.2.10.1 UNI 9614 – Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo

La norma definisce il metodo di misura delle vibrazioni di livello costante, non costante od impulsive, gli assi di misura, i tipi di locali e di edifici, i periodi diurno e notturno, la soglia di percezione delle vibrazioni, nonché i metodi di acquisizione, elaborazione e di presentazione dei dati. La valutazione del disturbo è effettuata sulla base del valore di accelerazione R.M.S. ponderato in frequenza, il quale è confrontato con una serie di valori limite dipendenti dal periodo di riferimento (giorno, dalle 7:00 alle 22:00, e notte, dalle 22:00 alle 7:00) e dalle destinazioni d'uso degli edifici. Dato che gli effetti prodotti dalle vibrazioni sono differenti a seconda della frequenza delle accelerazioni, vanno impiegati dei filtri che ponderano le accelerazioni a seconda del loro effetto sul soggetto esposto. Tali filtri rendono tutte le componenti dello spettro equivalenti in termini di percezione e quindi di disturbo. Il filtro per le accelerazioni che si trasmettono secondo l'asse z prevede un'attenuazione di 3 dB per ottava tra 1 e 4 Hz, un'attenuazione nulla tra 4 e 8 Hz ed un'attenuazione di 6 dB per ottava tra 8 e 80 Hz. Il filtro per le accelerazioni che si trasmettono secondo gli assi x e y prevede un'attenuazione nulla tra 1 e 2 Hz e un'attenuazione di 6 dB per ottava tra 2 e 80 Hz. Nell'appendice della norma UNI 9614, che non costituisce parte integrante della norma, si indica che la valutazione del disturbo associato alle vibrazioni di livello costante deve essere svolta confrontando i valori delle accelerazioni complessive ponderate in frequenza, o i corrispondenti livelli più elevati riscontrati sui tre assi, con una serie di valori limite riportati nei prospetti II e III:

- Per il disturbo dovuto a vibrazioni di livello costante e non costante

Tabella 2: Valori limite per vibrazioni di livello costante e non costante (asse z)

Destinazione d'uso	a [m/s <sup>2</sup> ]	L <sub>w</sub> [dB]
Aree critiche	5.0 *10 <sup>-3</sup>	74
Abitazioni (Notte)	7.0 *10 <sup>-3</sup>	77
Abitazioni (Giorno)	10.0 *10 <sup>-3</sup>	80
Uffici	20.0*10 <sup>-3</sup>	86
Fabbriche	40.0 *10 <sup>-3</sup>	92

Tabella 3: Valori limite per vibrazioni di livello costante e non costante (assi x, y)

Destinazione d'uso	a [m/s <sup>2</sup> ]	L <sub>w</sub> [dB]
Aree critiche	3.6 *10 <sup>-3</sup>	71
Abitazioni (Notte)	5.0 *10 <sup>-3</sup>	74
Abitazioni (Giorno)	7.2 *10 <sup>-3</sup>	77
Uffici	14.4*10 <sup>-3</sup>	83
Fabbriche	28.8 *10 <sup>-3</sup>	89

Quando i valori o i livelli delle vibrazioni in esame superano i limiti, le vibrazioni possono essere considerate oggettivamente disturbanti per il soggetto esposto. Nel caso di vibrazioni di tipo impulsivo è necessario misurare il livello di picco dell'accelerazione complessiva ponderata in frequenza; tale livello deve essere successivamente diminuito di 3 dB al fine di stimare il corrispondente livello efficace.

- Per il disturbo dovuto a vibrazioni di livello impulsivo

Tabella 4: valori limite per vibrazioni di livello impulsivo

Destinazione d'uso	$a_w(z)[m/s^2]$	$a_w(x-y)[m/s^2]$
Aree critiche	$5.0 \cdot 10^{-3}$	$3.6 \cdot 10^{-3}$
Abitazioni (Notte)	$7.0 \cdot 10^{-3}$	$5.0 \cdot 10^{-3}$
Abitazioni (Giorno)	0.3	0.22
Uffici	0.64	0.46
Fabbriche	0.64	0.46

All' Art. 5 la stessa norma, fornisce i valori di accelerazione e livello relativi alla soglia di percezione relativamente all'individuo che staziona all'interno di un edificio interessato da vibrazioni, soglia che risulta:

$$a_z = 5,0 \cdot 10^{-3} m/s^2 \quad L_z = 74 dB$$

$$a_{x,y} = 3,6 \cdot 10^{-3} m/s^2 \quad L_{x,y} = 71 dB$$

L'analisi in frequenza delle vibrazioni va effettuata in bande di 1/3 di ottava nel campo da 1 a 80 Hz (estremi inclusi). Le vibrazioni vanno rilevate nel punto più significativo del locale o dell'edificio interessato dalle vibrazioni, orientando l'accelerometro secondo la terna di assi ortogonali ad un'altezza dal piano pavimento pari a m 1.20 ed orientati secondo le direttrici:

- Verticale: asse  $z$ , ortogonale al pavimento;
- Orizzontale: asse  $x$ , parallela al piano pavimento ed ortogonale agli assi  $y$  e  $z$ ;

### 1.2.10.2 UNI 9916 – Criteri di misura e valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici.

La normativa UNI 9916 del 2004 fornisce una guida per la scelta di metodi appropriati di misura e di trattamento dei dati per la valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici. La norma individua la velocità come grandezza da misurare, ottenuta sia mediante l'utilizzo di velocimetri, sia attraverso

integrazione di segnali accelerometrici. Le vibrazioni devono essere misurate sia in direzione verticale che in due direzioni orizzontali ortogonali, queste ultime scelte possibilmente con riferimento agli assi principali dell'edificio. Le modalità di trattamento dei dati dipendono dalla natura dei segnali da analizzare, di tipo deterministico o non deterministico (aleatorio), stazionario o non stazionario, periodico o non periodico, dalla loro durata e distribuzione di energia nel dominio della frequenza.

In particolare la normativa UNI9916 considera due diverse definizioni di velocità:

- Velocità di picco puntuale (p.p.v. - “peak particle velocity”), definita come il valore massimo del modulo del vettore velocità misurato simultaneamente lungo le due componenti orizzontali e la verticale.
- Velocità di picco di una componente puntuale (p.c.p.v. – “peak component particle velocity”), definita come il valore massimo del modulo di una delle tre componenti ortogonali misurate simultaneamente.

Tale norma non fornisce limiti ben definiti ma fornisce una guida relativa ai metodi di misura, di trattamento dei dati, di valutazione dei fenomeni vibratorii allo scopo di permettere la valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici, con riferimento alla loro risposta strutturale ed integrità architettonica. La norma classifica le definizioni di danno in funzione degli effetti che le vibrazioni provocano agli edifici secondo la seguente terminologia:

- *Danno di soglia*: formazione di fessure filiformi sulle superfici dei muri a secco o accrescimento di fessure già esistenti sulle superfici intonacate o sulle superfici di muri a secco; inoltre formazione di fessure filiformi nei giunti a malta delle costruzioni in mattoni e in calcestruzzo.



Fig. 8: esempio di danno di soglia

- *Danno minore*: formazione di fessure più aperte, distacco e caduta di gesso o pezzi di intonaco di muri a secco; formazione di fessure in blocchi di mattoni o di calcestruzzo.



*Fig. 9: esempio di danno di minore*

- *Danno maggiore*: danneggiamento di elementi strutturali; fessure nelle colonne di supporto; apertura dei giunti; serie di fessure nella muratura.



*Fig. 10 : esempio di danno di maggiore*

Essa prosegue definendo le caratteristiche delle sorgenti di vibrazioni e della risposta dell'edificio, e pertanto mette in stretta relazione il regime vibrazionale a manifestazioni oggettive degli effetti di quest'ultimo sugli edifici. Per vibrazioni di breve durata (cioè tali da escludere problemi di fatica e amplificazioni dovute a risonanza nella struttura interessata), la normativa UNI 9916 prevede che sia misurata la velocità p.c.p.v.. I valori di riferimento sono quelli riportati in Tab. 1 e riguardano sia le misure in fondazione sia le componenti orizzontali della velocità ai piani superiori, con particolare riferimento al piano più elevato. Per la componente verticale dei singoli solai, la norma indica come valore di riferimento per la p.c.p.v. 20mm/s limitatamente alle prime due classi di edifici. Tale valore

è indipendente dal contenuto in frequenza della registrazione e può essere inferiore per la terza classe di edifici.

Tabella 5 :prospetto dei valori limiti di velocità per tipologia d'edificio in funzione delle frequenze

Classe	Tipo di edificio	Valori di riferimento per la velocità di vibrazione p.c.p.v in mm/s			
		Fondazioni			Piano alto
		Da 1 Hz fino a 10 Hz	Da 10 Hz fino a 50 Hz	Da 50 Hz fino a 100 Hz(*)	Per tutte le frequenze
1	Costruzioni industriali, edifici industriali e costruzioni strutturalmente simili	20	Varia linearmente da 20 ( $f = 10$ Hz) fino a 40 ( $f = 50$ Hz)	Varia linearmente da 40 ( $f = 50$ Hz) fino a 50 ( $f = 100$ Hz)	40
2	Edifici residenziali e costruzioni simili	5	Varia linearmente da 5 ( $f = 10$ Hz) fino a 15 ( $f = 50$ Hz)	Varia linearmente da 15 ( $f = 50$ Hz) fino a 20 ( $f = 100$ Hz)	15
3	Costruzioni che non ricadono nelle classi 1 e 2 e che sono degne di essere tutelate (per esempio monumenti storici)	3	Varia linearmente da 3 ( $f = 10$ Hz) fino a 8 ( $f = 50$ Hz)	Varia linearmente da 8 ( $f = 50$ Hz) fino a 10 ( $f = 100$ Hz)	8
(*) Per frequenze oltre 100 Hz possono essere usati i valori di riferimento per 100 Hz.					

I valori di riferimento relativi alle vibrazioni con carattere continuo (cioè tali da indurre fenomeni di fatica o amplificazioni dovute alla risonanza nella struttura interessata) sono riportati in Tab. 2. I valori sono indipendenti dal contenuto in frequenza del segnale e riguardano sia le misure in fondazione sia le componenti orizzontali della velocità ai piani superiori, con particolare riferimento al piano più elevato. Per la componente verticale dei singoli solai, la norma indica come valore di riferimento per la p.c.p.v. 10 mm/s limitatamente alle prime due classi di edifici e può essere inferiore per la terza classe di edifici.

Tabella 6 : prospetto dei valori limiti di velocità per tipologia d'edificio

<i>Classe</i>	<i>Tipo di edificio</i>	<i>Valori di riferimento per la velocità di vibrazione p.c.p.v. in mm/s (per tutte le frequenze)</i>
1	Costruzioni industriali, edifici industriali e costruzioni strutturalmente	10
2	Edifici residenziali e costruzioni simili	5
3	Costruzioni che non ricadono nelle classi 1 e 2 e che sono degne di essere tutelate (per esempio monumenti storici)	2.5

Per le vibrazioni provocate nelle costruzioni dallo scoppio di mine, dalle attività di macchine di cantiere e dal traffico su strada e ferroviario, la normativa UNI9916 rimanda per i valori di riferimento alla SN 640312 (1992). La grandezza di riferimento è la velocità p.p.v., cioè il picco nel tempo del modulo del vettore velocità. La norma è applicabile solo alle vibrazioni di frequenza maggiore di 8 Hz. Inoltre si riporta infine il prospetto IV all'Appendice B della norma UNI 9916 che fornisce le velocità ammissibili delle vibrazioni agli edifici relativamente alla massima delle tre componenti *x*, *y*, *z* della velocità nel punto di misura.

Tabella 7 : Prospetto IV velocità ammissibili

Categoria	Tipi di Strutture	Velocità di vibrazione in mm/s			
		Misura alla fondazione			Misure al pavimento dell'ultimo piano
		Campi di frequenza			Frequenze diverse
		< 10	10 - 50	50 - 100	
1	Edifici utilizzari per scopi commerciali, edifici industriali e simili	20	20-40	40-50	40
2	Edifici residenziali e simili	5	5-15	15-20	15
3	Strutture particolarmente sensibili alle vibrazioni, non rientranti nelle categorie precedenti e di grande valore intrinseco	3	3-8	8-10	8

Tabella 8: prospetto dei valori limi di p.p.v. (mm/s)

Classe	Tipo di costruzione	Esposizione	Valori di riferimento per la velocità di vibrazione p.p.v. in mm/s		
			Posizioni di misura *)		
			Da 8 Hz fino a 30 Hz(*)	Da 30 Hz fino a 60 Hz	Da 60 Hz fino a 150 Hz
A	Costruzioni molto poco sensibili (per esempio ponti, gallerie, fondazioni di macchine)	Occasionale Frequente Permanente	Fino a tre volte i valori corrispondenti alla classe C	Fino a tre volte i valori corrispondenti alla classe C	Fino a tre volte i valori corrispondenti alla classe C
B	Costruzioni poco sensibili (per esempio edifici industriali in cemento armato o metallici) costruiti a regola d'arte e con manutenzione adeguata	Occasionale Frequente Permanente	Fino a due volte i valori corrispondenti Alla classe C	Fino a due volte i valori corrispondenti Alla classe C	Fino a due volte i valori corrispondenti Alla classe C
C	Costruzioni normalmente sensibili (per esempio edifici d'abitazione in muratura di cemento, cemento armato o mattoni, edifici amministrativi, scuole, ospedali, chiese in pietra naturale o mattoni intonacati) costruiti a regola d'arte e con manutenzione adeguata	Occasionale Frequente Permanente	15 6 3	20 8 4	30 12 6
D	Costruzioni particolarmente sensibili (per esempio monumenti storici e soggetti a tutela) case con soffitti in gesso, edifici della classe C nuovi o ristrutturati di recente	Occasionale Frequente Permanente	Valori compresi tra quelli previsti per la classe C e la loro metà	Valori compresi tra quelli previsti per la classe C e la loro metà	Valori compresi tra quelli previsti per la classe C e la loro metà
(*) Le posizioni di misura devono essere scelte sugli elementi rigidi della struttura portante o dove sono attesi i maggiori effetti delle vibrazioni.					



## 2 CAPITOLO- CAMPAGNE SPERIMENTALI

### 2.1 SEZIONE I-CAMPAGNA SPERIMENTALE SULL'ESPOSIZIONE ALLA VIBRAZIONE A CORPO INTERO

#### 2.1.1 Campagna sperimentale in ambito estrattivo

L'obbiettivo di questa campagna è stato quello di valutare la variazione della dose d'esposizione al variare della sorgente vibratoria e poter avere una base di dati al fine d'implementare il modello A(8). Nella prima fase sono state effettuate delle misurazioni per più operatori su differenti veicoli impiegati nella cava; nella seconda, invece, è stata valutata l'esposizione per uno stesso operatore su più mezzi. Successivamente, è stata calcolata la dose giornaliera d'esposizione di tutti i lavoratori e i risultati sono stati confrontati per evidenziare come la specifica fase del processo di lavorazione dell'attività possa incidere sull'esposizione giornaliera del conducente. Infine si è proposto un parametro correttivo legato alle caratteristiche antropometriche del soggetto per l'implementazione del modello finalizzato alla valutazione della dose d'esposizione.

##### 2.1.1.1 Sito di svolgimento della campagna

Il lavoro esposto in questo capitolo si basa su una campagna di misurazione realizzata nella cava di calcare in località Carsoli sita a 100 Km da Roma. Il sito dove si sono svolti i lavori è ubicato al margine orientale del Comune di Riofreddo, nel settore NW della struttura montuosa Simbruino-Ernica, in località Colle Orsini, a circa metà strada tra i comuni di Riofreddo a NW e Oricola a SE, in corrispondenza del confine tra la Regione Lazio e la Regione Abruzzo. L'area estrattiva è vicina all'Autostrada A24 (Roma-L'Aquila) e precisamente in prossimità dell'uscita per Carsoli, ad una distanza di circa 4.5 Km; si accede direttamente alla cava dalla S.S. n. 5 Tiburtina-Valeria, che corre in questo tratto parallela all'Autostrada



Fig. 11: visuale della montagna (sinistra) e dell'impianto (destra)

Le coordinate geografiche e cartografiche dell'ingresso della cava sono riportate nella tabella 5.

Tabella 9 : Coordinate geografiche e cartografiche del sito in esame

<b>Coordinate Geografiche (°)</b>			
<b>WGS 84</b>		<b>ED 50</b>	
Longitudine Est	13,019187	Longitudine Est	13,020104
Latitudine Nord	42,059578	Latitudine Nord	42,060560
<b>Coordinate Cartografiche (m)</b>			
<b>ED 50 UTM 33 N</b>		<b>GAUSS-BOAGA 1940 FUSO EST</b>	
X	336.174,358441 Est	X	2.356.106,934732 Est
Y	4.658.479,418619 Nord	Y	4.658.299,340779 Nord

La cartografia di riferimento del sito in esame è elencata nella tabella 6.

Tabella 10 : Cartografia di riferimento

<b>CARTOGRAFIA</b>		
<b>IGM 25.000</b>	Tavolette	145 III SO
	Fogli	367 III
<b>CTR 10.000</b>	Sezioni	3670900
<b>CTR 5.000</b>	Elementi	367093 e 367134

### *a) Area di studio*

Il settore orientale della Regione Lazio è formato da montagne calcaree che superano i 2000 m di altezza, con conche intramontane che ben si correlano con il paesaggio delle regioni appenniniche. L'area di studio è inclusa in una di queste valli, orientata secondo un'asse Nord-Ovest Sud-Est, maggiormente caratterizzabile per la presenza del Fiume Aniene delimitata a Sud dai Monti Ruffi ed a Nord dalle propaggini meridionali dei Monti Sabatini. Più specificatamente l'area di studio si inserisce tra Monte Pisciato (834 mt) a Nord-ovest, e Colle Orsini (802 mt) e Colle Capretta a Sud Est.

### *b) Inquadramento geologico generale*

L'assetto attuale del settore appenninico in esame è il risultato di un complesso processo geodinamico, prevalentemente neogenico, di convergenza della placca europea ed africana responsabile del corrugamento dei sedimenti, depositatesi nell'antico oceano Tetide, a partire dal Trias superiore. Tale processo orogenetico, evolutosi secondo un sistema a vergenza orientale, ha prodotto inizialmente una migrazione delle spinte compressive dai settori sud-occidentali verso quelli nord-orientali, e, successivamente, a partire dal Tortoniano superiore (Miocene superiore), un fronte distensivo, causato dall'apertura del bacino Tirrenico, anch'esso caratterizzato da una direzione dai settori occidentali verso quelli orientali. In tale contesto si è sviluppato ed è evoluto il sistema orogenico costituito da una fascia deformata (catena), da un bacino sedimentario caratterizzato da una elevata subsidenza, ubicato proprio a ridosso della porzione frontale della catena (avanfossa), all'interno del quale si sono depositi forti spessori di sedimenti torbiditici silicoclastici (flysch), derivanti dall'erosione di settori di catena, e, al di là di questo bacino, da un settore crostale indeformato (avampaese). L'analisi geometrico-strutturale dei principali elementi tettonici permette di affermare che la catena si è strutturata secondo un sistema di sovrascorrimenti di età progressivamente più giovane in direzione dei settori esterni, cioè verso l'avampaese (sovrascorrimenti in *piggy-back sequence*) con qualche eccezione di strutture fuori sequenza. Una simile evoluzione del sistema orogenico ha causato una sovrapposizione geometrica delle diverse unità tettoniche derivate dalla deformazione dei settori più interni sopra le unità più esterne, lungo superfici di accavallamento immergenti verso la catena. Nella porzione centrale della catena appenninica le unità, da quelle più interne verso quelle più esterne (cioè quelle geometricamente più alte verso quelle più basse) sono: *Unità dei Flysch alloctoni*, *Unità della Falda toscana*, *Unità della Falda sabina* e *Unità della Falda laziale-abruzzese*. Tale suddivisione è ovviamente schematica

poiché, come emerge dallo studio di diversi Autori, il fronte deformativo non ha seguito i limiti di separazione dei diversi domini paleogeografici meso-cenozoici. In particolare durante l'evoluzione tortoniano-messiniana i settori del dominio sabino e di quello laziale-abruzzese sono stati investiti contemporaneamente dal fronte deformativo. Le rocce carbonatiche dei Monti Ernici fanno parte dell'Unità della Falda laziale-abruzzese. In questo termine vengono comprese tutte le unità strutturali derivate dalla deformazione della piattaforma carbonatica laziale-abruzzese, distinte in unità laziali-abruzzesi interne ed unità esterne. Risulta, infatti, che il settore lepino-ausono-aurunco sia stato coinvolto dal fronte orogenico nel Tortoniano, mentre il settore simbruino-ernico è stato inglobato nella catena solo nel Messiniano. Uno degli elementi strutturali più evidenti del settore in esame è sicuramente il fronte di sovrascorrimento Olevano-Antrodoco. Alla fase tettonica messiniana fa seguito, nel Pliocene inferiore, una nuova fase, che determina la sovrapposizione, verso est, del dominio di transizione su quello di piattaforma lungo un allineamento tettonico denominato dagli Autori "Olevano - Antrodoco". Questo elemento tettonico, ad andamento N-S, presenta le caratteristiche di un fuori sequenza rispetto alla generale successione temporale e spaziale con cui si sono sviluppati i principali fronti di sovrascorrimento della catena appenninica, in progressiva migrazione verso est. Lungo l'Olevano-Antrodoco i rilievi carbonatici della piattaforma laziale-abruzzese vengono a contatto con le strutture calcaree e calcareo-marnose dei Monti Sabini in facies di transizione tra la piattaforma carbonatica ed il bacino. Tra i due domini paleogeografici si interpongono tettonicamente i depositi silicoclastici, terrigeni, dell'avanfossa messiniana. Nel Plio-Pleistocene, infine, in seguito all'apertura del Tirreno, peraltro già iniziata nel Miocene superiore, tutta l'area dell'Appennino centrale è soggetta, come già detto, a distensione. Si formano, all'interno della catena, una serie di depressioni tettoniche (L'Aquila, Fucino, Sulmona, Rieti) che diventano importanti aree di sedimentazione, di natura continentale, e che hanno ospitato a più riprese importanti bacini lacustri. La conca intermontana di Carsoli è situata nel settore occidentale dell'Appennino Centrale, al confine tra le regioni Abruzzo e Lazio, ed è compresa interamente all'interno del bacino idrografico del Fiume Turano. Si tratta di un'ampia depressione chiusa, sede di un antico e vasto bacino lacustre, in cui sono andati a confluire forti spessori di depositi continentali, costituiti essenzialmente da sedimenti lacustri ed in minor misura da depositi fluviali, di conoide alluvionale e di versante (D'OREFICE *et alii*, 2010).

c) Caratteristiche del sito

In appendice alla tesi (Appendice A) riportiamo lo studio completo dell'area.

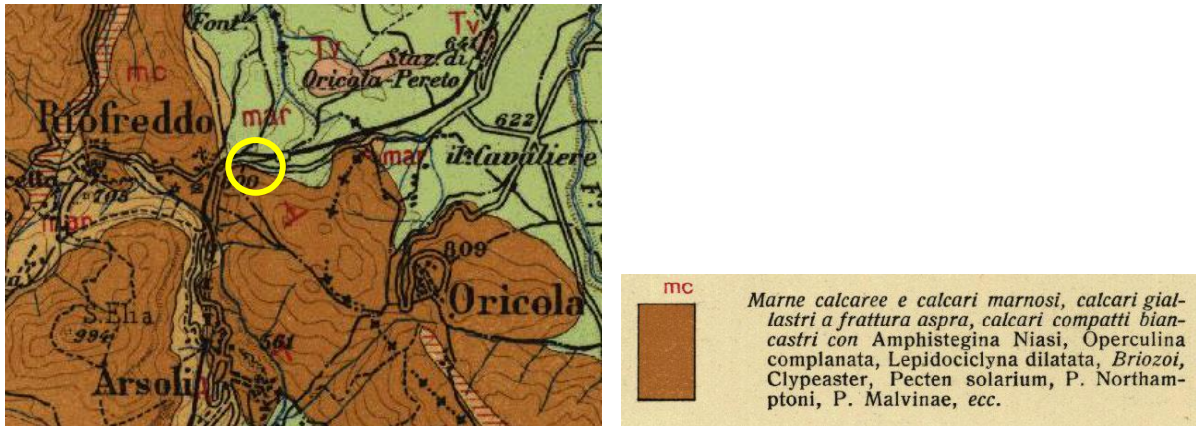


Fig. 12: Stralcio Carta Geologica d'Italia - Foglio 145

### 2.1.1.2 Descrizione delle sorgenti vibratorie

Le misure effettuate per la valutazione dell'esposizione alla vibrazione a corpo intero (WBV) sono state realizzate su un totale di 8 differenti tipologie di macchinari. Esse sono state realizzate sia al minimo, per poter comprendere le caratteristiche del segnale sorgente vibratoria, sia durante le normali attività lavorative quotidiane. Di seguito sono riportate le descrizioni con le rispettive caratteristiche tecniche di ciascun mezzo.

#### ➤ *Camion LHD*

Il dumper ribaltabile è un autocarro utilizzato come mezzo di lavoro nell'ambito delle attività estrattive. La sua particolarità è quella di poter sopportare pesi decisamente al di fuori del normale, oltre la normale capacità di carico di un autocarro tradizionale con una portata varia tra le 200 e le 350 tonnellate. Con questo mezzo di lavoro è vietata la circolazione in città, per la sua scarsa praticità di sterzata, e qualora debba essere trasferito ad un altro sito estrattivo, deve essere smontato e/o caricato su di un altro autocarro adibito alla circolazione urbanistica. Nell'ambito di questo lavoro sono stati analizzati due differenti mezzi che operano nello stesso sito (Dumper 769 Caterpillar e Dumper Perlini DP 405); per un periodo limitato è stato sospeso l'impiego del modello Perlini 405 per attività di manutenzione straordinaria, sostituito con un Mercedes 4 assi di norma impiegato nei cantieri e adibito alla circolazione su strada.

▪ *Dumper Perlini DP 405*



*Fig. 13 : mezzo durante il viaggio in configurazione scarica (sinistra) e carica (destra)*



*Fig. 14: fase di scarico del materiale all'impianto (sinistra) e caricamento (destra)*

*Tabella 11: caratteristiche tecniche ed operative del Perlini 405*

<i>Modello</i>	<i>Attività operativa</i>	<i>Peso [ton]</i>	<i>Velocità in esercizio</i>
<i>Perlini 405, Anno di fabbricazione 2004</i>	<i>Carico/Trasporto/Scarico del materiale</i>	<i>A vuoto= 29.8 Portata utile = 40 Massa complessiva a carico=69.8</i>	<i>Salita = 20±5 KM Discesa = 30±5 KM</i>



- **Dumper 769 Caterpillar**



Fig. 15: fase di trasporto in configurazione scarica (sinistra) e attesa prima del caricamento (destra)

Tabella 12 : caratteristiche tecniche ed operative del Caterpillar 769

<i>Modello</i>	<i>Attività operativa</i>	<i>Peso [ton]</i>	<i>Velocità in esercizio [Km/h]</i>
769 D, Caterpillar, Anno di fabbricazione 2003	Carico/Trasporto/ Scarico del materiale	A vuoto= 28.5 Portata utile = 39.7 Massa complessiva a carico=68.2	Salita = 20±5 Discesa = 30±5

▪

- **Mercedes 4 assi**



Fig. 16: mezzo durante viaggio in configurazione scarica (sinistra) e carica (destra)

Tabella 13: caratteristiche tecniche ed operative del Mercedes Actros

<i>Modello</i>	<i>Attività operativa</i>	<i>Peso [ton]</i>	<i>Velocità in esercizio [Km/h]</i>
<i>Mercedes Actros 4151 K 8X4, Anno di fabbricazione 2010</i>	Carico/Trasporto/Scarico del materiale	A vuoto= 15.6 Portata utile = 16.4 Massa complessiva a carico=32	Salita = 25±5 Discesa = 35±5

➤ *Escavatore*

L'escavatore su cui sono state realizzate le misurazioni è un mezzo impiegato per la movimentazione del materiale, operazione diversificata a seconda delle esigenze. Il principale utilizzo consiste nel movimentare il materiale roccioso ottenuto dalla volata, caricandolo sui mezzi di trasporto. Altre funzioni che possono essere ricoperte da tale macchina sono la distribuzione del materiale di terreno sulla parete della collina per l'opera di ripristino ambientale, la movimentazione dei grossi blocchi di materiale all'interno del piazzale di cava oppure le operazioni di abbattimento controllato di materiale dal fronte di scavo.



Fig. 17: visuale dell'escavatore (sinistra) e caricamento su mezzo LHD (destra)



Tabella 14: caratteristiche tecniche ed operative dell'escavatore Komatsu

<i>Modello</i>	<i>Attività operativa</i>	<i>Peso [ton]</i>	<i>Capacità Benna [m<sup>3</sup>]</i>	<i>Velocità in esercizio [Km/h]</i>
<i>Komatsu, PC700 LC Anno di fabbricazione 2014</i>	Movimentazione materiale/ Caricamento mezzi	Massa Complessiva =67.1	5.58	2.8-4.6 Operazioni svolte da fermo con velocità di rotazione della torretta pari a 8.3 rpm

➤ *Jeep*

La jeep è uno dei mezzi che viene più frequentemente utilizzato in cava in quanto adibito al trasporto del personale dall'impianto alla base della montagna fino ai piazzali di lavorazione e all'interno dello stesso piazzale. L'esposizione per il conducente è estremamente variabile in quanto si può avere un minimo impiego di tale mezzo che può consistere in una singola corsa, per trasportare gli operatori al piazzale di lavorazione e successivo ritorno a fine giornata, oppure in un elevatissimo utilizzo dovuto a agli spostamenti che durante il giorno vengono effettuati per motivi di varia natura tecnica. Le condizioni del terreno in cui essa si muove sono estremamente variabili (roccia compatta, terreno friabile o fortemente disconnesso) sia nel tratto di pista dall'impianto a valle fino al piazzale in quota, sia all'interno dello stesso piazzale di lavorazione.



Fig. 18:visuale del mezzo

Tabella 15 : caratteristiche tecniche ed operative della jeep Land Rover Defender

<b>Modello : Land Rover Defender 90</b>			
<i>Attività operativa</i>	<i>Lunghezza [m]</i>	<i>Larghezza [m]</i>	<i>Altezza [m]</i>
Trasporto del personale all'interno del sito	3.883	1.790	1.99
<i>Passo [m]</i>	<i>Pendenza max [gradi]</i>	<i>Peso [Kg]</i>	<i>Velocità in esercizio [Km/h]</i>
2.360	45	1825	Salita = 30±5 Km Discesa = 40±5 Km

### ➤ *Pala gommata*

Le pale gommata, anche dette pale caricatori, rientrano nella categoria delle macchine per il movimento terra che servono alla movimentazione di materiale sciolto, spesso terreno ghiaioso, per la realizzazione di scavi, rilevati e la modellazione di terreni a scopo costruttivo. Esse sono usate principalmente per eseguire operazioni di trasporto, carico, scavo, spargimento e compattamento della terra nei cantieri edili e nelle attività estrattive. Generalmente sono utilizzate per la movimentazione del materiale di ridotta granulometria per spargerlo al fine di livellare le piste di passaggio dei mezzi oppure per trasportare l'esplosivo nei punti della bancata che non si possono raggiungere con un normale mezzo di trasporto.



Fig. 19: visuale della pala gommata (sinistra) e attività di spargimento del materiale (destra)

Tabella 16: caratteristiche tecniche ed operative della pala gommata

<b>Modello</b>	<b>Attività operativa</b>	<b>Peso [ton]</b>	<b>Capacità Benna [m<sup>3</sup>]</b>	<b>Velocità in esercizio [Km/h]</b>
<i>Caterpillar, 928G, Anno di fabbricazione 2005</i>	Movimentazione materiale/ Stesura materiale su pista	Massa complessiva =10.5	2.3	30

### ➤ *Ruspa*

La ruspa è un mezzo cingolato di movimentazione terra impiegato nell'ambito estrattivo per due scopi: il primo è quello di movimentare il terreno attraverso la lama frontale, ad esempio quando è necessario accumulare del materiale in un determinato punto, mentre il secondo consiste nel rippaggio, ossia la frantumazione superfici rocciose o massi presenti nel terreno di scavo attraverso un dente d'acciaio montato sulla parte posteriore del mezzo.



Fig. 20: visuale della ruspa durante una fase di pausa

Tabella 17: caratteristiche tecniche ed operative della ruspa Caterpillar

<b>Modello</b>	<b>Attività operativa</b>	<b>Peso [ton]</b>	<b>Capacità Benna [m<sup>3</sup>]</b>	<b>Velocità in esercizio [Km/h]</b>
Caterpillar D9T, Anno di fabbricazione 2014	Movimentazione materiale/ Frantumazione terreno	Massa complessiva =50	13.5	Velocità avanzamento benna alzata= 10

➤ *Trivella perforatrice*

La trivella perforatrice è una macchina che, grazie a delle aste movimentate da un complesso sistema meccanico ed oleodinamico, riesce a perforare il terreno e realizzare dei fori nei quali verrà alloggiato l'esplosivo per la realizzazione della volata. La macchina svolge la sua funzione principalmente da ferma e i suoi spostamenti sono limitati allo spazio sulla bancata e, più raramente, nel piazzale di cava. La realizzazione dei fori può avere tempi diversi, che possono variare da pochi secondi a diversi minuti; ciò è dovuto alla tipologia del macchinario e alle caratteristiche del terreno di lavorazione. Molto spesso viene richiesta la realizzazione di fori ad una profondità tale per cui non è sufficiente l'utilizzo di una sola asta; non appena si è arrivati a fondo corsa si arresta momentaneamente la macchina e, attraverso un sistema automatico, si aggancia una seconda asta alla prima e si prosegue nell'operazione fino alla profondità richiesta. Qualora non fosse sufficiente quella aggiunta, è possibile ripetere l'operazione con l'inserimento di un'ulteriore elemento. L'elemento cruciale dell'operazione viene rappresentato dal terreno; se quest'ultimo è sufficiente compatto, l'asta incontra una sufficiente resistenza che permette una perforazione continua e quindi la realizzazione di un foro preciso. Qualora invece il terreno fosse disciolto, l'utensile ha difficoltà nel proseguire l'avanzamento e quindi l'operatore arresta l'operazione, solleva l'asta e quel punto o ritenta l'avanzamento in profondità oppure è costretto a cambiare punto di perforazione.





*Fig. 21: visuale della perforatrice prima dell'inizio delle misurazioni (sinistra) e durante l'attività (destra)*

Per comprendere meglio quanto sia delicata complessa e articolata questa fase di lavorazione, è stata effettuata una prova su un blocco di materiale calcareo su cui è stato realizzato un foro delle profondità di 50 cm. Le immagini mostrano chiaramente le dimensioni e l'estrema precisione della lavorazione che si riesce ad ottenere.



*Fig. 22: realizzazione della prova di perforazione(sinistra), visuale della precisione del foro (centro) e dimensioni (destra)*

Lo stato di tutti i veicoli viene riportato essere in condizioni "buone" e "molto buone" da parte dell'operatore grazie ad una manutenzione avvenuta ad intervalli regolari secondo un numero di ore d'esercizio, specifico per ogni mezzo.

Tabella 18 : caratteristiche tecniche dei mezzi impiegati

<i>Modello</i>	<i>Attività operativa</i>	<i>Peso [ton]</i>	<i>Lunghezza aste[m]</i>	<i>Diametro foro [mm]</i>
ATLAS COPCO ROC D7, Anno di fabbricazione 2007	Perforazione terreno	Massa complessiva =14.2	8.2	64-102

### 2.1.1.3 Descrizione della campagna

La campagna di misurazione è stata realizzata su un arco temporale prolungato, sia durante il periodo invernale, temperatura di  $10 \pm 5$  ° C, sia durante quello estivo, temperatura di  $27 \pm 5$  ° C. Le condizioni meteo sono state sempre serene e caratterizzate da una consistente oscillazione termica, essendo il sito posto in alta montagna. La valutazione dell'esposizione è stata effettuata in base alle specifiche stabilite dalla ISO 2631-1 (97) descritta precedentemente nel capitolo 1. Secondo tale linea guida, il tempo di misurazione, necessario per poter calcolare l'esposizione dell'operatore in ogni attività specifica, dovrebbe essere "adeguato", ossia sufficientemente lungo tale da garantire una precisione statistica e poter ottenere un campione rappresentativo del segnale acquisito. Nelle misure sperimentali questo aspetto può rappresentare un problema poiché una misurazione continua su un tempo prolungato è difficile da realizzare a causa delle inevitabili interruzioni che vi possono essere durante l'attività quotidiana, come una pausa dell'autista, l'arresto del mezzo per motivi d'intervento straordinari, ad esempio la rimozione di materiale roccioso dalla strada o incastrato nell'asta della perforatrice, oppure un semplice controllo di manutenzione ordinaria. Così la durata del tempo è stata scelta affinché tutti gli aspetti del ciclo di lavoro fossero rappresentati adeguatamente e, sulla base delle informazioni fornite dall'operatore, è stato scelto come quello necessario a completare un intero ciclo di lavoro per ogni veicolo. Un aspetto estremamente importante è stato quello di realizzare delle misurazioni che fossero realistiche e, al tempo stesso, il più possibile ripetibili. La tabella sottostante riporta il ciclo base di ogni veicolo, dove vengono riportati i tempi che vengono impiegati per lo svolgimento della singola attività per tutta la giornata lavorativa. Tali stime sono state ricavate, come già detto, sulla base delle interviste degli operatori ma ovviamente sono soggette a cambiamenti frequenti dovuti a necessità legate al processo di produzione.

Tabella 18: cicli operativi dei diversi mezzi

<b>Veicolo</b>	<b>Descrizione Ciclo</b>	<b>Tempo stimato [h]</b>
<i>Dumper</i>	carico-trasporto-scarico del materiale coltivato	5-6
<i>Escavatore</i>	movimentazione terreno/ ripristino parete	5-6 ore
<i>Jeep</i>	trasporto personale all'interno del sito	0.5- 1
<i>Macchina Perforatrice</i>	realizzazione fori bancata	4-6
<i>Ruspa</i>	movimentazione terreno/ fratturazione pavimentazione rocciosa (rippaggio)	0.2-2
<i>Pala gommata</i>	movimentazione terreno per realizzazione piste	0.3-1

#### 2.1.1.4 Operatori dei mezzi

Tutti gli operatori coinvolti sono stati volontari e, grazie alla loro disponibilità, si sono risolti molti problemi di carattere pratico per la realizzazione delle misure. Essi sono stati scelti per la loro esperienza pluriennale nel condurre questa tipologia di mezzi. Prima d' iniziare le misurazioni, tutti hanno completato un questionario per raccogliere informazioni in merito alle loro caratteristiche antropometriche, all'esperienza lavorativa svolta e alla presenza di sintomatologie o disturbi fisici, come problemi neuro-vascolari o muscoloscheletrici. I dati sono riportati di seguito

Tabella 19: caratteristiche degli operatori coinvolti nelle prove

<b>Operatore</b>	<b>Altezza [cm]</b>	<b>Peso[kg]</b>	<b>problemi fisici dichiarati</b>
1	180	80	operazione ernia 10 anni fa
2	182	68	nessuno
3	174	76	nessuno
4	174	92	nessuno
5	180	80	nessuno
6	168	78	nessuno
7	184	86	nessuno
8	185	89	nessuno

### 2.1.1.5 Strumento di misurazione

Per la realizzazione delle misure sul guidatore durante la sua attività, è stato impiegato un accelerometro triassiale SEN-027 PCB Piezotronics, conformemente alle direttive ISO 2631-1; questo accelerometro è stato appositamente progettato per l'analisi delle vibrazioni e il monitoraggio dell'esposizione alle vibrazioni dei conducenti dei veicoli. Esso è stato fissato al sedile attraverso del nastro adesivo; a causa delle difficoltà di tenuta d'aderenza dovute al materiale del tessuto che ricopriva la superficie d'appoggio, è stato necessario sospendere, in più di un'occasione, la misura per poter verificare che non avvenisse un distacco del nastro e quindi uno spostamento dello strumento, fatto che avrebbe portato all'invalidazione della misura. Il dispositivo è stato posizionato in modo tale da poter rilevare i livelli di accelerazione secondo le direzioni  $x$ ,  $y$  e  $z$  definite dal sistema di riferimento standard della ISO2631-1: asse  $x$  per misurare la vibrazione in direzione radiale, l'asse  $y$  nella direzione ortogonale e l'asse  $z$  lungo il piano verticale. Il guadagno è stato impostato con valori differenti,  $0.136 / 1 \text{ V}$ , al fine di garantire un adeguato campo di misurazione del segnale vibratorio ed evitare il fenomeno dell'overload (fuoriuscita dal campo di misura). Il fatto di aver indicato due valori è dovuto al fatto che in tutte le misure  $0.316$  è risultato adeguato per tutti i mezzi tranne che per la macchina perforatrice. La frequenza di campionamento è stata fissata ad un valore pari a  $1250 \text{ Hz}$ ; per poter definire tale parametro si può fare riferimento al teorema di Shannon, che indica la minima frequenza necessaria per poter campionare un segnale analogico che viene acquisito per poterlo ricostruire successivamente senza perdere informazioni. Il teorema afferma che la frequenza di campionamento  $f_c$  deve essere almeno pari al doppio della massima frequenza del segnale. Infine il filtro in frequenza è stato fissato in un range che va da  $0.5 \text{ Hz}$  ai  $250 \text{ Hz}$ , riuscendo a coprire tutto lo spettro di frequenze d'interesse per l'esposizione dell'uomo. Tali valori sono stati definiti sulla base sia di precedenti lavori svolti nello stesso ambito, sia sull'analisi delle prime misurazioni di prova. Prima d'effettuare ogni misurazione, è stata effettuata la calibrazione, secondo le indicazioni del costruttore, secondo la seguente procedura:

1. Fissaggio del trasduttore sul calibratore secondo l'asse d'interesse
2. Una volta fissato correttamente, avviamento del calibratore con l'emissione di un segnale caratterizzato da un valore pari a  $9.8 \text{ m/s}^2$  r.m.s e una frequenza di  $159.2 \text{ Hz}$
3. Attesa che il display fornisca l'indicazione corretta per poi rimuoverlo
4. Tale operazione deve essere ripetuta per ciascun asse di riferimento ( $x$ ,  $y$  e  $z$ )

Nella seguente tabella vengono riportate le caratteristiche dello strumento



Tabella 20 : parametri tecnici dello strumento di misurazione impiegato

<b>Modello</b>	<b>Sensibilità</b>	<b>Guadagno</b>
Accelerometro triassiale SEN027-PCB-	X axis: 10.52 mV/(m/s <sup>2</sup> ) Y axis: 10.55 mV/(m/s <sup>2</sup> ) Z axis: 10.58 mV/(m/s <sup>2</sup> )	0.136 volt variato a 1 volt sulla macchina perforatrice

L'accelerometro triassiale è stato collegato al dispositivo d'acquisizione Sound-Book attraverso tre connettori collegati ai rispettivi cavi di collegamento in uscita dal trasduttore. Il segnale vibratorio, una volta acquisito per mezzo del software Samurai, è stato registrato nella memoria del dispositivo per poter poi essere successivamente elaborato attraverso il programma Noise Vibration Work. Quest'ultimo, dopo aver acquisito il segnale da Samurai, presenta numerose opzioni di visualizzazione della misura; le principali sono la Time History (andamento del segnale nel tempo) e lo spettro in frequenza (componenti del segnale in bande in terzi d'ottava). Tramite quest'ultimo si è proceduto all'elaborazione dei risultati delle prove nelle seguenti modalità:

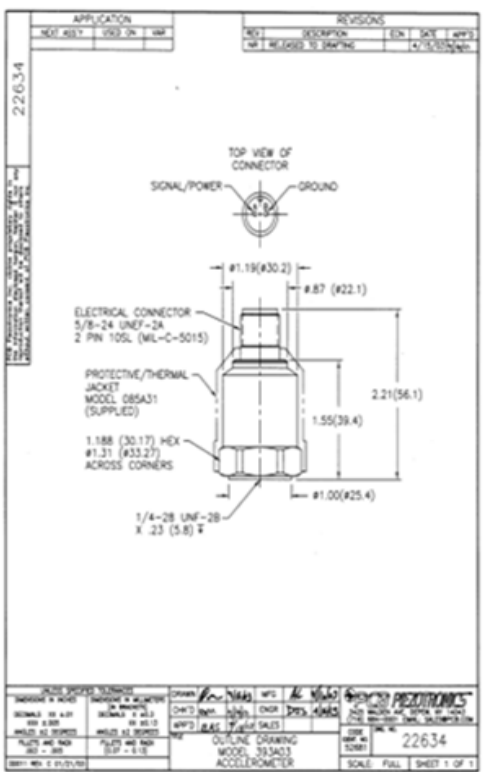
- Visualizzazione degli eventi nella Time-History
- Ponderazione dei primi tre canali (accelerometro triassiale) secondo la normativa ISO 2631
- Visualizzazione del Leq Running per tutti e quattro i canali
- Confronto dei risultati

Questa metodologia è stata applicata in tutte le campagne di misurazioni svolte sull'esposizione alla WBV.



Fig. 23: Soundbook (sinistra), calibrazione dello strumento su calibratore mono-assiale(centro) e collegamento al pc (destra)

Nella pagina seguito vengono riportate le caratteristiche della strumentazione impiegata:



PCB 393A03		
Voltage sensitive	1000	mV/g
Measurement range	5	±g pk
Frequency range (± 5 %)	0,5-2000	Hz
(± 10 %)	0,3-4000	Hz
(± 3 dB)	0,2-6000	Hz
Resolution	0,0001	g pk
Amplitude linearity	±1	%
Transverse sensitivity	≤5	%
Shock limit	5000	±g pk
Excitation voltage	18-30	VDC
Output impedance	<250	Ω
Output bias	8-12	VDC
Discharge time constant	1-3	sec
Size	30,2x55,6	mm
Weight	210	gm

Fig. 24: caratteristiche tecniche dell'accelerometro monoassiale PCB 393A03

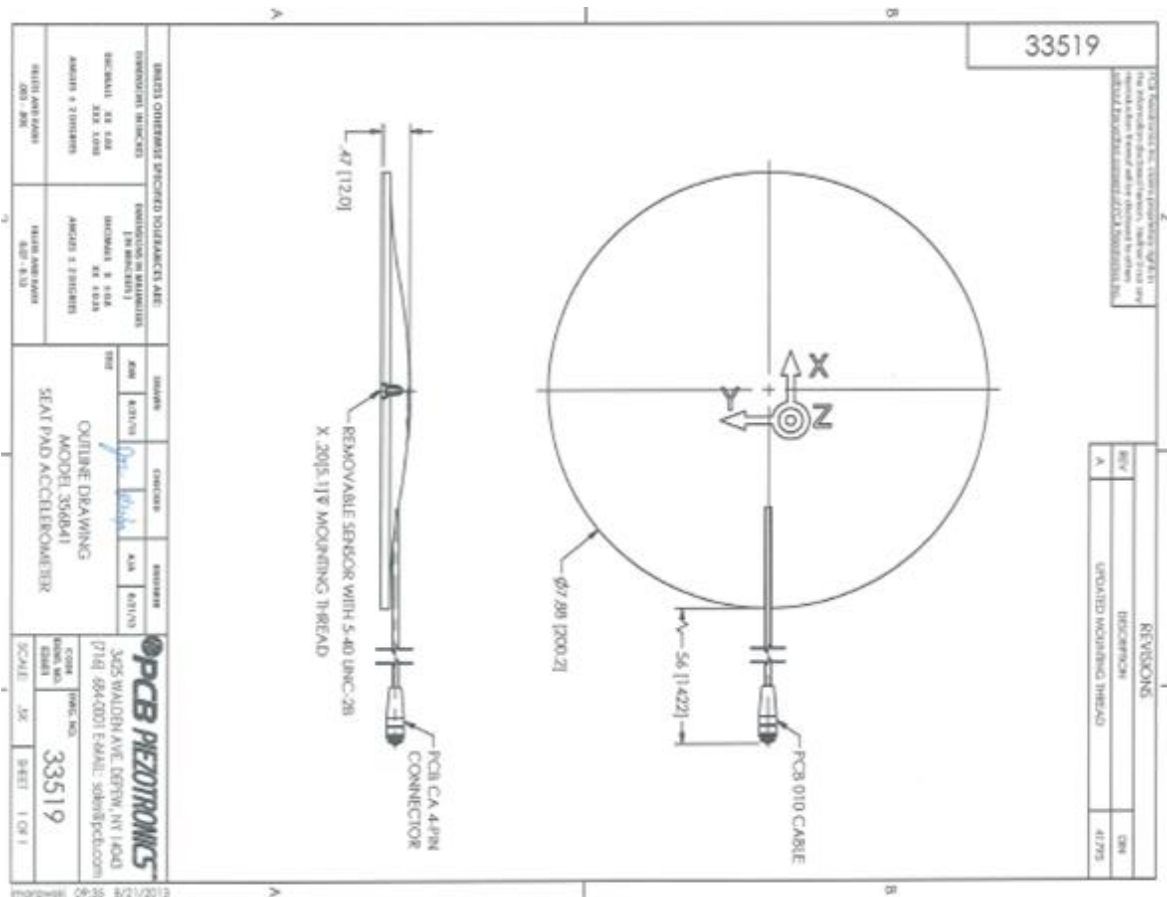


Fig. 25: caratteristiche tecniche dell'accelerometro triassiale PCB 393A03

Model Number	TRIAx ICP® SEAT PAD ACCELEROMETER PER ISO 10326-1		Revision: B										
356B41			ECN #: 38243										
<b>Performance</b>	<b>ENGLISH</b>	<b>SI</b>	<b>OPTIONAL VERSIONS</b>										
Sensitivity(± 10 %)	100 mV/g	10.2 mV/(m/s <sup>2</sup> )	Optional versions have identical specifications and accessories as listed for the standard model except where noted below. More than one option may be used.										
Measurement Range	± 10 g pk	± 98 m/s <sup>2</sup> pk											
Frequency Range(± 5 %)	0.5 to 1000 Hz	0.5 to 1000 Hz	[2]										
Resonant Frequency	± 27 kHz	± 27 kHz											
Broadband Resolution(1 to 10,000 Hz)	0.0002 g rms	0.002 m/s <sup>2</sup> rms	[1]										
Non-Linearity	± 1 %	± 1 %	[3]										
Transverse Sensitivity	± 5 %	± 5 %											
<b>Environmental</b>													
Overload Limit(Shock)	± 2000 g pk	± 19,620 m/s <sup>2</sup> pk											
Temperature Range	+14 to 122 °F	-10 to 50 °C	[1]										
Temperature Response	<0.10 %/°F	<0.17 %/°C											
<b>Electrical</b>			<b>NOTES:</b>										
Excitation Voltage	6.5 to 30 VDC	6.5 to 30 VDC	[1] Typical.										
Constant Current Excitation	0.3 to 10 mA	0.3 to 10 mA	[2] Standard calibration to 100 Hz with sensor in mounting pad. Special calibration above 100 Hz available with sensor outside mounting pad.										
Output Impedance	≤ 500 Ohm	≤ 500 Ohm	[3] Zero-based, least-squares, straight line method.										
Output Bias Voltage	2.8 to 4.5 VDC	2.8 to 4.5 VDC	[4] See PCB Declaration of Conformance P0023 for details.										
Discharge Time Constant	1 to 3 sec	1 to 3 sec											
Settling Time(within 10% of bias)	<20 sec	<20 sec											
Spectral Noise(1 Hz)	50 µg/√Hz	490 (µm/sec <sup>2</sup> )/√Hz	[1]										
Spectral Noise(10 Hz)	10 µg/√Hz	98 (µm/sec <sup>2</sup> )/√Hz	[1]										
Spectral Noise(100 Hz)	4 µg/√Hz	39 (µm/sec <sup>2</sup> )/√Hz	[1]										
Spectral Noise(1 kHz)	2 µg/√Hz	20 (µm/sec <sup>2</sup> )/√Hz	[1]										
<b>Physical</b>			<b>SUPPLIED ACCESSORIES:</b>										
Sensing Element	Ceramic	Ceramic	Model 010005 Cable (1)										
Sensing Geometry	Shear	Shear	Model 081A90 Mounting stud, 10-32 to 5-40 (1)										
Housing Material	Titanium	Titanium	Model AGC-17 NIST Traceable amplitude and phase response calibration from 0.5 to 100 Hz.										
Sealing	Hermetic	Hermetic											
Size (Diameter x Width)	7.87 in x 0.472 in	200 mm x 12 mm											
Weight	9.6 oz	272 gm	[1]										
Electrical Connector	Integral Cable	Integral Cable											
Electrical Connection Position	Side	Side											
Cable Termination	1/4-28 4-Pin Jack	1/4-28 4-Pin Jack											
Cable Length	5 ft	1.5 m											
Cable Type	010 4-cond Shielded	010 4-cond Shielded											
Mounting Thread	5-40 Female	5-40 Female											
<table border="1"> <tr> <td>Entered: DMW</td> <td>Engineer: AJA</td> <td>Sales: WDC</td> <td>Approved: BAM</td> <td>Spec Number:</td> </tr> <tr> <td>Date: 2/3/2012</td> <td>Date: 2/3/2012</td> <td>Date: 2/3/2012</td> <td>Date: 2/3/2012</td> <td>33518</td> </tr> </table>				Entered: DMW	Engineer: AJA	Sales: WDC	Approved: BAM	Spec Number:	Date: 2/3/2012	Date: 2/3/2012	Date: 2/3/2012	Date: 2/3/2012	33518
Entered: DMW	Engineer: AJA	Sales: WDC	Approved: BAM	Spec Number:									
Date: 2/3/2012	Date: 2/3/2012	Date: 2/3/2012	Date: 2/3/2012	33518									
<p>All specifications are at room temperature unless otherwise specified. In the interest of constant product improvement, we reserve the right to change specifications without notice. ICP® is a registered trademark of PCB Group, Inc.</p>													
<p>3425 Walden Avenue, Depew, NY 14043</p> <p>Phone: 716-684-0001 Fax: 716-685-3886 E-Mail: vibration@pcb.com</p>													

Fig. 26: caratteristiche tecniche dell'accelerometro triassiale PCB 393A03

### 2.1.1.6 Risultati

Alla realizzazione delle misurazioni è seguita l'elaborazione; di seguito vengono riportati i grafici delle Time History e dello spettro in frequenza misurati più significativi per ciascun mezzo. In appendice alla tesi (Appendice B) vengono riportati i rimanenti.

#### ➤ *Macchina perforatrice*

Per poter caratterizzare il segnale della sorgente vibratoria e comprenderne meglio le caratteristiche, è stata realizzata una prova al minimo su tutti i veicoli prima dell'inizio delle misure. Il motivo per cui è stata realizzata questa tipologia di prova, non è stato tanto quello di valutare i valori efficaci a cui è esposto l'operatore al minimo, condizione che si verifica per un tempo brevissimo e quindi trascurabile, ma evidenziare come l'asse di sollecitazione maggiormente interessato al movimento vibratorio sia quello verticale  $z$  ed individuare lo spettro in frequenza caratteristico. Tale test è stato svolto per una durata tale da permettere la stabilizzazione del segnale con l'operatore seduto secondo le condizioni d'impiego della sua normale attività lavorativa.



Fig. 27: realizzazione della prova al minimo sulla perforatrice (sinistra) e posizionamento accelerometro sulla pedana (destra)

Il grafico sottostante riporta la Time History del segnale vibratorio a cui viene esposto l'operatore, dove in rosso viene descritto l'andamento del segnale lungo l'asse  $x$ , in blu lungo l'asse  $y$  e in verde lungo l'asse  $z$  con il regime del motore al minimo. La curva nera invece mostra l'andamento del

segnale misurato alla base del sedile misurato lungo la direzione  $z$  e che rappresenta la sorgente vibratoria.

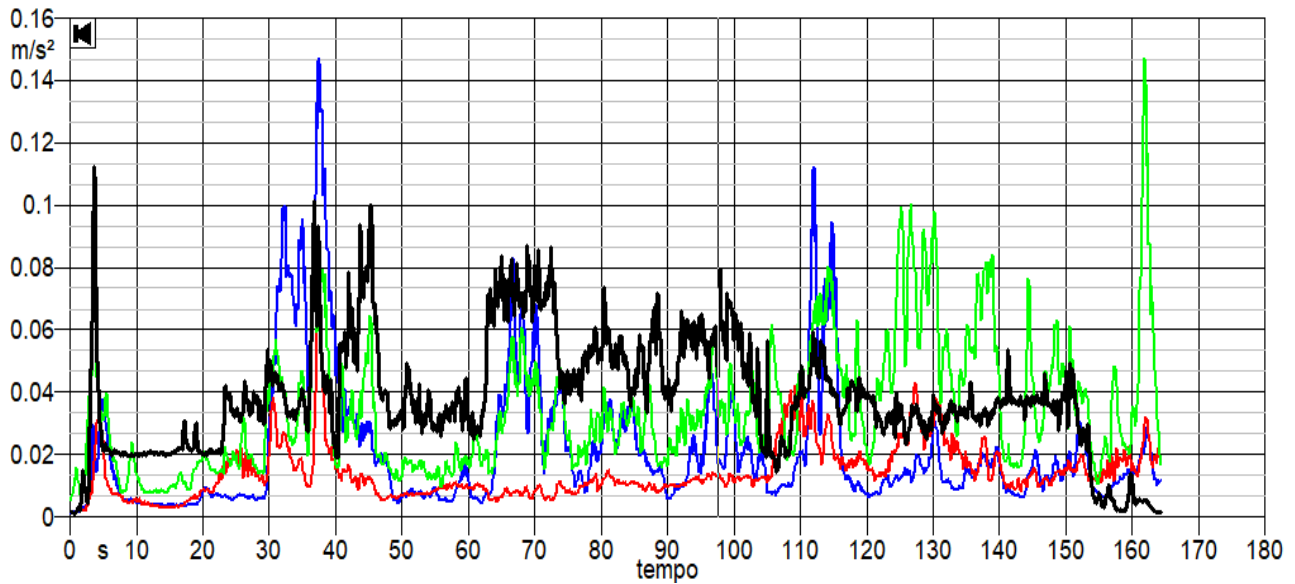


Fig. 28: Time History della prova macchina a regime minimo

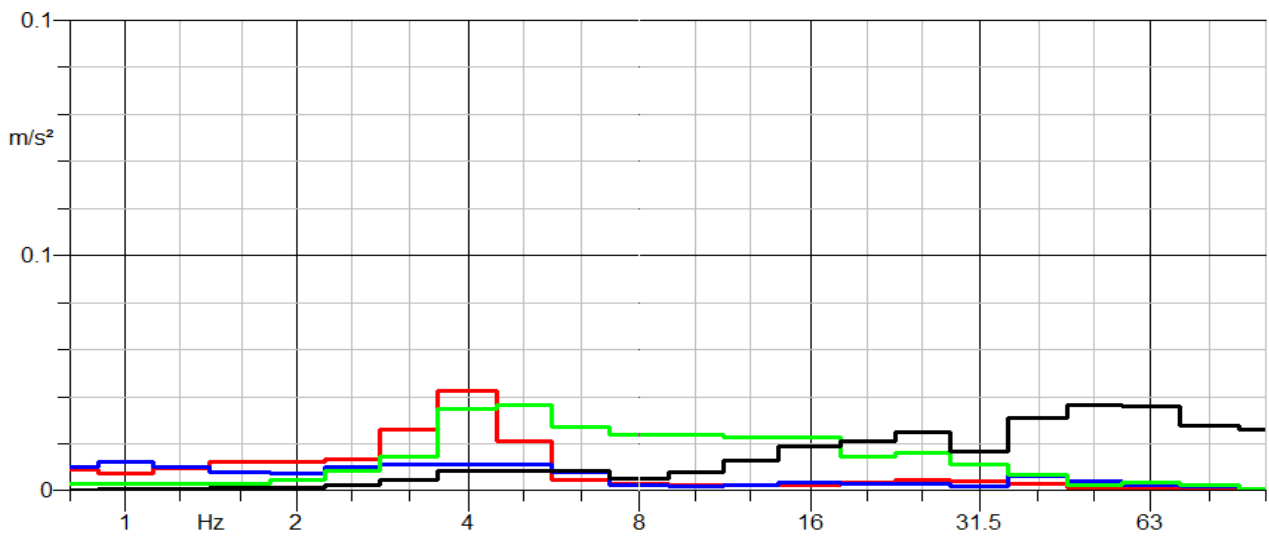


Fig. 29: spettro in frequenza della prova macchina a regime minimo

Il grafico mostra come al minimo si abbiano due spettri che si manifestano a 4 Hz per asse  $y$  e 5 Hz per asse  $z$ . Successivamente sono state eseguite le misurazioni nelle reali condizioni d'esercizio del mezzo durante l'attività di perforazione della bancata.



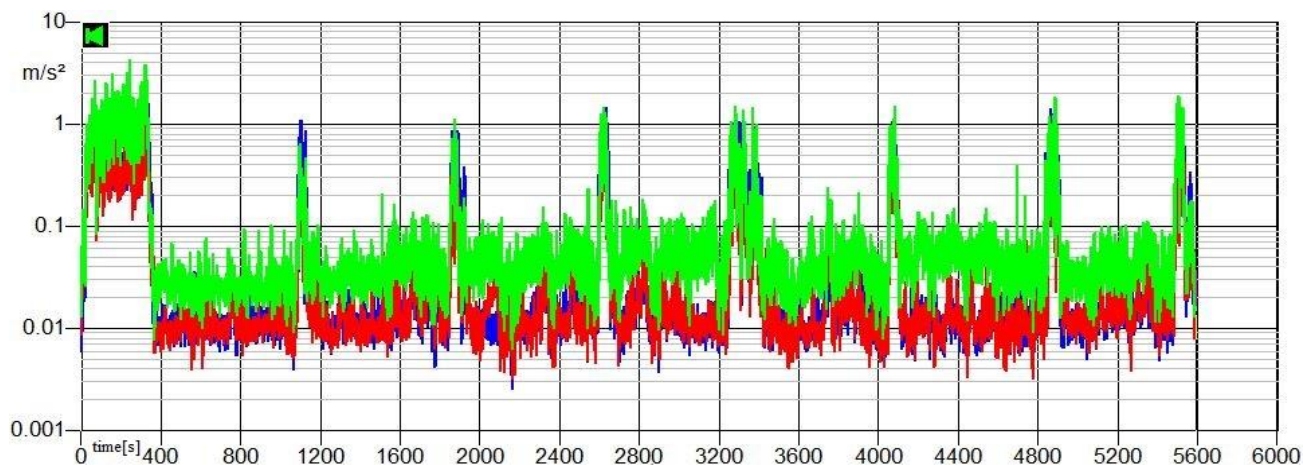


Fig. 30: Time History del segnale misurato sulla macchina perforatrice durante attività quotidiana

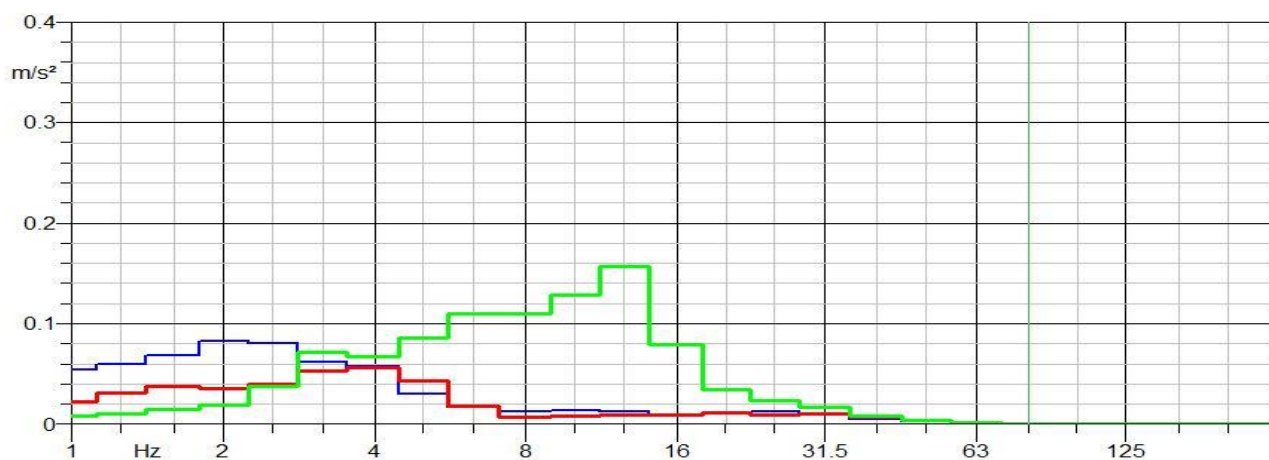


Fig. 31: spettro in frequenza del segnale misurato sulla macchina perforatrice durante attività quotidiana

Il segnale della Time History mostra un andamento approssimativamente costante, con modesti impulsi d'accelerazione dovuti sia allo spostamento della macchina da un punto all'altro della bancata per la realizzazione dei fori, che alla perforazione che compie l'asta nel terreno. Lo spettro in frequenza mostra una risonanza a 12.5 Hz per l'asse z, 2 Hz per asse x e 4 Hz per asse y. Come descritto precedente, l'operazione di perforazione può avere una durata variabile e, a dimostrazione dell'aleatorietà di questa lavorazione, si riporta di seguito una misurazione effettuate su una macchina considerando differenti fasi che si alternano tra loro; lo spostamento del macchinario per il posizionamento sulla bancata, fasi di perforazione e tempi regime minimo per consentire operazioni di fissaggio e manutenzione della macchina perforatrice.

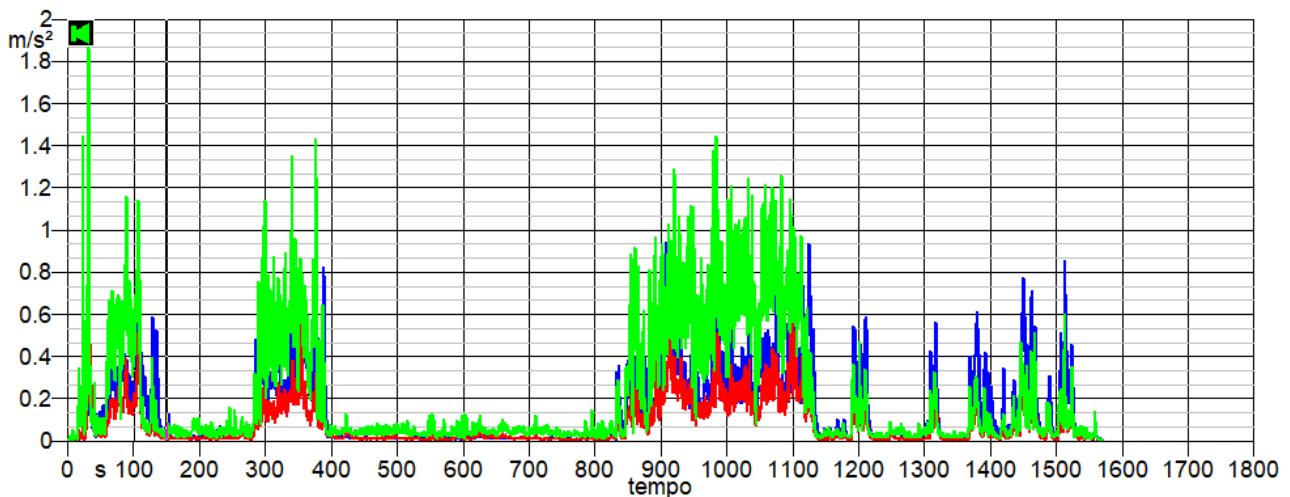


Fig. 32: Time History della trivella durante attività di perforazione

Per comodità grafica si riporta il grafico sopra in scala logaritmica per permettere una migliore visualizzazione dell'andamento del segnale

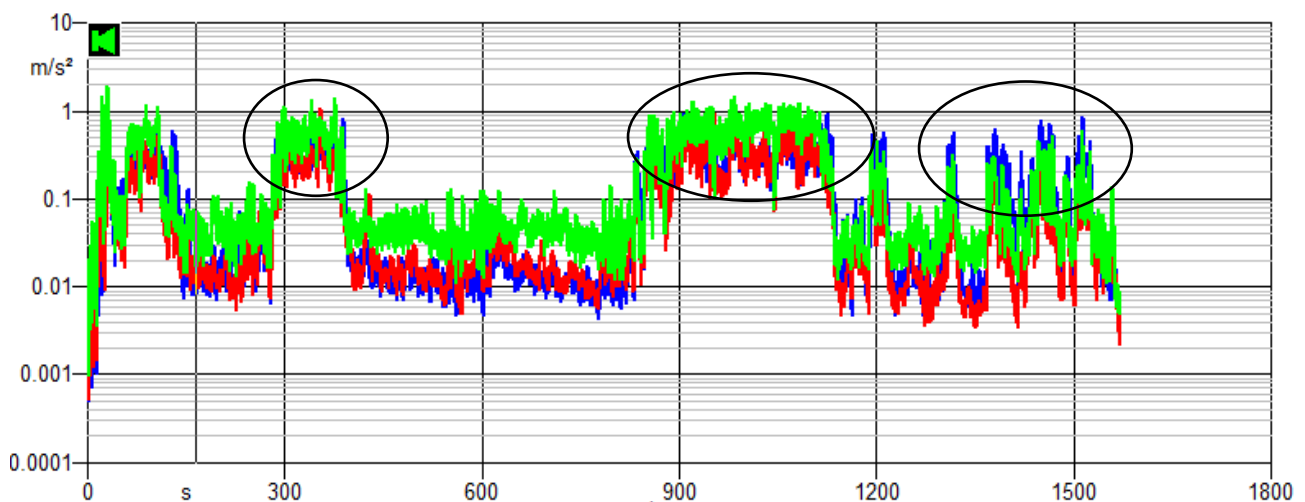


Fig. 33: evidenza di alcune operazioni dell'attività in scala logaritmica

Nel grafico sono evidenziate tre differenti fasi di lavorazioni; partendo da sinistra, nel primo caso si ha una lavorazione per la realizzazione di un foro di modesta profondità; nel secondo caso invece si può notare una lavorazione prolungata, mentre nel terzo caso si ha una sequenza di sollecitazioni di breve durata, dovute alle problematiche precedentemente descritte. Come detto l'analisi è stata effettuata anche lungo l'asse  $z$  della macchina per poter comprendere meglio le caratteristiche del segnale della sorgente vibratoria. Per dare un'idea di quanto il sedile riesca ad effettuare la sua azione di smorzamento si riportano di seguito i grafici della Time History e dello spettro in frequenza della misure lungo l'asse verticale per l'accelerometro montato sulla pedana (linea nera) e sul sedile (linea verde)

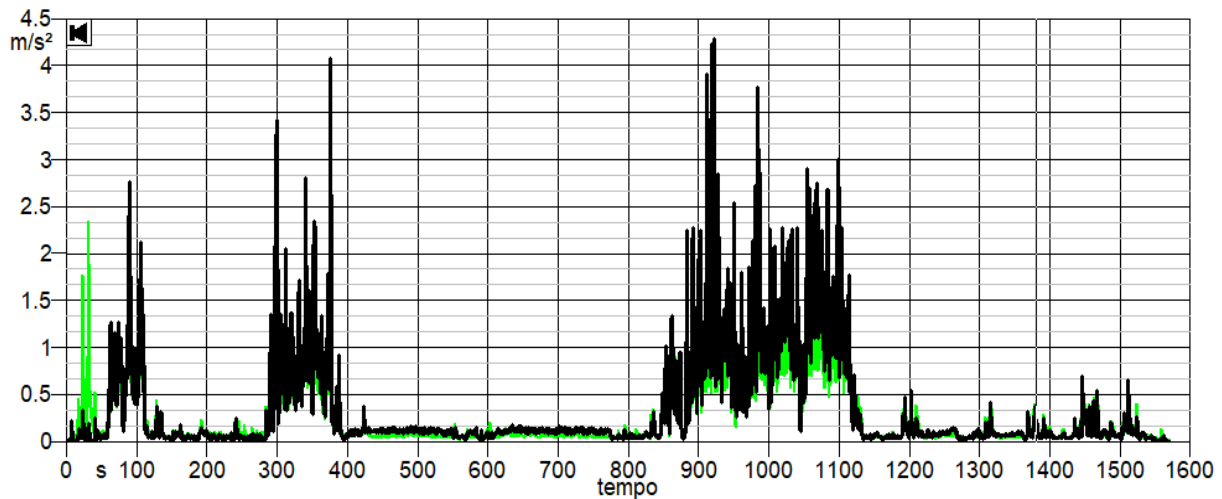


Fig. 34: confronto del segnale lungo  $z$  misurato sulla pedana e sul sedile

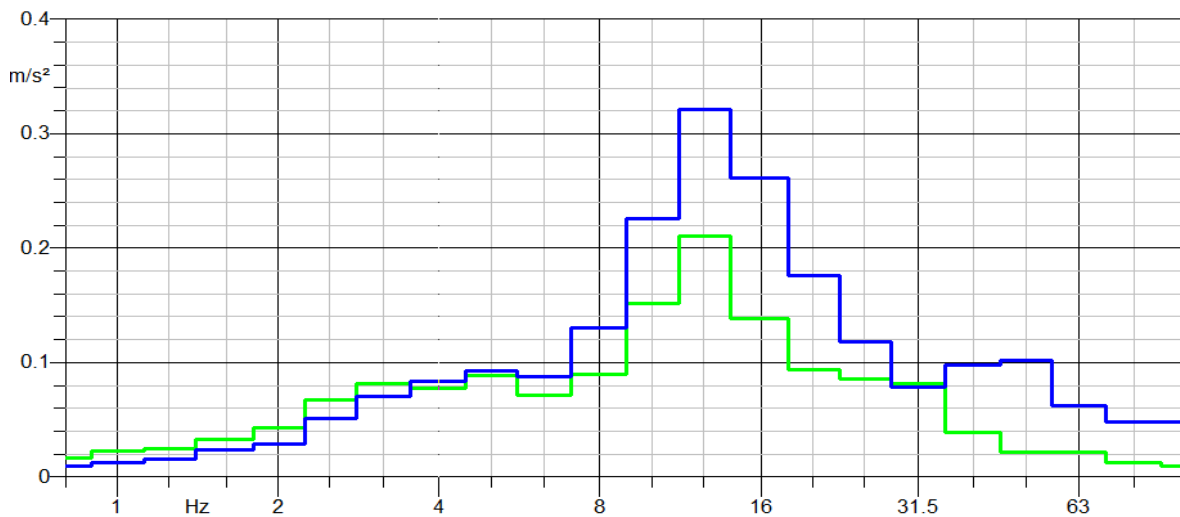


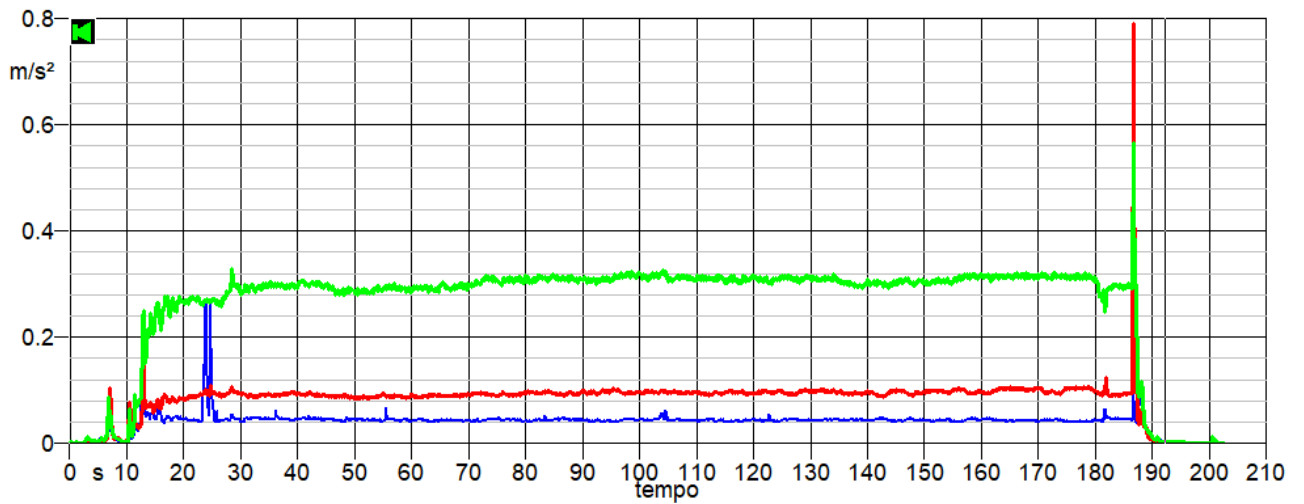
Fig. 35: confronto degli spettri lungo  $z$  misurato sulla pedana e sul sedile

Il grafico verde mostra l'andamento lungo l'asse  $z$  sul sedile mentre quello blu misurato alla base del sedile stesso; il maggior contenuto energetico è compresa in uno spettro compreso tra gli 8 e i 12 Hz appare evidente la frequenza fondamentale di sollecitazione a 12.5 Hz.

### ➤ Escavatore

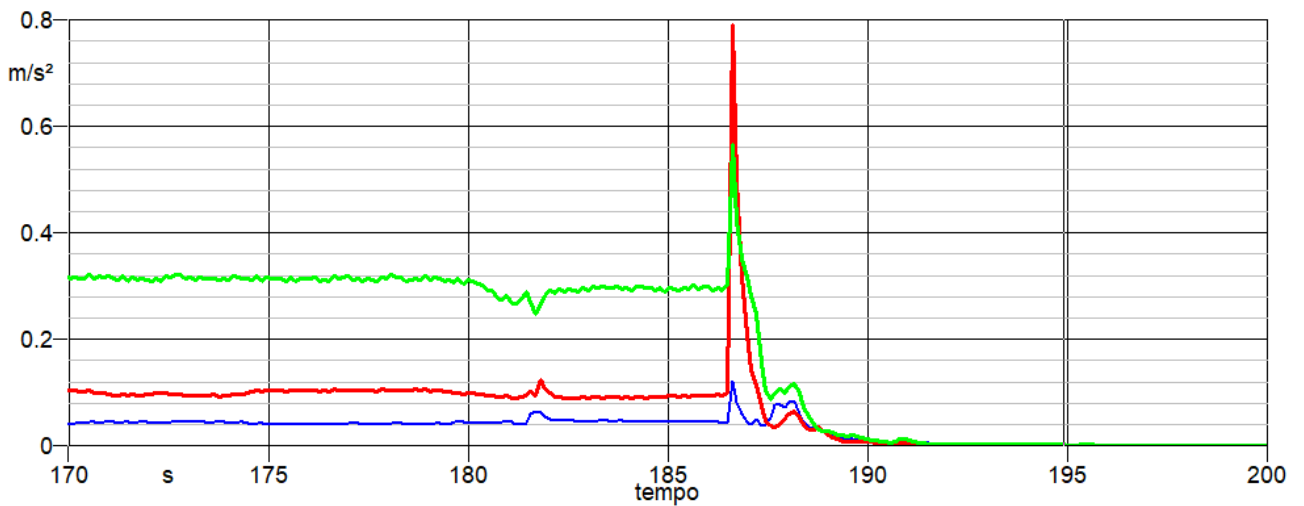
I valori sono riportati per comodità grafica in scala logaritmica per una migliore visualizzazione del segnale. Come nei casi precedenti, sono state effettuate prima le misure al minimo e poi durante l'attività operativa svolta durante la giornata per lo svolgimento dei vari compiti. Le curve rappresentano, come da convenzione, le sollecitazioni lungo le varie direzioni (blu= $x$ , rosso= $y$  e verde= $z$ )





*Fig. 36: Time History della prova al minimo dell'escavatore lungo i tre assi di riferimento*

Si può notare dai grafici come all'inizio e alla fine della misurazione ci siano dei rilevanti picchi generati in fase d'avviamento e d'arresto del mezzo, sostanzialmente maggiore in termini di valori assoluti rispetto all'avviamento.



*Fig. 37: particolare del segnale che evidenzia l'arresto del mezzo*

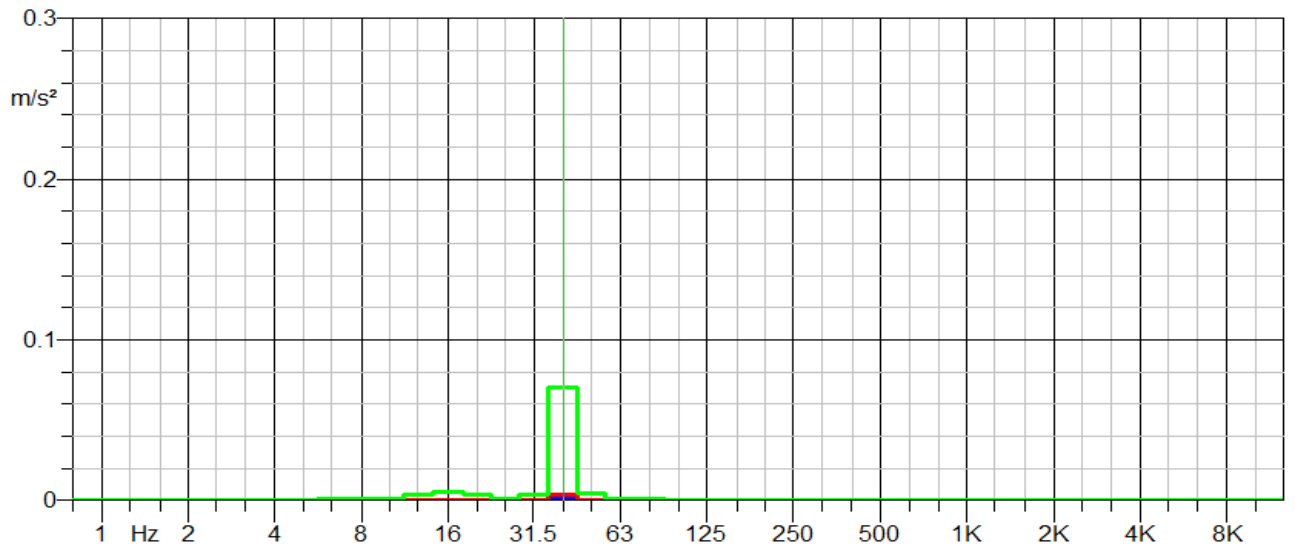


Fig. 38: spettro in frequenza del mino del mezzo

La frequenza massima di sollecitazione è 40 Hz, quindi al minimo possiamo dire che sia ha una specifica frequenza massima che però come vedremo successivamente risulterà differente da quella riscontrabile durante l'attività operativa

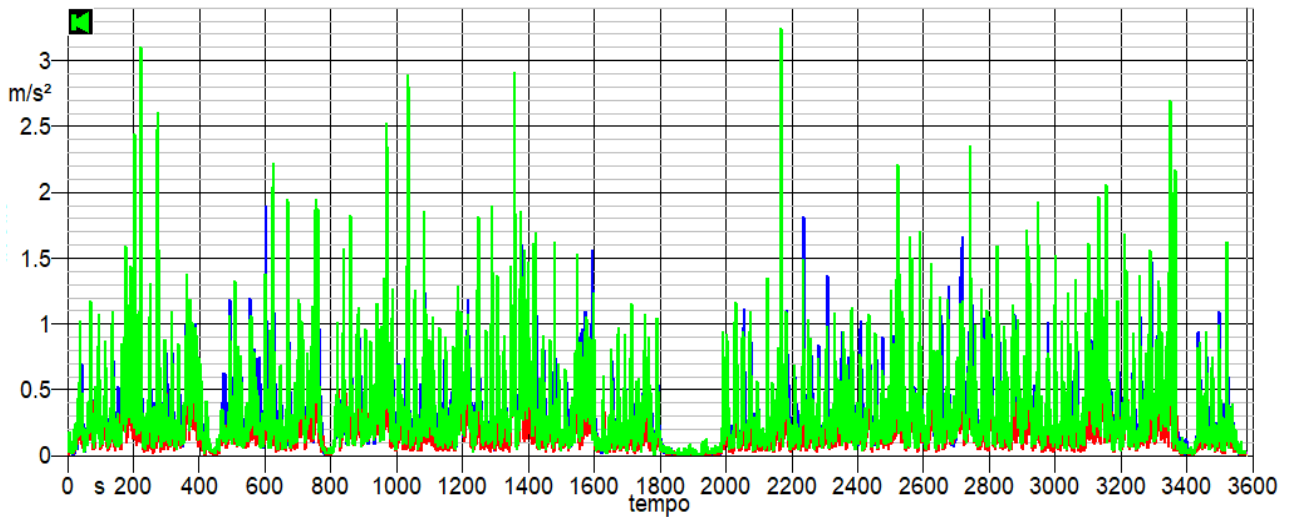


Fig. 39: andamento del segnale per l'attività di movimentazione terra

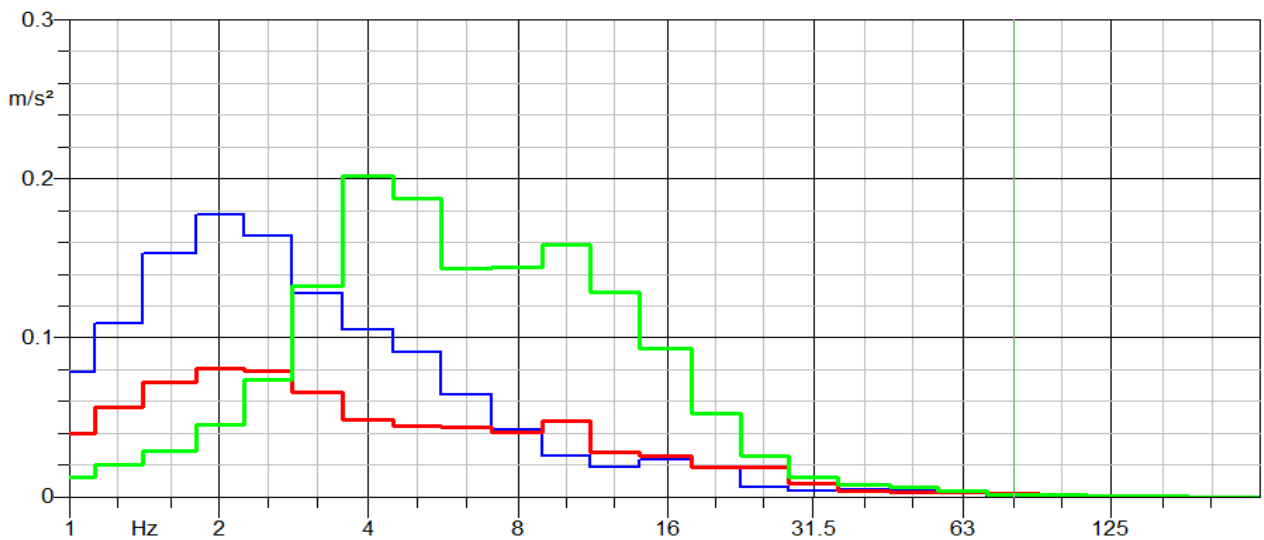


Fig. 40: spettro in frequenza del segnale per l'attività dell'escavatore

Lo spettro evidenzia una sollecitazione consistente a diverse frequenze, 2 Hz lungo  $x$  e  $y$  mentre 4 Hz lungo  $z$  con componente rilevante anche a 10 Hz

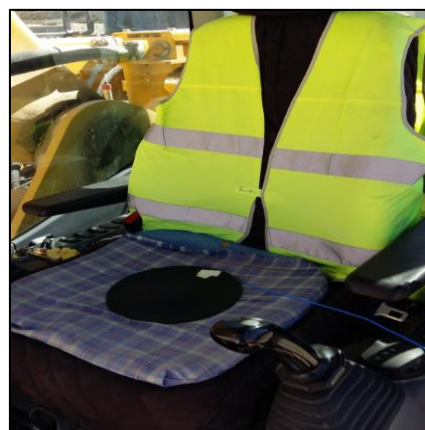


Fig. 41: misure effettuate sull'escavatore

### ➤ Jeep

I grafici nella pagina successiva riportano le misurazioni effettuate sulla jeep al minimo con il relativo spettro in frequenza. Si può notare, anche in questo caso, dall'andamento del segnale nel tempo, le particolari sollecitazioni che si hanno sia all'avviamento che allo spegnimento del mezzo.

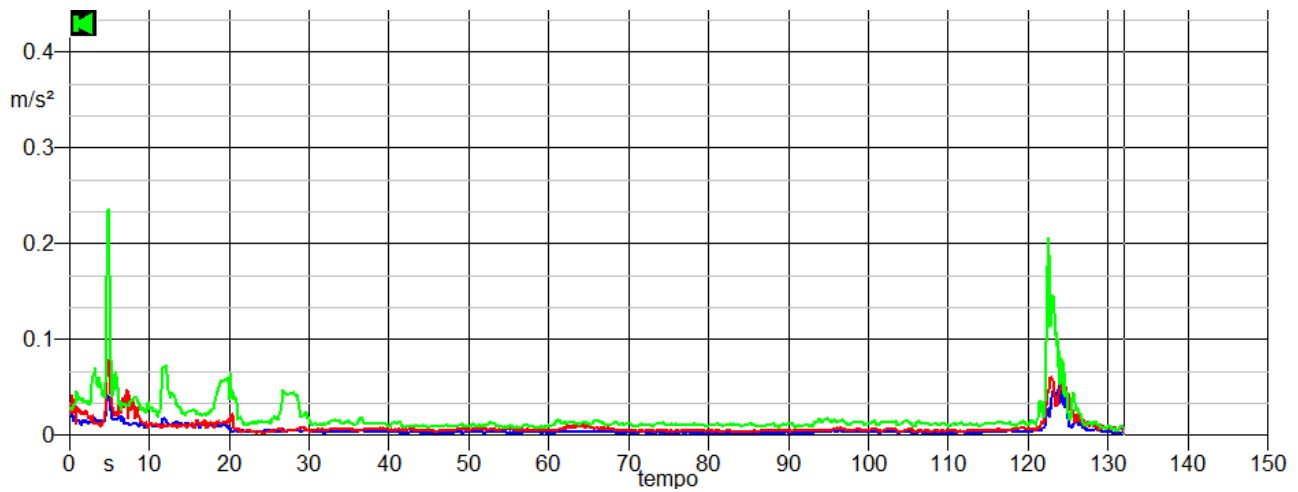


Fig. 42: andamento del segnale per il minimo della jeep

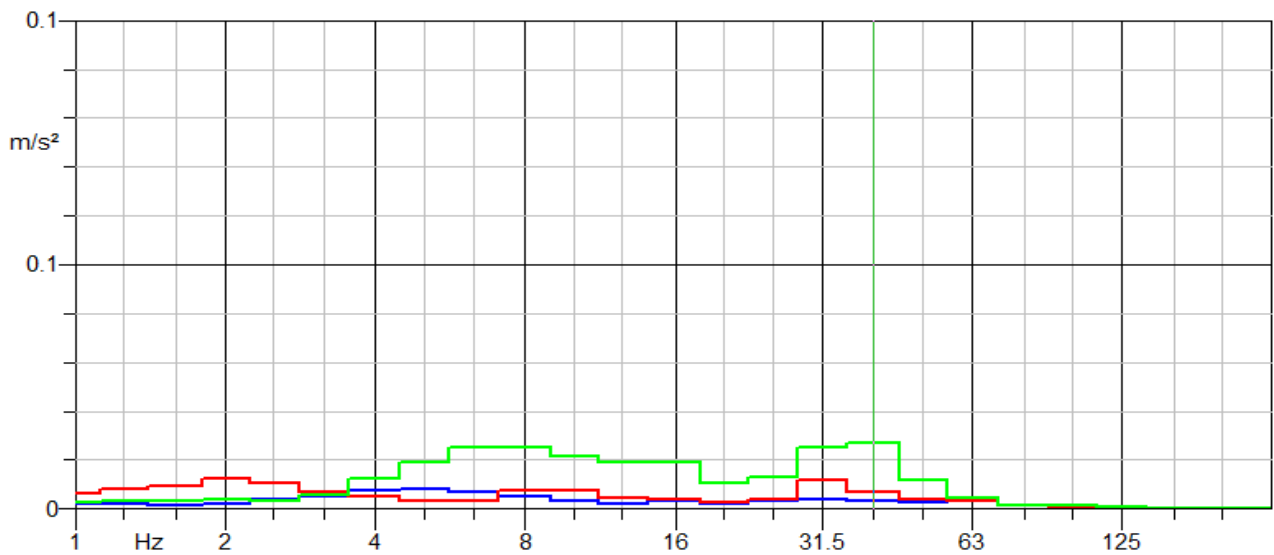


Fig. 43: spettro in frequenza della jeep al minimo

Il grafico che viene riportato di seguito è stato preso come riferimento per un'attività generica di trasporto del personale all'interno del piazzale della cava, Questa è una di quelle attività che hanno un'estrema aleatorietà dovuta alle diverse esigenze che si hanno durante il giorno. Si è potuto constatare come i valori di sollecitazione possano essere elevati a causa delle condizioni variabili del terreno ma in quasi sempre i tempi sono contenuti in quanto necessari a spostamenti brevi all'interno del sito

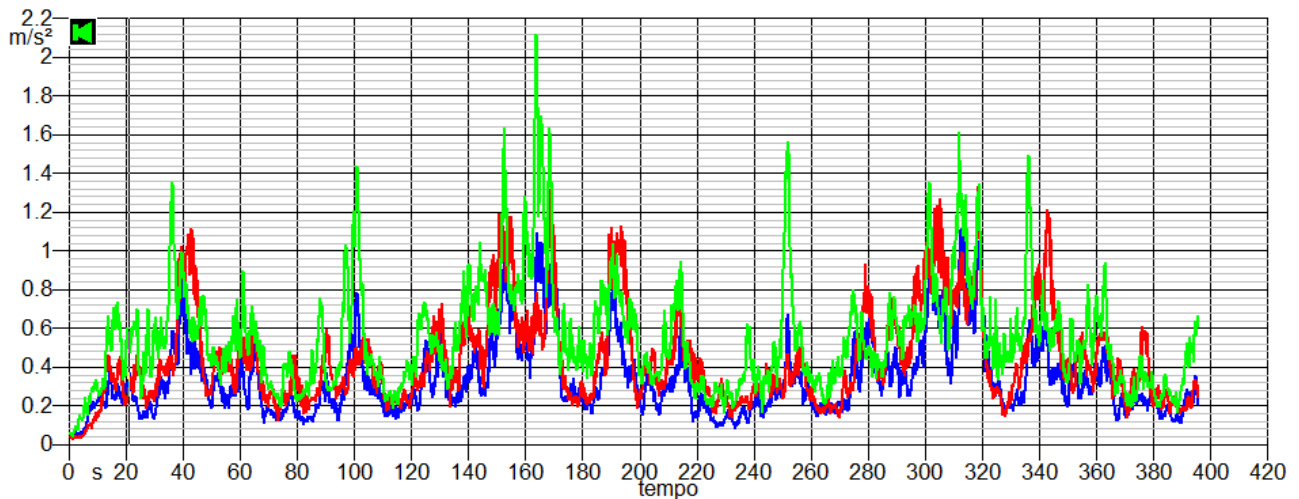


Fig. 44 : Time History della prova svolta sulla jeep

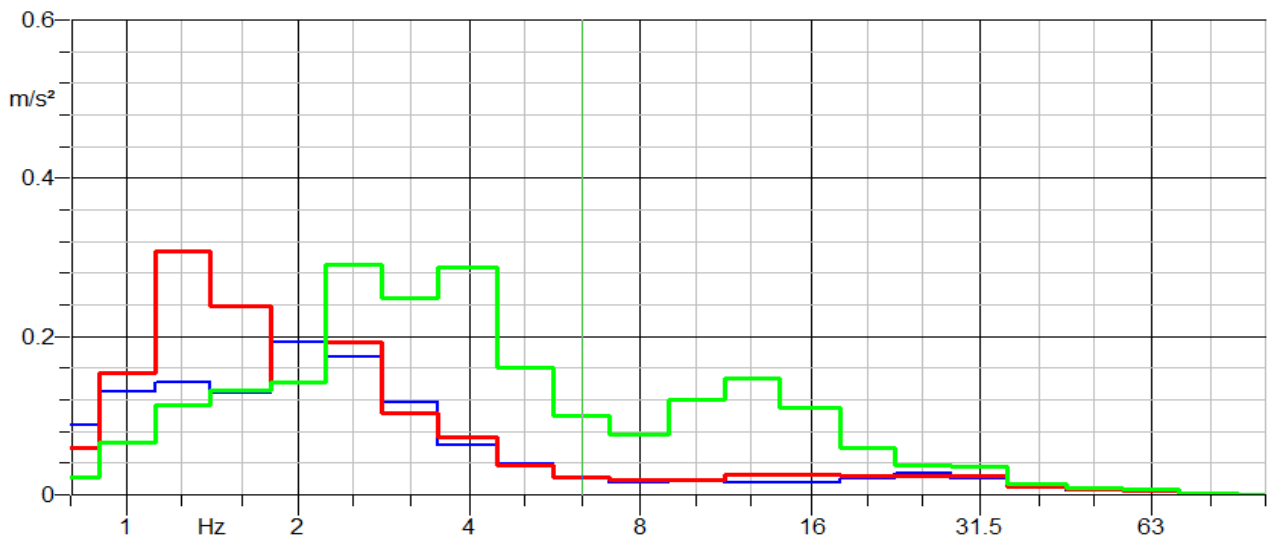


Fig. 45: spettro in frequenza della prova svolta sulla jeep

Il grafico mostra due frequenze rilevanti per l'asse z a 2.5 Hz e 4 Hz mentre a 1.3 Hz per asse y

### ➤ Pala gommata

Purtroppo a causa di problemi di carattere operativo sulla pala gommata e sulla ruspa è stato possibile eseguire solo delle misurazioni al minimo ma non durante l'attività operativa poiché tale mezzo è stato inviato in manutenzione ed è rientrato in funzionamento solo dopo la fine della campagna delle misure. Di seguito i grafici delle misurazioni effettuate al minimo

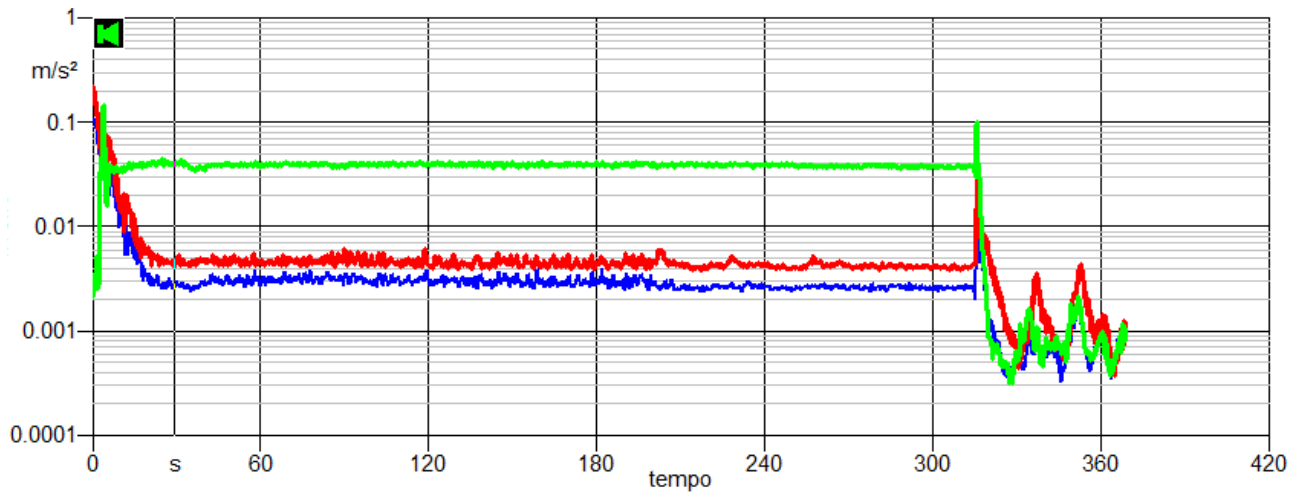


Fig. 46: andamento del segnale vibratorio al minimo

Risulta evidente come la direzione di sollecitazione massima sia lungo l'asse  $z$  e lo spegnimento del mezzo generi un notevole picco di sollecitazione lungo tutte le direzioni

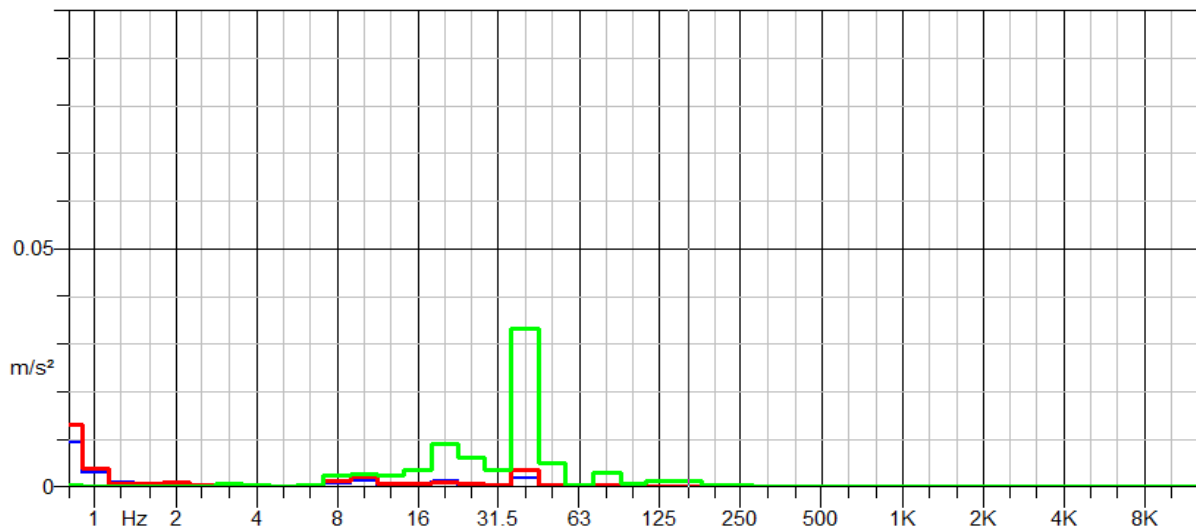


Fig. 47: spettro in frequenza della pala gommata al minimo

La frequenza fondamentale al minimo è risultata essere di 40 Hz sempre lungo l'asse  $z$ . Per far comprendere meglio i livelli di vibrazione in gioco è stata riportata una prova realizzata con l'accelerometro tri-assiale posizionato alla base del sedile ma, anziché mantenere il regime al minimo, sono stati fatti variare accelerando con regolarità per un intervallo di tempo limitato, I segnali visualizzati non sono ponderati, quindi rappresentano la sollecitazione vera e propria del sedile.

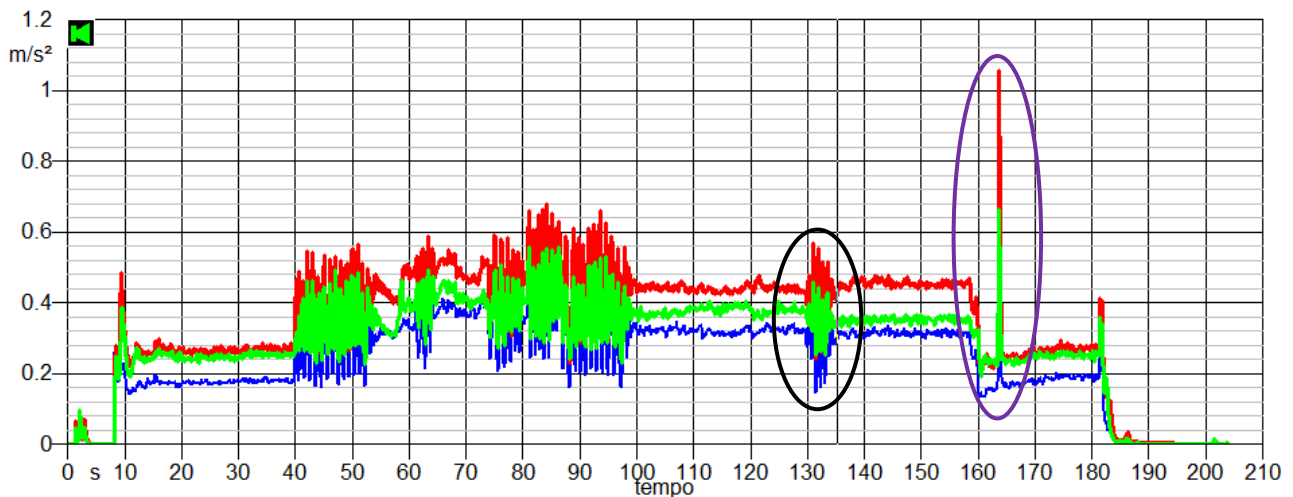


Fig. 48: andamento del segnale della simulazione per la pala gommata

Il grafico mostra le varie fasi con cui viene sollecitato il sedile; il primo spunto è dovuto all'avviamento del mezzo, si mantiene il minimo per diversi secondi e poi si evidenziano sollecitazioni dovute all'aumentare del numero dei giri del motore, variabili per poter rappresentare le condizioni più diverse dell'attività operativa. Successivamente il mezzo è stato lasciato a giri costanti, per poi effettuare il sollevamento e l'abbassamento della benna (cerchio nero), operazione che comporta una richiesta d'ulteriore potenza del motore. Il picco mostrato nel cerchio viola simula un'improvvisa sollecitazione a cui potrebbe essere esposto l'operatore, ad esempio passando dentro una buca, ed è stata realizzata con un movimento improvviso dell'operatore sul sedile, fatto che, a quanto riferito da lui stesso, si può verificare frequentemente durante la guida.

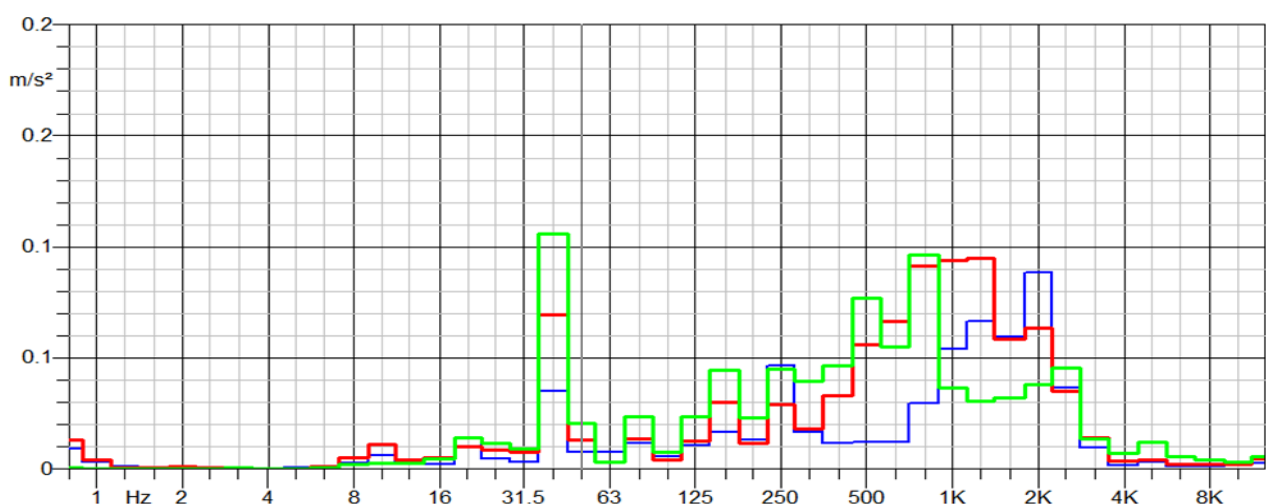


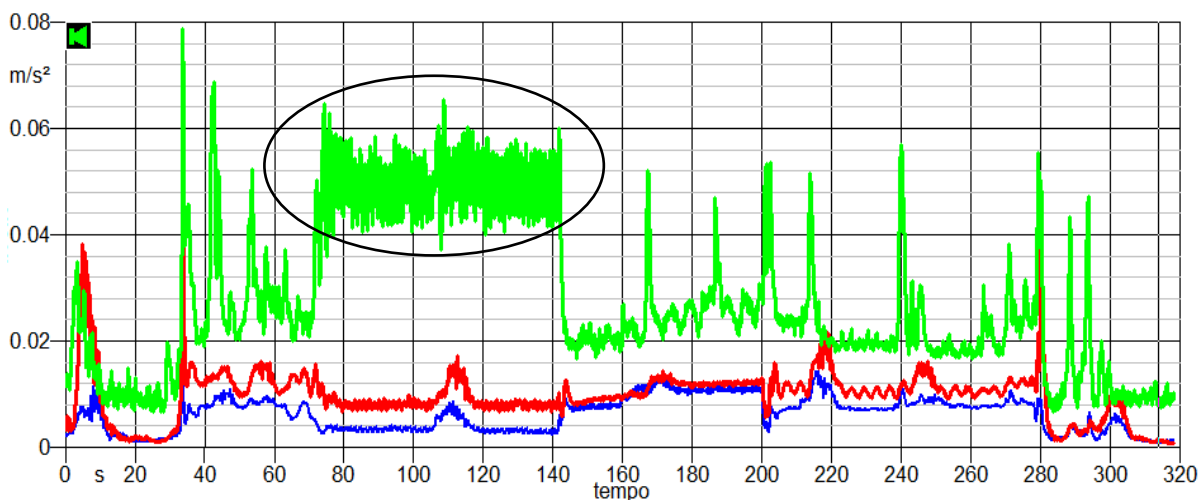
Fig. 49: spettro in frequenza della pala gommata con la simulazione di varie fasi

Lo spettro in frequenza misurato sul sedile mostra un andamento differente rispetto a quelli che generalmente s'incontrano nell'esposizione a corpo intero. Infatti la frequenza fondamentale a 40Hz

coincide con quella misura effettuata nella corpo intero, dimostrando l'importanza dell'analisi preliminare della sorgente, mentre tutte le altre frequenze sono tipiche di oscillazioni meccaniche che coprono uno spettro molto più ampio, arrivando fino a 2 kHz.

### ➤ *Ruspa*

Come nel caso della pala gommata, non è stato possibile effettuare rilevazioni durante l'attività operativa quotidiana. Le misure al minimo sono state realizzate con lo stesso criterio di quella della pala gommata, ossia simulando le reali condizioni operative d'impiego. I picchi che si osservano nella Time History del segnale di prova sono dovuti all'inserimento del dispositivo d'accelerazione automatica del mezzo, che consiste in aumento del numero di giri mantenuto costante fino a che non viene d'inserito attraverso un comando manuale da parte dell'operatore che permette un aumento di potenza del mezzo. Questa prova è stata realizzata per un tempo prolungato (cerchio nero) per dare un'idea dell'elevato livello d'accelerazione che può essere raggiunto da fermo, senza quindi considerare il movimento del mezzo sul terreno. Gli altri picchi mostrano prove d'aumento del numero dei giri motore per intervalli di tempo minori.



*Fig. 50: visualizzazione della misura della vibrazione a corpo intero per la ruspa con variazioni giri motore*

Il grafico evidenzia come l'asse più sollecitato sia quello  $z$  in direzione verticale, mentre lo spettro invece indica come frequenza fondamentale di sollecitazione la componente a 16 Hz.



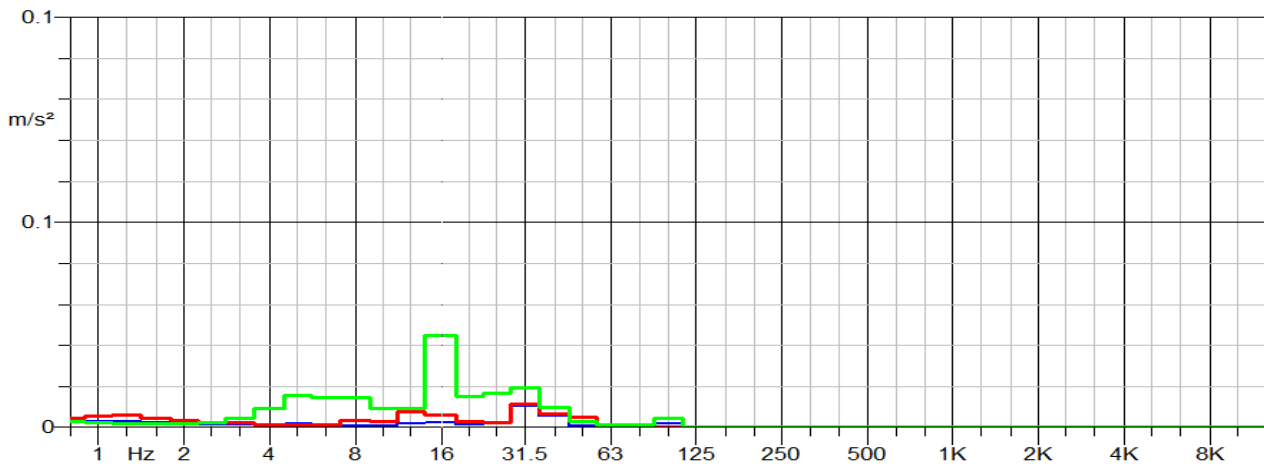


Fig. 51: andamento dello spettro per la misurazione alla corpo intero in prova

Seguendo la stessa metodologia di prima si è voluto testare il comportamento del sedile dell'operatore posizionando un accelerometro triassiale esattamente nel punto d'attacco della base. Anche in questo caso è stata realizzata una prova variando i giri del motore, inserendo il dispositivo d'accelerazione, ma in questo caso variano il numero dei giri in base al dosaggio di gas dell'operatore arbitrari e non regolati dal sistema di regolazione automatica della macchina.

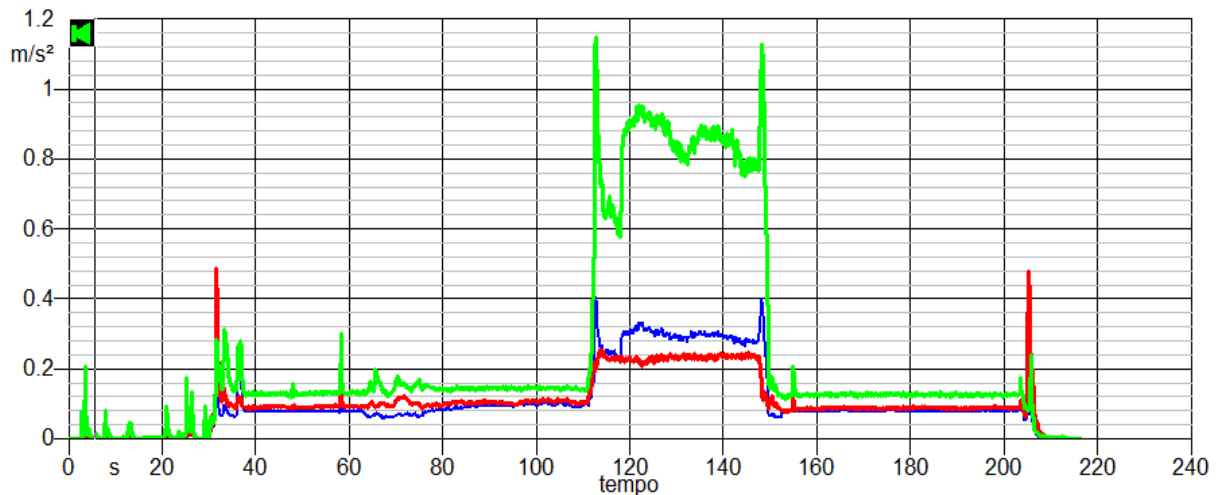


Fig. 52: andamento del segnale di prova della ruspa per accelerometro triassiale

Lo spettro invece mostra una frequenza fondamentale a 31.5 Hz uguale a quella per la vibrazione a corpo intero ma si ha un contributo rilevante a frequenze maggiori fino a 2 kHz, con una componente a 315 Hz, che rappresenta la fondamentale della struttura che sostiene il sedile

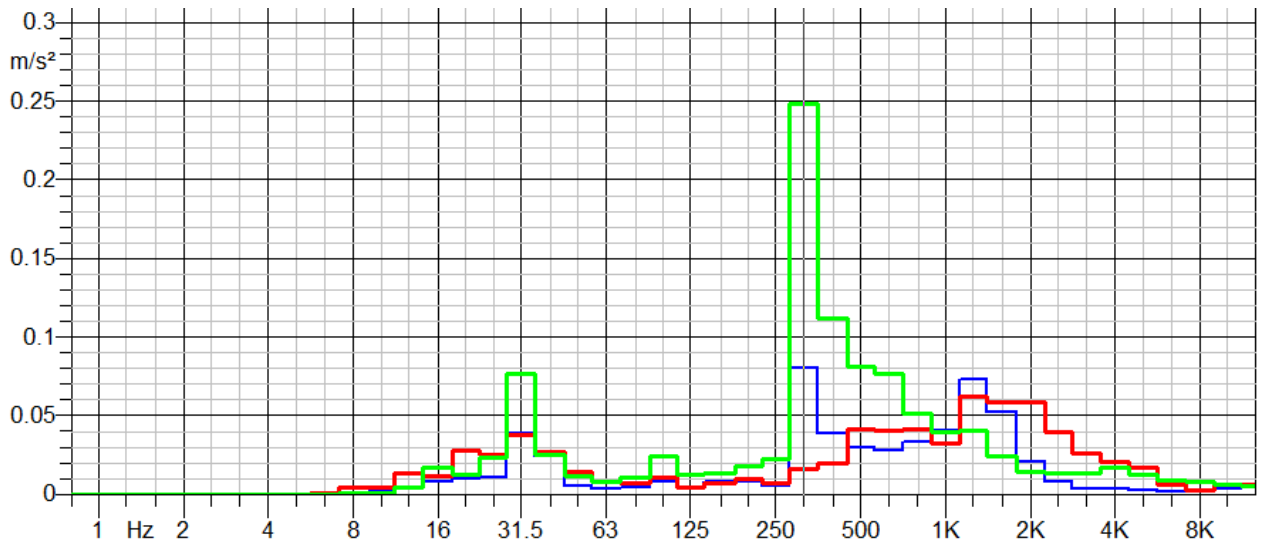


Fig. 53: spettro per accelerometro triassiale ruspa

### ➤ *Camion LHD*

Le misure realizzate sui mezzi per la movimentazione terra sono state diverse e sui tre mezzi descritti nella sezione precedente. Essendo mezzi sempre impiegati nelle attività quotidiane vi è stata la possibilità di realizzare un maggior numero di prove, sia al minimo che in attività operativa

#### ▪ *Dumper Perlini DP 405*

I seguenti grafici mostrano le prove che sono state realizzate sul dumper Perlini prima a regime costante del motore e poi variando il numero dei giri: esse sono state realizzate direttamente sul supporto del sedile dove si trova il guidatore e quindi non sono ponderate, con l'obiettivo di caratterizzare la sorgente vibratoria

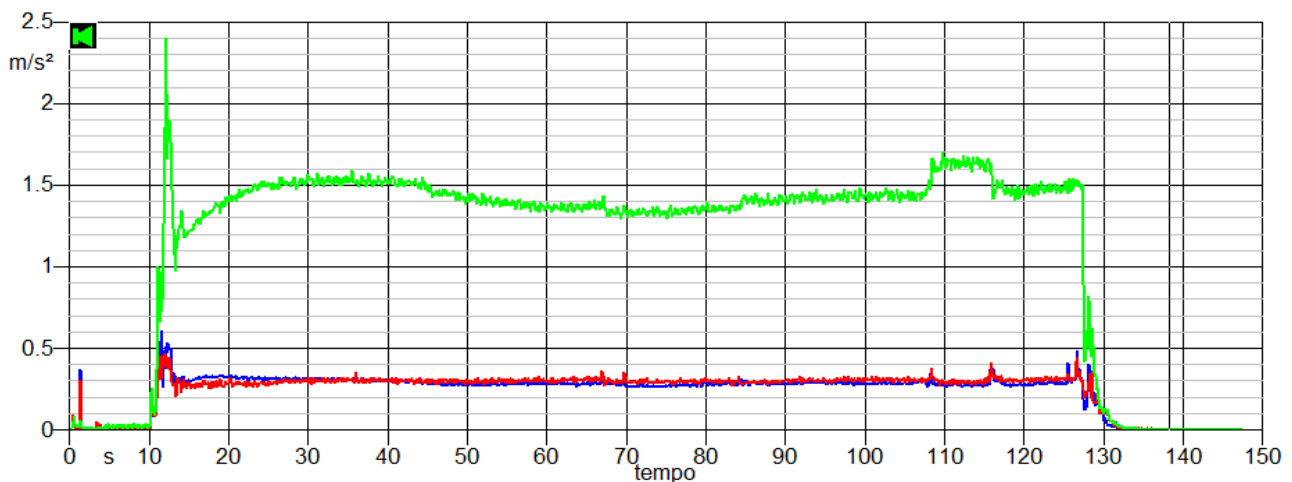


Fig. 54: Time History sorgente Dumper Perlini con giri costanti

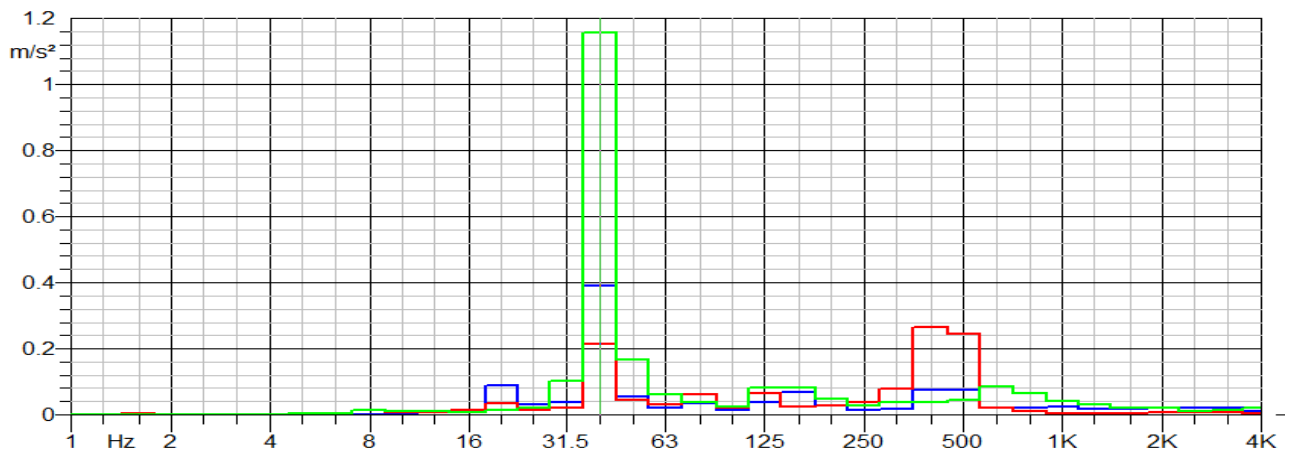


Fig. 55: spettro sorgente Dumper Perlini con giri costanti

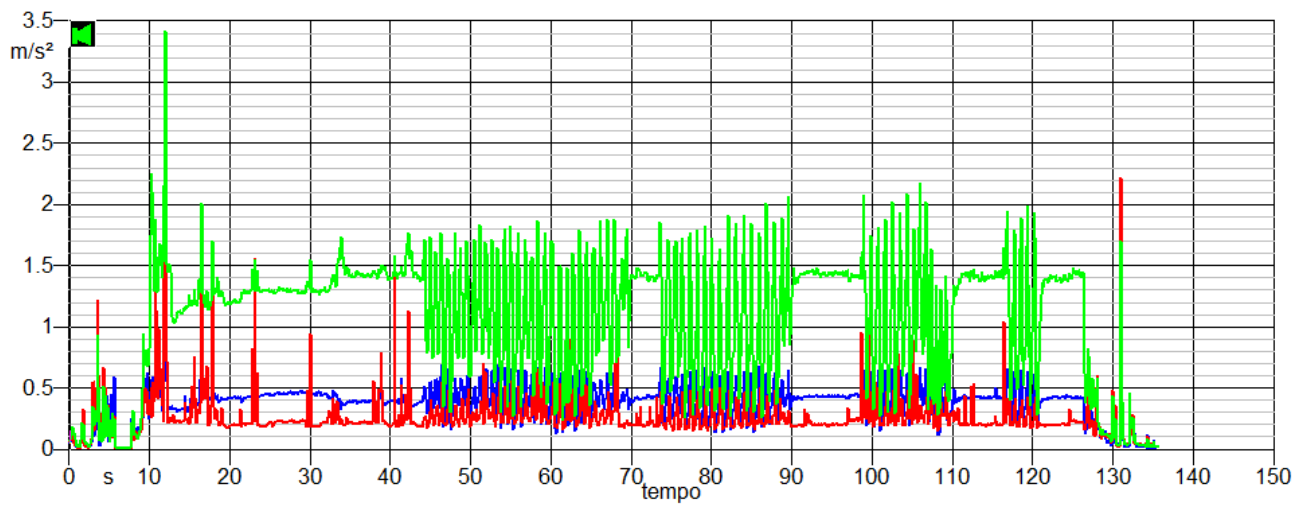


Fig. 56: Time History sorgente Dumper Perlini con giri variabili

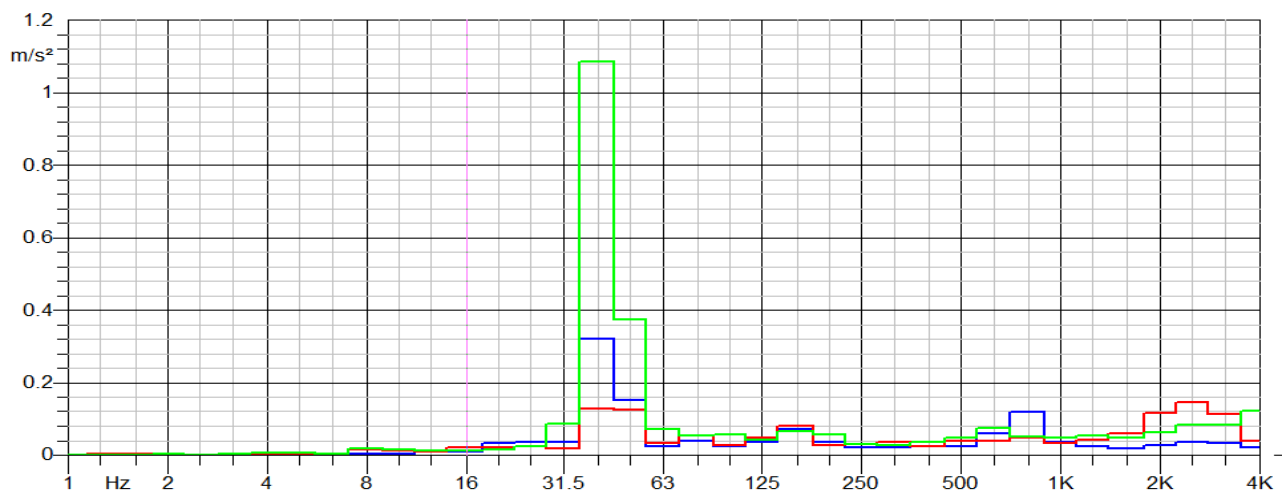


Fig. 57: spettro sorgente Dumper Perlini con giri variabili

Si evidenzia chiaramente un elevato valore di picco in fase d'accensione del mezzo, maggiore rispetto a quello dovuto allo spegnimento, cosa che invece non avveniva negli altri mezzi. Inoltre, come nelle altre prove, la direzione di sollecitazione maggiore è sempre lungo l'asse  $z$  ma, sia al minimo che a giri variabili, la differenza è molto più rilevante. La frequenza fondamentale è stata misurata a 40 Hz sia nelle condizioni di regime di minimo del motore che in quelle di giri variabili. Inoltre il range dello spettro in frequenza conferma valori molto simili a quelli degli altri mezzi testati, ossia contenuti energetici elevati per frequenze basse



*Fig. 58: accelerometro posizionato alla base del sedile*

Il mezzo, nello svolgere la propria attività, come verrà descritto successivamente, compie dei cicli nei quali, l'escavatore riempie il cassone di materiale che poi il mezzo, muovendosi sulle piste del piazzale, porterà al frantoio per la lavorazione. Per poter effettuare lo scarico, deve essere sollevato il cassone gradualmente e tale operazione richiede un incremento di potenza, con aumento dei giri motore, che si concretizza in una ulteriore sollecitazione vibratoria del telaio. Il grafico seguente riporta una simulazione che è stata eseguita sollevando e abbassando il cassone vuoto per evidenziare come avviene tale operazione. Il sollevamento viene eseguito da due pistoni che lavorano in due distinte fasi: il primo si estende fino a metà corsa, poi il sistema si arresta automaticamente per qualche secondo in modo tale da permettere l'inserimento del secondo pistone che conclude il sollevamento fino a fondo corsa per scaricare tutto il materiale. Il motivo di questo sistema è duplice; il primo per effettuare un deflusso del materiale dal cassone graduale; il secondo è di sicurezza; qualora cedesse uno dei due pistoni interviene l'altro per una discesa graduale e garantire che non avvenga un impatto del cassone sul mezzo stesso, con un eventuale ribaltamento

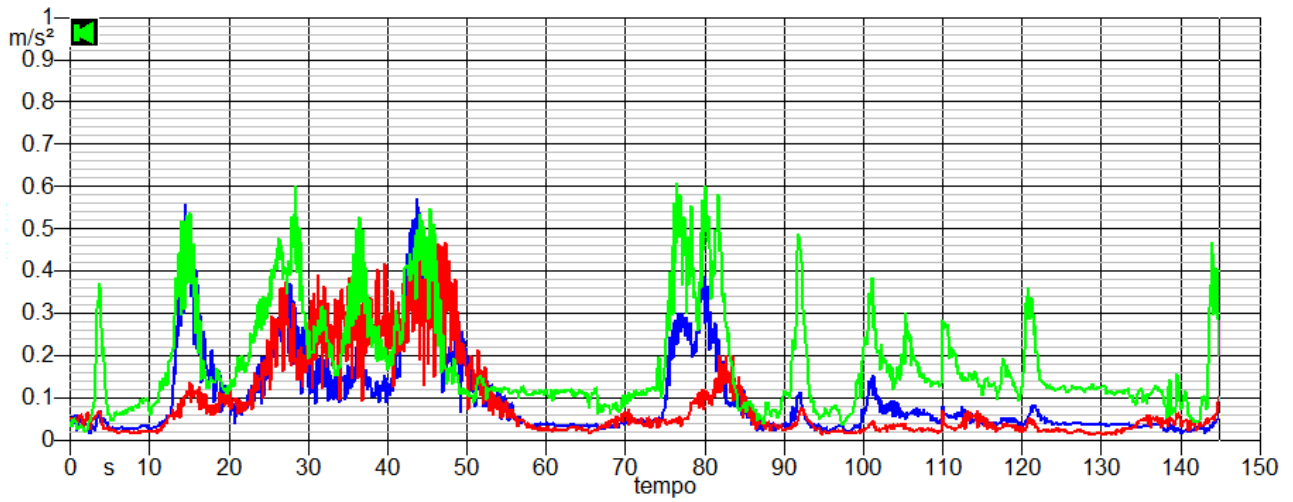


Fig. 59: Time History Dumper Perlini con prova di sollevamento

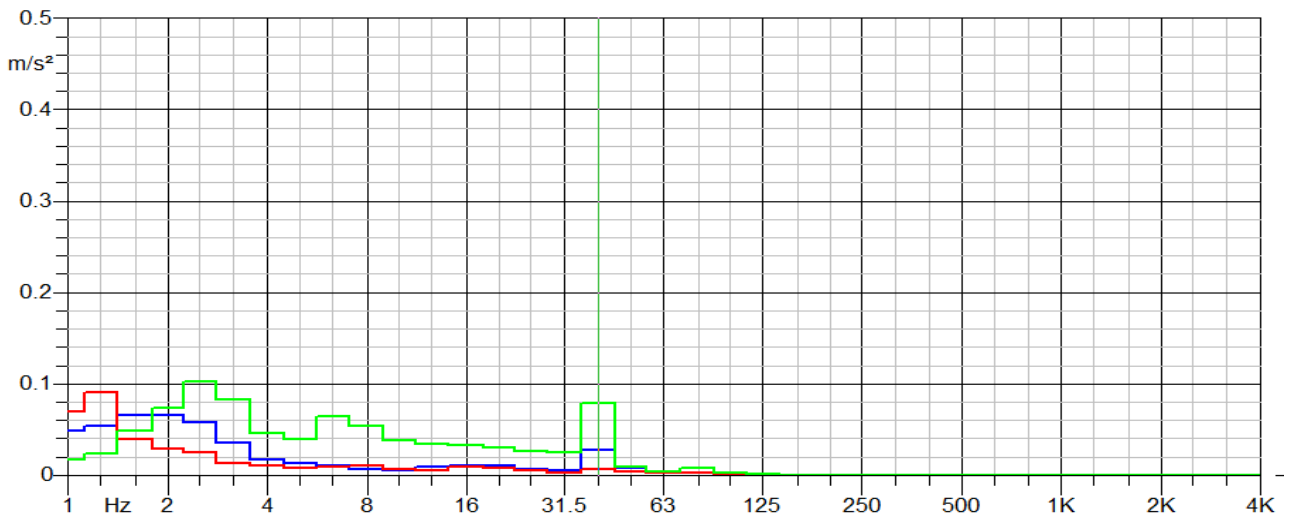


Fig. 60: spettro frequenza Dumper Perlini per prova di sollevamento

Lo spettro in frequenza invece dimostra la stessa fondamentale a 40 Hz per l'asse  $z$  ma al tempo stesso anche un elevato contributo energetico alle bassissime frequenze, 1-2 Hz.



Fig. 61: prova di sollevamento Dumper Perlini

Il grafico seguente invece riporta la misura effettuata sull'operatore 1 per una fase della giornata lavorativa. Per semplicità si ritiene trascurabile la variazione del peso del mezzo dovuta alla diminuzione graduale del carburante nei serbatoi durante l'arco della giornata.

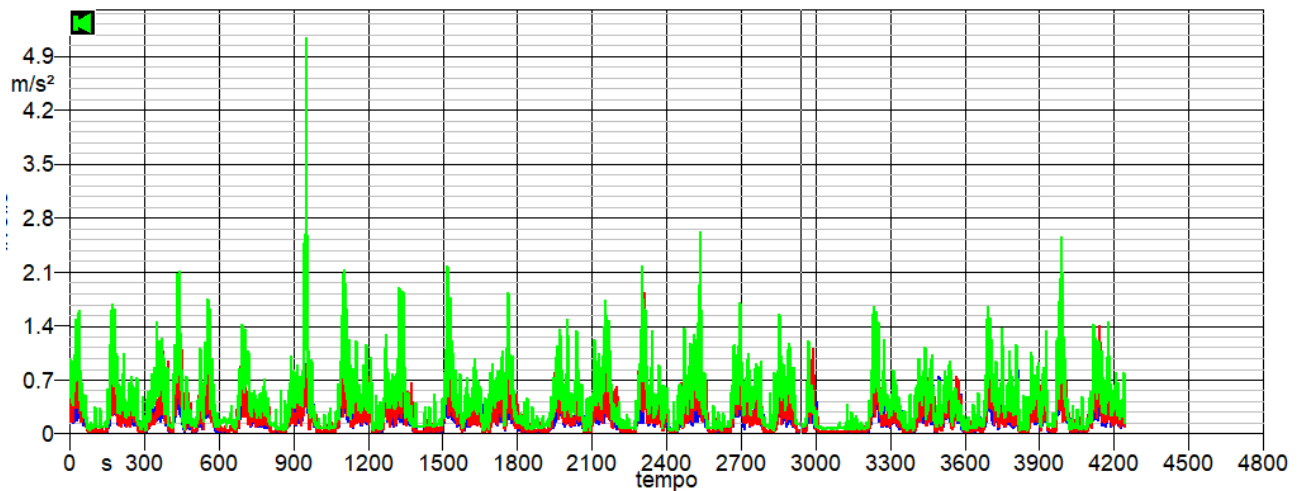


Fig. 62: Time history Dumper perlini operatore 1

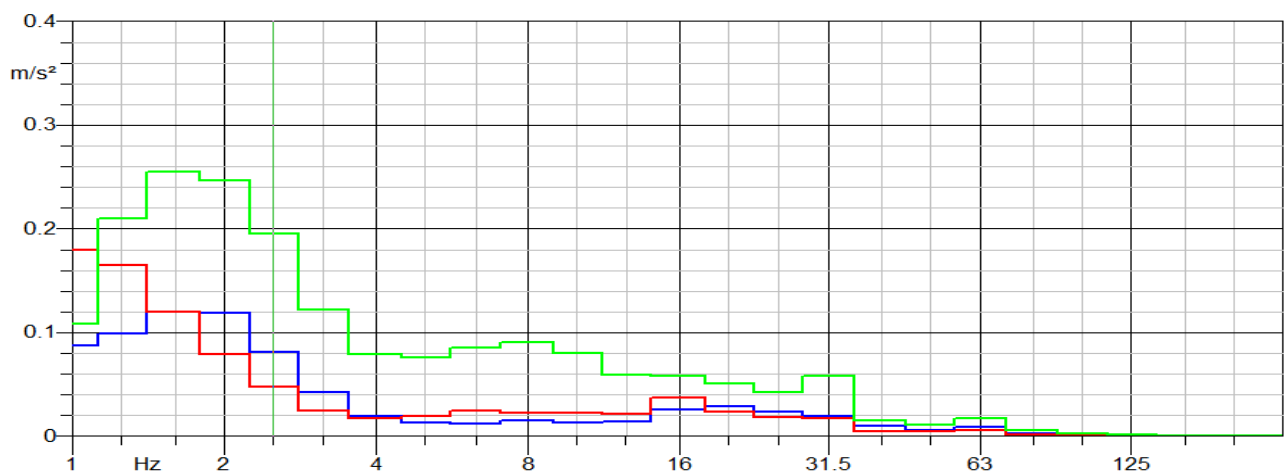


Fig. 63: spettro in frequenza per l'operatore 1

L'andamento del segnale nel tempo è dovuto alle varie fasi di lavorazione e verrà analizzato nel dettaglio in seguito. Lo spettro invece conferma quanto visto nella prova simulata, ossia un elevato contributo sotto i 2 Hz.

### ▪ Dumper 769 Caterpillar

La campagna di misure è proseguita anche con l'altro mezzo, il 769 Caterpillar. Questo veicolo ha mostrato fin da subito mostrato un maggiore livello vibratorio, già come sensazione percepita a bordo e nel rumore durante il funzionamento. Le prove al minimo evidenziano le stesse considerazioni fatte per il Perlini, ossia sollecitazione maggiore lungo l'asse  $z$  molto più rilevante rispetto agli altri due assi

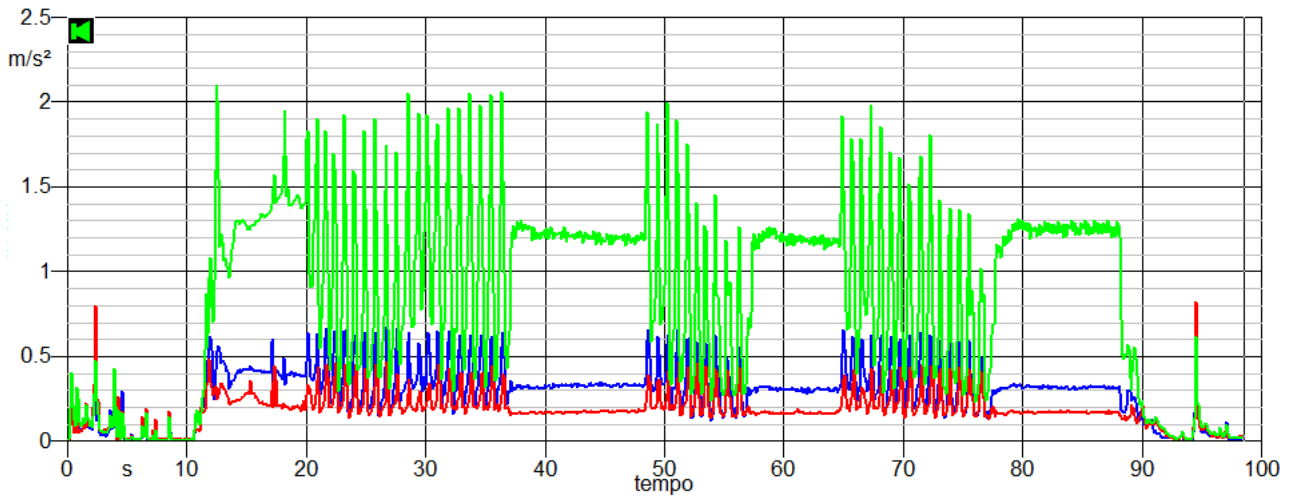


Fig.64: Time History sorgente Dumper 769 Carterpillar con giri variabili

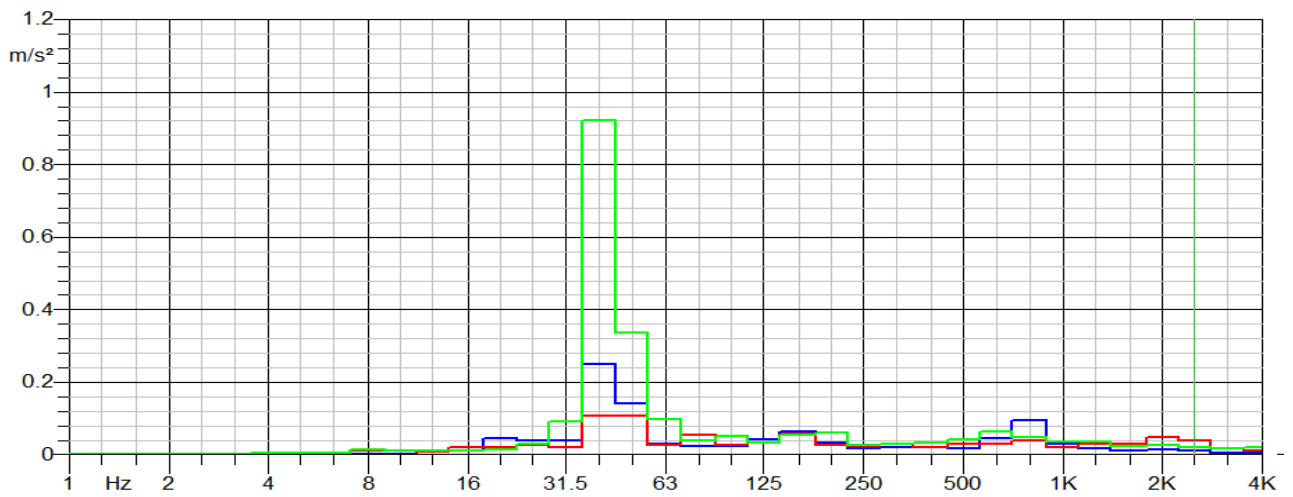


Fig. 65: Spettro sorgente Dumper 769 Caterpillar con giri variabili

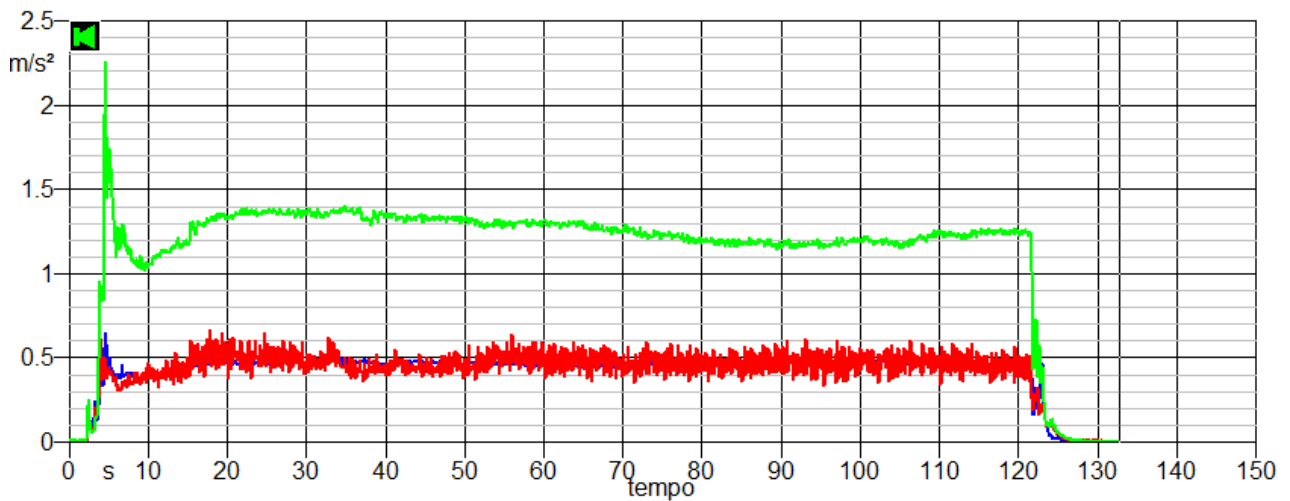


Fig.66: Time History sorgente Dumper 769 Carterpillar con giri costanti

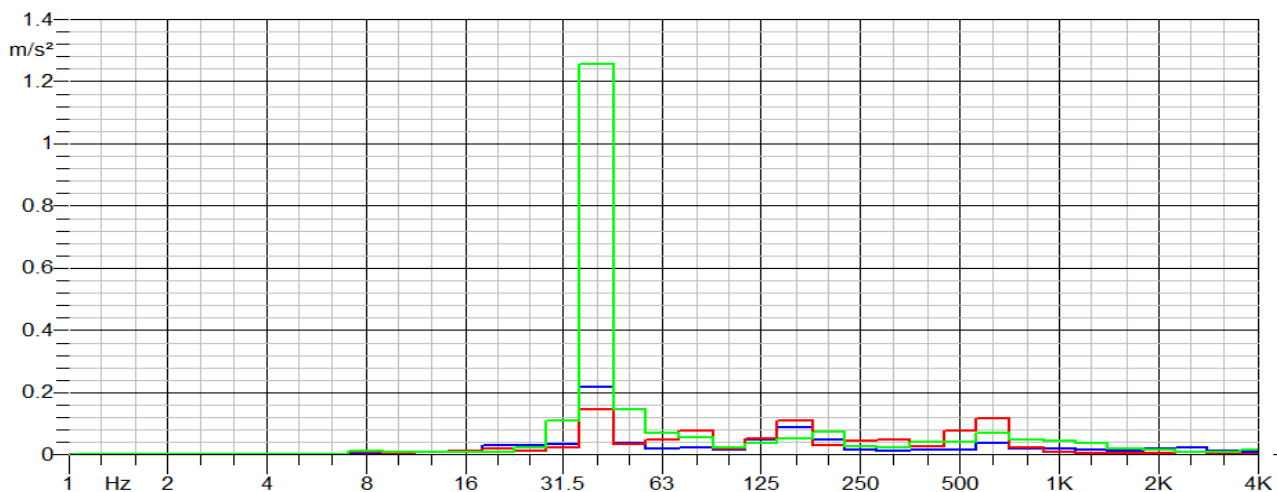


Fig.67: spettro sorgente Dumper 769 Caterpillar con giri costanti

Si evidenzia un consistente contributo energetico nel range tra 1.6 Hz e 2 Hz, soprattutto dell'asse z.

▪ **Mercedes 4 assi**

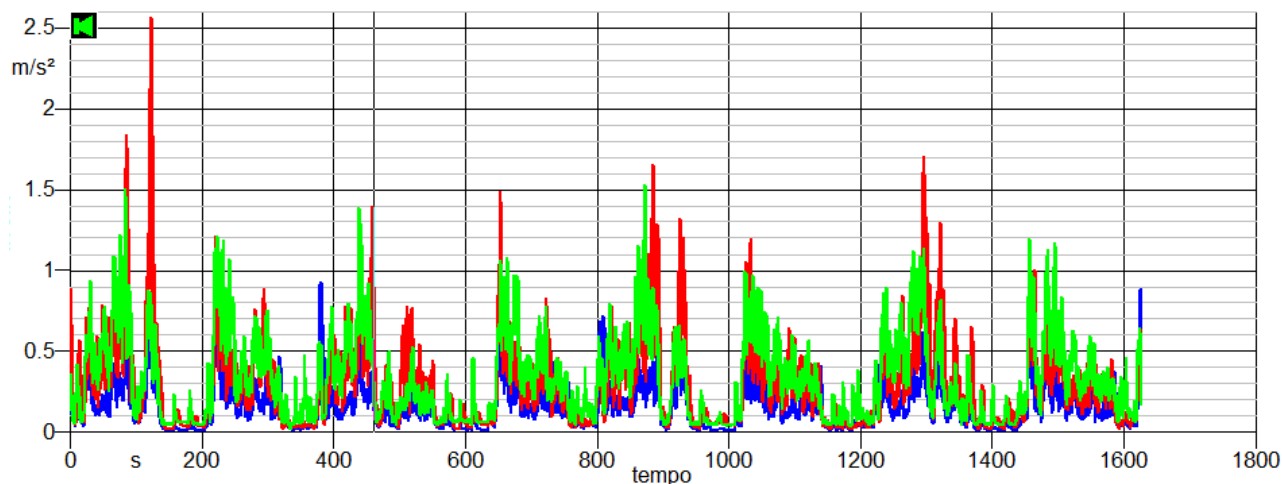


Fig. 68: Time History della misura d'esposizione per l'operatore 1 sul camion mercedes

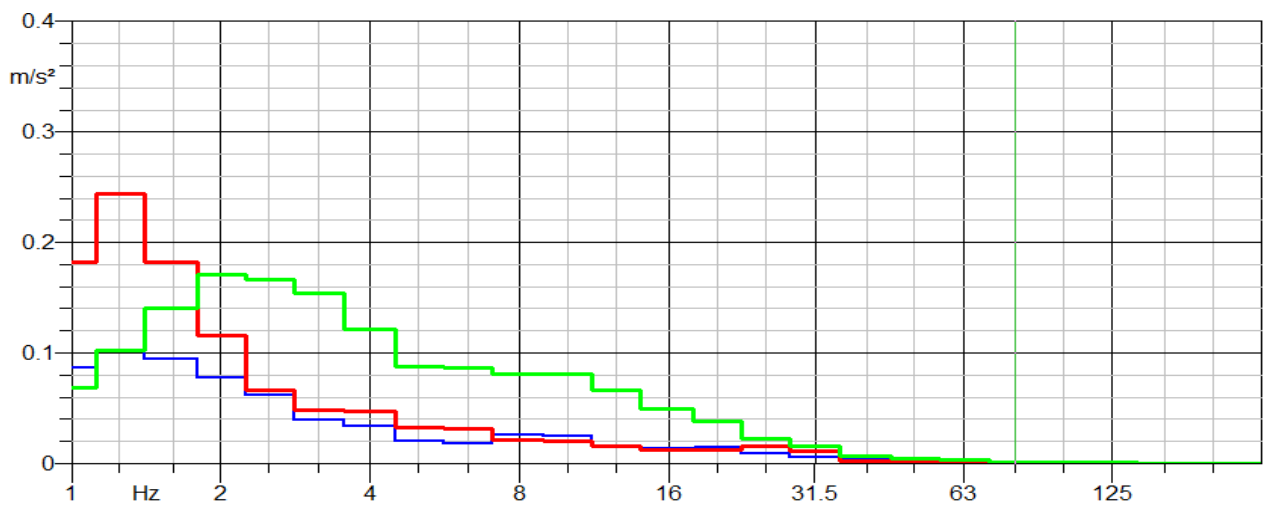


Fig. 69: spettro della misura d'esposizione per l'operatore 1 sul camion mercedes



Per poter comprendere meglio come le diverse fasi dell'attività lavorativa incidano sull'esposizione dell'operatore sono state realizzate delle misurazioni per lo stesso lavoratore su diversi mezzi. Nella tabella seguente sono riportati i valori d'accelerazione r.m.s ponderate in frequenza, i valori massimi e le frequenze dominanti misurate sul sedile in condizioni di lavoro ordinarie. La durata d'ogni fase è stata stimata sulla base delle informazioni raccolte tramite questionari, calcolando i tempi di lavoro durante una settimana di lavoro (5 giorni) e successivamente il tempo medio giornaliero. L'esposizione stimata è definita sulla base dell'attività lavorativa svolta dall'operatore lungo tutto il giorno e, al fine di prevedere il rischio di salute associato allo svolgimento di ogni attività specifica, è stato calcolato il valore di accelerazione ( $A(8)$ ). L'esposizione è stata valutata sui quattro veicoli riportati in tabella con i rispettivi compiti operativi

Tabella 21: risultati delle misurazioni sui diversi mezzi impiegati nelle prove

<b>Parametri</b>	<b>Jeep</b>	<b>Dumper perlini</b>	<b>Macchina perforatrice</b>	<b>Escavatore</b>
<i>Compito</i>	Trasporto operatori	Trasporto carico e scarico materiale	Perforazione bancata	Movimentazione terreno
<i>Accelerazione Ponderata in frequenza (<math>m/s^2</math>)</i>	$a_{wx}=0.112$	$a_{wx}=0.229$	$a_{wx}=0.184$	$a_{wx}=0.351$
	$a_{wy}=0.186$	$a_{wy}=0.261$	$a_{wy}=0.121$	$a_{wy}=0.199$
	$a_{wz}=0.414$	$a_{wz}=0.451$	$a_{wz}=0.305$	$a_{wz}=0.445$
<i>Valore Massimo d'accelerazione (<math>m/s^2</math>)</i>	$a_{wx}=1.186$	$a_{wx}=1.276$	$a_{wx}=1.642$	$a_{wx}=1.931$
	$a_{wy}=1.298$	$a_{wy}=1.360$	$a_{wy}=1.409$	$a_{wy}=0.994$
	$a_{wz}=2.216$	$a_{wz}=2.783$	$a_{wz}=4.925$	$a_{wz}=3.25$
<i>Frequenze dominanti (Hz)</i>	$DF_x=2$	$DF_x=1.6$	$DF_x=2$	$DF_x=2$
	$DF_y=1.6$	$DF_y=1.3$	$DF_y=4$	$DF_y=2$
	$DF_z=2.5$	$DF_z=2$	$DF_z=12.5$	$DF_z=4$
<i>Tempo stimato per ciascuna operazione (min,)</i>	10	122	336	12
<i>Dose d'esposizione <math>A(8)</math> per quella specifica attività</i>	0.05	0.22	0.26	0.07
<i>Dose giornaliera stimata (8 h)</i>	0.41	0.45	0.3	0.49

Le frequenze dominanti ricadono nell'intervallo da 1.3 a 4 Hz su tutti i veicoli sia per l'asse trasversale ( $x$  e  $y$ ) mentre nell'intervallo 2 -12.5 Hz nella verticale direzione, con lo spettro di potenza corrispondente che diminuisce al di sotto di 4 Hz. L'accelerazione di picco istantanea parte da un valore minimo di  $0.994 m/s^2$  ( $a_{wz}$  escavatore) fino ad un massimo di  $4.925 m/s^2$  ( $a_{wz}$  trivella). I dati riportati nella tabella evidenziano che, in termini d'esposizione per un compito specifico, la trivella

perforatrice è la sorgente più rilevante in termini di vibrazione mentre la jeep mostra valori minimi  $a_w$ . Al contrario, sotto l'ipotesi che l'operatore svolga l'attività specifica durante tutto il tempo di lavoro di riferimento (8h), il valore più elevato d' esposizione quotidiana risulta dalla misura realizzata sull'escavatore mentre la macchina perforatrice si dimostra essere il veicolo meno rilevante. Tra tutte le attività, quella dei dumper è risultata la più adatta in termini di ripetibilità; per questo motivo sono state analizzate le differenti fasi del ciclo di lavorazione e come esse incidano sull'esposizione giornaliera. Il tratto di pista all'interno del piazzale percorso dai mezzi ha una lunghezza all'incirca di 260 metri, comprendendo una zona di ghiaia ruvida vicino al punto di carico mentre le sezioni per le fasi di trasporto e di scarico sono costituite da una superficie liscia di roccia, con una pendenza di 8-10°. Il ciclo completo per un mezzo LHD comprende i seguenti quattro passaggi:

- corsa del mezzo in configurazione scaricata dalla macchina di frantumazione fino al punto di carico dove c'è l'escavatore
- fase di carico: l'escavatore riempie il cassone di carico
- percorso in configurazione carica fino al frantoio
- scarico del materiale nella macchina di frantumazione e ripartenza

In tutti i test, durante il tratto in salita, la velocità è risultata variabile, tra 16 Km / h e 22 Km / h a causa del sistema di trasmissione automatica, il quale modifica il numero dei giri del motore e di conseguenza il segnale di ingresso vibratorio. Al contrario nel tratto in discesa la velocità ricade in un diverso intervallo, dai 22 Km / h ai 30 Km / h, a seconda che il mezzo incontri l'altro camion nella direzione opposta sulla stessa pista o durante rallenti per evitare sovrapposizioni durante la fase di caricamento.



*Fig. 70: incrocio dei mezzi durante l'attività di transito(sinistra) e caricamento (destra)*

L'operatore che ha partecipato alla campagna sperimentale ha una lunga esperienza nella conduzione dei veicoli LHD e ha svolto le prove con le stesse modalità della sua attività quotidiana, cercando di replicare lo stesso stile di guida. Il segnale vibratorio della WBV è stato continuamente misurato sul

sedile del conducente per un periodo di circa 1.5 ore sul dumper 769 e 1.2 ore per il modello Perlini; ogni volta che vi è stato un problema di natura tecnica, e l'autista si è dovuto alzare, la misurazione è stata interrotta per poi essere riavviata. L'intervallo di tempo di ogni attività all'interno del ciclo è risultata sempre approssimativamente costante. Il ciclo completo di lavorazione è stato ripetuto tra le 12 e 15 volte durante il periodo di misura. Per separare ciascuna fase di lavoro, l'operatore per le misurazioni è stato a bordo del mezzo assieme al conducente durante lo svolgimento delle prove per annotare noti i tempi d' inizio e fine di ogni operazione. Il valore d'accelerazione è stato determinato per ogni fase e successivamente è stata calcolata la media di tutte le misurazioni registrate. I dati ottenuti sono stati elaborati e utilizzati sia per la stima dell'esposizione del livello giornaliero che per il tempo trascorso in ciascuna fase dell'attività giornaliera. Il tempo di ogni ciclo è risultato variabile da un minimo di 4 a un massimo di 6 minuti, in particolare si è rilevata una consistente variabilità nel tempo della fase di caricamento dovuto alle diverse condizioni del materiale rilasciato nel cassone del camion mentre quello della fase di scarico si è mostrata all'incirca costante. I tempi di viaggio, al contrario, sono risultati variabili i motivi sopra descritti. La tabella riportata sotto mostra i seguenti parametri calcolati su entrambi i mezzi: valori del parametro A (8), la stima della durata, l'esposizione giornaliera del conducente e l'asse della direzione della massima sollecitazione e tutti questi fattori sono stati calcolati per ogni fase diversa, indicata con le seguenti lettere

U.T. = (Unloaded travel) viaggio in configurazione scarica

L = (Loading) fase di caricamento del materiale

L.T. = (Loaded travel) viaggio in configurazione carica

D = (Dumping) fase di scaricamento del materiale

Tabella 22 : analisi delle diverse fasi delle attività dei mezzi

<b>Veicolo</b>	<b>Classe</b>	<b>A(8)</b>	<b>Fase</b>	<b>% tempo trascorso in ciascuna fase (min)</b>	<b>Asse dominante</b>	<b><math>a_w</math></b>	<b>Dose esposizione giornaliera per ciascuna fase</b>
769 Caterpillar	67.5 ton	0.47	U.T.	22.5-24.5%	z	0.66	0.35
			L	24-25%	z	0.3	0.14
			L.T.	27.5-29.5%	z	0.48	0.48
			D	19-21%	z	0.43	0.17
405 Perlini	70 ton	0.45	U.T.	22.5-24.5%	z	0.72	0.39
			L	24-25%	z	0.21	0.1

		L.T.	27.5-29.5%	z	0.53	0.24
		D	19-21%	z	0.30	0.12

Per comprendere meglio le differenti fasi di lavorazione vengono riportate in appendice B le Time History e gli spettri in frequenza di ciascuna fase di lavorazione, visualizzando ovviamente quelle più rappresentative del fenomeno in esame. L'analisi spettrale ha rivelato che la gamma di frequenza per le sollecitazioni sui tre assi  $x, y$  e  $z$  ricade in un range compreso tra 1 e 63 Hz per il camion Perlini mentre 1 - 50 Hz per il modello 769 Caterpillar. La direzione predominante delle esposizioni WBV è risultata essere l'asse  $z$  (direzione verticale); la frequenza dominante sempre a 2 Hz, con componenti rilevanti a 8 e 31.5 Hz per il camion Perlini a 8 e 40 Hz per il camion Caterpillar 769. L'accelerazione massima istantanea si è riscontrata sull'asse  $z$  per entrambi i veicoli, con valori da un livello minimo di  $0.6 \text{ m/s}^2$  ad un massimo di  $2.62 \text{ m/s}^2$ . In particolare bisogna evidenziare che sono stati registrati due singoli picchi transitori durante la fase di caricamento dovuti a enormi massi caricati dall'escavatore sul mezzo. I livelli di vibrazioni più alti sono state registrati sul Caterpillar 769 e, conseguentemente, anche il valore d'esposizione giornaliera A (8). La tabella mostra, su entrambi i camion, valori simili d'accelerazione  $a_w$  e di tempo trascorso in ogni fase. I valori maggiori sono stati registrati per le fasi di trasporto su entrambi i veicoli (il viaggio in configurazione scarica, percorso in discesa e mezzo più leggero, è sempre maggiore rispetto a quello in configurazione carica, più pesante e nel tratto in salita). Al contrario le altre fasi (caricamento e scarico) mostrano valori inferiori, in particolare i valori d'accelerazione della fase di scaricamento sono risultati essere superiori a quelli della fase di caricamento. È possibile spiegare questo aspetto perché nella fase di scarico ogni camion deve mantenere un elevato numero di giri motore per permettere il sollevamento del cassone, le cui problematiche sono state descritte all'inizio. Come descritto nella prima parte dell'elaborato, vi sono numerosi fattori che influenzano l'esposizione alla WBV per un guidatore e, uno di questi, è rappresentato dal corpo del soggetto, inteso come un insieme di sistemi massa-molla-smorzatore rappresentato da ciascun organo. Anche in altre applicazioni, dove la risposta del corpo umano alle vibrazioni a corpo intero è oggetto d'interesse, ad esempio in ambito clinico, si è cercato d'approfondire il legame tra proprietà antropometriche dei soggetti e caratteristiche del segnale vibratorio. Studi sulla massa effettiva che partecipa alla vibrazione, hanno mostrato differenze di risposta del corpo al solo variare della postura e delle composizioni del corpo (biological composition). Al contrario, nella caratterizzazione di piattaforme vibranti per applicazioni cliniche, inizialmente non si considerava il carico (prove a vuoto senza soggetto) mentre successivamente si è riscontrata un legame tra le prestazioni dei dispositivi e le caratteristiche del soggetto in esame. Da qui si comprende come la definizione di un parametro caratteristico che descriva in modo accurato la

risposta biodinamica del corpo sia estremamente complessa e articolata. In questo lavoro è stato fatto un tentativo per evidenziare la variazione della previsione della dose d'esposizione, rispetto a un individuo di caratteristiche standard, introducendo un parametro correttivo che correli altezza e peso del soggetto rispetto all'esposizione vibratoria. Sulla base della ricerca bibliografica, si è pensato d'utilizzare, all'interno della formula dell'A(8), il parametro BMI (Body Mass Index), definito come un indice di massa corporea, dato dal rapporto tra peso e quadrato dell'altezza di un individuo. Adolphe Quetelet, matematico e statistico belga, nei suoi studi sui dati antropometrici della crescita umana concluse che "il peso cresce con il quadrato dell'altezza", descrivendo nel 1832 il rapporto tra le due misure, definito come *indice Quetelet*. Oltre un secolo dopo tale l'indice è stato utilizzato anche negli studi sull'obesità e, nel 1972, tale parametro è stato definito con il nome *Body Mass Index*, introdotto dal fisiologo Ancel Keys. La letteratura scientifica mostra l'elaborazione di numerosi correzioni di tale parametro tramite coefficienti sperimentali, ossia definiti su base statistica in relazione a determinati gruppi di soggetti. L'ambito, quindi, in cui nasce è quello medico-clinico, dovuto all'esigenza di poter valutare in modo uniforme la massa grassa corporea di un soggetto e, oltretutto, per cercare di trovare una correlazione tra diverse malattie, tra cui il cancro e il diabete per soggetti di ambo i sessi, e le caratteristiche antropometriche. Inoltre è stato utilizzato come riferimento per comprendere anche le correlazioni con la qualità del sonno dell'uomo. Alcuni esperti dell'OMS e delle autorità governative, hanno preso come riferimento il BMI al fine poter analizzare le problematiche di salute inerenti alla popolazione e poter elaborare una strategia migliorativa. Il punto critico è rappresentato dal fatto che non vi è un'evidenza tra BMI e malattie, permettendo solo di poter eseguire delle previsioni. Si è affrontata tale criticità con diversi metodi, sia su base statistica delle malattie sia con tecniche avanzate, come assorbimetria a doppio fotone (DPA). Risulta, quindi evidente che il suo utilizzo debba essere effettuato con le dovute attenzioni. Nell'ambito di tale lavoro tale fattore correttivo è stato normalizzato rispetto sia all'accelerazione ponderata, definita sull'asse maggiormente sollecitato, sia all'accelerazione ponderata definita come somma vettoriale sui tre assi. Di seguito, sono riportati diversi metodi con la formula adottata assieme alle nomenclature delle metodologie utilizzate per la previsione della dose e quelle implementate con il parametro correttivo.

- Metodo A: metodologia definita dalla norma ISO 2631-1 (descritta nel primo capitolo) che prevede l'utilizzo dell'asse peggiore di sollecitazione moltiplicato il termine temporale d'effettiva esposizione del lavoratore normalizzato sulle 8ore.
- Metodo B: identico a quello A tranne per il termine accelerazione, considerata come somma vettoriale lungo i tre assi di riferimento
- Metodo C': segue la stessa impostazione del metodo A diviso un termine correttivo K definito nel seguente modo:

$$A(8)_{BMI} = \frac{a_w}{K_i} \cdot \sqrt{\frac{T_e}{8}}$$

$$K_i = BMI \cdot \frac{h_i^2}{peso_i}$$

i = individuo i-esimo

$$BMI = \frac{peso_s}{h_s^2} = 0,002188035$$

s = valori standard forniti dall'Istat

$$peso_s = 69 \text{ kg}$$

$$h_s^2 = 177.8 \text{ cm}$$

$a_w$  = accelerazione ponderata in frequenza sull'asse più sollecitato,

$T_e$  = tempo d' esposizione

- Metodo C: uguale al metodo C' a meno del termine d'accelerazione ponderata, definito come somma vettoriale

$$A(8)_{BMI} = \frac{a_{w_{sum}}}{K_i} \cdot \sqrt{\frac{T_e}{8}}$$

$a_{w_{sum}}$  = somma vettoriale delle accelerazioni ponderate in frequenza sui tre assi x, y e z

La seguente tabella riporta le caratteristiche dei diversi soggetti che hanno partecipato alle prove su differenti veicoli operanti in cava

Tabella 23: prospetto degli operatori impiegati sui diversi mezzi

	<b>Mezzo</b>	<b>Operatore</b>	<b>Età</b>	<b>Peso[Kg]</b>	<b>Altezza[cm]</b>
1	Dumper Perlini 405	1	51	80	180
2	Dumper Perlini 405	2	52	88	182
3	Dumper Perlini 405	4	35	92	174
4	Dumper Perlini 405	8	48	89	182
5	Dumper Perlini 405	3	35	76	174
6	Dumper Perlini 405	7	45	86	184
7	Dumper Perlini 405	5	40	80	180
8	Trivella perforatrice	1	51	80	180
9	Dumper Caterpillar 769	1	51	80	180
10	Jeep	1	51	80	180
11	Jeep	2	56	68	168
12	Autocarro Mercedes	3	35	92	174

13	Autocarro Mercedes	1	51	80	180
14	Autocarro Mercedes	2	56	88	182
15	Escavatore	6	66	63	168

Nella tabella seguente sono riportati i risultati delle valutazioni delle esposizioni con le differenti metodologie per ciascun operatore riferite all'operazione sullo specifico mezzo e i relativi confronti in termini percentuali tra per ciascun metodo rispetto a quello stabilito dalla norma (Met.A)

Tabella 24: confronto dei metodi di valutazione del parametro A (8)

<b>Operatore</b>	<b>K</b>	<b>A(8) Met.A</b>	<b>A(8) Met.B</b>	<b>A(8) Met.C</b>	<b>A(8) Met.C'</b>	<b>Confronto A-B</b>	<b>Confronto A-C</b>	<b>Confronto A-C'</b>
1	0.886	0.391	0.575	0.65	0.44	32.07	39.80	11.38
2	0.824	0.409	0.557	0.68	0.50	26.62	39.57	17.64
4	0.720	0.471	0.626	0.87	0.65	24.75	45.81	27.99
8	0.814	0.387	0.562	0.69	0.48	31.08	43.88	18.57
3	0.872	0.372	0.520	0.60	0.43	28.38	37.58	12.84
7	0.861	0.354	0.491	0.57	0.41	27.92	37.91	13.86
5	0.886	0.357	0.503	0.57	0.40	29.07	37.14	11.38
1	0.886	0.264	0.376	0.42	0.30	29.67	37.68	11.38
1	0.886	0.438	0.634	0.72	0.49	30.92	38.78	11.38
1	0.886	0.155	0.235	0.60	0.38	34.36	74.42	58.87
2	0.908	0.146	0.165	0.39	0.26	11.44	62.92	43.13
3	0.720	0.199	0.223	0.31	0.28	10.86	35.82	27.99
1	0.886	0.354	0.573	0.65	0.40	38.20	45.24	11.38
2	0.824	0.376	0.586	0.71	0.46	35.83	47.15	17.64
6	0.980	0.401	0.629	0.62	0.39	36.23	34.93	-2.03

Le differenti metodologie sono state confrontate tra di loro e i risultati sono riportati nella seguente tabella, evidenziando la media degli incrementi percentuali che si hanno per ciascun confronto tra il metodo standard e i differenti metodi sperimentali.

Tabella 25: variazione percentuale tra i diversi metodi di calcolo

	<b>Confronto A-B</b>	<b>Confronto A-C</b>	<b>Confronto A-C'</b>
<i>Variazione % tra i metodi</i>	28.49	41.55	21.92

I dati evidenziano che i metodi proposti e implementati portano ad una sovrastima rispetto al valore che viene definito con la normativa standard. Il metodo C mostra la maggiore variazione percentuale rispetto agli altri due poiché tiene conto sia dell'accelerazione lungo i tre assi che del parametro antropometrico. Per poter evidenziare la variazione della sovrastima in funzione delle caratteristiche antropometriche, è stata evidenziata la sovrastima percentuale rispetto alla variazione del  $K_i$ , suddiviso in tre fasce riportate nella tabella seguente

Tabella 26 : paragone tra i differenti metodi di calcolo in funzione del parametro  $k_i$

$K_i$	<i>Confronto A-B</i>	<i>Confronto A-C</i>	<i>Confronto A-C'</i>
$k_i < 0.8$	17.81	40.82	27.990
$0.8 < k_i < 0.9$	31.28	42.14	19.261
$k_i > 0.9$	23.84	39.03	30.445

Ciò che però risulta evidente è che si ha una variazione della valutazione della dose d'esposizione a seconda del valore del parametro  $K_i$ , al variare del rapporto tra queste due grandezze, confermando, quindi, una stretta correlazione tra accelerazione e caratteristiche antropometriche del soggetto. È interessante sottolineare che nel caso del confronto tra il metodo A e C, si ha una diminuzione della sovrastima percentuale all'aumentare del fattore  $K_i$ . Quest'ultimo aspetto ha dato un interessante spunto per lo svolgimento delle altre campagne sperimentali descritte di seguito.

## 2.1.2 Campagna sperimentale su autovetture blindate

Nel precedente lavoro svolto sui mezzi operanti nel settore estrattivo è stata valutata l'esposizione per diversi soggetti su differenti mezzi d'opera ciascuno dei quali, svolgendo una specifica attività nell'ambito del processo produttivo, rappresenta una determinata tipologia di sorgente vibratoria per caratteristiche proprie e operative. In questa seconda parte del lavoro si è voluto proseguire ponendo l'attenzione su due aspetti principali:

- approfondire l'influenza delle caratteristiche inerziali del veicolo sull'esposizione del lavoratore
- confrontare le diverse metodologie di previsione della dose d'esposizione utilizzando il parametro correttivo  $K_i$  come nella precedente campagna

Per quanto concerne il primo punto si è valutata la variazione della dose d'esposizione per uno stesso soggetto al variare della sorgente vibratoria realizzata modificando, su uno stesso identico modello di veicolo, la struttura del telaio mediante l'aggiunta di materiale particolari per la protezione dai colpi d'arma da fuoco. Il secondo punto invece, tenendo sempre conto del cambiamento della sorgente, si focalizza su come la dose d'esposizione di un soggetto sia influenzata dalle caratteristiche antropometriche, in particolare la massa corporea e l'altezza, sulla scia di quanto svolto nella precedente campagna. Lo studio si basa su due differenti campagne sperimentali descritte nei seguenti paragrafi.



### 2.1.2.1 Prima campagna

Come descritto precedentemente questa parte del lavoro è stata realizzata al fine di valutare la dose d'esposizione in presenza di una variazione del segnale della sorgente vibratoria. Sono stati svolti una serie di test su un percorso stradale con due differenti mezzi: un veicolo per utilizzo urbano in versione standard e un altro identico modello modificato con l'aggiunta di materiale balistico anti-proiettile sul telaio.

#### a) Le vetture impiegate

Le vetture utilizzate sono state gentilmente fornite da un'autofficina specializzata in riparazione, manutenzione e allestimenti sia di vetture per uso ordinario che per impieghi speciali. Esse consistono in due veicoli modello Subaru Legacy rispettivamente in configurazione blindata di colore nero e un non blindato di color grigio chiaro.



Fig. 71: vettura non blindata(sinistra) e vettura blindata (destra)

Entrambi i veicoli sono stati sottoposti a regolare manutenzione e revisionati secondo i termini previsti dalla legge e nella tabella seguente vengono riportate le caratteristiche tecniche

Tabella 27 : caratteristiche tecniche dei mezzi impiegati

<b>Veicolo</b>	<b>Anno</b>	<b>Massa a vuoto</b>	<b>km</b>	<b>Cilindrata</b>	<b>Potenza</b>	<b>Alimentazione</b>	<b>Trasmissione</b>
<i>Subaru Legacy</i>	2008	1.60 ton	170 000 km	3000cc	180 kW (245 cv)	Benzina	Cambio semi-automatico con dispositivo cruise-control

<i>modello standard</i>							
<i>Subaru Legacy modello blindato</i>	2009	1.82 ton	168 400 km	3000cc	180 kW (245 cv)	Benzina	Cambio semi-automatico con dispositivo cruise-control

La tabella mostra che la differenza in termini di usura del mezzo è minima, solamente 1600 km, mentre ciò che le differenzia in modo sostanziale sono:

➤ PESO

La differenza di peso 220 Kg è dovuta all'aggiunta sulla struttura della vettura di materiali balistici come dyneema, acciaio balistico, cristalli maggiorati e kevlar. In merito a quest'ultimo elemento si può dire che ha una lunga storia tecnologica; infatti a partire dal 1971 è stato messo a punto e brevettato un processo per ottenere fibre aramidiche caratterizzate da prestazioni meccaniche notevoli e confrontabili con quelle di alcuni tipi di fibre in carbonio. Il materiale ottenuto commercializzato con il nome di kevlar rappresenta la quasi totalità delle fibre oggi utilizzate nei compositi a base aramidica. Le fibre in Aramide o Aramidiche sono fibre polimeriche ad altissime prestazioni meccaniche ottenute per lavorazione di Poliammidi Aromatiche. I vantaggi di questo materiale sono un'elevatissima resistenza specifica a trazione elevata resistenza alla fiamma buona stabilità termica fino a 250-300°C e forte resistenza all'impatto. Oltretutto si è potuto riscontrare una notevole capacità di smorzamento delle vibrazioni. Inoltre le fibre in Kevlar sono contraddistinte a differenza da quelle in carbonio da una notevole resistenza all'impatto, proprietà che gli conferisce una notevole applicabilità nel campo della protezione balistica.



Fig. 72: tappeto di kevlar

Questa caratteristica è dovuta al fatto che l'aramide è un materiale scarsamente resistente a compressione; infatti se sottoposta a flessione essa mostra un comportamento caratterizzato da un'elevata plasticità nella zona compressa. Questa caratteristica consente all'asse neutro di spostarsi verso il basso impedendo il raggiungimento del punto di rottura a trazione della zona tesa anche per deformazioni flessionali elevatissime.

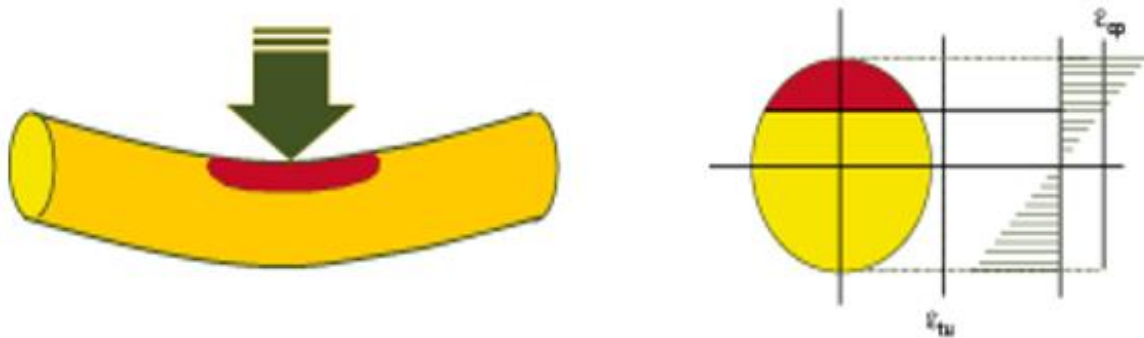


Fig. 73: comportamento flessionale delle fibre in aramide

Ulteriori informazioni specifiche inerenti alla composizione dei materiali alla quantità utilizzata e alla tipologia di montaggio non sono state rese disponibili a causa del segreto professionale inerente a tale tecnologia.

### ➤ TIPOLOGIA DI PNEUMATICI MONTATI

La vettura standard monta pneumatici ordinari mentre quella blindata è fornita di gomme runflat. Queste gomme hanno la particolare proprietà di non afflosciarsi in seguito ad una foratura dovuta a una qualsiasi causa grazie all'innovativa geometria del fianco del cerchione (Extended Hump) che evita lo slittamento dello pneumatico nel canale in caso di perdita d'aria insieme ad uno strato rinforzato interno allo pneumatico stesso (stallonamento). Il principio Extended Hump consente in caso di perdita di pressione totale allo pneumatico di rimanere nel cerchione in modo tale da garantire una percorrenza fino a 120 km/h con velocità massima di 80 km/h permettendo la fuga in caso di danneggiamento da arma da fuoco.

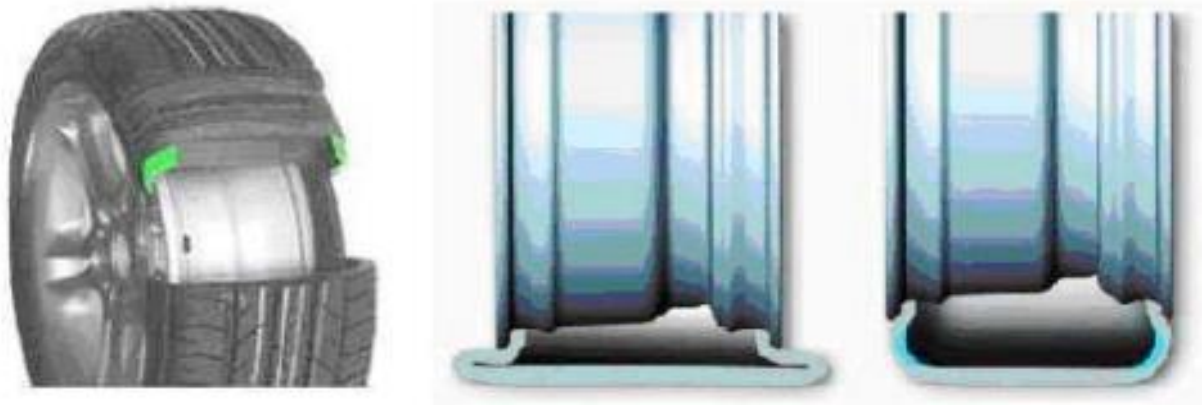


Fig. 74: sezione di una gomma runflat

Nell'immagine la parte verde rappresenta lo strato di materiale che si oppone all'afflosciamento. E' possibile notare il differente comportamento tra pneumatico normale (figura centrale) ed una runflat (figura a destra) in caso di foratura; nel primo caso il pneumatico si sgonfia immediatamente nel secondo invece la speciale geometria dello strato di materiale a contatto con il cerchione (zona in azzurro) evita l'afflosciamento.

#### *b) Sede dei test*

La campagna di misurazione è basata su prove realizzate percorrendo un tratto stradale urbano nel centro di Roma che collega Piazzale Clodio a Via Trionfale. Tale sito dopo accurata e attenta ricerca tra tutte le possibili zone disponibili è stato scelto per le proprie caratteristiche in termini di manutenzione e condizioni del traffico. Esso presenta una modesta pendenza e una lunghezza di 0,8 Km con 4 curve (vedi Fig.75) che si alternano a tratti rettilinei. Le condizioni del manto stradale sono risultate essere buone senza particolari discrepanze o avvallamenti e le prove sono state svolte in due differenti giornate in condizioni meteo serene con una temperatura di  $25 \pm 2$  °C.



Fig. 75: tratto di strada dei test

### c) Metodologia di prova

Il guidatore che ha partecipato alle prove è stato selezionato all'interno di un gruppo di autisti per le sue caratteristiche antropometriche considerandolo come il soggetto più rappresentativo tra gli operatori che svolgono questo tipo d'attività. Prima dell'inizio delle misurazioni è stato fornito un questionario da completare per raccogliere informazioni sulle sue caratteristiche antropometriche, sulle sue esperienze lavorative e in merito all'eventuale presenza di disturbi muscolo-scheletrici o qualsiasi altra sintomatologia. I dati raccolti hanno indicato un'altezza di 1.80 m peso 80 Kg e nessuna lesione o problematica di salute. Durante le misurazioni è stato possibile rimanere all'interno del veicolo vicino all'operatore sul sedile di guida potendo così controllare il corretto funzionamento del dispositivo d'acquisizione e annotando i tempi d' inizio e fine di ciascuna prova in modo da poter effettuare analisi separate per ogni misura. La metodologia di lavoro si basa su ripetute prove di percorrenza svolte lungo il tratto stradale in esame 5 volte in ciascuna direzione (sia salita che discesa) per un totale di 20 misurazioni. Il tempo di ciascuna prova è stato di circa  $60 \div 12$  s con una velocità del veicolo costante fissata a  $50 \div 10$  km / h attraverso il dispositivo di controllo della vettura cruise – control. La variabilità di tale parametro è dovuta al fatto che alcune prove sono state svolte a velocità ridotta a causa della presenza di altri veicoli, nonostante i test siano stati svolti durante lo stesso intervallo orario (10: 00-12: 00 a m ) al fine di trovarsi nelle minime condizioni di traffico stradale.

### d) Caratterizzazione della sorgente

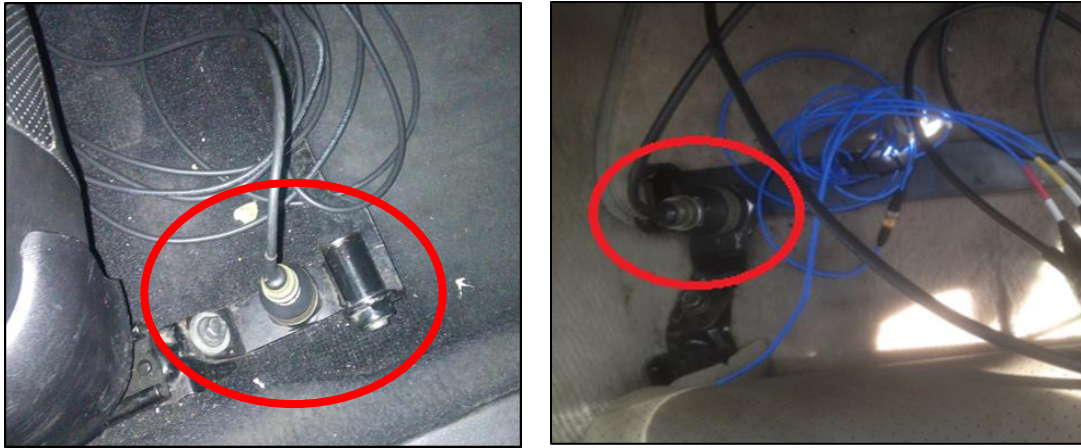


Le tecniche per effettuare le misurazioni sulla vibrazioni a corpo intero a cui il soggetto viene esposto sono le stesse adottate nella precedente campagna di misurazione in riferimento alla normativa ISO 2631-1 e identiche per ciascun veicolo, con l'impiego della medesima strumentazione. Per la misurazione dell'esposizione del soggetto guidatore, l'accelerometro è stato posizionato sul sedile secondo il sistema di riferimento standard mentre per la caratterizzazione del segnale sorgente si è riscontrata qualche difficoltà per poter posizionare l'accelerometro sul telaio. È stata effettuata una prima misurazione di prova per poter trovare il punto ottimale di fissaggio e, per tale scopo, sono stati smontati i sedili posteriori della vettura per fissare l'accelerometro sul pianale d'appoggio tramite un magnete. La stretta vicinanza tra pianale e terminale di scarico del veicolo ha comportato un innalzamento rilevante della temperatura dello strumento con un conseguente errore termico non trascurabile che porta a risultati non attendibili e quindi l'inevitabile invalidazione della misura. Inoltre la superficie non garantiva un corretto allineamento del dispositivo in posizione verticale.



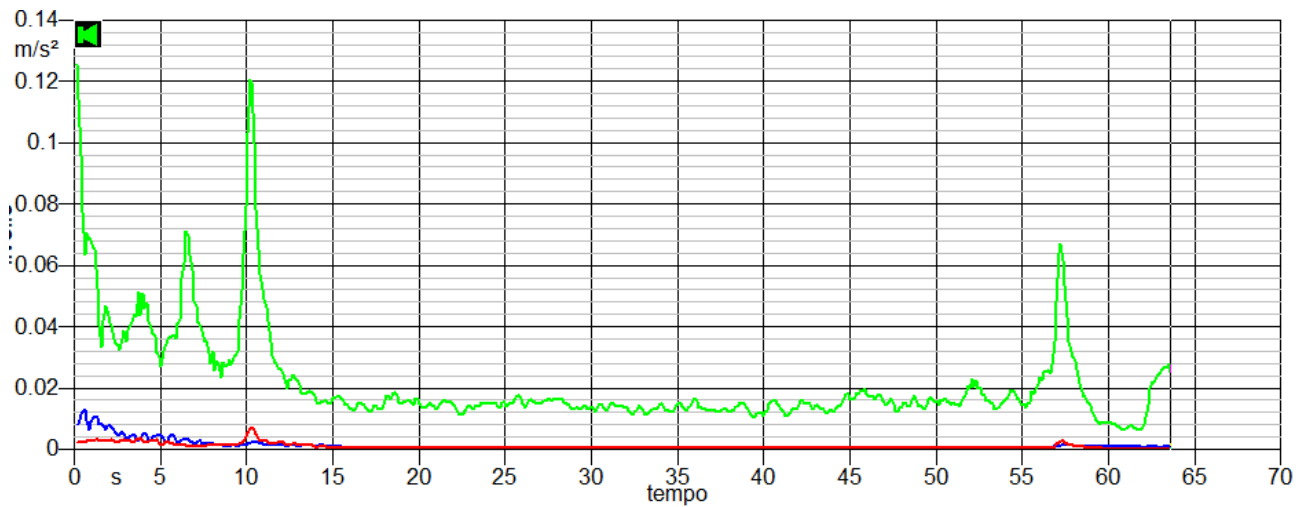
*Fig. 76: accelerometro posizionato sul sedile di guida e prova di fissaggio sui sedili posteriori*

Dopo diversi tentativi e smantellamenti del mezzo si è trovata la soluzione sfruttando il supporto di metallo definito porta-mitraglietta per la sua funzione operativa montato sulle vetture in dotazione alle forze dell'ordine sotto il sedile del passeggero e solidale al telaio stesso. Questa soluzione è stata adottata sia nelle prove con il mezzo blindato sia in quelle sul veicolo destinato ad uso civile. In entrambi i casi l'accelerometro è stato posizionato in prossimità del punto di ancoraggio del porta mitraglietta al sedile al fine di effettuare la misurazione quanto più possibile vicino al telaio e poter così meglio caratterizzare il segnale della sorgente vibratoria. Per assicurare la stabilità dell'elemento ed evitare indesiderate oscillazioni del supporto si è provveduto al serraggio delle viti d'attacco attraverso una chiave dinamometrica.



*Fig. 77: posizionamento dell'accelerometro sul porta mitraglietta d'entrambe le vetture*

Di seguito sono riportati i risultati della campagna di misurazione mostrando i grafici più esplicativi del lavoro. Come nel precedente capitolo vengono evidenziati le Time History (andamento del segnale d'accelerazione nel tempo) e gli spettri in frequenza (bande in terzi d'ottava) mostrando i segnali acquisiti lungo ciascun asse  $x$ ,  $y$  e  $z$  per ciascun modello di veicolo (linea blu = asse-  $x$ , linea rossa = asse-  $y$ , linea verde = asse-  $z$ ).



*Fig. 78: Time History misurazione al minimo vettura blindata*

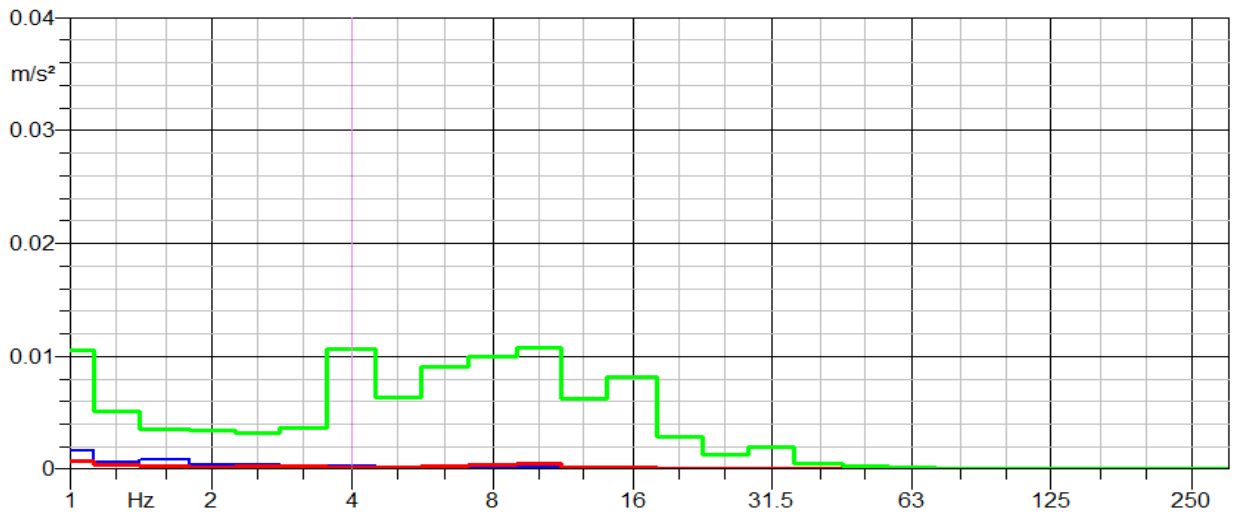


Fig. 79: spettro in frequenza misurazione al minimo vettura blindata

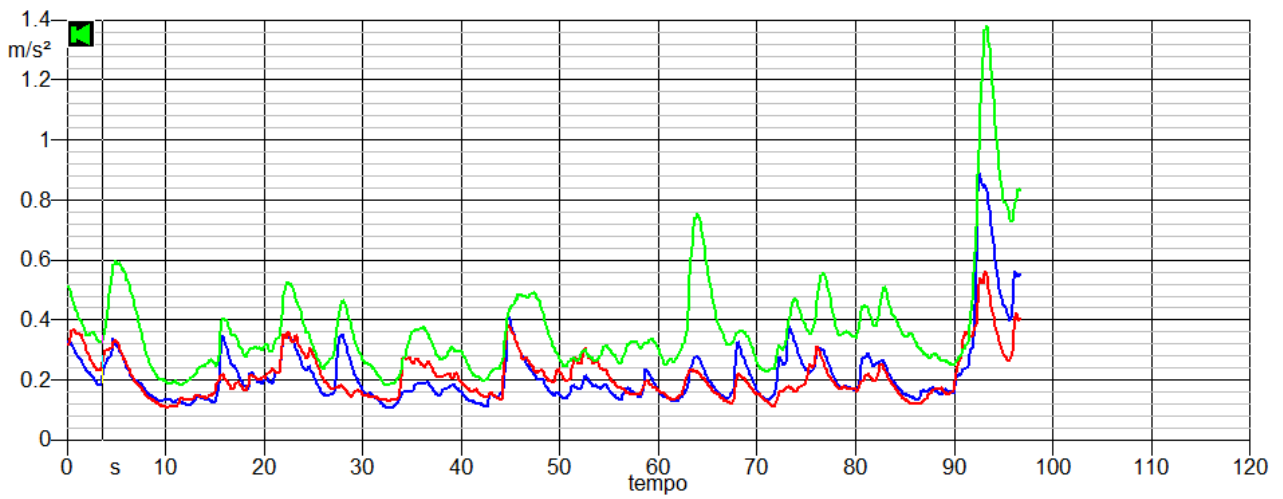


Fig. 80: Time History vettura modello standard direzione salita

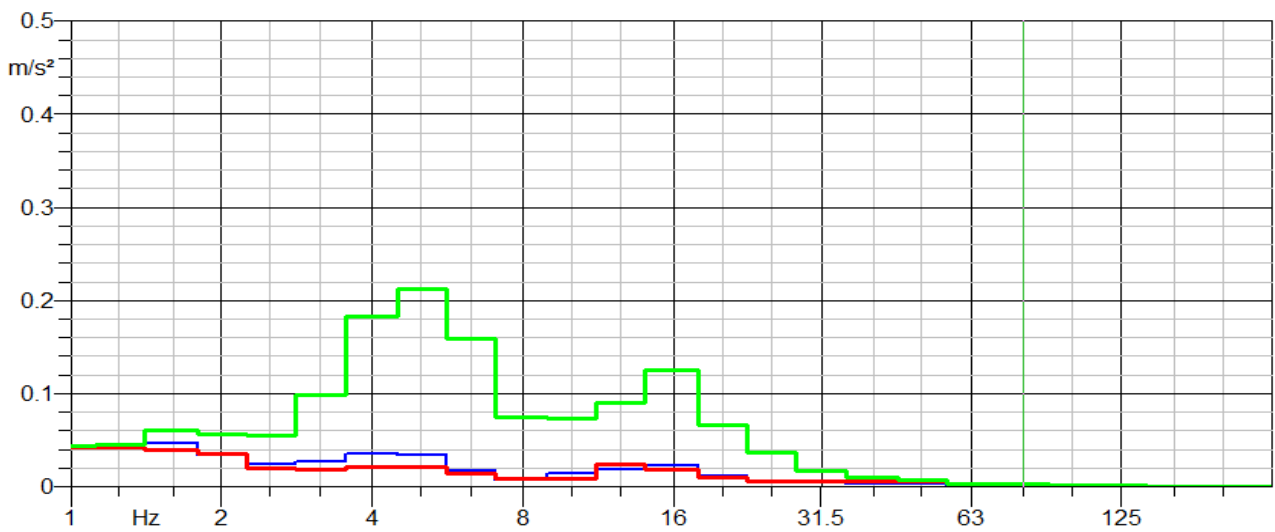


Fig. 81: spettro in frequenza vettura modello standard direzione salita



### e) Risultati

I risultati delle misurazioni effettuate su entrambi i mezzi sono riassunti nella seguente tabella, dove le colonne della tabella mostrano i diversi parametri ottenuti da tutti i dati ricavati dalle misurazioni suddivisi per ciascun veicolo e in base alla direzione di percorrenza. Per ciascun asse di sollecitazione l'accelerazione media ponderata in frequenza è stata definita come media aritmetica tra i valori di ciascuna prova distinte per verso di percorrenza e veicolo secondo la seguente espressione

$$\overline{a_{wx}} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^n a_{wx_i}; \overline{a_{wy}} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^n a_{wy_i}; \overline{a_{wz}} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^n a_{wz_i};$$

Tutti i valori di accelerazione sono espressi in termini di  $m/s^2$  mentre le frequenze in Hz

Tabella 28: risultati delle misurazioni realizzate per ciascun verso di percorrenza

Tratto di prova	Accelerazione Ponderata in Frequenza R M S ( $m/s^2$ )			Accelerazioni di Picco ( $m/s^2$ )			Frequenza Dominante (Hz)			Dose d'Esposizione Giornaliera Stimata
	$a_{wx}$	$a_{wy}$	$a_{wz}$	$a_{wx}$	$a_{wy}$	$a_{wz}$	DF <sub>x</sub>	DF <sub>y</sub>	DF <sub>z</sub>	
Verso di percorrenza	$a_{wx}$	$a_{wy}$	$a_{wz}$	$a_{wx}$	$a_{wy}$	$a_{wz}$	DF <sub>x</sub>	DF <sub>y</sub>	DF <sub>z</sub>	A (8 h)
<i>Veicolo Blindato</i>										
Salita	0.02	0.01	0.31	0.03	0.02	0.79	4	4-10	4	0.34
Discesa	0.03	0.05	0.41	0.08	0.04	0.88	3-2	4-10	4	0.41
<i>Veicolo Standard</i>										
Salita	0.11	0.09	0.38	0.18	0.14	0.56	4-16	4-12.5	5-16	0.38
Discesa	0.14	0.12	0.42	0.22	0.29	0.79	4-16	4-12.5	5-16	0.43

Al fine d'evidenziare la variazione della dose d'esposizione su entrambi i veicoli sono riportati nella seguente tabella i confronti dei valori d'accelerazione ponderati in frequenza e di dose d'esposizione giornaliera stimata in termini percentuali tra le due tipologie di vetture

Tabella 29 : variazione dei valori d'accelerazione per ciascun veicolo in funzione del verso di percorrenza

<b>Modello veicolo</b>	<b>Accelerazione Ponderata in Frequenza R M S (<math>m/s^2</math>)</b>			<b>Dose d'Esposizione Giornaliera Stimata</b>
	$a_{wx}$	$a_{wy}$	$a_{wz}$	A (8 h)
<i>Salita</i>				
<i>Standard/ Blindato</i>	78.57 %	91.67 %	2.38 %	10.5 %
<i>Discesa</i>				
<i>Standard/ Blindato</i>	81.82 %	88.89 %	18.42 %	4.65 %

I dati ottenuti evidenziano come l'installazione delle protezioni balistiche sul telaio della vettura incida in modo considerevole sulla dose d'esposizione. Infatti risultati diversi sono stati ricavati da misurazioni effettuate nelle stesse identiche condizioni al contorno evidenziando i seguenti aspetti:

1. Le frequenze dominanti del segnale vibratorio a cui viene esposto il soggetto rientrano in range di valori molto simili su entrambi i veicoli (4 -12.5 Hz), anche se sull'asse  $z$  sulla vettura in configurazione standard si ha uno spettro caratteristico sensibilmente più ampio (5-16 Hz)
2. I valori d'accelerazione rilevati nella direzione in salita del test risultano essere mediamente inferiori a quelli ottenuti nella direzione opposta su entrambi i veicoli. Nonostante l'inserimento del dispositivo di controllo della velocità (cruise control), il mantenimento di una velocità costante è risultato più difficile in salita, con il frequente cambiamento dei giri del motore gestiti dal cambio automatico
3. Lungo ciascun asse ( $x$ ,  $y$  e  $z$ ) i valori d'accelerazione ottenuti sul veicolo standard risultano superiori a quelli misurati su quello blindato. La tabella evidenzia una riduzione dei valori di  $a_w$  (accelerazione ponderata in frequenza) per veicoli blindati, in particolare una riduzione percentuale massima lungo gli assi  $x$  e  $y$ . Conseguentemente anche l'esposizione giornaliera stimata in ciascuna direzione di sollecitazione risulta essere maggiore nelle prove realizzate sul veicolo senza blindatura. Infatti i valori stimati per le vetture modificate sono mediamente inferiori con una riduzione che va da un minimo del 4.65% (discesa) ad un valore massimo del 10.52% (salita)
4. I valori d'accelerazione di picco massimo risultano essere maggiori nel piano orizzontale (direzioni  $x$  e  $y$ ) sul veicolo standard mentre su quello blindato l'asse verticale (direzione  $z$ ) è dominante in tutte le prove

### 2.1.2.2 Seconda campagna di misurazione

Il lavoro svolto fino qui ha permesso d'evidenziare gli effetti sulla dose d'esposizione giornaliera al modificarsi della sorgente vibratoria. Da qui si è deciso di proseguire la raccolta dei dati svolgendo una seconda campagna di misurazione impiegando la stessa tipologia di veicoli nello stesso contesto di prova al fine di ampliare lo studio della prima campagna svolta. Per queste motivi, a differenza del precedente lavoro, sono stati coinvolti più operatori alla guida a cui è stato richiesto di condurre entrambe le vetture su un percorso stabilito. Tale confronto è stato effettuato con la medesima strumentazione e nelle stesse condizioni in modo da assicurare la ripetibilità delle prove. Come già accennato, l'obiettivo della misura è quello di analizzare i livelli di vibrazione a cui è sottoposto il corpo di un guidatore e determinare se l'aumento del peso del veicolo, dovuto alla blindatura, possa in qualche modo migliorare o peggiorare l'esposizione dell'operatore, ossia generare un maggiore rischio d'agente fisico di vibrazione.

#### *a) Le vetture impiegate*

I veicoli impiegati sono gli stessi della prima campagna le cui caratteristiche sono riportate nel precedente paragrafo; le prove sono state realizzate a distanza di breve tempo dalle prime con un aumento del chilometraggio delle vetture ritenuto trascurabile e quindi ininfluenza sullo stato d'efficienza meccanico dei mezzi.



Fig. 82: vettura blindata (sinistra), particolare della blindatura sullo sportello(centro) e vettura standard (destra)

## *b) Sede dei test*

Per la ricerca del luogo di prova si è dovuto tener conto che le macchine sarebbero state condotte da più operatori e quindi il tracciato dovesse permettere una agevole conduzione senza particolari difficoltà. I criteri utilizzati per poter identificare il tracciato sono stati:

- le condizioni del manto stradale perfettamente asfaltato senza avvallamenti
- la lontananza da arterie stradali principali per ridurre al minimo la possibilità di causare traffico o pericolo per le altre autovetture e avere una viabilità scorrevole
- la configurazione geometrica più rettilinea possibile con assenza o numero limitato di tratti curvilinei

E' stato effettuato un sopralluogo in tre zone differenti. Nella prima giornata di ricognizione si valutata la possibilità di utilizzare il parcheggio antistante la sede di Saxa Rubra zona Flaminia; qui si è riscontrato il vantaggio dell'assenza di traffico veicolare ma non è stato ritenuto idoneo a causa della brevità del percorso (220m circa). La seconda giornata è stata effettuata nella stessa identica zona ma in una posizione leggermente decentrata, ma anche questo tratto non è risultato adeguato all'esigenze delle prove a causa della limitatezza del percorso (300m circa) nonostante le ottime condizioni del manto stradale fossero ottime e il traffico limitato. L'ultima e decisiva missione è stata quella svolta in Via dei Due Ponti; il tratto, considerato idoneo, è lungo circa 2.2 km, non presenta buche o avvallamenti rilevanti, con una configurazione prevalentemente rettilinea tranne in due punti centrali evidenziati in rosso e una lieve curva nel tratto finale del percorso evidenziata in blu.

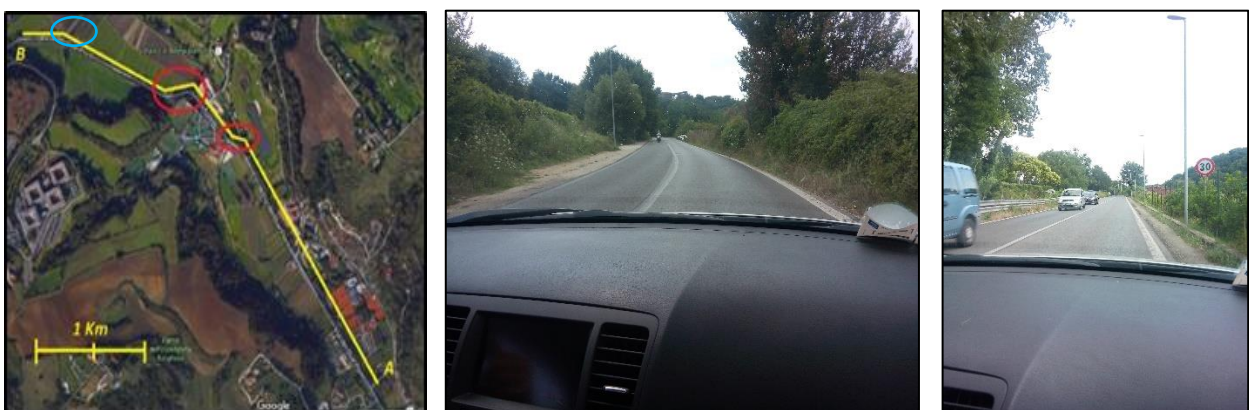


Fig. 83: vista della strada: fonte google-maps (sinistra), condizioni traffico nulle(centri) e presenza di vetture su strada(destra)

L'inconveniente che si è manifestato in diverse occasioni durante le prove è stata l'immissione o rallentamento delle autovetture per l'entrata o l'uscita dai numerosi circoli ed impianti sportivi presenti lungo la via; questo fatto ha causato l'interruzione della misura e quindi la ripetizione del test.

### *c) Metodologia di prova*

La prima giornata di test è stata svolta per avere un primo riscontro sulla effettiva praticabilità della strada in condizioni di prova, ossia si è valutata quale fosse la velocità costante più adeguata da mantenere durante i test cercando un compromesso tra la necessità di percorrenza dei tratti curvilinei in sicurezza ed evitare di creare traffico. La prima prova è stata effettuata ad una velocità costante di 60 Km/h ma tale scelta si è rivelata non adeguata poiché con questo tipo d'andamento non si garantiva una sicura percorrenza delle varianti. Così si è deciso di eseguirne delle altre ad una velocità ridotta sempre costante ma di 45 Km/h e tale andamento di velocità è stato ritenuto adeguato. Le misure d'esposizione sono state realizzate su 14 differenti operatori tutti di sesso maschile con rilevante esperienza con la guida delle vetture; l'età media dei partecipanti è stata 45anni da un minimo di 24 ad un massimo di 66 anni. Il criterio con cui è stato scelto il gruppo di guidatori è stato quello d'identificare caratteristiche antropometriche (peso e altezza) quanto più simili e paragonabili. L'altezza media è risultata essere pari a 177.43cm (valore minimo 165 valore massimo 190cm) mentre il peso 80.2 Kg (range da 67.3 a 102.4 Kg). I dati sono sintetizzati nella tabella seguente

*Tabella 30 : caratteristiche degli operatori che hanno svolto le prove*

<b><i>Operatore</i></b>	<b><i>Peso[Kg]</i></b>	<b><i>Altezza [cm]</i></b>	<b><i>Eta'</i></b>
<i>1</i>	88	182	24
<i>2</i>	88	182	24
<i>3</i>	71	168	52
<i>4</i>	74	170	47
<i>5</i>	84	183	59
<i>6</i>	86	184	40
<i>7</i>	70	165	65
<i>8</i>	72	168	55
<i>9</i>	102	174	50
<i>10</i>	67	165	56
<i>11</i>	79	190	28
<i>12</i>	79	190	28
<i>13</i>	68	175	66
<i>14</i>	92	188	36

Le prove sono state suddividendo gli operatori nei seguenti differenti gruppi :

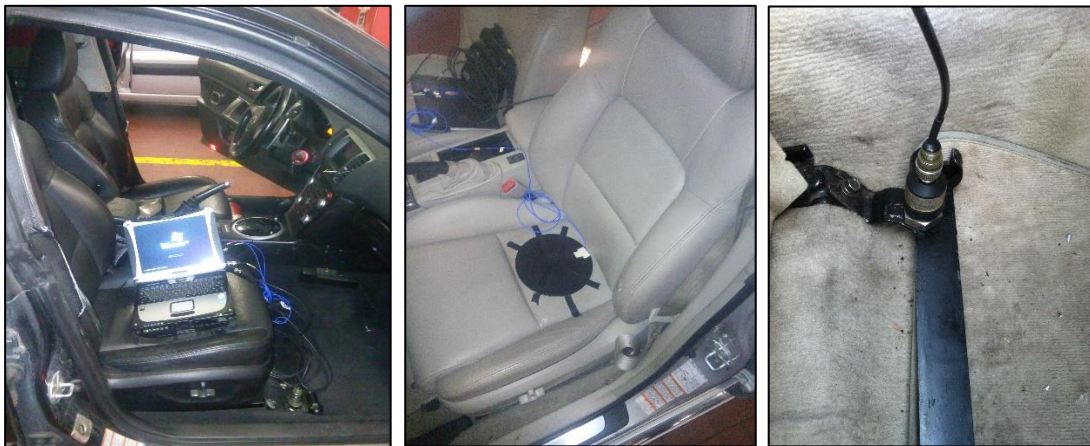
- Gruppo 1: 7 guidatori (7 uomini) con stessa altezza 170 (tolleranza  $\pm 5$  cm) e peso variabile
- Gruppo 2: 7 guidatori (7 uomini) con stessa altezza 186 (tolleranza  $\pm 4$  cm) e peso variabile

- Gruppo 3: 7 guidatori (7 uomini) con stesso peso 71 (tolleranza  $\pm 3$  Kg) e altezza variabile
- Gruppo 4: 7 guidatori (7 uomini) con stesso peso 85 (tolleranza  $\pm 6$  Kg) e altezza variabile

Prima dell'inizio di ciascuna misurazione è stato illustrato a ciascun operatore lo scopo di tale prova richiedendo di rispettare i parametri di guida controllare la posizione del sedile ergonomicamente idonea e posizionarsi sul sedile secondo le proprie abitudini in modo da mantenere la posizione naturale di guida. Oltre a ciò è stata verificata la corretta posizione dell'accelerometro tri-assiale sotto il bacino del soggetto. Ciascuna prova ha avuto una durata di 3 min. sono state ripetute per ciascun operatore 5 volte

#### *d) Caratterizzazione della sorgente vibratoria*

La metodologia di misurazione è stata identica alla precedente campagna. E' stato posizionato lo strumento per la misura dell'esposizione al corpo intero sul sedile di guida fissandolo con del nastro adesivo e l'accelerometro come già visto fissato solidale al porta mitraglietta



*Fig. 84: preparazione della strumentazione accelerometro su sedile e particolare auto blindata*

#### *e) Risultati*

Nella campagna di misurazione sono stati svolti in totale 28 test, suddividendoli in due fasi; nella prima sono state effettuate le prove sulla vettura standard per tutti i 14 operatori mentre nella seconda sono state ripetute le prove con gli stessi soggetti sulla vettura dotata di blindatura. I grafici mostrano l'andamento dei valori d'accelerazione ponderati in frequenza  $a_w$  lungo i tre assi di sollecitazione.

Vengono riportati i grafici più rappresentativi della campagna di misure, per entrambe le configurazioni, dove sull'asse delle y vengono riportati i valori d'accelerazione in  $[m/s^2]$  con scala logaritmica per una migliore visualizzazione grafica mentre sull'asse delle x il tempo espresso in secondi [s]. Il grafico seguente mostra il grafico per l'operatore 1 sulla vettura in configurazione standard mentre i grafici ottenuti per i restanti soggetti sono riportati nelle appendici C e D.

### Operatore 1

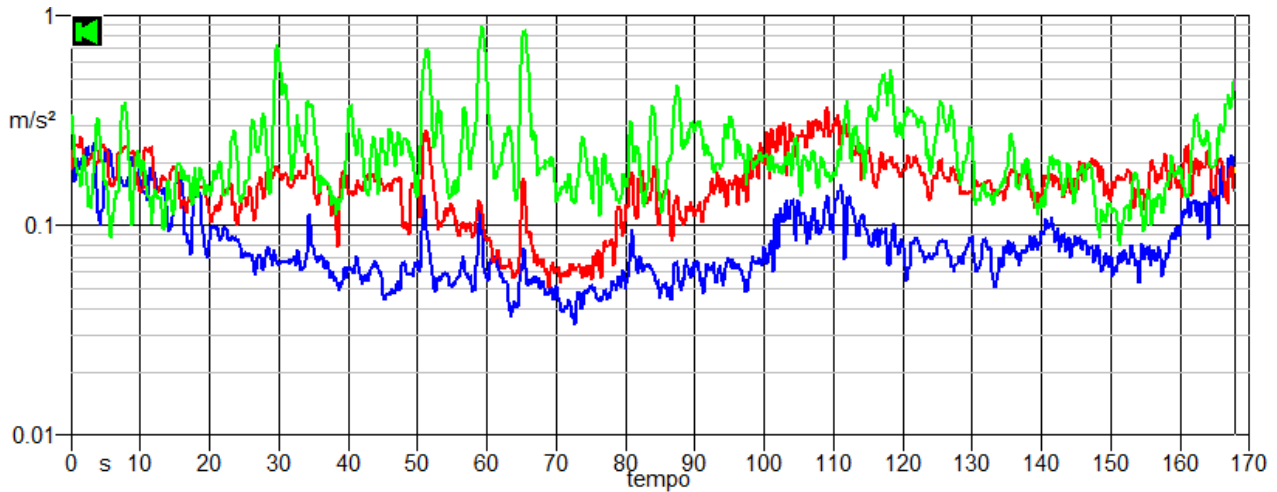


Fig. 85: Time History della misurazione effettuata

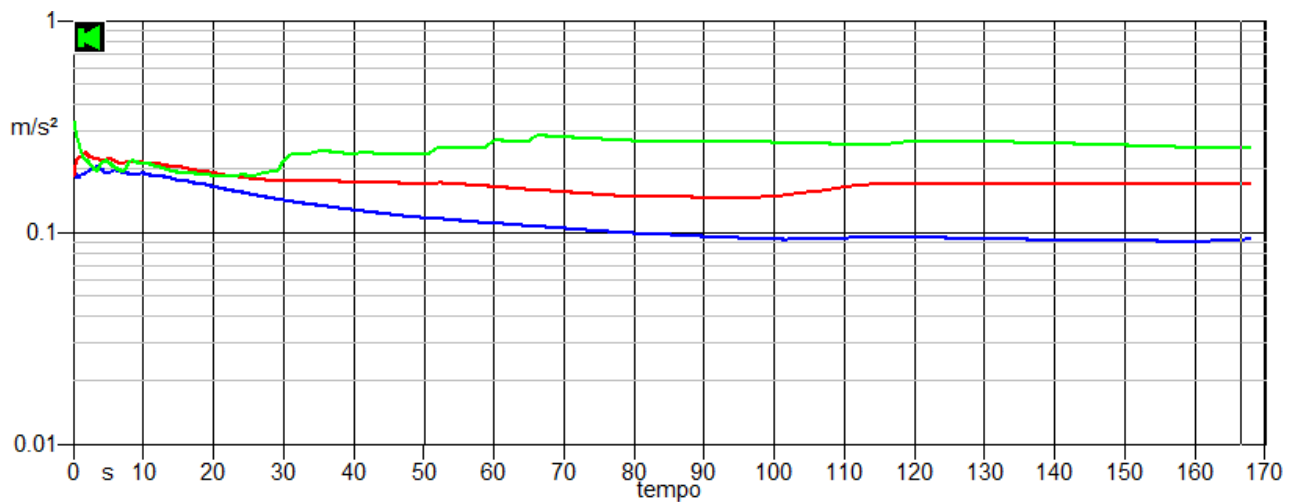


Fig. 86: visualizzazione del livello equivalente lungo i tre assi x, y e z



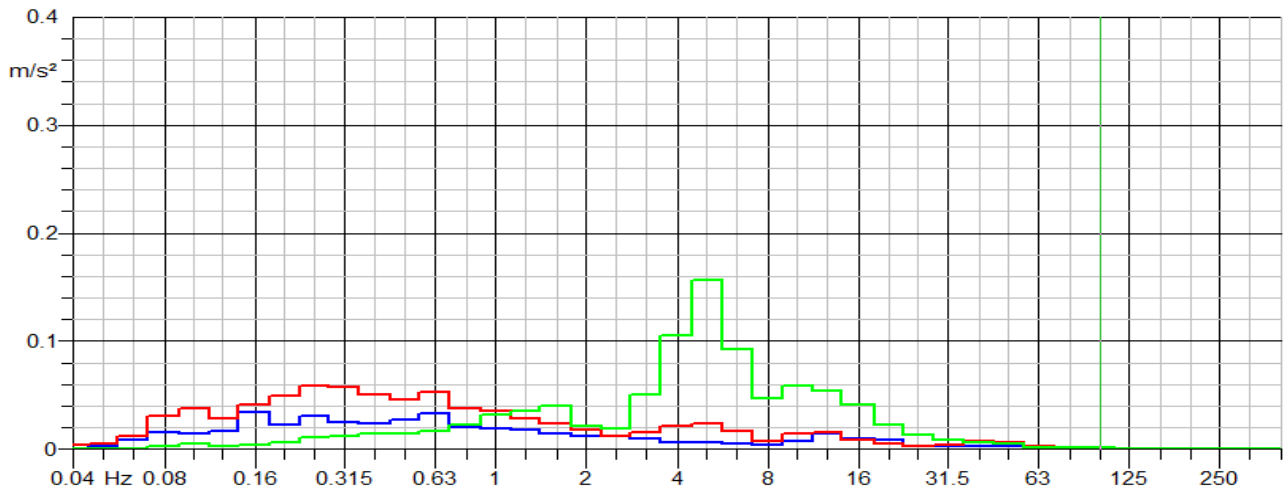


Fig. 87: spettro in frequenza della misura registrata per ciascun asse di sollecitazione

I seguenti grafici mostrano i risultati ottenuti nella misurazione effettuata con il primo operatore con le vetture in configurazione blindata. I grafici relativi ai restanti operatori sono riportati in appendice D

**Operatore 1**

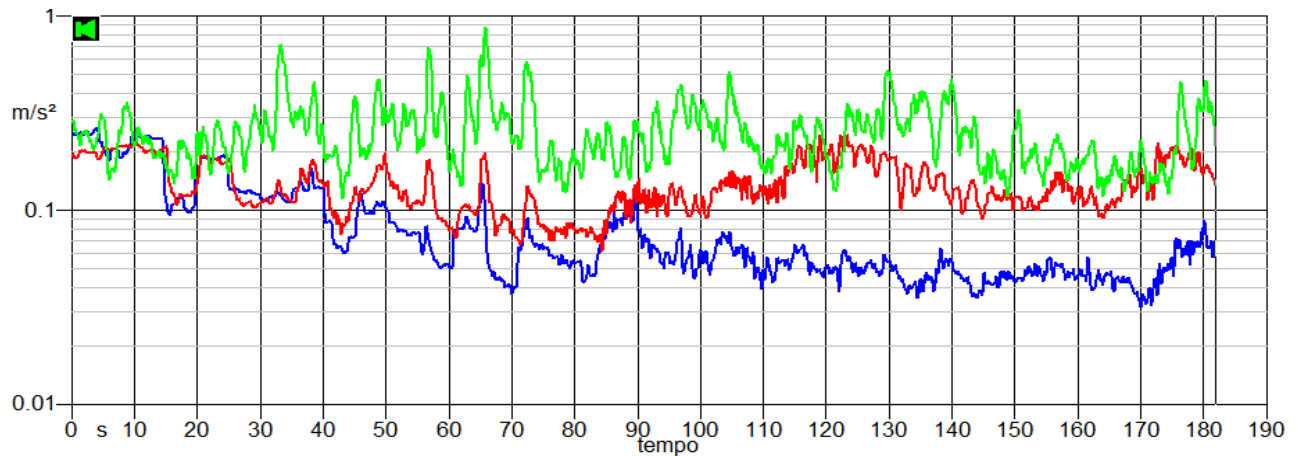


Fig. 88: Time History della misurazione effettuata

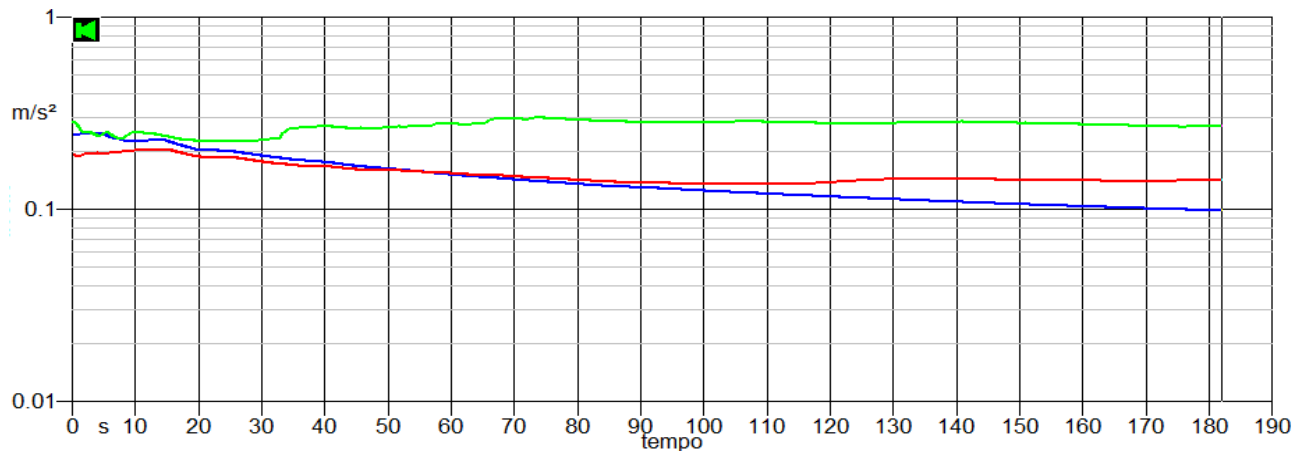


Fig. 89: visualizzazione del livello equivalente lungo i tre assi x, y e z



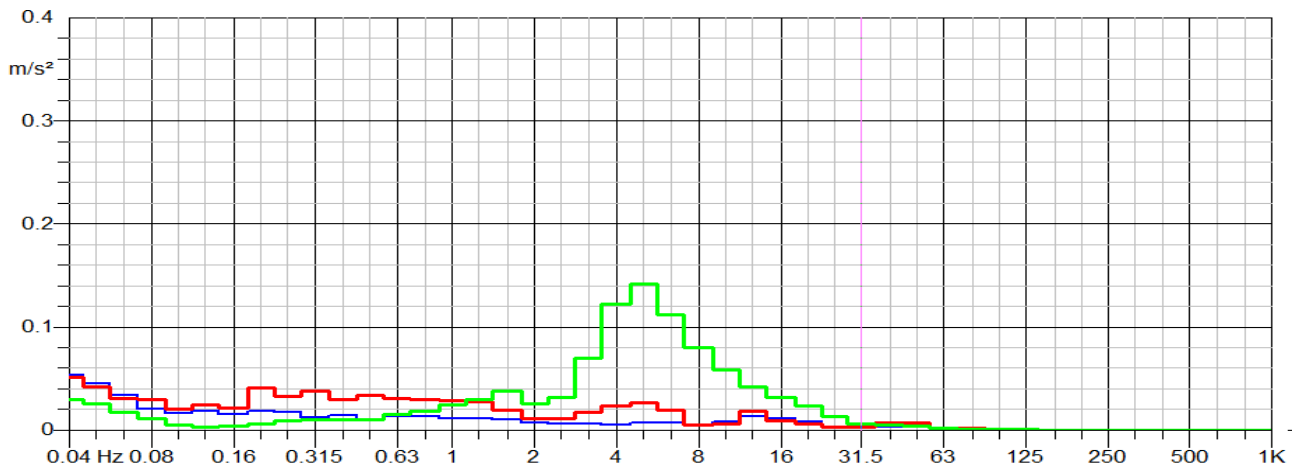


Fig. 90: spettro in frequenza della misura registrata per ciascun asse di sollecitazione

L'asse  $z$  (direzione verticale) risulta essere quello maggiormente sollecitato su entrambi i veicoli. Appare evidente dai grafici esposti che il segnale acquisito sia considerevolmente variabile, nonostante la ripetibilità delle prove nelle medesime condizioni al contorno. Per comprendere meglio tale aspetto il seguente grafico rappresenta la media segnale calcolata per ciascun intervallo di tempo d'acquisizione (125ms - delta time d'acquisizione da cui viene definito il valore efficace) su tutte le misure effettuate su ciascun guidatore

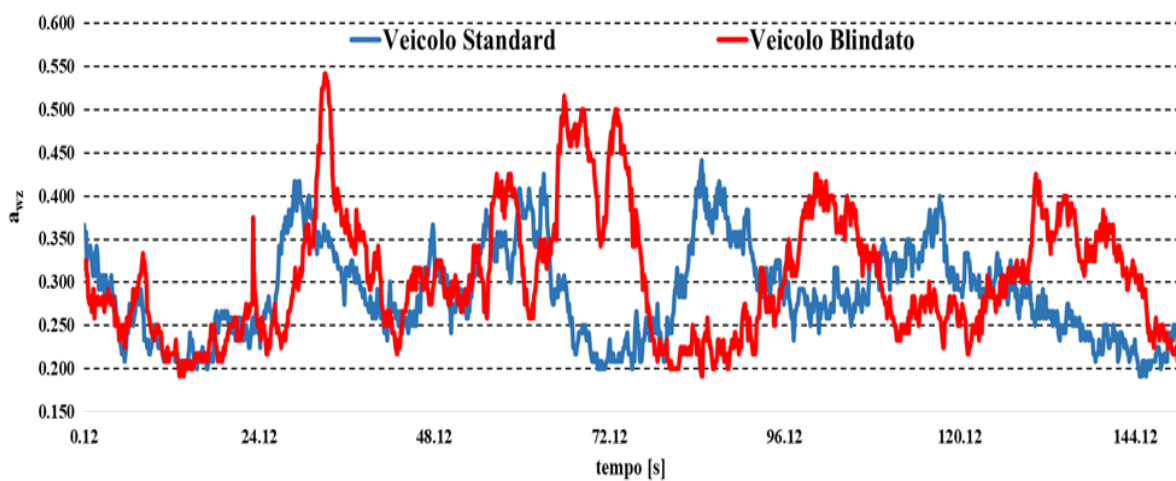


Fig. 91: confronto segnale sorgente vibratoria

Di seguito si riporta il confronto del segnale delle due sorgenti, il mezzo in configurazione standard e in versione blindata

Tabella 31: risultati ottenuti sulle due tipologie di vetture

VEICOLO	MEDIA ARITMETICA	DEVIAZIONE STANDARD
BLINDATO	0.5131	0.0161
NON BLINDATO	0.3802	0.0098

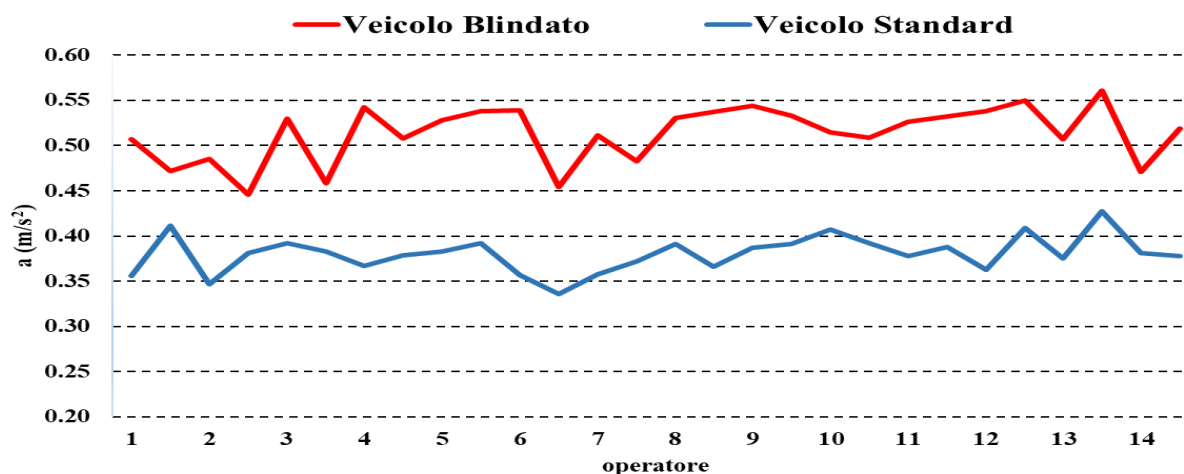


Fig. 92: confronto accelerazione per ciascun operatore su entrambi i veicoli

L'accelerazione media ponderata in frequenza è stata definita per ciascun asse di sollecitazione secondo lo stesso identico metodo della precedente campagna. La tabella seguente riporta i dati dell'accelerazione e relativa esposizione lungo i tre assi di riferimento

### **VEICOLO NON BLINDATO**

Tabella 32 : risultati delle misurazioni per gli operatori sul veicolo in configurazione standard

<i>Operatore</i>	<i>Asse X (m/s<sup>2</sup>)</i>	<i>Asse Y (m/s<sup>2</sup>)</i>	<i>Asse Z (m/s<sup>2</sup>)</i>	<i>A<sub>wx</sub>*I 4</i>	<i>A<sub>wy</sub>*I 4</i>	<i>A<sub>wz</sub></i>
1	0.092	0.112	0.273	0.128	0.157	0.287
2	0.074	0.101	0.275	0.1036	0.141	0.282
3	0.077	0.133	0.282	0.108	0.186	0.282
4	0.074	0.128	0.284	0.104	0.179	0.285
5	0.115	0.137	0.279	0.161	0.191	0.318
6	0.056	0.113	0.275	0.0791	0.158	0.275
7	0.101	0.133	0.293	0.141	0.186	0.293
8	0.058	0.114	0.288	0.081	0.159	0.288
9	0.058	0.119	0.249	0.081	0.167	0.249
10	0.120	0.151	0.282	0.168	0.21	0.282
11	0.058	0.117	0.269	0.081	0.164	0.269

12	0.172	0.219	0.271	0.241	0.306	0.244
13	0.076	0.128	0.286	0.107	0.179	0.286
14	0.061	0.120	0.258	0.084	0.168	0.258

## **VEICOLO BLINDATO**

*Tabella 33 : risultati delle misurazioni per gli operatori sul veicolo in configurazione blindata*

<b>Operatore</b>	<b>Asse X (m/s<sup>2</sup>)</b>	<b>Asse Y (m/s<sup>2</sup>)</b>	<b>Asse Z (m/s<sup>2</sup>)</b>	<b>A<sub>wx</sub>*14</b>	<b>A<sub>wy</sub>*14</b>	<b>A<sub>wz</sub></b>
1	0.146	0.133	0.254	0.204	0.187	0.255
2	0.09	0.135	0.248	0.127	0.190	0.248
3	0.084	0.154	0.263	0.118	0.216	0.263
4	0.136	0.187	0.262	0.190	0.263	0.250
5	0.117	0.175	0.257	0.164	0.246	0.269
6	0.08	0.161	0.252	0.113	0.225	0.262
7	0.073	0.311	0.265	0.102	0.435	0.257
8	0.082	0.17	0.266	0.115	0.239	0.265
9	0.071	0.169	0.236	0.099	0.237	0.236
10	0.099	0.172	0.261	0.139	0.242	0.259
11	0.093	0.161	0.257	0.130	0.224	0.246
12	0.096	0.175	0.263	0.134	0.245	0.260
13	0.115	0.185	0.265	0.161	0.259	0.265
14	0.101	0.153	0.252	0.140	0.215	0.253

## VEICOLO NON BLINDATO

Tabella 34 : valutazione del parametro A(8) per il veicolo standard

<i>Operatore</i>	$A_{wx} * I 4$	$A_{wy} * I 4$	$A_{wz}$	$A(8)$	<i>A(8) tempo esp 4h</i>
1	0.128	0.157	0.287	0.287	0.203
2	0.1036	0.141	0.282	0.282	0.199
3	0.108	0.186	0.282	0.282	0.199
4	0.104	0.179	0.285	0.285	0.201
5	0.161	0.191	0.318	0.318	0.224
6	0.0791	0.158	0.275	0.275	0.194
7	0.141	0.186	0.293	0.293	0.207
8	0.081	0.159	0.288	0.288	0.204
9	0.081	0.167	0.249	0.249	0.176
10	0.168	0.21	0.282	0.282	0.199
11	0.081	0.164	0.269	0.269	0.19
12	0.241	0.306	0.244	0.244	0.172
13	0.107	0.179	0.286	0.286	0.202
14	0.084	0.168	0.258	0.258	0.182

## VEICOLO BLINDATO

Tabella 35 : valutazione del parametro A(8) per il veicolo blindato

<i>Operatore</i>	$A_{wx} * 1.4$	$A_{wy} * 1.4$	$A_{wz}$	$A(8)$	$A(8) \text{ tempo esp } 4h$
1	0.204	0.187	0.255	0.255	0.180
2	0.127	0.190	0.248	0.248	0.175
3	0.118	0.216	0.263	0.263	0.186
4	0.190	0.263	0.250	0.250	0.186
5	0.164	0.246	0.269	0.269	0.190
6	0.113	0.225	0.262	0.262	0.185
7	0.102	0.435	0.257	0.257	0.308
8	0.115	0.239	0.265	0.265	0.187
9	0.099	0.237	0.236	0.236	0.167
10	0.139	0.242	0.259	0.259	0.183
11	0.130	0.224	0.246	0.246	0.174
12	0.134	0.245	0.260	0.260	0.184
13	0.161	0.259	0.265	0.265	0.187
14	0.140	0.215	0.253	0.253	0.179

La tabella seguente mostra la variazione percentuale della dose d'esposizione per ciascun operatore tra i due differenti veicoli

Tabella 36 : confronto dei risultati per le due tipologie di veicoli per un tempo stimato di 8 ore

<i>Operatore</i>	<i>Peso [Kg]</i>	<i>Altezza [cm]</i>	<i>Età</i>	$A(8)$ <i>Veicolo Standard</i>	$A(8)$ <i>Veicolo Blindato</i>	$\Delta\%$
1	88	182	24	0.288	0.255	-11.48
2	88	182	24	0.282	0.248	-12.06

3	71	168	52	0.293	0.263	-10.09
4	74	170	47	0.285	0.250	-12.46
5	84	183	59	0.318	0.269	-15.41
6	86	184	40	0.295	0.262	-11.19
7	70	165	65	0.294	0.257	-12.61
8	72	168	55	0.299	0.265	-11.22
9	102	174	50	0.290	0.236	-18.48
10	67	165	56	0.292	0.259	-11.47
11	79	190	28	0.300	0.246	-18.03
12	79	190	28	0.294	0.260	-11.56
13	68	175	66	0.296	0.265	-10.47
14	92	188	36	0.288	0.253	-12.33

I dati raccolti nella tabella 36 consentono di evidenziare le caratteristiche antropometriche dei soggetti e dei relativi valori di A (8). Le colonne a sinistra mostrano le caratteristiche del corpo (peso, altezza e età) di ciascun guidatore mentre quelle a destra evidenziano i diversi valori di A (8) tra il veicolo standard e blindato. Nell'ultima colonna la differenza tra i due set di dati viene evidenziata con valori percentuali. Sulla base dei dati campionati, è possibile osservare una correlazione significativa tra l'esposizione a WBV e l'installazione di armature proiettili sul telaio. In particolare, la dose riferita ai veicoli corazzati diminuisce da un valore minimo del 10.09% (conducente 3) ad un valore massimo di 18.48% (conducente 9). Questi risultati confermano ancora una forte correlazione tra dose d'esposizione e caratteristiche della sorgente vibratoria.

Tabella 37 : variazione percentuale del parametro A(8) per un tempo stimato di 4 h

<i>Operatore</i>	<i>Peso [Kg]</i>	<i>Altezza [cm]</i>	<i>Età</i>	<i>A(8) Veicolo Standard</i>	<i>A(8) Veicolo Blindato</i>	<i>Δ%</i>
1	88	182	24	0.203	0.180	-11.48
2	88	182	24	0.199	0.175	-12.06
3	71	168	52	0.200	0.186	-6.90
4	74	170	47	0.202	0.186	-7.89
5	84	183	59	0.225	0.190	-15.41
6	86	184	40	0.194	0.185	-4.73
7	70	165	65	0.208	0.198	-4.66
8	72	168	55	0.204	0.187	-8.15
9	102	174	50	0.176	0.167	-5.41
10	67	165	56	0.199	0.183	-8.33
11	79	190	28	0.191	0.174	-8.91
12	79	190	28	0.193	0.184	-4.51
13	68	175	66	0.202	0.187	-7.34
14	92	188	36	0.182	0.179	-2.13

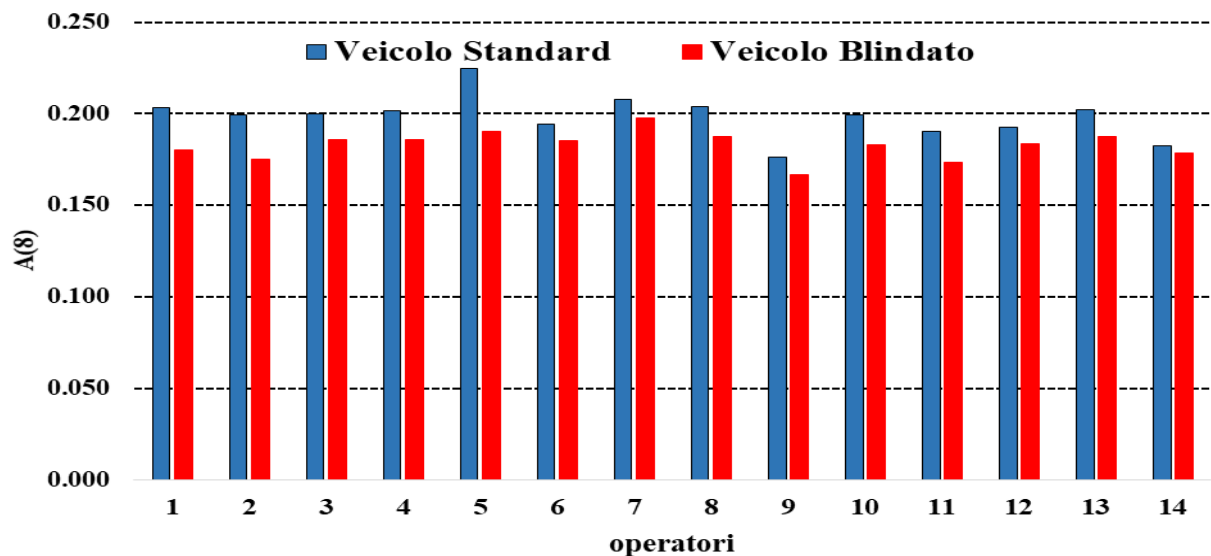


Fig. 93: confronto della dose d'esposizione tra i due veicoli

Successivamente si è proceduto all'elaborazione dei dati forniti dall'accelerometro mediante Noise Vibration Works. Come sorgente è stato utilizzato il porta mitraglietta sito sotto al sedile del passeggero anteriore Esportati i valori da Samurai al programma sopra citato si è determinata la time-history ed in questa analisi (CH4) non è stata utilizzata nessuna curva di ponderazione.

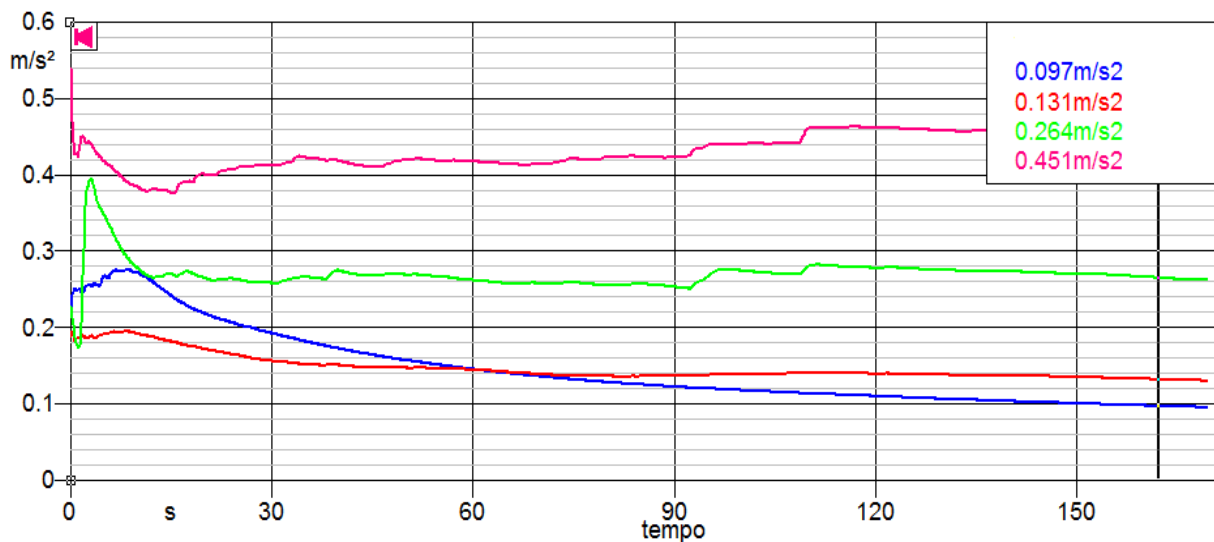


Fig. 94: confronto segnale del livello equivalente tra differenti operatori

Si nota in figura che dal canale uno al canale tre (accelerometro triassiale) sono stati applicati i filtri di ponderazione contrariamente al canale quattro (sorgente), acquisendo il segnale originale. Riportati i valori d'accelerazione in un programma di calcolo, se ne è determinata prima una media aritmetica per entrambe le vetture e in seguito la deviazione standard. Quest'ultima chiamata anche scarto tipo è un indice statistico che consente di misurare la dispersione della singole osservazioni intorno alla

media aritmetica ed ha la proprietà di avere la stessa unità di misura dei valori osservati ( $m/s^2$ ). Una volta elaborati i dati si è proceduto alla divisione degli operatori in due gruppi distinti in modo da poter valutare la variazione di accelerazione in funzione delle caratteristiche fisiche (peso e altezza). Il primo gruppo è stato selezionato con un'altezza compresa tra 182 cm e 190 cm e con una variazione di peso tra i 79 Kg e i 92 Kg; il secondo gruppo invece prevedeva un'altezza tra i 165 cm e i 174 cm ed un peso compreso tra 67 Kg e 102 Kg. L'analisi ha evidenziato che i soggetti con corporatura esile risentono maggiormente dell'accelerazione lungo tutti gli assi esaminati mentre i soggetti con corporatura robusta ne risentono in maniera inferiore.

### **VEICOLO NON BLINDATO**

Di seguito sono riportati i risultati ottenuti per il veicolo standard: i due grafici seguenti mostrano i risultati della campagna di misurazione ottenuti dal Gruppo 1 (altezza fissa  $170 \pm 5$  cm) e quelli che riguardano il Gruppo 2 (altezza fissa di  $186 \pm 4$  cm) espresso con  $a_{Wmax}$  ( $m/s^2$ )

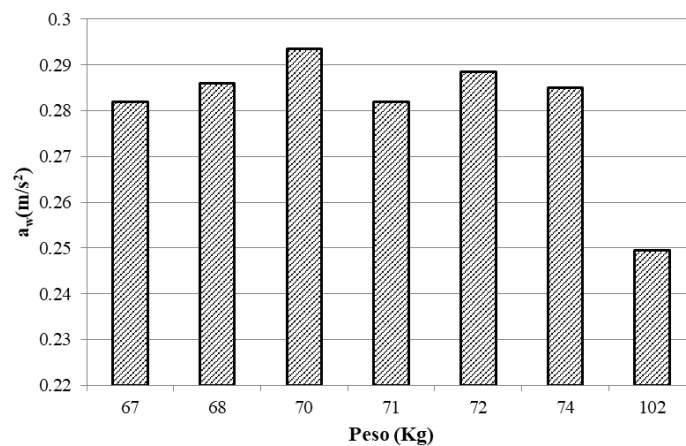


Fig. 95: confronto gruppo 1 fissata altezza

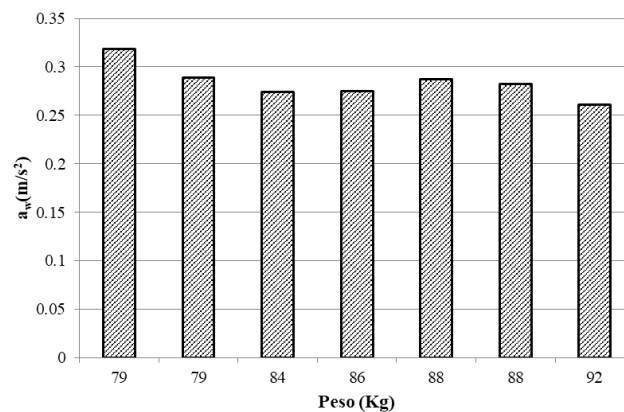


Fig. 96: confronto gruppo 2 fissata altezza



Il grafico in figura 97 mostra i risultati della campagna di misurazione ottenuta dal Gruppo 3 (peso fisso di  $71 \pm 3$  Kg) mentre quello figura 98 spiega i valori del gruppo 4 (peso fisso di  $85 \pm 6$  Kg) di altezza variabile espressa con  $a_{wmax}$  ( $m/s^2$ ).

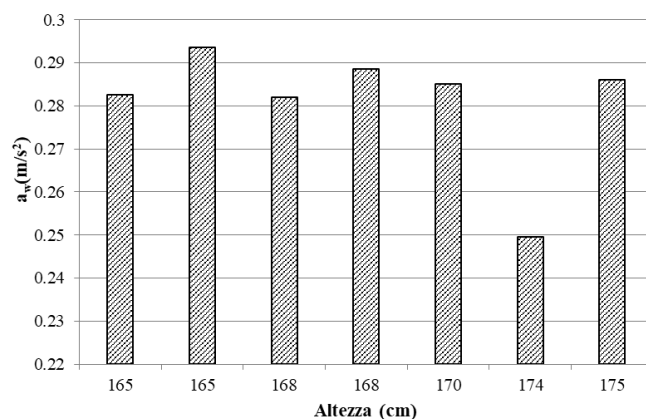


Fig. 97: confronto gruppo 3 fissato peso

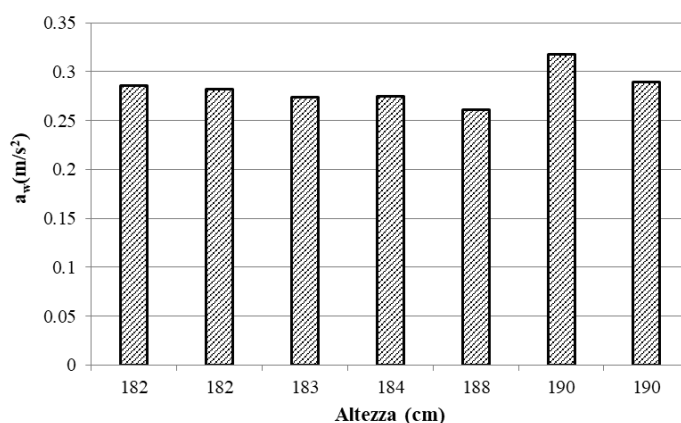


Fig. 98: confronto gruppo 4 fissato peso

## VEICOLO BLINDATO

I grafici in figura 99 e 100 illustrano i risultati della campagna di misura con il modello blindato e illustrano l'andamento di  $a_w$  registrato dal gruppo 1 (altezza stabilita di  $170 \pm 5$  cm) e gruppo 2 (altezza fissa di  $186 \pm 4$  cm)

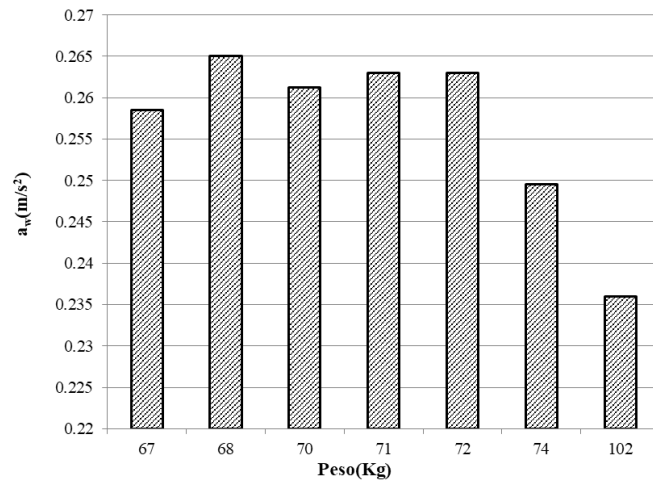


Fig. 99: confronto gruppo 1 fissata altezza

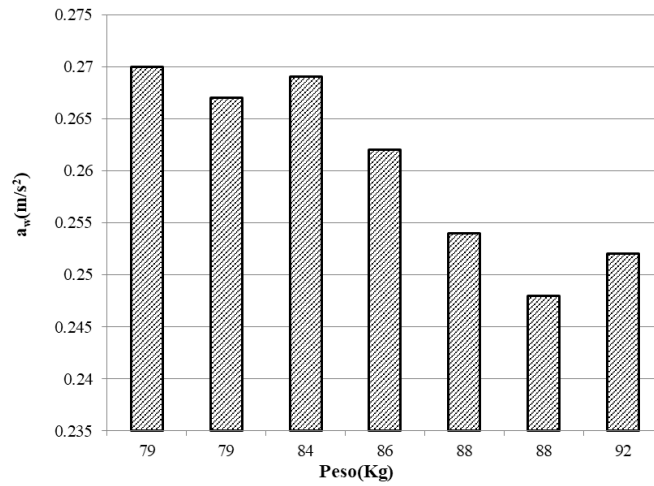


Fig. 100: confronto gruppo 2 fissata altezza

I grafici che seguono mostrano i risultati registrati dal gruppo 3 (peso fisso di  $71 \pm 3$  Kg) e gruppo 4 (peso fisso di  $85 \pm 6$  Kg) dove  $a_w$  è rappresentato in funzione dell'altezza del soggetto diverso

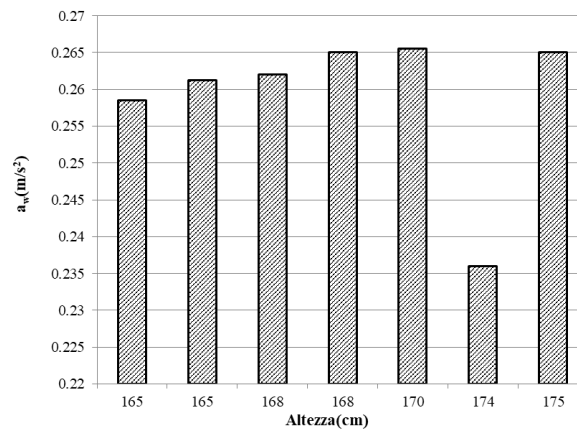


Fig. 101: confronto gruppo 3 fissato peso

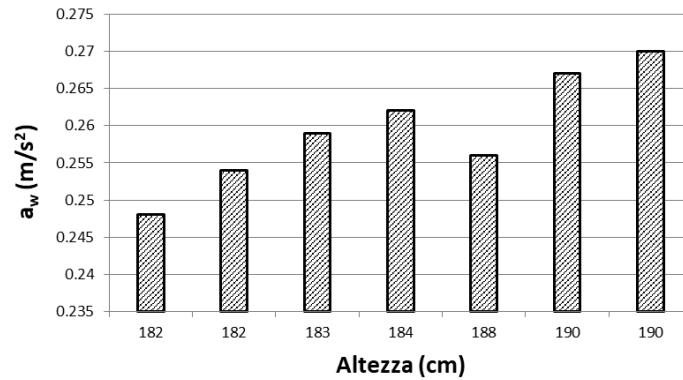


Fig. 102: confronto gruppo 3 fissato peso

Attraverso una funzione polinomiale quarto grado vengono approssimate le funzioni per descrivere una chiara tendenza legata ai valori ottenuti dalle misure di campagna  $a_w$ . Il grafico di figura 103 mostra lo sviluppo della funzione per il gruppo 1 (altezza fissa di 170cm e peso variabile) e 2 (altezza fissa di 186cm e peso variabile) per il modello originale. Tutte le linee mostrano chiaramente che l'esposizione diminuisce con un aumento del peso su entrambi i veicoli che presentano caratteristiche diverse del telaio. Invece il grafico della Figura 104 evidenzia una linea di tendenza in aumento quando l'altezza aumenta per il gruppo 4 (peso fisso di 71 e altezza variabile) per il modello originale del Subaru Legacy e una linea di tendenza simile con lo stesso gruppo ma su modello blindato Subaru Legacy. Tutte le funzioni polinomiali che approssimano i risultati ottenuti dalla campagna di misurazione su un'autovettura di un veicolo modello mostrano linee di tendenza diverse di tutti i gruppi in cui la popolazione è stata suddivisa. Ciò che risulta evidente è che all'aumentare del peso si ha una sensibile diminuzione della dose d'esposizione mentre all'aumentare dell'altezza il soggetto appare maggiormente esposto. Per completezza sono riportati di seguito i grafici che sintetizzano i risultati ottenuti per tutti i gruppi su entrambi i veicoli testati

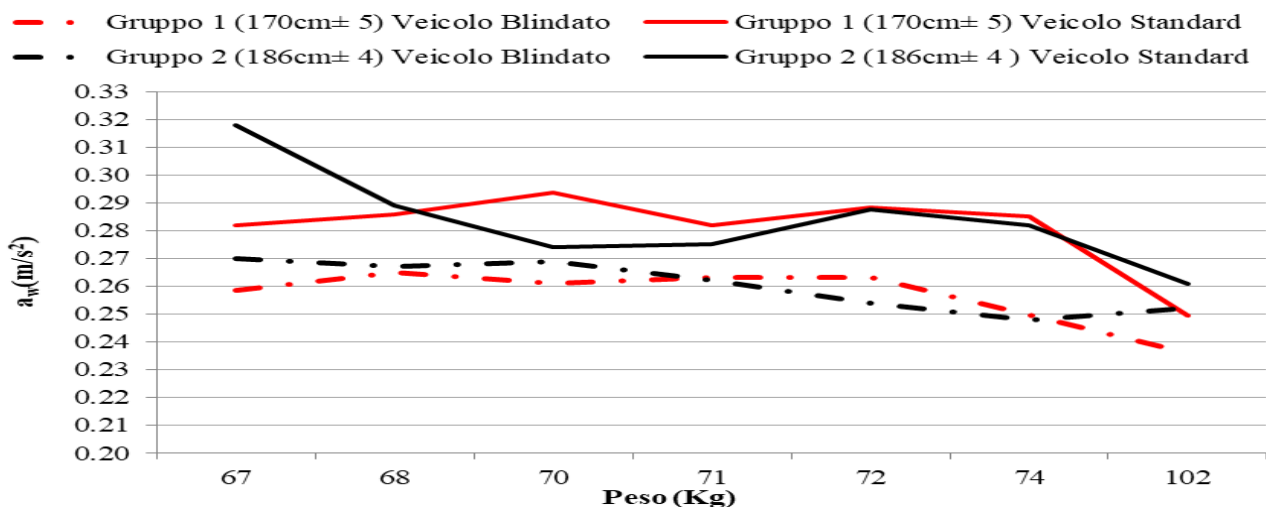


Fig. 103: confronto dei valori d'accelerazione per i gruppi 1 e 2

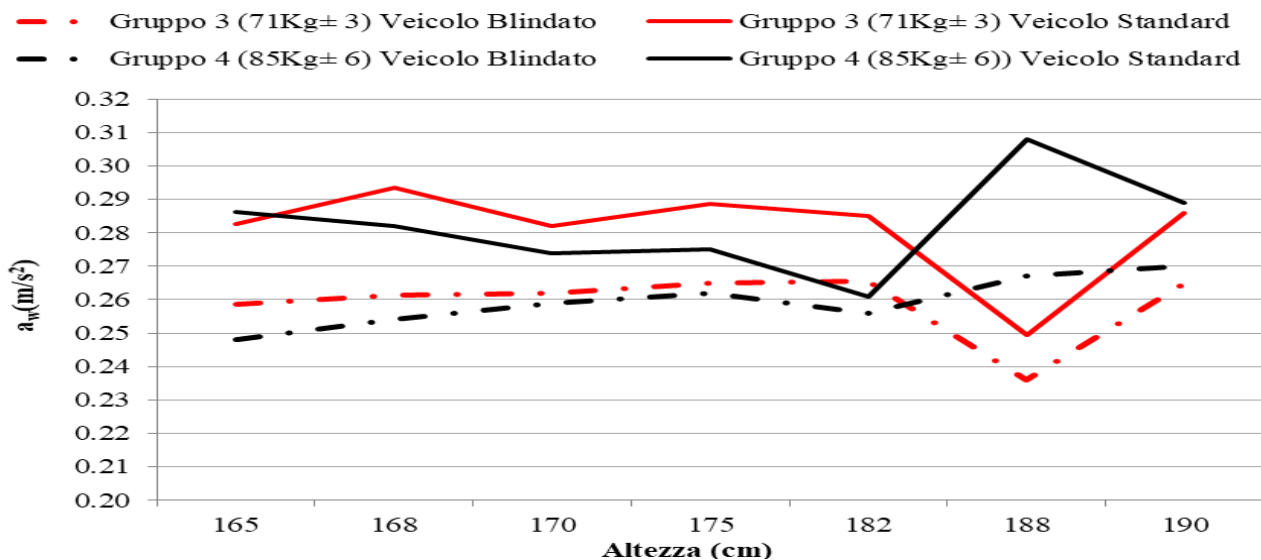


Fig. 104 : confronto dei valori d'accelerazione per i gruppi 3 e 4

Infine di seguito sono riportati i risultati ottenuti per l'integrazione della formula della previsione della dose d'esposizione come nella campagna precedente

## VEICOLO NON BLINDATO

Tabella 38 : risultati ottenuti con le differenti metodologie di calcolo per gli operatori sul veicolo standard

Operatore	K	A(8) Met.A	A(8) Met.B	A(8) Met.C'	A(8) Met.C	Confronto A-B	Confronto A-C'	Confronto A-C
1	0.824	0.061	0.074	0.090	0.074	18.31	32.72	17.64
2	0.824	0.059	0.070	0.085	0.072	15.22	30.17	17.64
3	0.870	0.059	0.075	0.086	0.068	21.09	31.36	13.02
4	0.855	0.058	0.071	0.083	0.067	19.13	30.89	14.55
5	0.872	0.065	0.082	0.094	0.074	21.52	31.54	12.77
6	0.861	0.058	0.069	0.080	0.067	15.92	27.57	13.86
7	0.851	0.060	0.077	0.091	0.071	21.91	33.55	14.90
8	0.858	0.059	0.070	0.081	0.069	15.05	27.14	14.23
9	0.649	0.051	0.064	0.098	0.078	19.88	47.97	35.05
10	0.889	0.058	0.081	0.091	0.066	27.82	35.82	11.09
11	0.9998	0.055	0.067	0.067	0.055	17.41	17.42	0.02
12	0.9998	0.050	0.100	0.100	0.050	49.95	49.96	0.02
13	0.985	0.058	0.072	0.073	0.059	19.21	20.39	1.46
14	0.841	0.053	0.065	0.078	0.063	19.25	32.13	15.94

Tabella 39 : confronto in termini percentuali tra i diversi metodi di calcolo per veicolo standard

	Confronto A-B	Confronto A-C'	Confronto A-C
Variazione % tra i metodi	21.548	32.046	13.013

La seguente tabella gli incrementi percentuali che si hanno per ciascun confronto metodologico

Tabella 40 : confronto dei risultati in funzione del parametro correttivo  $k_i$

$K_i$	Confronto A-B	Confronto A-C'	Confronto A-C
$k_i < 0.8$	19.88	47.96	35.05
$0.8 < k_i < 0.9$	19.52	31.29	14.56
$k_i > 0.9$	28.85	29.25	0.49

Appare evidente che i metodi proposti e implementati portano sempre ad una sovrastima rispetto al valore che viene definito con la normativa standard. Ciò che però risulta evidente è che all'aumentare del fattore  $K_i$  l'aumento percentuale si riduce, dimostrando come avvenga vi sia una relazione tra la dose d'accelerazione e le caratteristiche antropometriche, ossia che al variare del rapporto tra queste due grandezze si ha una variazione della stima.

## VEICOLO BLINDATO

Tabella 41 : risultati ottenuti con le differenti metodologie di calcolo per gli operatori sul veicolo blindato

Operatore	K	A(8) Met.A	A(8) Met.B	A(8) Met.C'	A(8) Met.C	Confronto A-B	Confronto A-C'	Confronto A-C
1	0.824	0.053	0.078	0.095	0.064	32.36	44.29	17.64
2	0.824	0.053	0.071	0.087	0.064	26.34	39.33	17.64
3	0.870	0.056	0.077	0.088	0.064	27.09	36.59	13.02
4	0.855	0.051	0.084	0.098	0.060	39.23	48.07	14.55
5	0.872	0.055	0.082	0.094	0.064	32.64	41.24	12.77
6	0.861	0.055	0.076	0.088	0.063	27.91	37.91	13.86
7	0.851	0.052	0.115	0.136	0.061	54.72	61.47	14.90
8	0.858	0.053	0.075	0.088	0.062	29.26	39.33	14.23
9	0.649	0.048	0.071	0.109	0.074	32.44	56.12	35.05
10	0.889	0.053	0.078	0.088	0.059	32.37	39.87	11.09
11	0.9998	0.050	0.073	0.073	0.050	31.98	31.99	0.02
12	0.9998	0.052	0.077	0.077	0.052	31.82	31.83	0.02
13	0.985	0.054	0.083	0.084	0.055	34.90	35.85	1.46
14	0.841	0.054	0.077	0.091	0.064	29.83	41.02	15.94

Tabella 42 : confronto in termini percentuali tra i diversi metodi di calcolo per veicolo blindato

	Confronto A-B	Confronto A-C'	Confronto A-C
Variazione % tra i metodi	33.06	41.78	13.01

Tabella 43 : confronto dei risultati in funzione del parametro correttivo  $k_i$

$K_i$	Confronto A-B	Confronto A-C'	Confronto A-C
$k_i < 0.8$	32.44	56.12	35.05
$0.8 < k_i < 0.9$	33.18	42.91	14.56
$k_i > 0.9$	32.90	33.22	0.50

## 2.1.3 Campagna sperimentale su mezzi adibiti al trasporto pubblico

### 2.1.3.1 Mezzi oggetto della campagna di misurazione

La tipologia di mezzo sulla quale sono state effettuate le misure è stato l'autobus, ad eccezione di un solo caso, un filobus. La scelta delle linee e dei veicoli su cui effettuare le indagini è stata fatta sulla base del fatto che il parco vetture eterogeneo e i mezzi percorrono strade la cui pavimentazione risulta variegata sia per grado di manutenzione che per tipologia di fondo stradale. Per questo motivo i modelli di vetture utilizzati per le indagini sono stati molteplici:

- Citaro Suburbano
- Citaro Urbano
- Cityclass Cursor con pedana
- Cityclass Cursor CNG
- Citelis 3p - 18m
- Citelis 3p - 12 m
- Urbanway Cursor

#### ➤ CITARO SUBURBANO E URBANO - O530 N3



*Fig. 105: vettura Mercedes Citaro*

Il Mercedes – Benz 0530 Citaro è un modello di autobus realizzato dalla Mercedes-Benz a pianale ribassato in produzione dal 1997. Nel 2014 ne è stata dichiarata la produzione superiore ai 40000 esemplari. Nel 2007 e nel 2012 il Citaro è stato oggetto di restyling che ne hanno modificato leggermente il frontale. Di seguito sono riportate le caratteristiche tecniche del sedile di guida

## MODELLO SEDILE ISRINGHAUSEN :

- molleggio pneumatico
- regolazione automatica del peso
- regolazione altezza mm100
- guida scorrimento orizzontale mm 210
- schienale reclinabile
- regolazione durezza ammortizzatore
- regolazione inclinazione
- abbassamento rapido
- sostegno lombare bicamera
- tessuto traspirante
- interposto assorbente carboni attivi
- seduta estiva ergonomica

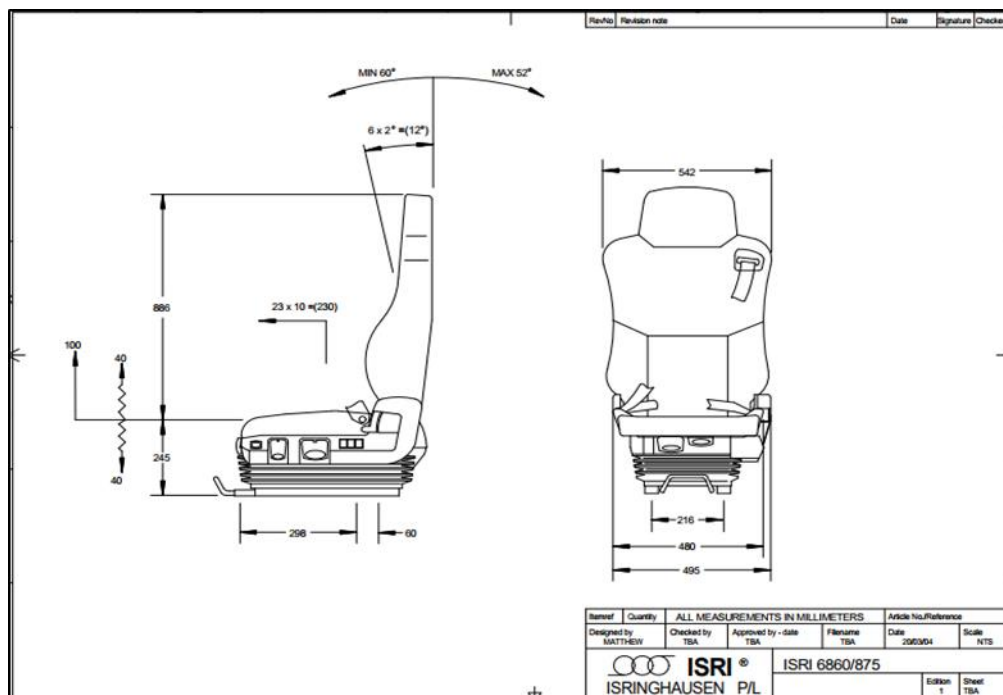


Fig. 106: caratteristiche del sedile ISRI

## ➤ CITYCLASS CURSOR

L'Iveco 491 CityClass è un autobus prodotto dal 1996 al 2008 come erede dell'Iveco Turbocity-R. La differenza dai precedenti Turbocity era netta: la carrozzeria era caratterizzata da forme arrotondate che anticipavano di quasi 5 anni i moderni dettami per l'estetica degli

autobus urbani. Il Cityclass è stato classificato come Iveco 491 (per la versione urbana) e Iveco 591 (per la versione suburbana); a differenza dei precedenti modelli non ne è mai stata messa in produzione una versione interurbana (l'ipotetico Iveco 691).



*Fig. 107: vettura Cityclass Cursor*



*Fig. 108: veduta dall'interno deisedili passeggeri*

Costruito con la tecnica del pianale ribassato (per tutta la lunghezza del veicolo) il Cityclass è inizialmente equipaggiato con un motore Fiat 8360 46 erogante 220 cavalli e montato in posizione verticale trasversale posteriore. Dopo poco si passa al più moderno 8360 46B erogante 270 cavalli (350 nella versione snodata). Nel 2001 in occasione dell'entrata in vigore delle normative Euro 3 viene introdotto il motore Cursor 8 da 7790 cm<sup>3</sup> erogante 290 cavalli (350 per le versioni snodate). Successivamente il Cursor 8 verrà adattato alle normative Euro 4 e all'alimentazione a metano. Infine nel 2006 verrà lanciata la versione EEV (Enhanced Environment-Friendly Vehicle) già a in regola con le norme Euro 5.



Tabella 44: Caratteristiche modello IVECO 491

<b>IVECO 491</b>	
<b>ALLESTIMENTO</b>	URBANO
<b>LUNGHEZZA</b>	10.8 m. 12 m. 18 m
<b>PORTE</b>	3 o 4
<b>ALIMENTAZIONE</b>	gasolio. metano. idrogeno

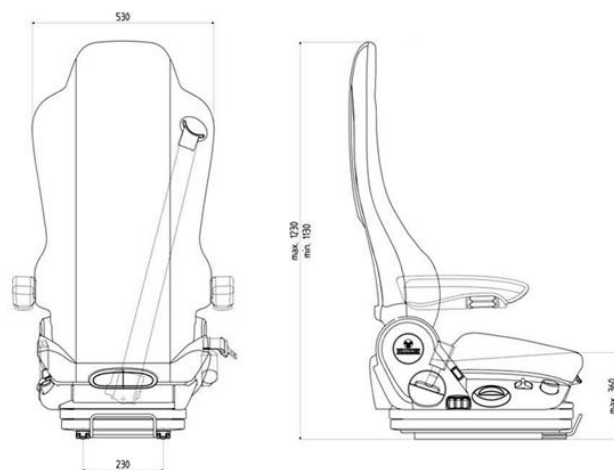
MODELLO DEL SEDILE GRAMMER:

CARATTERISTICHE	LINEA®			TOUREA®			
	HIGH PERFORMANCE			HIGH PERFORMANCE			
Codice prodotto in tessuto	1141340	1179085	1141342	1141291	1179084	1141341	1179080
Climatizzazione attiva		●			●		●
Comandi posizionati a destra	●	●	●	●	●	●	
Comandi posizionati a sinistra							●
Ammortizzatore regolabile	●	●	●	●	●	●	●
Cintura di sicurezza a 3 punti				●	●	●	●
Corsa del molleggio 80 mm	●	●	●	●	●	●	●
Regolazione dell'altezza 100 mm	●	●	●	●	●	●	●
Poggiatesta integrato	●	●	●	●	●	●	●
Regolazione longitudinale 200 mm	●	●	●	●	●	●	●
Supporto lombare pneumatico	●	●	●	●	●	●	●
Schienale regolabile	●	●	●	●	●	●	●
Regolazione pneumatica supporto laterale	●	●	●	●	●	●	●
Regolazione profondità della seduta	●	●	●	●	●	●	●
Regolazione dell'inclinazione della seduta	●	●	●	●	●	●	●
Discesa rapida	●	●		●	●		
Piattaforma girevole 50° a destra / 90° a sinistra			●			●	●
<b>ACCESSORI OPZIONALI</b>							
Rete portaoggetti	○	○	○	○	○	○	○
Braccioli ad alto comfort, reclinabili	○	○	○	○	○	○	○
Cintura di sicurezza	○	○	○				
Cavo integrato per predisposizione microfono * (1)	●	●	●	●	●	●	●
Riscaldamento sedile a doppia intensità	○	●	○	○	●	○	●
Supporto per microfono e cavo	○	○	○	○	○	○	○
Supporto NFAP* per sedile girevole (altezza 82 mm)		1050968			1050968		
Supporto NFAP* per sedile non girevole (alt. 144 mm)		1049682			1049682		
Supporto AFAP** per sedile girevole (altezza 110 mm)		1050969			1050969		
Supporto AFAP** per sedile non girevole (alt. 172 mm)		1078639			1078639		

● Standard ○ Opzionale, disponibile a pagamento

\*\*Nuova seduta \*\*Vecchia seduta \*(1) Predisposto per il montaggio di componenti opzionali

Fig. 109: caratteristiche sedile Grammer



*Fig. 110: sezione del sedile*



*Fig. 111: sedile Grammer con accelerometro tri-assiale*

## ➤ CITYCLASS CURSOR CNG

La messa in linea delle prime 30 vetture alimentati a metano risale al febbraio 2006 nell'ambito delle politiche di “Mobilità sostenibile” dettate dal Campidoglio e delle quali l'Atac dopo la fusione con la Sta e la sua trasformazione in “Agenzia per la Mobilità Pubblica e Privata del Comune di Roma” è il principale soggetto attuatore. Insieme alle nuove vetture venne realizzata la nuova rimessa di Tor Pagnotta appositamente costruita per ospitare le nuove vetture. Ciascun bus a metano è costato 247

mila euro. L'investimento complessivo per l'acquisto delle prime 200 vetture è stato pari a 49 milioni di euro, oltre ai 4 milioni impegnati per la realizzazione dell'apposita rimessa di Tor Pagnotta per un totale di 53 milioni di euro. L'investimento è stato così ripartito: 34 milioni di euro li ha stanziati la Regione Lazio 18 il Comune di Roma e uno il Ministero dell'Ambiente. I duecento autobus acquistati finora del tipo Irisbus Iveco 491E 12 27 Cityclass Cursor CNG sono stati immatricolati nel parco Atac all'interno del gruppo 4101-4300 ed assegnati ad impianti dotati di distribuzione di metano come la nuova rimessa Tor Pagnotta appositamente dedicata e la rimessa Tor Sapienza dove l'impianto recentemente realizzato già lavora per il rifornimento e la manutenzione della vettura 3106 Iveco 471 12 20 U-Effeuno attualmente unico esemplare circolante a Roma di autobus a combustione mista gasolio/metano.



*Fig. 112: modello Cursor CNG*

Il modello dispone del nuovo motore Iveco Cursor a Metano a ciclo Otto sovralimentato con una cilindrata di 7790 cm<sup>3</sup> iniezione multipoint a controllo elettronico 6 cilindri in linea capace di erogare una potenza massima di 200 kW a 2100 giri/min ed una coppia massima di 1100 Nm a 1100 giri/min abbinato al nuovo cambio ZF a sei marce. E' dotato di otto bombole poste sul tetto dell'autobus dalla capacità di 140 litri l'una che garantiscono un'autonomia massima di 515 km e di un sistema di sicurezza che tiene continuamente sotto controllo le pressioni interne alle bombole rileva eventuali fughe di gas e provvede all'estinzione di eventuali incendi che potrebbero verificarsi nel vano motore. E' inoltre fornito di ABS ASR kneeling pedana per accesso disabili impianto di climatizzazione sistema informativo per l'utenza AVM sistema di controllo satellitare e di videosorveglianza. Lungo 12 m e largo 2.5m può raggiungere una velocità massima di 71 km/h ha tre porte 20 posti a sedere 2 posti per disabili 70 posti in piedi ed un posto di servizio per un totale di 93 posti pianale interamente

ribassato con altezze soglie 320 mm alla porta anteriore e 340 mm alle porte centrale e posteriore. Il Cityclass Cursor CNG garantisce bassi livelli di emissione di gas nocivi rientrando pienamente entro i limiti imposti per la definizione di EEV (veicolo ecologico avanzato) in particolare i livelli di emissioni garantiti sono: 2.53 g/kWh di monossido di carbonio 0.006 g/kWh di idrocarburi non metanici 0.017 g/kWh di idrocarburi metanici 0.38 g/kWh di ossidi di azoto e 0.003 g/kWh di particolato. Rispetto al corrispondente modello a gasolio già presente in 834 esemplari acquistati tra il 2001 e il 2003 ed in particolare rispetto ai 234 in grado di trasportare passeggeri disabili ha un diverso arredamento interno per via dei due posti per sedie a rotelle anziché uno con sei file da due posti affiancati nella parte posteriore sinistra anziché quattro che probabilmente ostacolerà il deflusso dei passeggeri all'interno del mezzo e dei nuovi sedili non imbottiti che sicuramente garantiranno un livello igienico più elevato; la cabina di guida ha una nuova porta d'ingresso dotata di vano portaoggetti integrato ed una differente disposizione e presenza di alcuni comandi tra cui un nuovo pulsante per l'apertura contemporanea di tutte le porte e la possibilità di sbrinare l'anta sinistra (per l'autista) della porta anteriore Sia il Cityclass Cursor CNG che il Citelis descritto nel paragrafo seguente possiedono come modello di sedile il Grammer.

## ➤ CITELIS

Il Citelis è un autobus prodotto dalla Irisbus (dall'ottobre 2005 al maggio 2013).



*Fig. 113: modello Citelis*

Il motore è il noto Iveco Cursor 8 con cilindrata da 7.8 litri disponibile con potenze variabili da 210 a 310 CV, montato in posizione posteriore trasversale verticale. L'ingombro del motore in tale posizione è tale che anche il Citelis, come l'Agora, monta ruote di dimensioni ridotte rispetto ad altri autobus per poter rientrare nei limiti di lunghezza standard. È alimentato a gasolio o a metano (nel



rispetto della normativa Euro 4 ma sono disponibili anche versioni EEV (Enhanced Environmentally-friendly Vehicles) già in regola con la normativa Euro 5. Il cambio è automatico (come in tutti i bus moderni) del tipo ZF o Voith. Il Citelis è dotato anche di un sistema di sospensioni pneumatiche a correzione automatica dell'assetto. È stato prodotto in versioni da 10, 12 e 18 metri (articolata) anche nelle versioni filoviarie la cui produzione è però affidata alla società ceca Karosa. Il Citelis in versione tipica ha il motore in posizione trasversale come il predecessore Agora; è tuttavia offerto anche nella versione "Line" caratterizzata dal motore posto invece longitudinalmente e da interni leggermente più spartani. Le due versioni sono esteticamente distinguibili solo nella zona posteriore (il Line ha fanali a gemme rotonde disposte in verticale anziché in orizzontale e due finestrini triangolari in più per via della differente cinematica). Il Citelis è stato poi sostituito nel maggio 2013 dall'Iveco Bus Urbanway (Urbanway Cursor).

Tabella 45: Caratteristiche modello CITELIS

	<i>Citelis 10 m</i>	<i>Citelis 12 m</i>	<i>Citelis 18 m</i>
<i>Lunghezza</i>	10.46	11.99	17.59
<i>Allestimento</i>	Urbano. Suburbano	Urbano. Suburbano	Urbano. Suburbano
<i>Porte</i>	2/3	2/3	3/4

## ➤ URBANWAY CURSOR

L'Urbanway è un autobus urbano costruito a partire dal maggio 2013 da Iveco Bus (ex Irisbus) ad Annonay in Francia. È il successore del Citelis nel campo del trasporto urbano. Il produttore Iveco ha approfittato del passaggio all'Euro 6 da settembre 2014 per rivedere l'architettura dei suoi autobus a partire da quelli urbani.



Fig. 114: modello Urbanway

Questo veicolo è stato progettato intorno a due nuovi motori: l'Iveco Tector 7 e l'Iveco Cursor 9 Entrambi dotati della tecnologia di post-trattamento dei gas di scarico "HI-eSCR" (High Efficiency SCR) sviluppata da FPT Industrial questi motori possiedono diverse cilindratae comprese tra 671 (Tector) e 871 (Cursor). L'Urbanway è disponibile in tre lunghezze: 10.5 m 12 m e 18 m (snodato) ed è uno dei primi autobus di Iveco ad essere dotato di sistemi di illuminazione esterna ed interna con tecnologia a LED. Come ogni autobus di ultima generazione è provvisto di climatizzatore pedana d'accesso per i disabili e display di percorso anteriore laterale e posteriore. A seconda della versione è disponibile con allestimento a 2,3 e 4 porte rototraslanti o sliding. Del Citelis del quale è diretta derivazione mantiene la forma del parabrezza i pannelli laterali l'assetto di guida rialzato e gran parte del telaio.

Tabella 46: Caratteristiche modello URBANWAY

:	<i>Urbanway 10 m</i>	<i>Urbanway 12 m</i>	<i>Urbanway 18 m</i>
<i>Lunghezza</i>	10.46	12	18
<i>Allestimento</i>	Urbano. Suburbano	Urbano. Suburbano	Urbano. Suburbano
<i>Porte</i>	2/3	2/3	3/4
<i>Alimentazione</i>	Gasolio. Metano. Ibrido	Gasolio. Metano. Ibrido	Gasolio. Metano. Ibrido

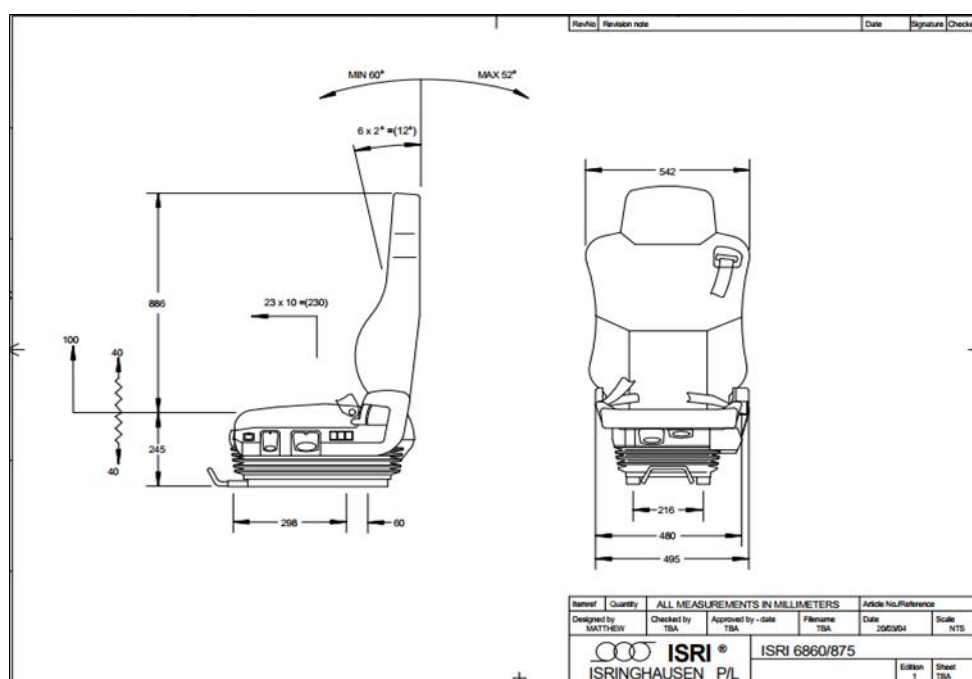


Fig. 115: sezione sedile ISRI

MODELLO SEDILE ISRINGHAUSEN :

- molleggio pneumatico

- regolazione automatica del peso
- regolazione altezza mm100
- guida scorrimento orizzontale mm 210
- schienale reclinabile
- regolazione durezza ammortizzatore
- regolazione inclinazione
- abbassamento rapido
- sostegno lombare bicamera
- tessuto traspirante
- interposto assorbente carboni attivi
- seduta estiva ergonomica

### 2.1.3.2 Campagna di misure

Nella campagna di misurazioni sono stati eseguiti rilievi, con le stesse modalità della precedenti campagne, sugli autisti di mezzi pubblici ATAC. Nello specifico l'obiettivo dell'indagine di campo è stato quello di misurare la dose di esposizione giornaliera tramite la A(8) andando a definire anche il parametro di stima Value Dose Vibration (VDV). Tramite una vera e propria simulazione, è stato inoltre possibile definire in che modo una pavimentazione buona condizionasse le vibrazioni trasmesse agli autisti di vetture nuove e di vetture di modello precedente. Le misure sono state eseguite su autobus di linea in assetto completo di esercizio, con salita di passeggeri e arresto alle fermate previste. La scelta delle linee e dei veicoli su cui effettuare le misure è stata fatta in ottemperanza a quanto richiesto dall'ASL RMC relativamente a quanto concordato nel piano di miglioramento elaborato alla luce dei risultati dell'indagine effettuata nel 2016 e in ottemperanza a quanto richiesto dai RLS, previa consultazione del Medico Competente. Nel primo caso quindi sono state ripetute le indagine su quelle linee/vetture che nella precedente indagine avevano superato il valore limite o erano risultate border line: di queste, 3 linee sono state esercite anche con le nuove vetture del parco aziendale Iveco Urbanway, per un opportuno confronto tra vetture vecchie e nuove, a parità di linea esercita e quindi di manto stradale percorso. Nel secondo caso invece si è tenuto conto dell'abbinamento linea/vettura indicato dalla figura RLS (Rappresentante Lavoratori Sicurezza) su suggerimento del personale operante nelle diverse rimesse che hanno tenuto conto della pavimentazione stradale, andando a coprire la casistica peggiore. In relazione ai criteri sopraelencati sono state individuate 12 linee per un totale di 15 misurazioni.



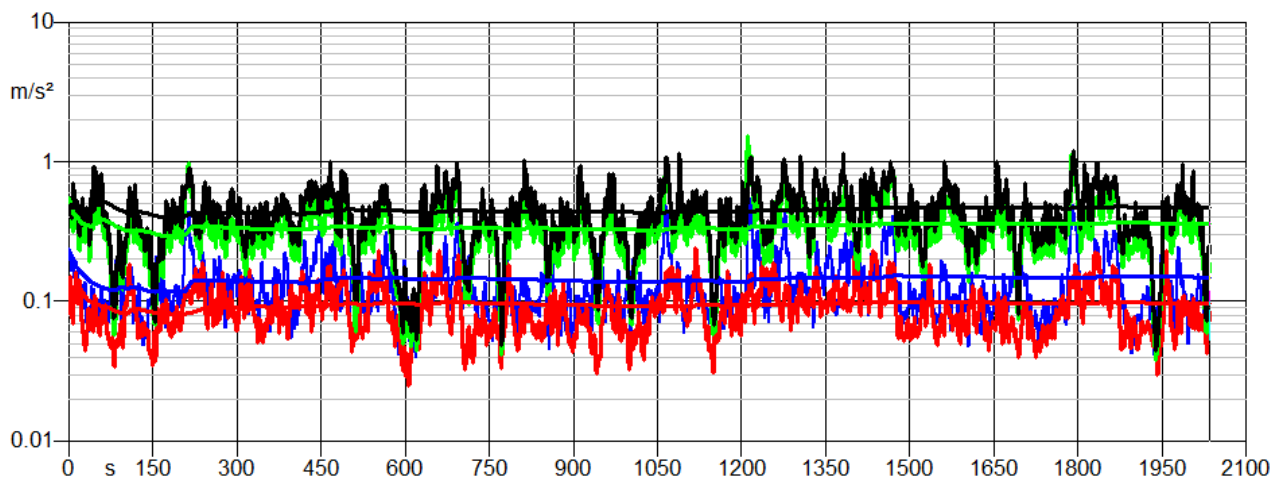


GRA). È stato scelto questo percorso perché la pavimentazione risulta essere nella sua interezza qualitativamente in “buono” stato come è possibile vedere dall’immagine sottostante.



*Fig. 117: visuale della pavimentazione del percorso della simulata*

Elaborando la misura con il software NVW è stato ricavata la Time History e il running Leq sia con vettura di modello Cursor, sia con vettura di modello Urbanway. In questo modo è stato possibile definire uno dei parametri che caratterizza le vibrazioni: l’accelerazione ponderata in frequenza sui tre assi.



*Fig. 118: Time - history e running Leq Cursor*

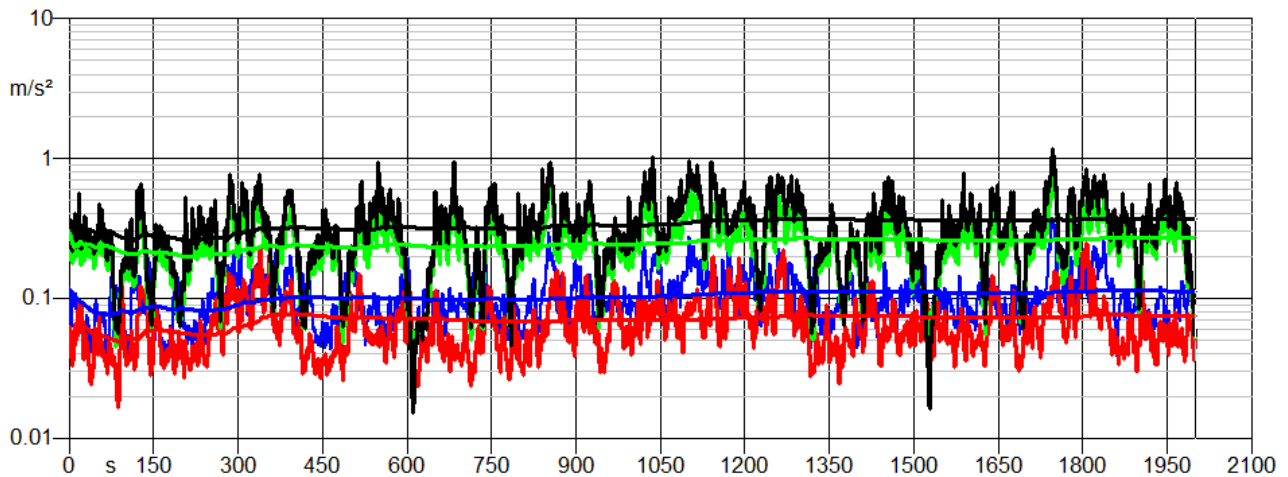


Fig. 119: Time - history e running Leq Urbanway

Nella seguente tabella sono state estratte le accelerazioni ponderate in frequenza sui tre assi che hanno permesso di determinare il parametro  $A(8)$  sia con il metodo dell'asse più sollecitato, sia con il metodo della somma vettoriale. L'obiettivo di questo calcolo è confrontare il parametro  $A(8)$  della prova simulata con quello determinato da sulle varie linee analizzate.

Tabella 47: sintesi dei risultati della prova effettuata per il modello CURSOR

Modello	Tempo di misura [s]	Leq PONDERATA		
		1.4 $A_{wx}$	1.4 $A_{wy}$	$A_{wz}$
Cursor	2034.5	0.2086	0.1358	0.361
Metodo A		Metodo B		
$A(8)$	$A(8)$ nelle 6 h	$A_{wSUM}$	$A(8)$	$A(8)$ nelle 6 h
0.433	0.39	0.438493558	0.117	0.39

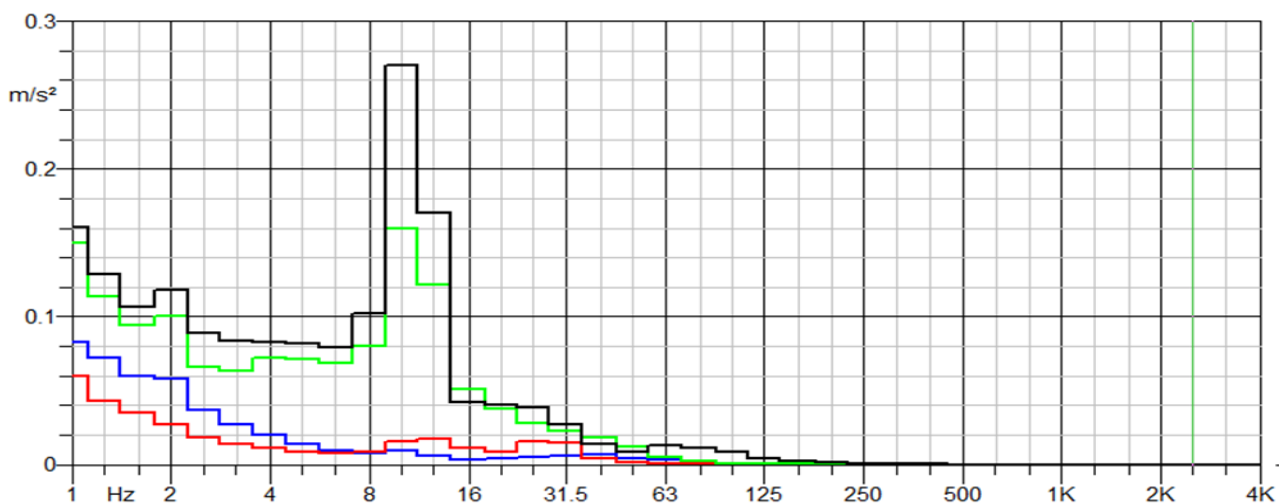


Fig. 120: spettro in frequenza relativo al Cursor

Tabella 48: sintesi dei risultati della prova effettuata per il modello URBANWAY

Modello	Tempo di misura [s]	Leq PONDERATA		
		$1.4 A_{wx}$	$1.4 A_{wy}$	$A_{wz}$
Urbanway	2000	0.1568	0.105	0.27
Metodo A		Metodo B		
$A(8)$	$A(8)$ nelle 6 h	$A_{wSUM}$	$A(8)$	$A(8)$ nelle 6 h
0.071	0.24	0.329410443	0.087	0.29

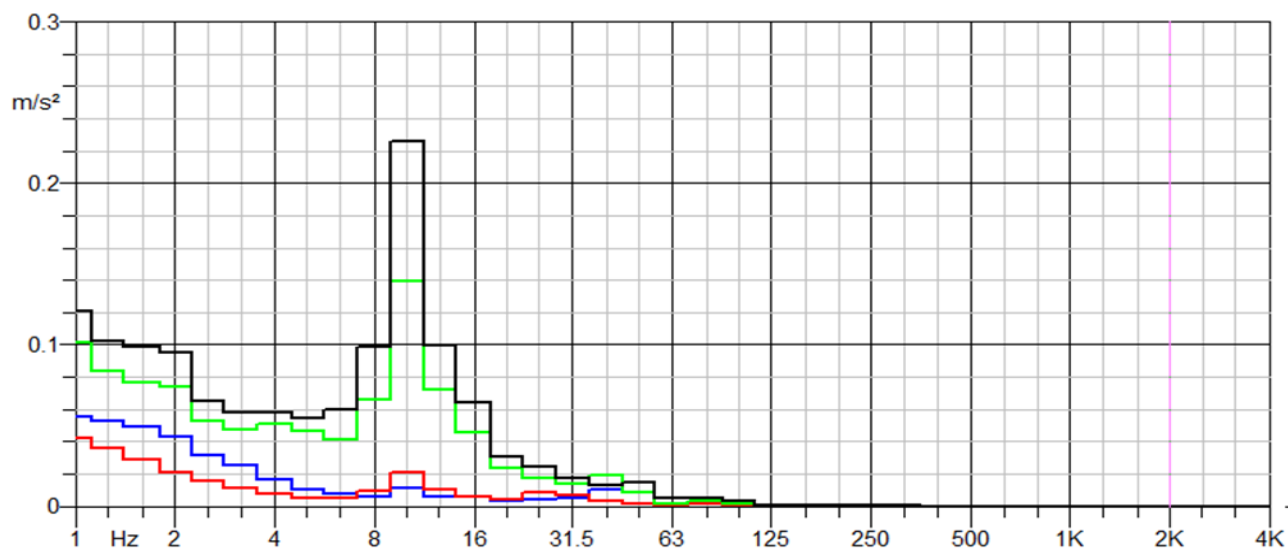


Fig. 121: spettro in frequenza relativo all'Urbanway

La campagna di misure è stata effettuata nel Comune di Roma su 12 linee per un totale di 15 misure. Le rimesse interessate sono state: Portonaccio- Tor Sapienza- Tor pagnotta- Grottarossa e Tor Vegata.

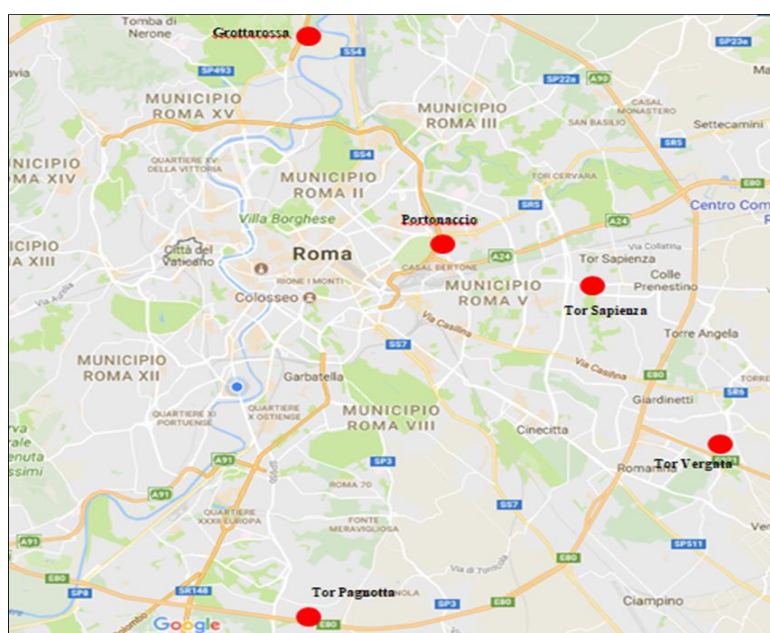


Fig. 122: localizzazione delle rimesse

La tabella sottostante sintetizza le caratteristiche dei mezzi (sorgenti di vibrazioni meccaniche), identificate nell'ambiente lavorativo preso in considerazione. Alle varie linee è stata associata la propria rimessa fornendo appropriatamente i dati delle vetture e dei sedili.

*Tabella 49: prospetto dei risultati ottenuti per tutte le prove effettuate*

<b>Marca</b>	<b>Modello</b>	<b>Numero vettura</b>	<b>Anno immatric.</b>	<b>Km</b>	<b>Linea</b>	<b>Marca sedile</b>	<b>Modello sedile</b>
Iveco	City C-Cursor con pedana	3919	2002	513.144	058	Fisa	Grammer
Iveco	Urbanway Cursor	3347	2016	43.031	058	ISRI	Isrighausen
Mercedes	O530 N3/Su Citaro Suburb.	8177	2004	789.097	504	ISRI	Isrighausen
Iveco	Urbanway Cursor	3331	2016	52.044	504	ISRI	Isrighausen
Mercedes	O530 N3/U Citaro Urbano	7527	2004	524.788	46	ISRI	Isrighausen
Iveco	Urbanway Cursor	3398	2017	25.911	46	ISRI	Isrighausen
Irisbus	491 Cityclass Cursor CNG	4320	2007	511.486	731	ISRI	--
Breda Menarinibus	Avantcity	8634	2016	20.600	90	Fisa	Grammer
Irisbus	491 Cityclass Cursor CNG	4320	2007	511.486	772	ISRI	--
Iveco	Citelis 3p 18m	422	2013	223.189	40	ISRI	Isrighausen
Iveco	Citelis 3p 12 m	3092	2013	292.364	80	ISRI	Isrighausen
Iveco	City C-Cursor senza pedana	5904	2002	399.208	336	Fisa	Grammer
Iveco	Urbanway Cursor	558	2017	37.956	69	ISRI	Isrighausen
Mercedes	O530 N3/U Citaro Urbano	7527	2004	524.788	360	ISRI	Isrighausen
Mercedes	O530 N3/Su Citaro Suburb.	8132	2004	626.122	558	ISRI	Isrighausen



*Fig. 123: Urbanway utilizzato nella simulazione*

#### 2.1.3.4 Procedura di misurazione

Una volta identificate le linee oggetto del lavoro, è stato possibile recarsi in sito ed iniziare la campagna sperimentale. Per ogni linea è stata effettuata una misura sia nella direzione dell'andata che in quella del ritorno, in alcuni casi su differenti modelli di vettura. Le misure sul campo sono state effettuate in condizioni operative standard per le varie linee individuate, ossia con presenza a bordo di passeggeri ed arresto alle fermate previste da programma. La presenza dei passeggeri ha garantito la rispondenza delle prove ai requisiti di massima assimilabilità all'attività ordinaria. Per calcolare l'accelerazione in ingresso ed uscita dal soggetto e valutare la dose d'esposizione, come nei lavori precedenti, è stato posizionato l'accelerometro sul sedile mediante un nastro isolante in modo da aderire in maniera efficiente e permettere quindi una corretta esecuzione della misura. Si è avuto cura di posizionare l'origine degli assi sotto il coccige dell'autista, con l'accelerometro collegato al sound-book; qui i dati sono stati acquisiti ed elaborati tramite il software Samurai. Una criticità che ha condizionato la scelta del numero e tipo di linee da effettuare giornalmente, è stata l'autonomia dello strumento, all'incirca attorno alle 4 ore. In aggiunta a quanto esposto, in alcune misurazioni si è riuscito a posizionare un accelerometro mono-assiale sulla pedana in prossimità del punto di ancoraggio del sedile. In questo modo è stato possibile rilevare contemporaneamente sia il segnale delle vibrazioni indotte sul guidatore lungo le tre direzioni di riferimento  $x$ ,  $y$  e  $z$  sia le vibrazioni trasmesse sulla pedana del bus. Le linee sulla quale è stato effettuato questo rilievo sono state 5, ognuna relativa ad una tipologia di modello di vettura differente per permettere di rilevare, a parità di percorso o di modello, quale fosse la risposta e il quantitativo d'energia vibratoria assorbita da un

individuo. Nonostante siano entrati in vigore un decreto legislativo ed una normativa che definiscono limiti e modalità di misurazione, come già accennato precedentemente, non è ancora del tutto esplicito il fenomeno fisico della trasmissione delle vibrazioni al corpo umano. La UNI 2631 normativa italiana di riferimento per l'esposizione dell'uomo alle vibrazioni non considera infatti la trasmissione della WBV all'interno del corpo. Questo limite porta a considerare come rilevante soltanto il quantitativo di vibrazioni in ingresso al corpo stesso mentre la conoscenza di come il segnale vibratorio si trasmetta attraverso il corpo può dare un importante contributo alla comprensione della risposta del corpo umano sollecitato a Whole Body Vibration.



*Fig. 124: accelerometro sul sedile e strumentazione utilizzata*

### 2.1.3.5 Elaborazione dati

A seguito della sperimentazione e della restituzione dei dati tramite Samurai, è stato possibile effettuare un'estesa elaborazione tramite il software Noise and Vibration Work al fine di quantificare i parametri che hanno consentito di analizzare la dose di esposizione giornaliera. Nello specifico le variabili necessarie a determinare l'esposizione sono state estrapolate dai grafici forniti dal programma NWV. La procedura per determinare l'esposizione è uguale a quella svolta nelle altre campagne ed è stata replicata per tutte le linee. Di seguito viene richiamata rapidamente:

- Individuazione Time- History e Running Leq che forniscono l'accelerazione quadratica media (r.m.s.) ponderata in frequenza sui tre assi  $x$ ,  $y$  e  $z$ .



- Determinazione del parametro A(8) in base sia all'asse più sollecitato che alla somma vettoriale delle accelerazioni ponderate in frequenza sui tre assi.
- Determinazione in alcune misurazione del VDV.
- Determinazione dell'A(8) in relazione alle caratteristiche antropometriche dell'autista.

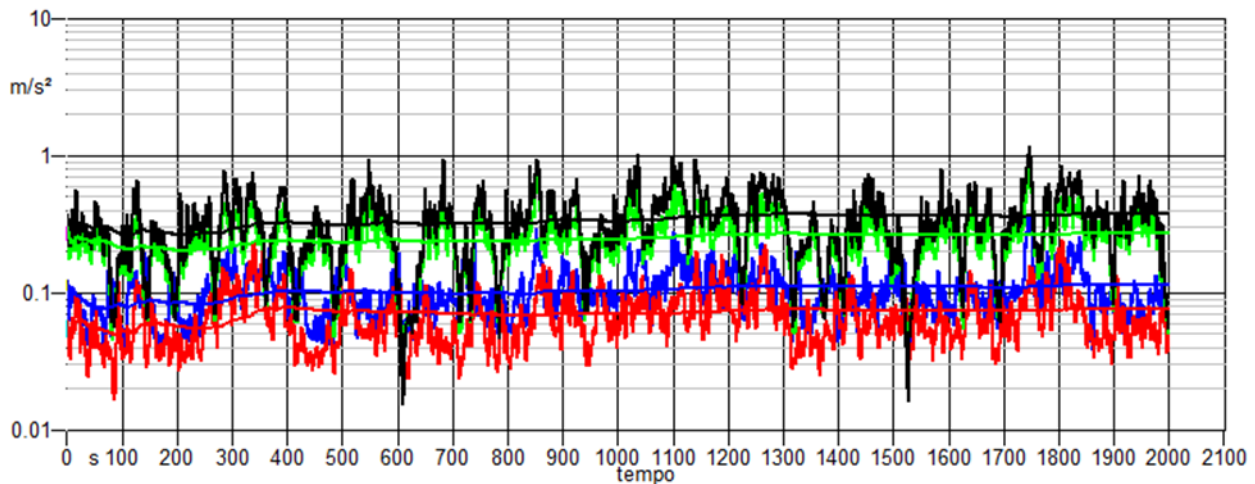


Fig. 125: esempio di time - history e running Leq

### 2.1.3.6 Metodo di calcolo applicati

Per comodità si riporta nuovamente il metodo del VDV descritto nel primo capitolo, che risulta essere più sensibile ai picchi rispetto al metodo di base ed è definito come:

$$VDV = \left\{ \int_0^T [a_w(t)]^4 dt \right\}^{1/4}$$

dove:

- $a_w(t)$  è l'accelerazione istantanea ponderata in frequenza
- $T$  è la durata della misurazione.

Nel caso in cui ci sia un'esposizione alle vibrazioni su più periodi di tempo, la ISO 2631-1 definisce la seguente formula per il calcolo del VDV totale:

$$VDV_{totale} = \left( \sum_i VDV_i^4 \right)^{1/4}$$

Si definisce infine un rapporto per il raffronto con il metodo base che serve ad indicare il grado di impulsività del segnale di vibrazione misurato:

$$R = \frac{VDV}{a_w T^{1/4}} > 1.75$$

Nel caso in cui la disuguaglianza risulti verificata, si trova conferma che il fenomeno impulsivo necessita di specifica considerazione, in quanto gli impulsi, oltre a presentare livelli relativamente elevati presentano anche una significativa ripetitività. Nel caso di  $R=1$  ci si trova in una situazione di totale assenza di fenomeno impulsivo. Per  $R=1.4$  il VDV è uguale alla sua stima eVDV proposta dalla ISO 2631-1 dove  $eVDV=1.4a_w T^{1/4}$ . Per quanto concerne i limiti del VDV, si fa riferimento a quelli indicati nella Direttiva Europea 2002/44/CE (valore d'azione =  $9.1 \text{ m/s}^{1.75}$  e valore limite =  $21 \text{ m/s}^{1.75}$ ) in quanto nella ISO 2631-1 vengono indicati solamente quelli per il eVDV che, come già detto in precedenza, è puramente un valore stimato e non reale. I valori espressi nella Direttiva Europea sono comunque concettualmente analoghi a quelli della ISO e quindi di fatto validi al fine della valutazione. Si fa notare infine che non esiste in Italia una normativa specifica del settore che faccia riferimento alle azioni da intraprendere nel caso di superamento dei limiti del VDV, per tale ragione i valori riscontrati nella seguente indagine sono puramente a carattere scientifico e statistico. Per quanto riguarda la valutazione delle vibrazioni trasmesse al corpo intero, questa si basa sul calcolo del valore  $A(8)$  espresso come l'accelerazione continua equivalente su 8 ore, e calcolato come il più alto dei valori quadratici medi delle accelerazioni ponderate in frequenza, determinati sui tre assi ortogonali ( $1.4a_{wx}$ ,  $1.4a_{wy}$ ,  $1a_{wz}$ , per un lavoratore seduto o in piedi) o nel caso non ci sia un asse dominante, attraverso la il valore totale delle vibrazioni conformemente alla norma ISO 2631-1 (1997) e aggiornamento Amd.1 (2010), cioè assumendo come accelerazione ponderata in frequenza, la somma vettoriale lungo i tre assi: METODO B. Inoltre la valutazione può essere fatta sulla base di una stima fondata sulle informazioni relative al livello di emissione delle attrezzature, fornite dai fabbricanti o anche prendendo in considerazione la banca dati dell'ISPESL, moltiplicate per i relativi coefficienti di correzione.



### 2.1.3.7 Organizzazione della campagna: le giornate di misura

La campagna di misure si è svolta in un tempo di circa un mese dal 30 Maggio al 27 Giugno 2017 non considerando la simulazione che invece è stata effettuata a fine luglio. Le modalità di scelta dei giorni e delle linee è stata effettuata dall' ASPP del Servizio di Prevenzione e Protezione di ATAC che in ottemperanza alle rimesse hanno ottimizzato lo svolgersi delle indagini e la scelta dei giorni avendo cura di tener conto dell'autonomia dello strumento che in vetture nuove poteva essere alimentato tramite una batteria collegata alla presa accendisigari mentre nelle vetture meno recenti, come Cursor e Citaro, questo non poteva avvenire data la mancanza delle medesime dovuto a furti. Nella tabella che segue sono indicati i giorni dei rilievi e le informazioni relativi alle singole linee (numero vettura e modello).



Fig. 126: batteria di supporto

Tabella 50 : prospetto delle linee, vetture e modelli impiegati nei test

<b>Data</b>	<b>n° linea</b>	<b>n° vettura</b>	<b>Modello</b>
30/05/2017	360	7527	Mercedes urbano Citaro
30/05/2017	360	7527	Mercedes urbano Citaro
06/06/2017	46	7527	Mercedes urbano Citaro
06/06/2017	46	7527	Mercedes urbano Citaro
06/06/2017	46	3398	Urbanway
06/06/2017	46	3398	Urbanway
07/06/2017	772	4320	City Class Cursor
07/06/2017	772	4320	City Class Cursor
07/06/2017	731	4320	City Class Cursor
07/06/2017	731	4320	City Class Cursor
08/06/2017	69	558	Urbanway 18 metri
08/06/2017	80	3092	Citelis 12 metri
08/06/2017	80	3092	Citelis 12 metri
09/06/2017	336	5904	City Class Cursor
09/06/2017	336	5904	City Class Cursor

09/06/2017	90	8634	Filobus Breda Menarinibus
09/06/2017	90	8634	Filobus Breda Menarinibus
13/06/2017	40	422	Citelis 18 metri
13/06/2017	40	422	Citelis 18 metri
20/06/2017	558	8132	Mercedes urbano Citaro
20/06/2017	558	8132	Mercedes urbano Citaro
20/06/2017	504	8177	Mercedes urbano Citaro
20/06/2017	504	3331	Urbanway
27/06/2017	058	3919	City Class Cursor
27/06/2017	058	3919	City Class Cursor
27/06/2017	058	3347	Urbanway
27/06/2017	058	3347	Urbanway

1° GIORNATA : 30/05/2017 Linea 360 Zama – Muse



Fig. 127: percorso linea 360

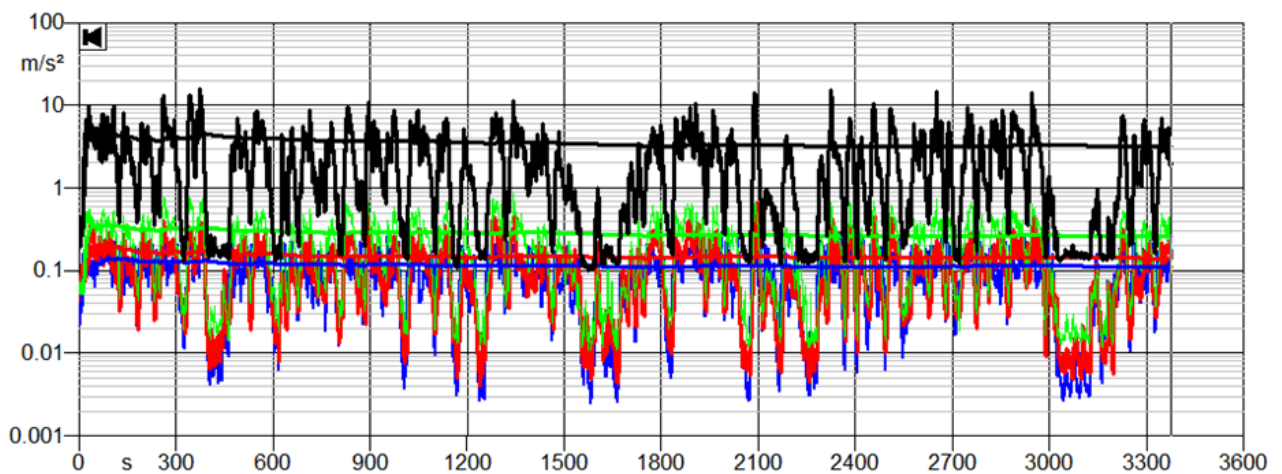


Fig. 128: time - history e Running Leq andata della linea 360

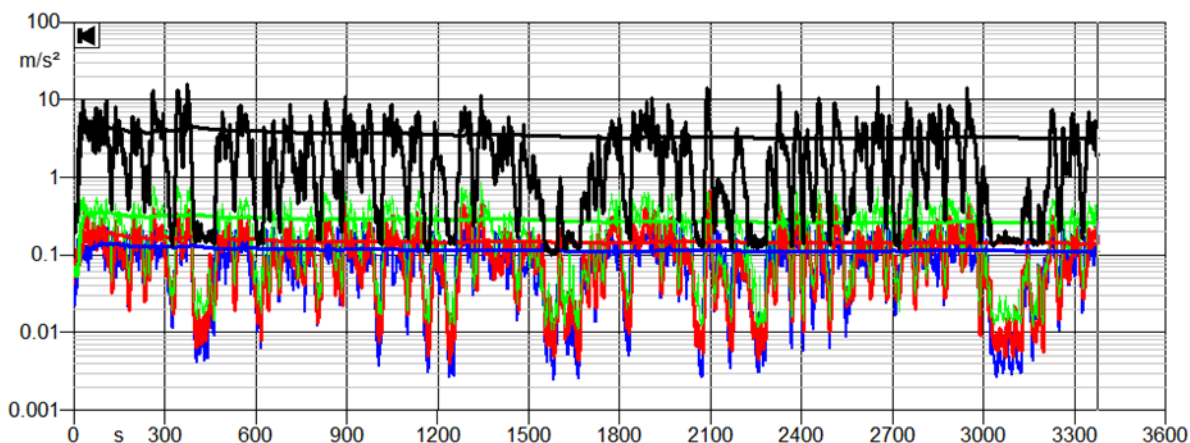


Fig. 129: time - history e Running Leq ritorno della linea 360

Dai running Leq è possibile determinare, come già visto in precedenza, le accelerazioni ponderate in frequenza sui tre assi, utili ai fini della valutazione della dose d'esposizione giornaliera del soggetto.

Tabella 51 : risultati in termini di A(8) e VDV ricavati per ciascuna linea

<b>DATI LINEA</b>				<b>Leq PONDERATA</b>		
<i>n vettura</i>	<i>modello</i>	<i>tratta</i>	<i>tempo di misura [s]</i>	$A_{wx}$	$A_{wy}$	$A_{wz}$
7527	Mercedes urbano Citaro	Zama - Muse	2972	0.1680	0.21	0.3
7527	Mercedes urbano Citaro	Muse -Zama	3376	0.16	0.20	0.25
<b>A(8)</b>						
<b>METODO A: ASSE PIU' SOLLECITATO</b>			<b>METODO B: SOMMA VETTORIALE</b>			
$A(8)$	$A(8)TOT$	$A(8)nelle 6h$	$A_{wSUM}$	$A(8)$	$A(8)TOT$	$A(8)nelle 6h$
0.10	0.13	0.24	0.40	0.13	0.18	0.33
0.09			0.36	0.12		
<b>VDV</b>						
<i>Max peak</i>	<i>FC A</i>	<i>FC B</i>	<i>VDV A</i>	<i>VDV TOT A</i>	<i>VDV B</i>	<i>VDV TOT B</i>
8.2	27	20	3.10	4.73	4.16	6.49
3.2	13	9	2.67		3.79	

Tabella 52 : implementazione dei metodi di calcolo tramite fattore correttivo  $K_i$

<b>METODO C</b>			
<i>BMI</i>	<i>Sc</i>	$K_i$	$A(8) BMI$
$peso/h^2$	$h^2/peso$	$BMI * Sc$	$(A_{w sum} / K_i) * radq(Te/8)$
0.00219	289	0.632342112	0.21
<b>METODO C'</b>			
<i>BMI</i>	<i>Sc</i>	$K_i$	$A(8) BMI$

$\text{peso}/h^2$	$h^2/\text{peso}$	$BMI * Sc$	$A_{w\text{sum}} * \text{radq}(Te/8) * K_i$
0.00219	289	0.632342112	0.38

Nel grafico sottostante viene riportato il confronto tra le tre differenti metodologie di calcolo.

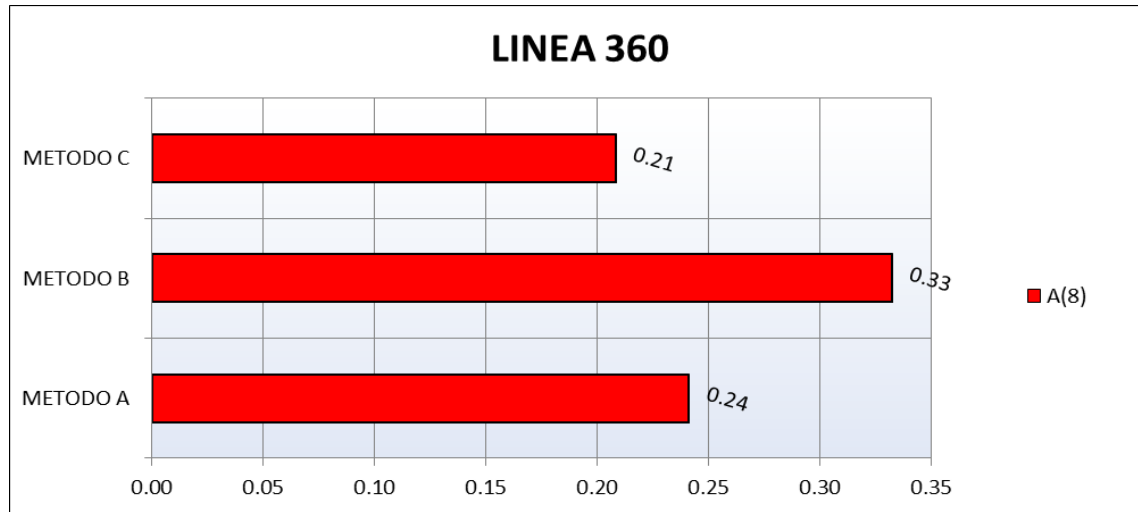


Fig. 130: confronto tra i 3 metodi linea 360

Tutte le altre misurazioni, sia tabelle valori che grafici, effettuate sulle restanti linee sono state riportate in appendice E. Per una maggiore chiarezza d'esposizione la tabella seguente sintetizza tutti i risultati ottenuti in tutte le prove

Tabella 53: caratteristiche tecniche e risultati per ciascuna vettura

<b>Dati vettura</b>				<b>Capolinea -capolinea</b>					<b>Dati sedile</b>		
Marca	Modello	Numero vettura	Linea	A(8) Metodo A	A(8) Metodo B	A(8) Metodo C	VDV Metodo A	VDV Metodo B	Sedile	Modello	Rimessa
Iveco	City C-Cursor con pedana	3919	58	0.49	0.6	0.55	11.61	16.03	Fisa	Grammer	TV
Iveco	Urbanway Cursor	3347	58	0.40	0.49	0.44	7.69	9.45	ISRI	Isrighausen	TV
Mercedes	O530 N3/Su Citaro Suburb.	8177	504	0.35	0.53	0.44	6.86	10.34	ISRI	Isrighausen	TV
Iveco	Urbanway Cursor	3331	504	0.35	0.42	0.31	6.82	8.19	ISRI	Isrighausen	TV
Mercedes	O530 N3/U Citaro Urbano	7527	46	0.32	0.40	0.31	6.17	6.17	ISRI	Isrighausen	PRT
Iveco	Urbanway Cursor	3398	46	0.27	0.38	0.27	5.27	5.27	ISRI	Isrighausen	PRT

Irisbus	491 Cityclass Cursor CNG	4320	731	0.44	0.54	0.41	8.53	10.48	ISRI	--	TP
Breda Menarini bus	Avantcity	8634	90	0.25	0.35	0.33	4.77	6.91	Fisa	Grammer	TP
Irisbus	491 Cityclass Cursor CNG	4320	772	0.35	0.42	0.32	6.80	7.99	ISRI	--	TP
Iveco	Citelis 3p	422	40	0.35	0.43	0.33	10.38	13.82	ISRI	Isrighausen	TS
	18m										
Iveco	Citelis 3p 12 m	3092	80	0.28	0.36	0.33	5.37	6.93	ISRI	Isrighausen	GRT
Iveco	City C-Cursor senza pedana	5904	336	0.32	0.41	0.32	6.14	7.85	Fisa	Grammer	GRT
Iveco	Urbanway Cursor	558	69	0.23	0.29	0.26	4.46	5.65	ISRI	Isrighausen	GRT
Mercedes	O530 N3/U Citaro Urbano	7527	360	0.24	0.33	0.21	4.73	6.49	ISRI	Isrighausen	PRT
Mercedes	O530 N3/Su Citaro Suburb.	8132	558	0.31	0.33	0.32	6.13	6.50	ISRI	Isrighausen	TV

### 2.1.3.8 Funzioni di trasferimento

#### *Trasmisibilita'*

Quotidianamente il corpo umano è sottoposto a vibrazioni di differente tipologia. a bassa. media ed alta frequenza. che possono avere effetti sia positivi che negativi sull'organismo. L'esposizione alle vibrazioni. infatti. può avere serie ripercussioni sul corpo umano secondo il tipo d'oscillazione e la durata d'esposizione a cui l'organismo è sottoposto. Gli effetti negativi sono connessi alle onde d'energia trasferite dalla sorgente vibrante al corpo soggetto all'esposizione: queste infatti provocano diversi effetti su tessuti e organi e sui sistemi che attraversano prima di essere smorzate e dissipate. Il corpo umano. come qualsiasi altra macchina. può tollerare solo certi livelli d'energia di vibrazione oltre ai quali. come conseguenza. inizia a deteriorarsi e a fallire a causa dei danni di lungo termine. Il corpo umano non vibra come una massa unica con una frequenza naturale. ma gli organi e ogni singolo segmento del corpo umano hanno la propria frequenza di risonanza. Questo provoca

un'amplificazione o attenuazione delle vibrazioni di input da parte di ogni parte del corpo. secondo la propria frequenza di risonanza.

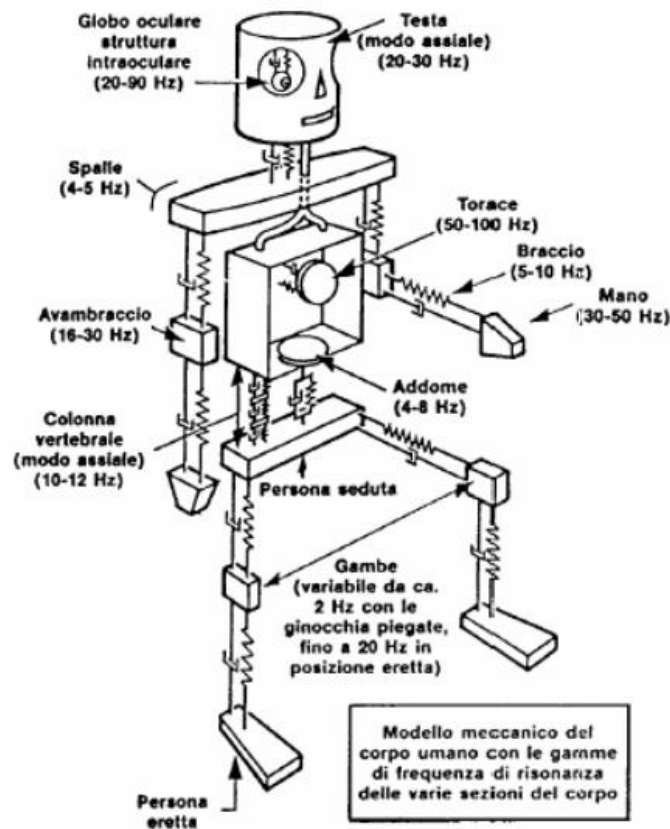


Fig. 131:modellizzazione del corpo umano

Come già descritto precedentemente, ogni massa ha la propria frequenza di risonanza e in relazione a tale frequenza varia l'ampiezza di vibrazione dell'oggetto, in particolare quando la massa vibra alla sua frequenza di risonanza la vibrazione è amplificata poiché l'ampiezza massima di vibrazione teoricamente tende ad essere infinita.

- Vibrazioni comprese tra i 2.5 - 5 Hz generano forti risonanze nelle vertebre del collo e nella zona lombare con amplificazione fino al 240%;
- vibrazioni tra i 4 - 6 Hz generano risonanza nel tronco con amplificazione fino al 200%;
- vibrazioni tra i 20 - 30 Hz generano la risonanza maggiore tra la testa e le spalle con amplificazione fino al 350%.

Vibrazioni quindi, che hanno un range di frequenza compreso tra i 0.5 e gli 80 Hz hanno effetti significativi sul corpo umano ed in particolare le frequenze di risonanza più efficienti per vibrazioni verticali sono comprese tra i 4 - 8 Hz. È evidente come tale fenomeno implichi degli effetti negativi sul corpo umano come esplicitato nelle tabella sottostante

Tabella 54 : effetti delle vibrazioni sul corpo umano

Frequenza di risonanza	Zona interessata	Sintomatologia associata
1-4 Hz	Sistema respiratorio	Dispnea
1-10 Hz	Area oculare	Diminuizione dell'acuità visiva
4-6 Hz	Cervello	Sonnolenza e diminuizione di attenzione
4-8 Hz	Orecchio e cuore	Problemi d'equilibrio e scompensi cardiaci
20-30 Hz	Colonna vertebrale	Dolori cervicali e lombari
20-40 Hz	Area oculare	Diminuizione della capacità di focalizzazione

Parametro fondamentale per comprendere la risposta e il quantitativo di vibrazioni assorbite da un individuo è la trasmissibilità STH. Seat To Head, che rappresenta la funzione di trasferimento del corpo umano. Questo parametro non contemplato nella UNI 2631 chiarifica il fenomeno fisico e soprattutto la risposta del corpo umano a WBV. Nonostante siano entrati in vigore un decreto legislativo ed una normativa che definiscono limiti e modalità di misurazione non è ancora del tutto esplicito il fenomeno fisico della trasmissione delle vibrazioni. La UNI 2631 normativa italiana di riferimento per l'esposizione dell'uomo alle vibrazioni non considera infatti la trasmissione della WBV all'interno del corpo. Questo limite porta a considerare come rilevante soltanto il quantitativo di vibrazioni in ingresso al corpo stesso. Al contrario una conoscenza con cui la vibrazione si trasmette attraverso il corpo può dare un importante contributo alla comprensione della risposta del corpo umano sollecitato a Whole Body Vibration. E' stato quindi necessario elaborare i dati relativi al terzo e quarto canale, che identificano rispettivamente le vibrazioni sull'asse  $z$  del sedile e dell'asse  $z$  della pedana, in maniera tale da poter determinare per ogni modello di vettura una funzione di trasferimento e studiarne l'andamento.

Le linee sulla quale sono state effettuate le misure anche delle vibrazioni in pedana sono state:

- Linea 504 Citaro e Urbanway
- Linea 558 Citaro
- Linea 058 Cursor e Urbanway
- Linea 40 Citelis
- Linea 508 Cursor
- *LINEA 504 CITARO E URBANWAY*

La linea 504 è una circolare. La misura è stata effettuata sia con vettura di modello precedente come il Citaro, sia con vettura nuova come l'Urbanway. Quindi il percorso effettuato dai due modelli di vetture in questo caso è lo stesso. Sarà quindi possibile vedere in che modo varia l'andamento delle funzioni di trasferimento di due vetture diverse che effettuano lo stesso percorso.

Tabella 55 : livelli d'attenuazione in funzione della frequenza per il modello CITARO e URBANWAY

<i>citaro</i>	<i>linea 504</i>
<i>f [Hz]</i>	<i>La [dB]</i>
1	-1.69
1.25	-1.81
1.6	-1.85
2	-1.91
2.5	-2.03
3.15	-2.23
4	-2.81
5	-4.59
6.3	-5.93
8	-7.81
10	-8.44
12.5	-6.88
16	-3.45
20	-6.58
25	-5.16
31.5	-3.24
40	-1.41
50	-6.88
63	-18.42
80	-23.38
100	-23.84
125	-23.00
<b>MEDIA</b>	<b>-7.43</b>

<i>Urbanway</i>	<i>linea 504</i>
<i>f [Hz]</i>	<i>La [dB]</i>
1	-2.65
1.25	-2.34
1.6	-1.56
2	-1.28
2.5	-1.57
3.15	-2.51
4	-4.55
5	-7.14
6.3	-7.98
8	-9.64
10	-9.34
12.5	-8.57
16	-7.91
20	-8.44
25	-5.06
31.5	-8.16
40	-7.07
50	-7.22
63	-12.40
80	-10.81
100	-20.43
125	-23.33
<b>MEDIA</b>	<b>-7.72</b>



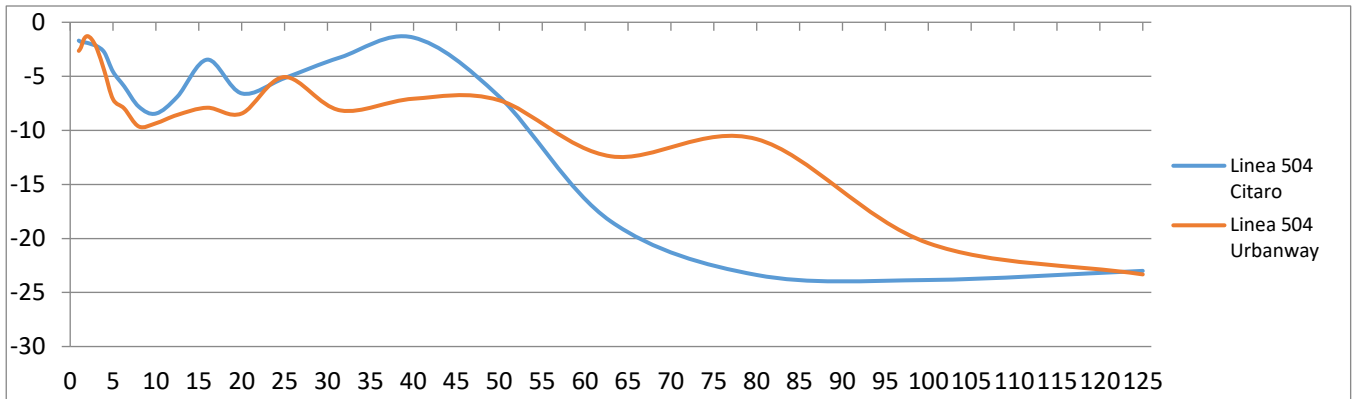


Fig. 132: funzione di trasferimento per la linea 504 con modello Citaro e Urbanway

Dal grafico sopra si evince che dalla frequenza di 2 Hz l'andamento delle funzioni è decrescente il che implica che fino alla frequenza di risonanza pari a 10 Hz come si può vedere dai grafici sottostanti degli spettri si ha un'attenuazione del segnale vibratorio molto evidente che è seguita da degli andamenti crescenti e decrescenti differenti nelle due tipologie di vetture: nell'Urbanway la funzione cresce con meno rapidità di quella del Citaro che raggiunge un valore massimo ai 16 Hz. L'Urbanway raggiunge invece un'amplificazione massima a frequenze di 25 Hz fino ad attenuarsi su un valore abbastanza stabile. In entrambe le curve nonostante gli andamenti diversi. Le funzioni si trovano entrambe nel quadrante delle ordinate negative il che implica che ad ogni caso si presentano attenuazioni più o meno evidenti da parte del sedile delle vibrazioni trasmesse

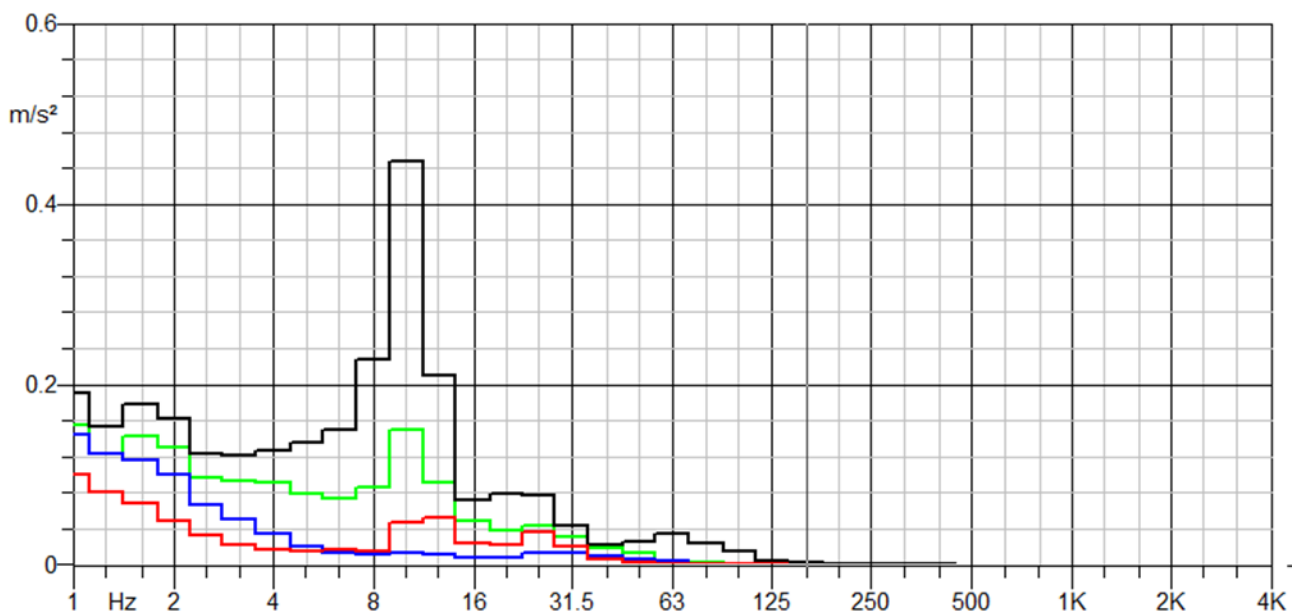


Fig. 133: spettro in frequenza Citaro

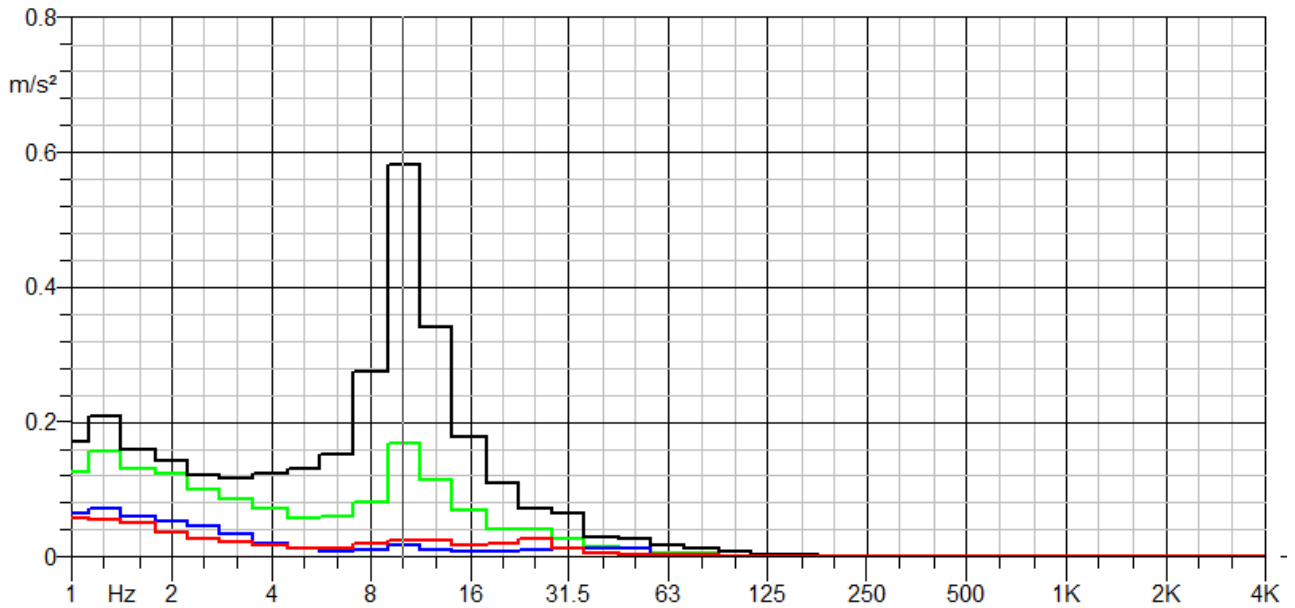


Fig. 134: spettro in frequenza Urbanway

- LINEA 558 CITARO

Le misurazioni che state effettuate su questa linea hanno interessato sia l'andata che il ritorno da i vari capolinea. Per questo motivo è stato possibile vedere come si comporta questo tipo di modello di vettura nel caso in cui transiti su percorsi diversi e su pavimentazioni con differenti gradi di ammaloramento

Tabella 56 : livelli d'attenuazione in funzione della frequenza per il modello CITARO e URBANWAY

<i>S</i>	<i>Linea 558</i>
<i>Hz</i>	<i>La [dB]</i>
1	-2.04466
1.25	-1.83536
1.6	-1.21139
2	-1.03631
2.5	-1.19363
3.15	-1.92797
4	-3.97101
5	-6.47143
6.3	-7.01566
8	-7.90552
10	-8.53309
12.5	-8.04102
16	-5.57744
20	-6.96414
25	-7.77959
31.5	-6.51467
40	-4.6423
50	-10.0647

<i>Citaro</i>	<i>Linea 558</i>
<i>Hz</i>	<i>La [dB]</i>
1	-1.55744
1.25	-1.32036
1.6	-0.83001
2	-0.49596
2.5	-0.46528
3.15	-1.47677
4	-2.3726
5	-3.973
6.3	-4.43646
8	-6.10443
10	-9.07572
12.5	-8.91867
16	-3.56806
20	-3.96852
25	-3.19744
31.5	-1.08675
40	-2.19571
50	-7.40321

63	-12.6404
80	-14.724
100	-15.809
125	-17.0234
<b>MEDIA</b>	<b>-6.95121</b>

63	-10.379
80	-12.862
100	-13.8058
125	-18.9378
<b>MEDIA</b>	<b>-5.38323</b>

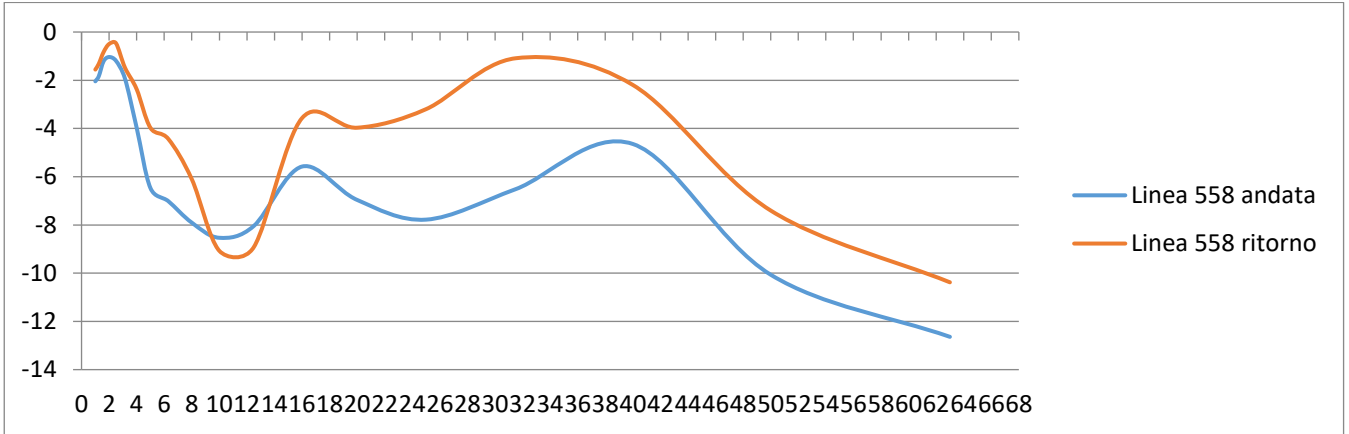


Fig. 135: funzione di trasferimento per la linea 558 con modello Citaro e Urbanway

E' possibile vedere dal grafico che per frequenze inferiori a 2 Hz si hanno delle amplificazioni che potrebbero essere dovute o dal rumore di fondo o dal calore dello strumento stesso. Infatti anche nella linea precedente seppur meno accentuata la funzione risultava essere inizialmente crescente. In realtà l'andamento dai 2 ai 10 Hz di frequenza come anche per la linea precedente è di tipo decrescente il che implica una attenuazione che risulta essere abbastanza simile sia per l'andata che il ritorno. Di seguito è possibile vedere qual è l'andamento dello spettro in frequenza

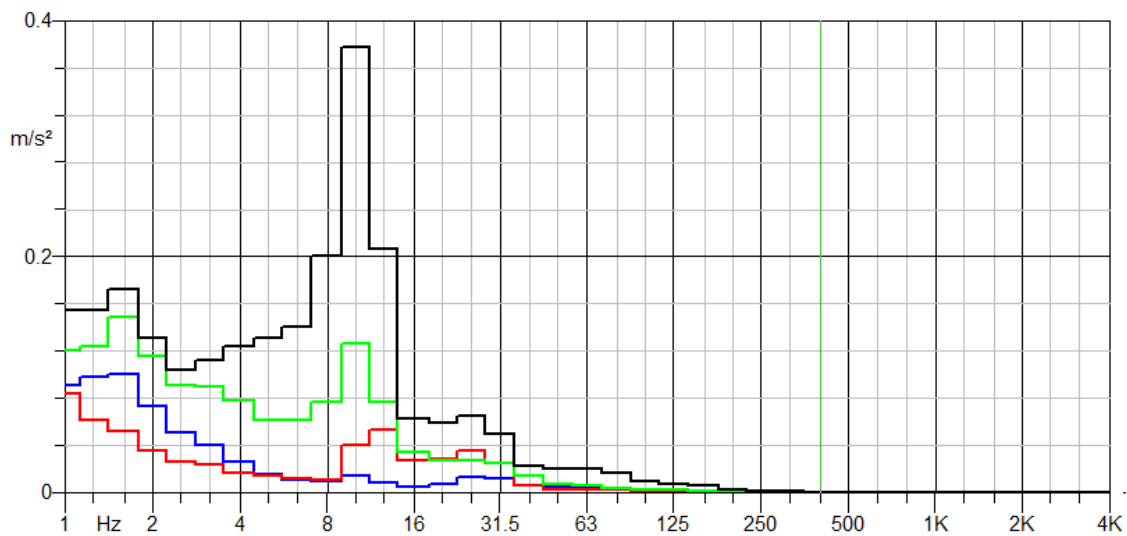


Fig. 136: spettro in frequenza linea 558 andata

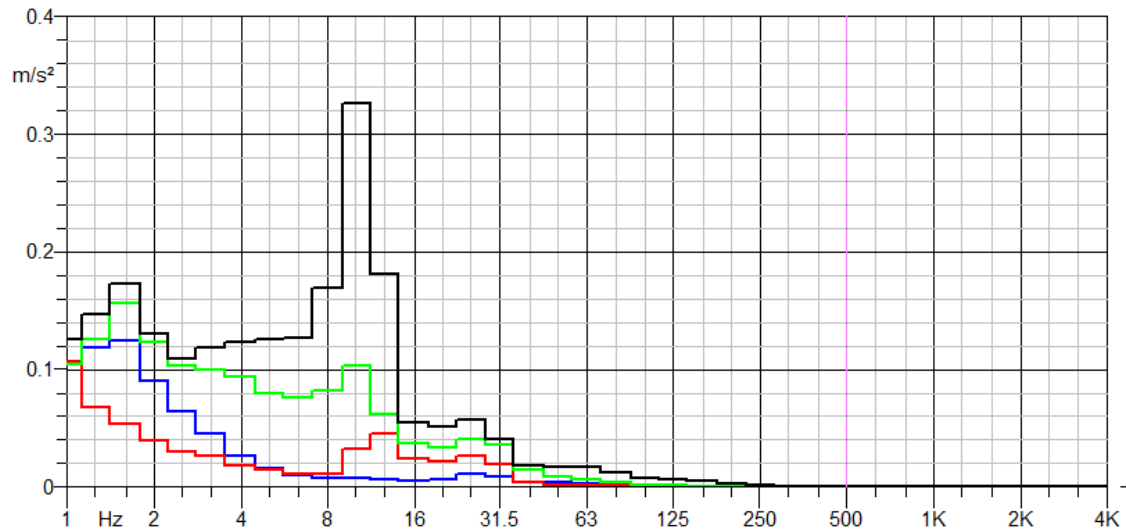


Fig. 137: spettro in frequenza linea 558 ritorno

Come è possibile vedere dagli spettri in frequenza. In entrambi i casi a 10 Hz si presentano frequenze di risonanza con valori più o meno simili che si attestano a  $0.35 \text{ m/s}^2$ . Sono queste le frequenze che causano maggiori danni e fastidi è per questo che bisogna fare in modo che il sedile sistema massa-molla smorzi il più possibile a queste frequenze

### CONFRONTO TRA LE VETTURE CITARO

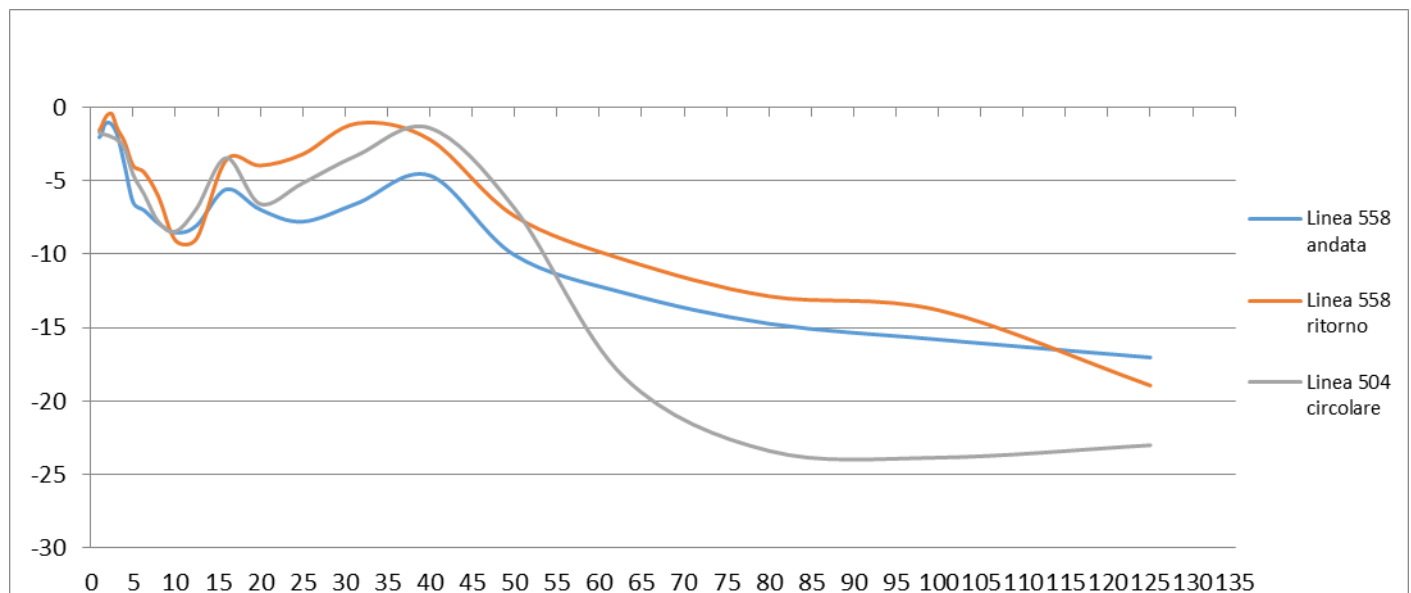


Fig. 138: confronto funzioni di trasferimento modello Citaro

Nel grafico sono state messe a confronto le funzioni di trasferimento delle 3 vetture Citaro. A parità di modello ma con differenti condizioni al contorno è difficile poterne trarre delle conclusioni reali. Sperimentalmente è possibile dire che a parità di vettura di sedile di variabilità di carico a bordo e di

variabilità di percorso e gradi di ammaloramento il sistema attenua le sollecitazioni con andamenti differenti. Presentando valori di attenuazione massimi nelle frequenze di risonanza

**LINEA 058 CURSOR E URBANWAY**

Tabella 57 : livelli d'attenuazione in funzione della frequenza per il modello CITARO e URBANWAY

<b>Cursor</b>	<b>058</b>
<b><i>f</i> [Hz]</b>	<b><i>La</i> [dB]</b>
1	-2.45
1.25	-2.31
1.6	-1.71
2	-1.65
2.5	-2.01
3.15	-2.86
4	-4.40
5	-4.44
6.3	-4.85
8	-5.60
10	-4.15
12.5	-1.93
16	-1.12
20	-3.68
25	-7.61
31.5	-7.19
40	-4.76
50	1.27
63	-5.24
80	-7.77
100	-17.60
125	-18.3939
<b>MEDIA</b>	<b>-5.02</b>

<b>Urbanway</b>	<b>058</b>
<b><i>f</i> [Hz]</b>	<b><i>La</i> [dB]</b>
1	-2.43
1.25	-1.83
1.6	-1.59
2	-1.33
2.5	-1.85
3.15	-2.58
4	-4.07
5	-4.23
6.3	-5.34
8	-6.11
10	-4.65
12.5	-2.87
16	-1.30
20	-3.49
25	-6.03
31.5	-5.40
40	-3.75
50	1.04
63	-3.50
80	-4.59
100	-12.21
125	-13.3753
<b>MEDIA</b>	<b>-4.16</b>

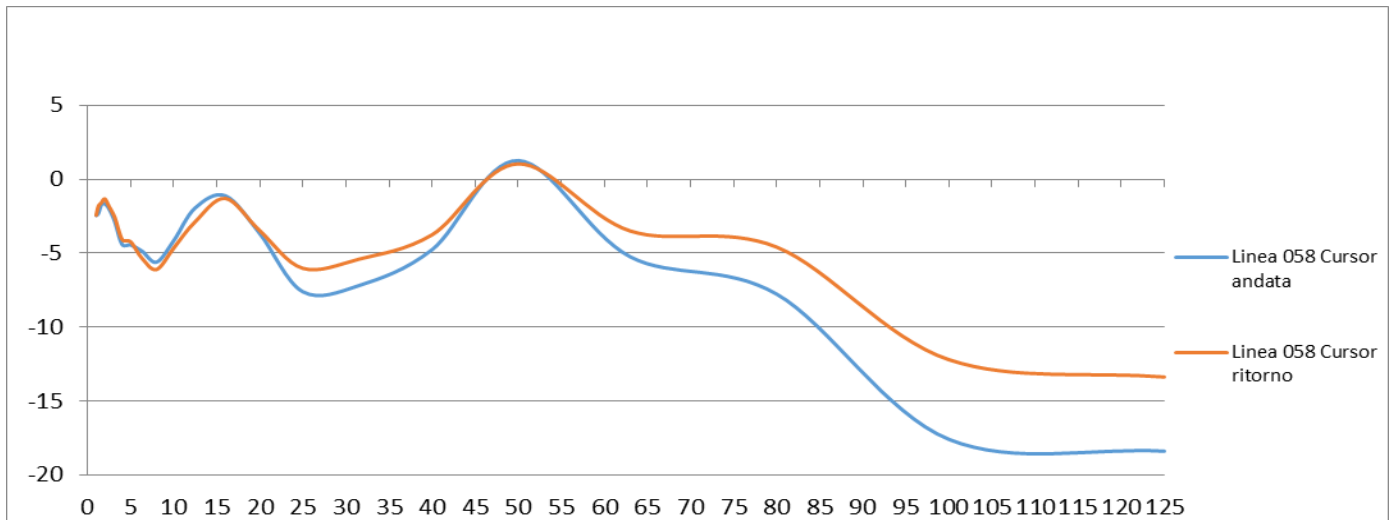


Fig. 139: funzioni di trasferimento linea 058 andata e ritorno Cursor

Tabella 58 : frequenze e livelli di attenuazione per la linea 058 Urbanway

<i>Urbanway</i>	<i>058</i>
<i>f [Hz]</i>	<i>La [dB]</i>
1	-6.5
1.25	-2.3
1.6	-2.1
2	-4.4
2.5	-1.8
3.15	-3.8
4	-3.6
5	-7.3
6.3	-9.0
8	-6.9
10	-4.6
12.5	-3.6
16	-2.7
20	-4.6
25	-5.9
31.5	-9.6
40	-4.8
50	-7.5
63	-14.5
80	-12.9
100	-31.0
125	-15.3
<b>MEDIA</b>	<b>-7.5</b>

<i>Urbanway</i>	<i>058</i>
<i>f [Hz]</i>	<i>La [dB]</i>
1	-7.73
1.25	-2.18
1.6	-2.04
2	-5.85
2.5	-1.74
3.15	-4.04
4	-3.46
5	-7.95
6.3	-10.49
8	-8.38
10	-5.89
12.5	-6.37
16	-5.33
20	-5.79
25	-5.58
31.5	-10.16
40	-6.76
50	-8.82
63	-15.64
80	-13.91
100	-35.41
125	-18.5414
<b>MEDIA</b>	<b>-8.73</b>

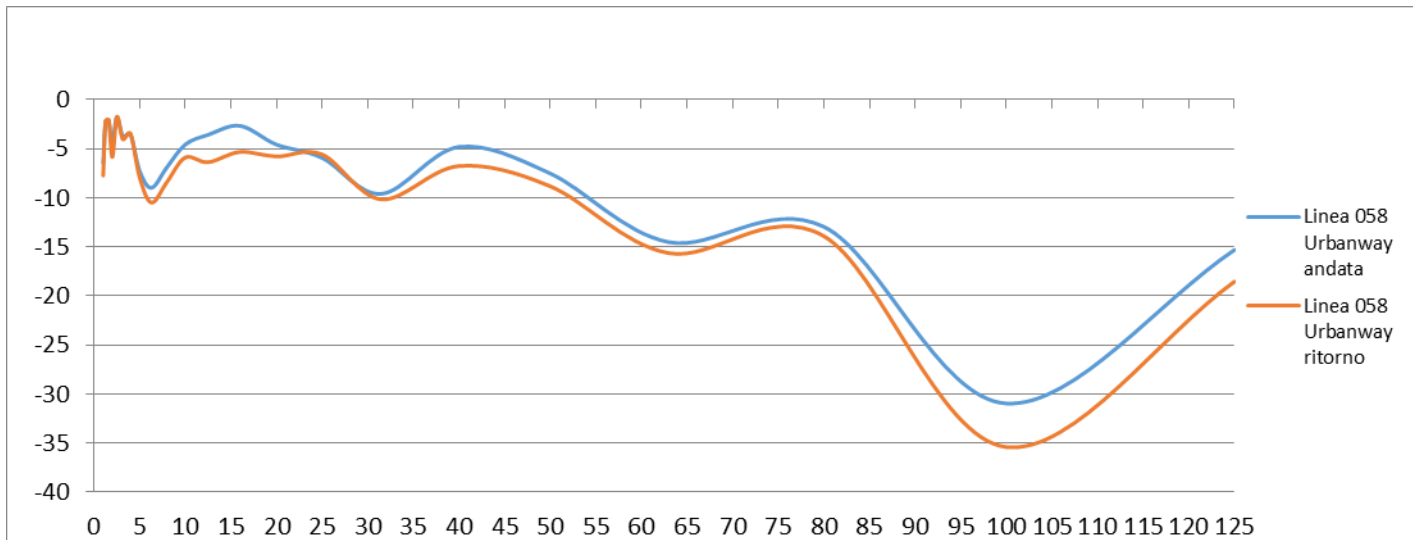


Fig. 140: funzioni di trasferimento linea 058 andata e ritorno Urbanway

## LINEA 508 CURSOR

Tabella 59 : frequenze e livelli d'attenuazione della linea 508 andata e ritorno Cursor

<i>Cursor</i>	<i>508</i>
<i>f [Hz]</i>	<i>La [dB]</i>
1	-2.753304
1.25	-1.915817
1.6	-1.191148
2	-0.41327
2.5	0.2278347
3.15	-0.192352
4	-2.356815
5	-4.769409
6.3	-5.558905
8	-8.010631
10	-5.967071
12.5	-3.885791
16	-2.523342
20	-5.602222
25	-7.889826
31.5	-9.719802
40	-2.598334
50	0.2110412
63	-3.009327
80	-15.69224
100	-21.46481
125	-23.87678
<b>MEDIA</b>	<b>-5.861469</b>

<i>Cursor</i>	<i>508</i>
<i>f [Hz]</i>	<i>La [dB]</i>
1	-2.425692
1.25	-1.73832
1.6	-1.020892
2	-0.214499
2.5	0.4289452
3.15	-0.58177
4	-3.995117
5	-5.123471
6.3	-6.092225
8	-8.307527
10	-6.132241
12.5	-3.871802
16	-2.80702
20	-5.899412
25	-8.226642
31.5	-8.094651
40	-0.507223
50	1.0746106
63	-2.157796
80	-17.34845
100	-22.20297
125	-21.81991
<b>MEDIA</b>	<b>-5.77564</b>

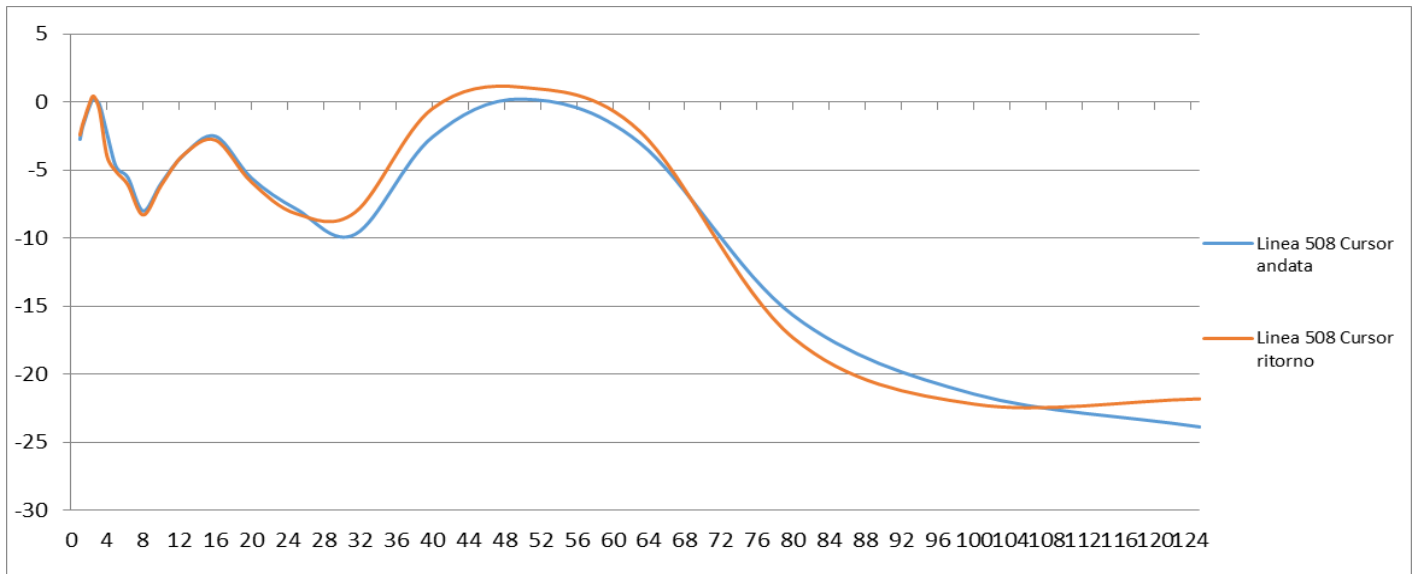


Fig. 141: funzioni di trasferimento linea da e verso termini

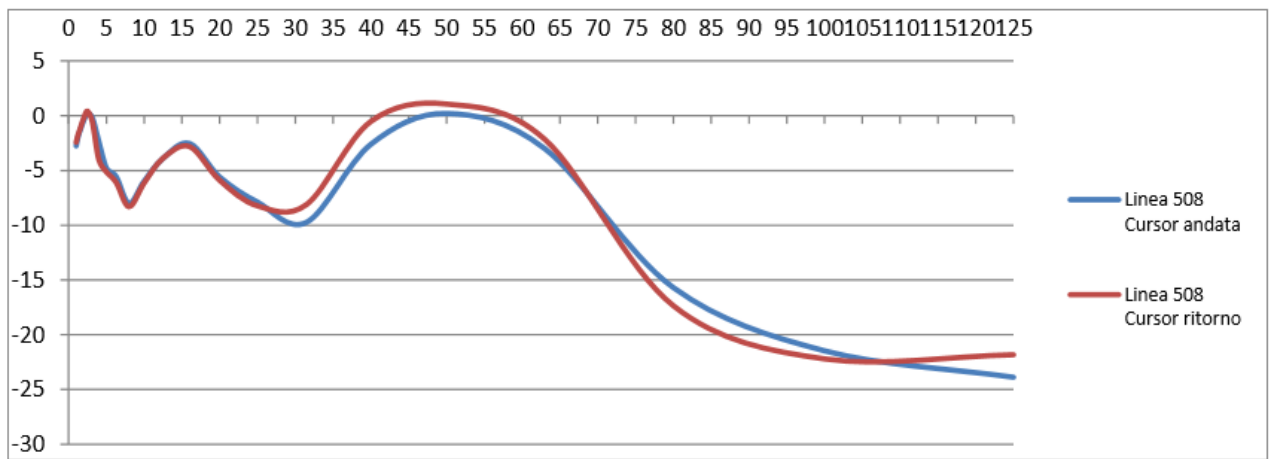


Fig. 142: funzioni di trasferimento linea508 andata e ritorno Cursor



## CONFRONTO TRA LE VETTURE CURSOR E URBANWAY

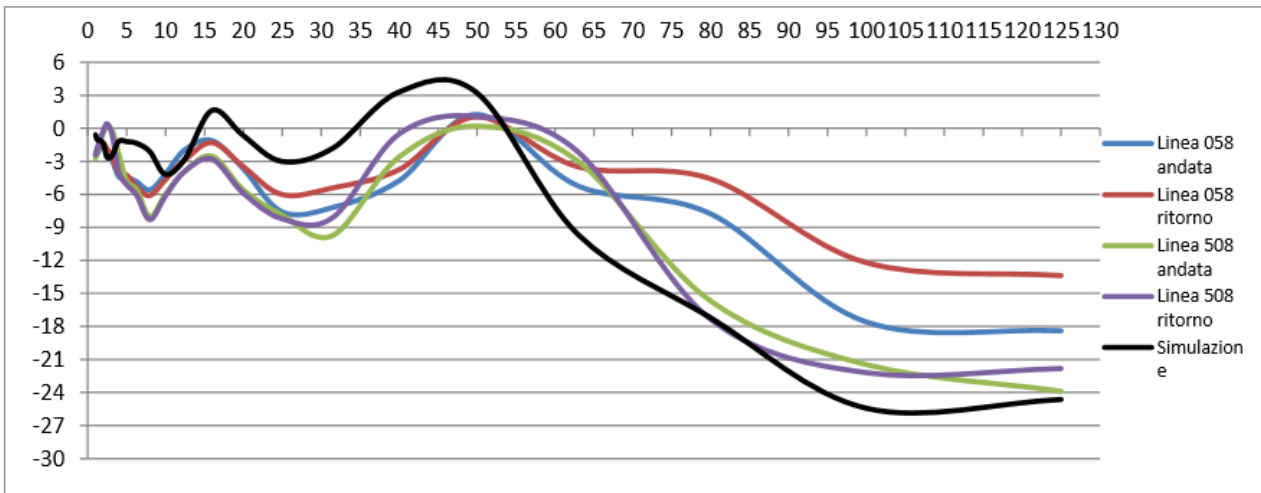


Fig. 143: confronto funzioni di trasferimento modello Cursor

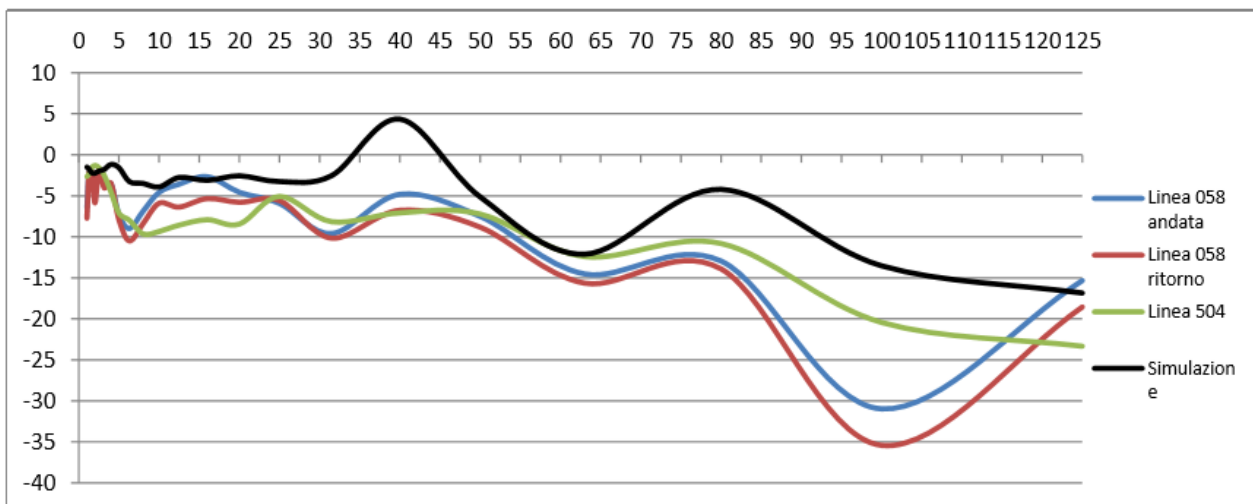


Fig. 144: confronto funzioni di trasferimento modello Urbanway

### 2.1.3.9 Risultati

Nella seguente tabella sono state messe a confronto le prime due metodologie di A(8) descritte nei paragrafi precedenti. E' possibile visualizzare in rosso i valori di dose di esposizione giornaliera che superano il valore di azione, mentre in verde i valori che si trovano borderline. Nonostante ci siano linee che superano il valore di azione in nessun caso viene superato il valore limite. E' stato inoltre messo in evidenza l'incremento del metodo B rispetto al metodo A delle varie linee riscontrando una variazione percentuale media del 21%.

Tabella 60 : confronto tra i metodi di valutazione d'esposizione A e B per ciascun operatore

	<i>n</i> <i>linea</i>	<i>età</i>	<i>peso</i>	<i>altezza</i>	<i>Asse più sollecitato</i>	<i>Somma vettoriale</i>	<i>Variazione % del metodo B rispetto il metodo A</i>	
					<i>Metodo A</i>	<i>Metodo B</i>		
1	360	56	100	170	0.24	0.33	27	
2	46	58	78	175	0.32	0.40	20	
3	46	36	92	171	0.27	0.38	29	
4	772	48	89	182	0.35	0.42	17	
5	731	48	89	182	0.44	0.54	19	
6	69	48	72	175	0.23	0.29	21	
7	80	38	85	172	0.28	0.36	22	
8	336	38	82	176	0.32	0.41	22	
9	90	56	68	168	0.25	0.35	29	
10	508	30	71	179	0.67	0.76	12	
11	40	39	87	175	0.35	0.43	19	
12	558	42	74	180	0.31	0.33	6	
13	504	/	80	175	0.35	0.53	34	
14	504	34	100	184	0.35	0.42	17	
15	58	44	70	173	0.49	0.60	18	
16	58	59	76	180	0.40	0.49	18	
<b>Variazione % media</b>								
								21

Per la definizione dell'A(8) è stato ulteriormente definito un nuovo metodo, che tiene in considerazione le caratteristiche antropometriche dell'individuo. Utilizzando il BMI, cioè il body mass index, è stato possibile determinare un fattore di correzione  $k_i$  che tiene in considerazione contemporaneamente il valore di altezza e peso dell'operatore. E' stata definita quindi, con i due metodi che includono il BMI, la dose di esposizione giornaliera valutandone l'incremento rispetto il valore dell'A(8) definito nella ISO 2631- 1 (1997).

Tabella 61 : confronto tra i metodi di valutazione d'esposizione A e C per ciascun operatore

	<i>n</i> <i>linea</i>	<i>età</i>	<i>peso</i>	<i>altezza</i>	$K_i = BMI * h^2 / peso$	<i>Asse più sollecitato</i>	<i>Metodo con BMI</i>	<i>Variazione % del metodo C rispetto il metodo A</i>	<i>Media delle variazioni</i>
					$K_i$	<i>Metodo A</i>	<i>Metodo C con somma vettoriale</i>		
1	360	56	100	170	0.6323	0.24	0.53	54	43
2	46	36	92	171	0.6954	0.32	0.58	44	
3	504	34	100	184	0.7407	0.35	0.57	38	

4	80	38	85	172	0.7615	0.28	0.47	41	37	
5	40	39	87	175	0.7702	0.35	0.56	37		
6	772	48	89	182	0.8143	0.35	0.52	32		
7	731	48	89	182	0.8143	0.44	0.66	34		
8	336	38	82	176	0.8265	0.32	0.50	35		
9	504	/	80	175	0.8376	0.35	0.63	45		
10	46	58	78	175	0.8590	0.27	0.44	39		
11	90	56	68	168	0.9081	0.25	0.39	35		22
12	69	48	72	175	0.9306	0.23	0.31	26		
13	58	59	76	180	0.9327	0.40	0.53	24		
14	58	44	70	173	0.9355	0.49	0.64	24		
15	558	42	74	180	0.9580	0.31	0.34	10		
16	508	30	71	179	0.9874	0.67	0.77	12.95112033		
								<b>Variazione % media</b>		
								33		

Il coefficiente  $k_i$  è stato disposto in ordine crescente e suddiviso in 3 range:

$$- k_i < 0.8$$

$$- 0.8 < k_i < 0.9$$

$$- k_i > 0.9$$

In questo modo è stato possibile definire in che modo varia il metodo C e il metodo C' rispetto al metodo A poiché per ogni range è stata calcolata la variazione % media

Tabella 62 : confronto tra i metodi di valutazione d'esposizione A e C' per ciascun operatore

	n linea	età	peso	altezza	$K_i = BMI * h^2/peso$	Asse più sollecitato	Metodo con BMI	Variazione % del metodo C' rispetto il metodo A	Media delle variazioni
					$K_i$	Metodo A	Metodo C' con asse più sollecitato		
1	360	56	100	170	0.6323	0.24	0.38	36.8	28.0
2	46	36	92	171	0.6954	0.32	0.46	30.5	
3	504	34	100	184	0.7407	0.35	0.47	25.9	
4	80	38	85	172	0.7615	0.28	0.37	23.8	
5	40	39	87	175	0.7702	0.35	0.45	23.0	
6	772	48	89	182	0.8143	0.35	0.43	18.6	17.0
7	731	48	89	182	0.8143	0.44	0.54	18.6	
8	336	38	82	176	0.8265	0.32	0.39	17.3	
9	504	/	80	175	0.8376	0.35	0.42	16.2	
10	46	58	78	175	0.8590	0.27	0.31	14.1	
11	90	56	68	168	0.9081	0.25	0.28	9.2	5.8

12	69	48	72	175	0.9306	0.23	0.25	6.9
13	58	59	76	180	0.9327	0.40	0.43	6.7
14	58	44	70	173	0.9355	0.49	0.52	6.4
15	558	42	74	180	0.9580	0.31	0.32	4.2
16	508	30	71	179	0.9874	0.67	0.68	1.3
								<b>Variazione % media</b>
								16

Per la definizione dell'A(8), come precedentemente descritto, è stato ulteriormente definito un nuovo metodo che tiene in considerazione le caratteristiche antropometriche dell'individuo. Utilizzando il BMI cioè il body mass index è stato possibile determinare un fattore di correzione  $K_i$  che tiene in considerazione contemporaneamente il valore di altezza e peso dell'operatore. E' stata definita, quindi, con i due metodi che includono il BMI la dose di esposizione giornaliera, valutandone l'incremento rispetto il valore dell'A(8) definito nella ISO 2631- 1 (1997).

Tabella 63 : confronto tra i metodi C e C' in funzione del parametro  $K_i$

	<i>n</i> <i>linea</i>	<i>età</i>	<i>peso</i>	<i>altezza</i>	<i>K<sub>i</sub> = BMI * h<sup>2</sup>/peso</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>1</i>	<i>2</i>
					<i>K<sub>i</sub></i>	<i>Variazione % del metodo C' rispetto il metodo A</i>	<i>Variazione % del metodo C rispetto il metodo A</i>	<i>Media delle variazioni</i>	<i>Media delle variazioni</i>
1	360	56	100	170	0.6323	54	36.8	43	28
2	46	36	92	171	0.6954	44	30.5		
3	504	34	100	184	0.7408	38	25.9		
4	80	38	85	172	0.7615	41	23.8		
5	40	39	87	175	0.7702	37	23.0		
6	772	48	89	182	0.8143	32	18.6	37	17
7	731	48	89	182	0.8143	34	18.6		
8	336	38	82	176	0.8265	35	17.3		
9	504	/	80	175	0.8376	45	16.2		
10	46	58	78	175	0.8591	39	14.1		
11	90	56	68	168	0.9082	35	9.2	22	6
12	69	48	72	175	0.9307	26	6.9		
13	58	59	76	180	0.9328	24	6.7		
14	58	44	70	173	0.9355	24	6.4		
15	558	42	74	180	0.9580	10	4.2		
16	508	30	71	179	0.9874	13	1.3		

In quest'ultima tabella si evince il confronto, a parità di range del  $K_i$ , delle variazioni dei due metodi C e C', E' stata rilevata una correlazione tra il fattore correttivo  $K_i$  e le variazioni %, Infatti al crescere

del  $K_i$ , in entrambi i metodi, si ha un decremento in media delle variazioni rispettivamente del 35%, 27% e 14%. Per maggiore chiarezza vengono riportate di seguito le tabelle dei fattori correttivi ricavate nelle due precedenti campagne sperimentali, evidenziando come vari la sovrastima in funzione del parametro correttivo  $K_i$

### *Campagna sperimentale in ambito estrattivo*

*Tabella 64 : comparazione tra i metodi di calcolo in funzione del parametro  $K_i$  su operatori in ambito estrattivo*

<b><math>K_i</math></b>	<b>Confronto A-B</b>	<b>Confronto A-C'</b>	<b>Confronto A-C</b>
$k_i < 0.8$	17.81	40.82	27.990
$0.8 < k_i < 0.9$	31.28	42.14	19.261
$k_i > 0.9$	23.84	39.03	30.445

### *Campagna sperimentale su veicoli urbani*

#### Mezzi standard

*Tabella 65 : comparazione tra i metodi di calcolo in funzione del parametro  $K_i$  su mezzi standard*

<b><math>K_i</math></b>	<b>Confronto A-B</b>	<b>Confronto A-C'</b>	<b>Confronto A-C</b>
$k_i < 0.8$	19.88	47.96	35.05
$0.8 < k_i < 0.9$	19.52	31.29	14.56
$k_i > 0.9$	28.85	29.25	0.49

#### Mezzi blindati

*Tabella 66 : comparazione tra i metodi di calcolo in funzione del parametro  $K_i$  su mezzi blindati*

<b><math>K_i</math></b>	<b>Confronto A-B</b>	<b>Confronto A-C'</b>	<b>Confronto A-C</b>
$k_i < 0.8$	32.44	56.12	35.05
$0.8 < k_i < 0.9$	33.18	42.91	14.56
$k_i > 0.9$	32.90	33.22	0.50

## 2.2 PROVE SPERIMENTALI SULLE METODOLOGIE D'ACCOPPIAMENTO TERRENO- TRASDUTTORE

### 2.2.1 Introduzione

Come descritto nel primo capitolo, le normative nazionali ed internazionali suggeriscono diverse metodologie per la misura di vibrazioni meccaniche trasmesse nel terreno. Ciascuna d'esse presenta vantaggi e limiti, quali la rapidità del posizionamento dei trasduttori, la minore invasività nel terreno, la ripetibilità delle procedura e l'influenza delle condizioni ambientali esterne, La normativa UNI9916 suggerisce, per valori d'accelerazione superiori a 1 g, il seppellimento dello strumento al fine di garantire un efficace aderenza al terreno ed evitare, così, spostamenti relativi che porterebbero all'invalidazione della misurazione. Lo scopo di questa parte del lavoro quello di effettuare un confronto tra le metodologie proposte in normativa e quella sperimentale, che prevede l'impiego come supporto al trasduttore di profilati metallici. Il principale contesto di studio della problematica è quello delle attività estrattive, a cui sono state aggiunte precedenti campagne di misurazioni in differenti contesti allo scopo di testare le differenti tecniche d'accoppiamento e avere un primo riscontro scientifico-sperimentale. La realizzazione delle prove, con la relativa raccolta di tutti i dati, è avvenuta in tre diverse campagne sperimentali:

- campagna di misurazione in ambiente urbano
- campagna di misurazione in ambiente rurale
- campagna di misurazione in ambito estrattivo

### 2.2.2 Campagna di misura in ambiente urbano

Nella prima parte della campagna di misurazioni sono stati eseguiti rilievi strumentali per mezzo di accelerometri al fine di caratterizzare nel dominio della frequenza le vibrazioni indotte dal transito dei tram nel centro storico di Roma lungo via Ottaviano, Le misure sono state condotte in prossimità della sorgente, ed in corrispondenza ad una distanza prefissata, La differenza degli spettri così ottenuti ha permesso di ottenere una stima dell'attenuazione del fenomeno vibratorio, Nella prima parte del lavoro sono stati scelti 4 punti di misura lungo la via e dai primi tre punti di misura è stata ricavata una la legge di attenuazione che è stata poi confrontata con quella del quarto punto di misura allo fscopo di validare e verificare il modello di attenuazione proposto, Nella seconda parte sono invece

stati effettuati rilievi per mezzo di velocimetro nel locale cantine di un edificio posto in via Ottaviano allo scopo di valutare i possibili danni all'edificio conseguenti alle vibrazioni trasmesse dai tram, Ciò è stato ottenuto mediante un confronto con la normativa italiana vigente (UNI 9916), E' da sottolineare come la componente vibrazione vibrazionale presenta presenti problematiche molto complesse quali:

- le misurazioni del fenomeno vibrazionale lungo i tre assi ortogonali
- la forte dipendenza dei risultati dal punto di misura
- la varietà dei modi di propagazione dell'energia meccanica nel terreno che la stessa sorgente può eccitare in relazione anche alla composizione del terreno stesso che ipotizziamo essere omogeneo e isotropo
- la difficoltà di determinare la funzione di accoppiamento mutuo tra edifici e terreno

Il sistema di riferimento scelto ha come direzioni di sollecitazione una verticale (asse  $z$ ) e le altre due ortogonali tra loro (assi  $x$  e  $y$ ). L'asse  $x$  viene scelto parallelo alla direzione del traffico e di conseguenza l'asse  $y$  ortogonale ad esso; è consigliabile comunque che le componenti di vibrazione sulle tre direzioni principali siano registrate simultaneamente, In generale le modalità di fissaggio dei trasduttori devono consentire la fedele riproduzione del moto vibratorio dell'elemento (parte strutturale o terreno) sul quale essi sono fissati, senza che siano introdotte alterazioni del moto stesso imputabili al sistema di accoppiamento del trasduttore Il sistema di montaggio deve essere pertanto quanto più leggero e rigido possibile e nel nostro caso tutto ciò si è cercato di ottenerlo mediante biadesivo attaccato sugli appoggi del supporto

### 2.2.2.1 Tipologia di sorgente



Fig. 145: Tram Socimi T8000



La sorgente vibratoria in esame è costituita da un tram modello Socimi T8000 come quello riportato nella figura sopra. Il mezzo ha le seguenti caratteristiche tecniche:

Numero porte:8 (4 per lato)

Posti a sedere:34

Posti in piedi:152

Posti invalidi:

Posti di servizio:2 (1 per cabina)

Posti totali:188

Massa a vuoto : 30.5 t

### 2.2.2.2 Descrizione del sito

Come già accennato la campagna di misurazioni è stata effettuata lungo via Ottaviano percorsa lungo tutta la sua lunghezza oltre che dal normale traffico veicolare su gomma anche da una linea tranviaria. La via ha una lunghezza di 700m circa e larghezza di 20m, 2 vie laterali confluiscono in essa ed è delimitata da edifici risalenti al secolo scorso. La strada è costituita da tre parti: quella centrale in asfalto dove è disposta la linea tranviaria, una parte laterale di sanpietrini e il marciapiedi in basalto. I tram transitano in entrambe i versi con una sola fermata in un'unica direzione. Sono stati scelti 4 siti di misura lungo la via a metà di ogni isolato equidistanti l'uno dall'altro. L'edificio scelto per il confronto con i valori da normativa affaccia su via Ottaviano ed è un edificio 5 piani, più uno interrato dove sono state effettuate le misurazioni.



Fig. 146: punti di misura scelti su Via Ottaviano





*Fig. 147: panoramica della via oggetto del lavoro*

Per ciascun punto di misura, sono stati registrati diversi eventi, almeno una decina per ogni senso di marcia (ciò per rendere la sorgente il più possibile omogenea), tramite i quali è stato possibile determinare i corrispondenti valori medi dell'ampiezza dell'accelerazione utilizzati successivamente per la stima della legge di attenuazione

### 2.2.2.3 Strumentazione impiegata

Le prove descritte nel seguente lavoro sono state realizzate mediante l'utilizzo della strumentazione di seguito elencata:

- Terna di accelerometri monoassiali della PCB Piezotronics



*Fig. 148: Terna accelerometrica PCB*

	PCB 393A03	
Voltage sensitive	1000	mV/g
Measurement range	5	±g pk
Frequency range (± 5 %)	0,5-2000	Hz
(± 10 %)	0,3-4000	Hz
(± 3 dB)	0,2-6000	Hz
Resolution	0,0001	g pk
Amplitude linearity	±1	%
Transverse sensitivity	≤5	%
Shock limit	5000	±g pk
Excitation voltage	18-30	VDC
Output impedance	<250	Ω
Output bias	8-12	VDC
Discharge time constant	1-3	sec
Size	30,2x55,6	mm
Weight	210	gm

Fig. 149: Terna Scheda tecnica dell'accelerometro

- Velocimetro triassiale Sinus 3D Seismometer



Fig. 150: Velocimetro triassiale Sinus 3D Seismometer

Sinus Triaxial Seismometer	
Caratteristiche tecniche	
Tipo di sensore	trasduttore di velocità di vibrazioni con risposta in frequenza linearizzata
Principio di funzionamento	velocimetro autogenerante equalizzato elettronicamente
Sensibilità	27.7 V/ms-1
Escursione della bobina	4 mm p-p
Risposta in frequenza	Da 1 a 80 Hz, $\pm 0.4$ dB (Numero d'ordine 902220.3) Da 1 a 315 Hz, $\pm 0.4$ dB (Numero d'ordine 902219.7)
Gamma dinamica	tipica 123 dB
Minimo valore rilevabile	tipica 350 nm/s (come richiesto da DIN 45669)
Linearità e fase	conforme DIN 45669 (Class 1)
Sensibilità trasversale	conforme DIN 45669 (< 5%)
Alimentazione	ICP 2 ... 20 mA
Segnale in uscita	$\pm 10$ V
Campo di temperature	-30°C ... +60°C
Contenitore	Alluminio
Grado di protezione	IP 65 (a tenuta di spruzzi)
Dimensioni	120 mm x 120 mm x 80 mm
Peso	2.0 kg
Connettore	3 x ICP via LEMO FFP.2S.306
Cavi	Cavo da 1,5 m uscita in BNC (Numero d'ordine 902241.2, incluso) (X: verde, Y: blu, Z: rosso) Cavo di prolunga da 25 metri su avvolgitore (Numero d'ordine 902240.4)

Fig. 151: scheda tecnica del velocimetro

La gestione dell'acquisizione e dell'archiviazione dei dati viene effettuata tramite:

- Software SAMURAI™ – SINUS Messtechnik GmbH per l'acquisizione e il salvataggio dei dati;
- Software Noise & Vibration Works Reader – Spectra S r l per il trattamento dei dati

### 2.2.2.4 Acquisizione ed elaborazione dati

Acquisiti i dati, la procedura, uguale sia per la caratterizzazione della sorgente che per la caratterizzazione del recettore è composta dalle seguenti fasi:

- Individuazione dalla time-history degli eventi registrati
- Estrazione degli spettri in frequenza per bande in terzi d'ottava
- Somma vettoriale lungo le tre direzioni degli spettri estratti
- Media delle somme vettoriali ottenute al fine di ottenere un'unica curva rappresentativa
- Differenza tra la curva rappresentativa della sorgente e quella rappresentativa del recettore (Funzione di trasferimento)

Il primo passo è stato quello di caratterizzare la sorgente e il recettore di ogni sezione. Sono stati quindi registrati in prossimità del binario o del basamento dell'edificio almeno una ventina di passaggi al fine di ottenere almeno dieci valori per senso di marcia con i quali caratterizzare la nostra

sorgente/recettore La strumentazione è stata posizionata a 1,9m dall'asse dei binari per quanto riguarda la caratterizzazione della sorgente e 7,7m per quanto riguarda il recettore



Fig. 152: distanze dall'asse della rotaia

Un aspetto fondamentale nel processo di misura di una vibrazione meccanica è l'analisi in frequenza. L'intervallo delle frequenze di interesse viene suddiviso in domini di frequenze adiacenti, dette bande, caratterizzati da un rapporto ben preciso tra il limite superiore e quello inferiore a da una frequenza centrale. Classico è l'utilizzo di bande di ampiezza dette *bande d'ottava* dove la frequenza limite superiore è due volte quella inferiore; altra suddivisione dello spettro di frequenze è in *bande di terze d'ottava* in cui:

$$f_{\text{sup}} = \sqrt[3]{2} f_{\text{inf}}$$

in questo modo la suddivisione dello spettro risulta essere molto più precisa. Per ogni asse  $x$ ,  $y$ ,  $z$  è stato registrato tramite soundbook sia la time-history sia il relativo spettro in bande di terzi d'ottava.

#### a) Valutazione della funzione nella sezione 1

La sezione 1 è quella sita all'altezza di Via Ottaviano 23 una ventina di metri dopo la fermata del tram. Sono stati presi in considerazione 11 passaggi lungo una direzione per quanto riguarda la sorgente e 10 passaggi per quanto riguarda il recettore.

- Sorgente 1

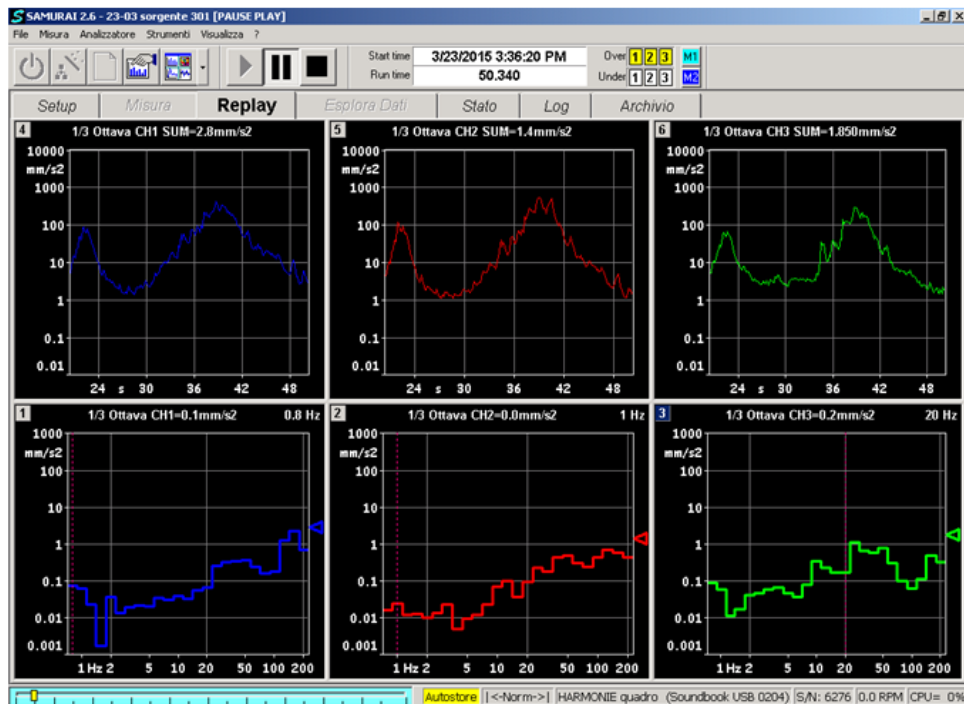


Fig. 153: acquisizione dati su Samurai

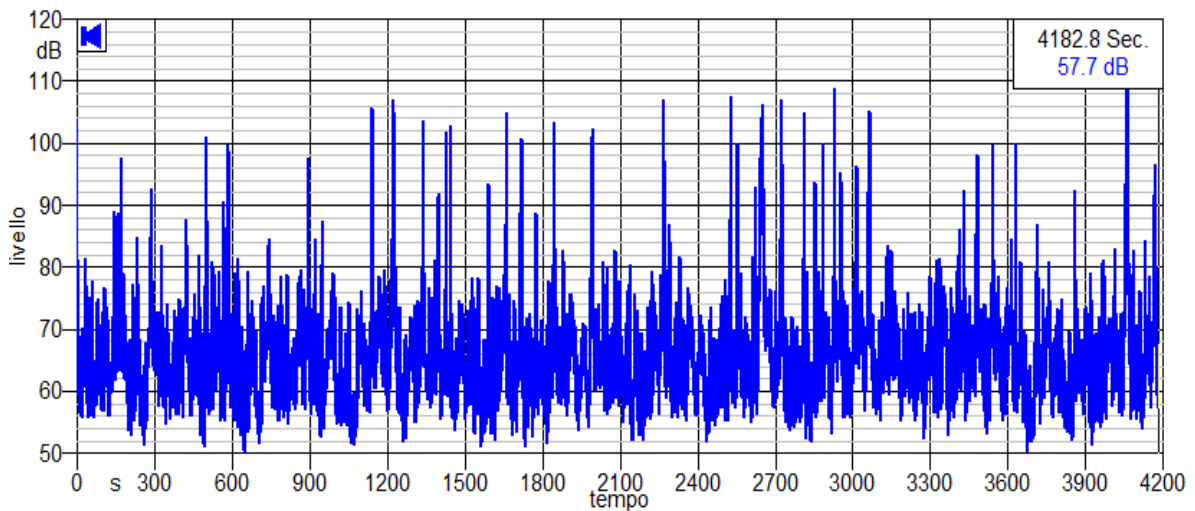


Fig. 154: Time History della registrazione

Per ogni evento che è stato registrato sono stati selezionati dalla time-history solo quelli in una direzione al fine di ottenere una maggiore omogeneità della sorgente. Il singolo evento è stato selezionato considerando  $\pm 20$  dB dal suo valore di picco.



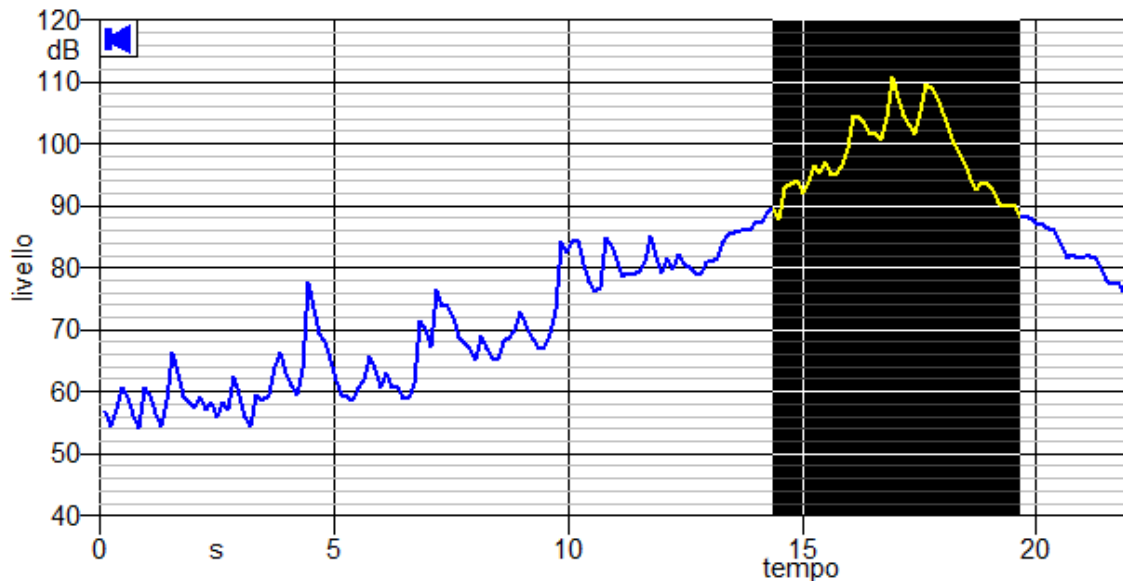


Fig. 155: esempio di selezione di un evento

Selezionati tutti gli eventi, di ognuno ne è stato estratto lo spettro. Gli spettri così ottenuti sono stati messi a confronto per valutare se ci fosse qualche evento “anomalo” e in tal caso scartarlo. La presenza di eventuali “anomalie” è da ricercarsi in eventuali errori propri dello strumento durante la fase di registrazione.

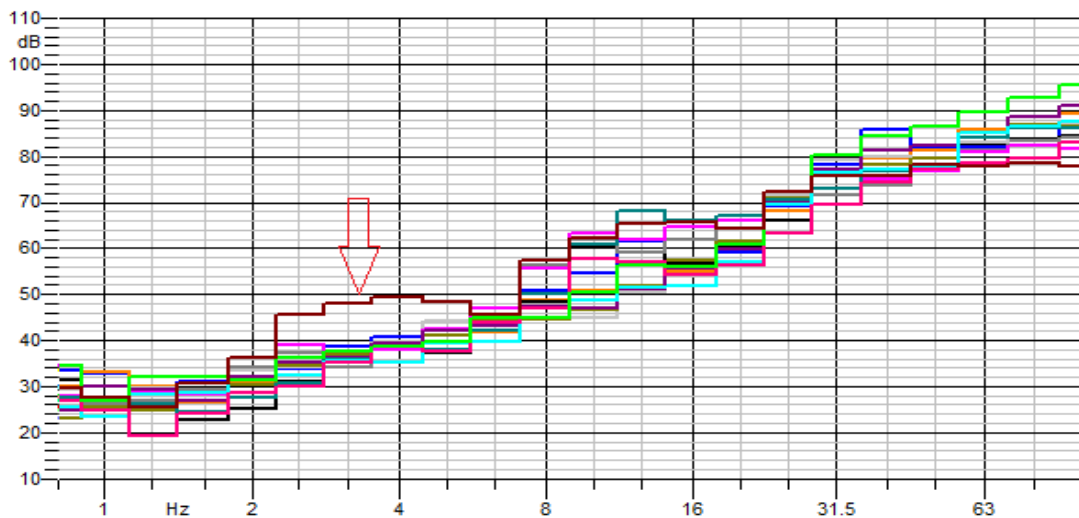


Fig. 156: confronto tra gli spettri degli eventi selezionati

Presi dunque tutti gli eventi più rappresentativi se ne fa una somma vettoriale lungo i tre assi:

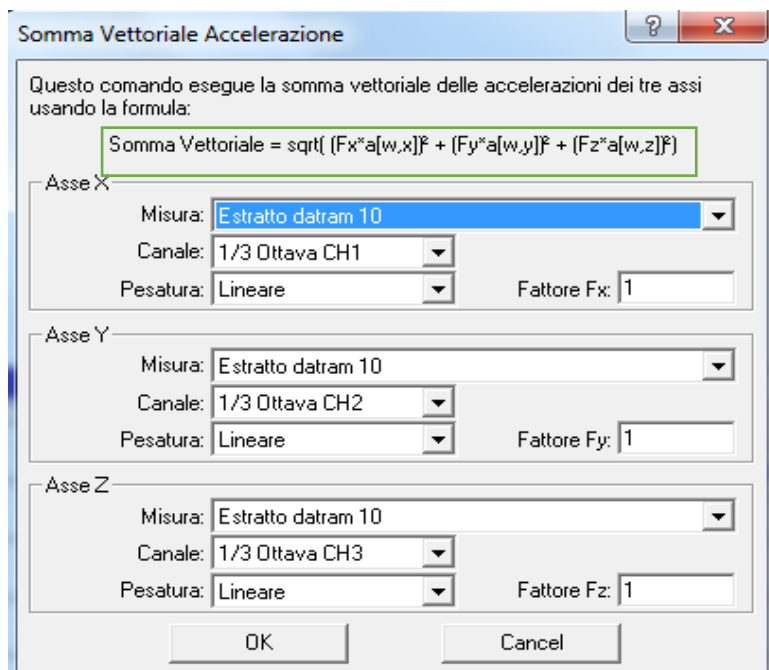


Fig. 157: somma vettoriale lungo i tre assi

L'ultimo passo è quello di operare una media di tutte le somme vettoriali degli eventi registrati così da ottenere un'unica curva che rappresenti la sorgente che stiamo caratterizzando

Tabella 67 : livello vibratorio per ciascun passaggio in funzione della frequenza per la sorgente 1

<b>S1</b>	<b>Valori in dB ad ogni passaggio</b>											
<b>f [Hz]</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>Media</b>
<b>0.8</b>	41.3	41.2	38.6	29.4	35.6	35.7	34	39.8	31.2	35.1	32.7	35.9
<b>1</b>	40	41.8	37.3	30.7	36.8	40.2	33	41.3	32.6	39.3	38.3	37.4
<b>1.25</b>	37.1	42.1	40.1	42.5	33	38.1	30.8	45.3	33.4	36.2	46.4	38.6
<b>1.6</b>	41.1	47.5	37.4	36.6	34.9	34.4	29.7	43.5	38.2	32.5	47.3	38.5
<b>2</b>	39.6	45.9	36	37	37.9	35.6	34.7	45.1	47.6	33.1	51.4	40.4
<b>2.5</b>	43.4	46.3	35.5	37.8	37.2	36.2	39.8	47.1	48.6	35.8	53	41.9
<b>3.15</b>	44.9	46.4	37.6	39.6	38.2	44.4	46.4	52.1	51.9	44.5	56	45.6
<b>4</b>	46	48.7	37.9	41.7	38.6	43	45.7	58.2	51.5	45.6	59	46.9
<b>5</b>	47.7	51.9	39.3	41.7	40.4	42.9	40.3	65.2	52.6	44.8	59.8	47.9
<b>6.3</b>	49.3	54.3	45.1	45.3	44.8	44.6	43	70.5	53.7	42.8	61.3	50.4
<b>8</b>	51.8	57.6	50.1	51	54.4	53.2	48.3	70.7	59	47.7	61.1	55.0
<b>10</b>	61.3	61.9	58.5	65.9	60.9	59.6	50.4	70.7	64.4	57.4	64.9	61.4
<b>12.5</b>	59.9	63.5	57.8	62.9	62.6	59.4	54.3	72.8	68.8	58	65.7	62.3
<b>16</b>	63.7	61.2	60.8	64.3	63	62.5	60.7	77.9	70.5	60	71	65.1

<b>20</b>	71.1	72.2	69.6	70.8	71	75	73.8	83.8	77.1	72.6	77.5	74.0
<b>25</b>	80.3	81.7	78.8	79	80.4	88.8	81.7	95	86.4	81.9	83.8	83.4
<b>31.5</b>	86.1	89.4	84	84.7	85.8	88.3	84.5	102.9	92.7	84.8	88.9	88.4
<b>40</b>	91.9	95	86.9	90	89.9	89.9	86.2	104.9	95.7	87.2	97.4	92.3
<b>50</b>	96.2	99.4	91.4	97	96.4	94.2	88.2	110.8	101.3	90.9	101.3	97.0
<b>63</b>	100.8	101.4	95.3	99.9	100.7	95.1	89	112.1	106.3	90	107.3	99.8
<b>80</b>	104	103.6	95.8	101.5	100.8	98.5	92.5	109	110.1	91.7	106.1	101.2
<b>100</b>	104.6	105.3	98.8	104.7	103.6	102.8	98.9	109.3	105.8	95.9	107.7	103.4

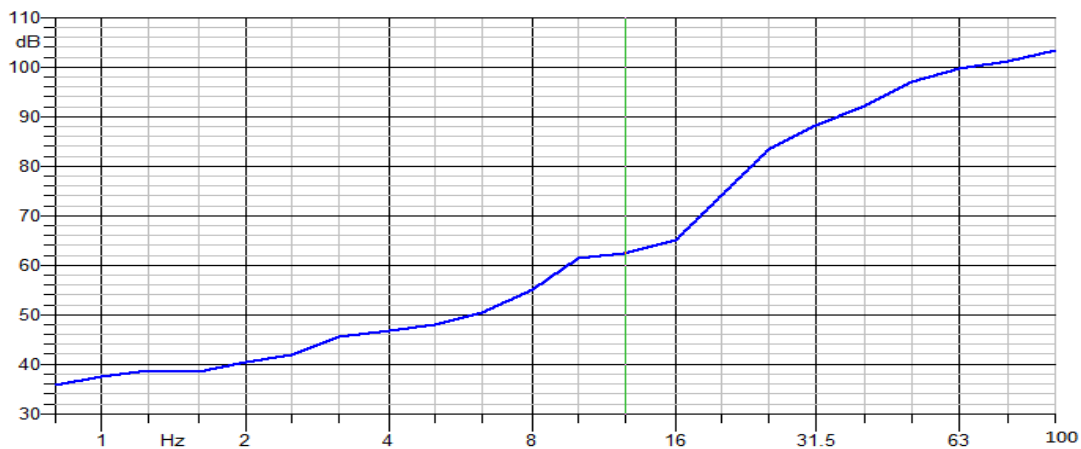


Fig. 158: Caratterizzazione della sorgente 1

A questo punto ripetiamo la stessa procedura per il recettore della sezione 1 in modo da poter tirar fuori la funzione di trasferimento caratteristica di questa sezione operando una differenza tra le due curve ottenute

### Recettore 1

Il recettore 1 è stato scelto ad una distanza di 7.7 m dall'asse del binario in prossimità del basamento dell'edificio

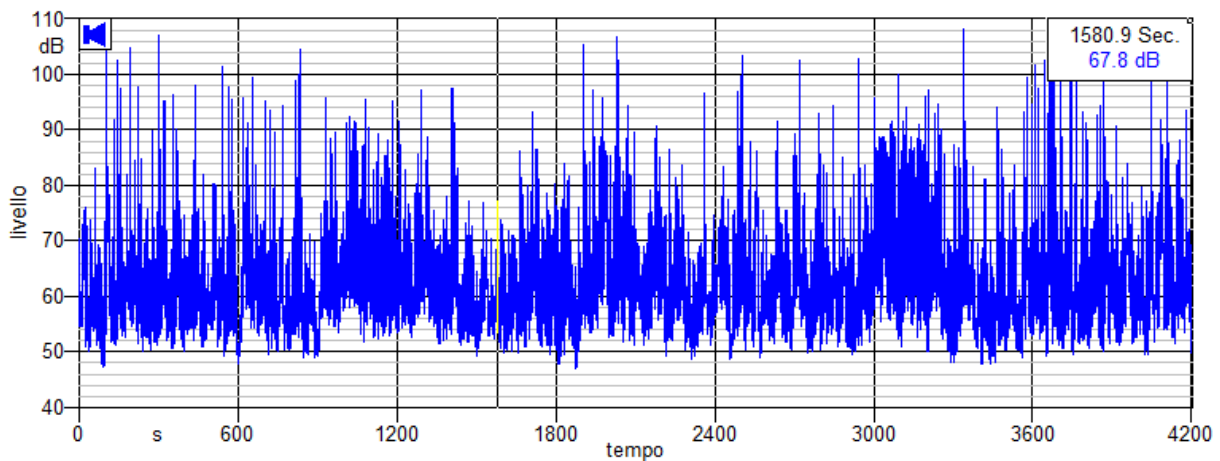


Fig. 159: Time History del recettore 1



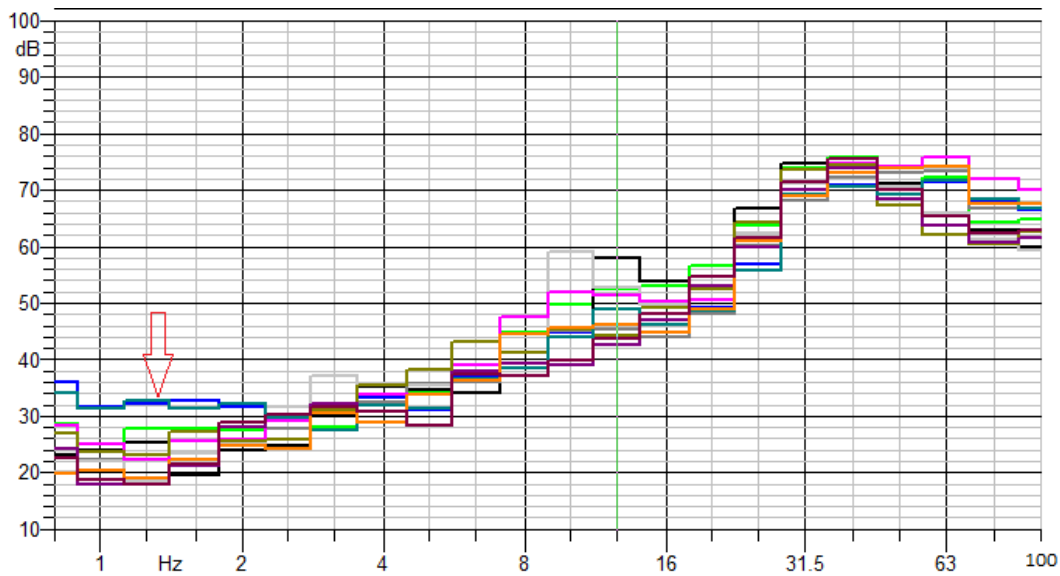


Fig. 160: confronto tra gli spettri degli eventi selezionati

Tabella 68 : livello vibratorio per ciascun passaggio in funzione della frequenza per il recettore 1

<b>R 1</b>	<b>Valori in dB ad ogni passaggio</b>										
<b><math>f</math> [Hz]</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>Media</b>
<b>0.8</b>	27.2	34.7	32.2	28.3	24.9	28.3	39.6	29.2	29.7	29.8	30.4
<b>1</b>	25.6	31	31.3	26.6	26	30	35.6	28.7	28.1	28.5	29.1
<b>1.25</b>	26.1	28.9	30.6	28.4	20.8	22.2	35.1	25.8	26.6	28.3	27.3
<b>1.6</b>	26	31.6	31.5	26.3	26.7	29.6	34.5	26.8	29.4	31	29.3
<b>2</b>	31.9	34.5	35.5	32.7	32.9	31.9	34.2	35	35.9	34.2	33.9
<b>2.5</b>	38.3	33.2	37.3	31.2	32.2	37.5	33.1	33.2	32.2	32.2	34.0
<b>3.15</b>	42.7	33.9	32.6	34.9	37.2	44.4	33.8	34	36.2	35.6	36.5
<b>4</b>	41.2	36.9	34.9	39	38.4	45.2	35.8	34.9	42.3	36.9	38.6
<b>5</b>	38.1	39.9	40	38.1	40.2	42.9	36.3	37.4	45.2	38.2	39.6
<b>6.3</b>	42.1	44.8	40.8	38.8	40.8	45.4	41	41.4	47.9	45.4	42.8
<b>8</b>	46	51	50	50.1	48.7	48.8	45.3	48.5	46.3	54.3	48.9
<b>10</b>	46.9	57.6	56.4	53.2	51.3	64.4	49.9	56.5	52.5	59.3	54.8
<b>12.5</b>	48.9	58.8	58.9	66.9	53	60.1	56.4	57.3	53.7	59.6	57.4
<b>16</b>	53.6	54.3	61.7	64.3	53	58.3	54.2	54.8	60.1	60.7	57.5
<b>20</b>	60.4	58.3	62.9	70.2	57.4	61.7	57.8	58.3	66.9	62.8	61.7
<b>25</b>	69.2	69.8	73	78.6	70.1	69.9	67.8	67	77.3	70	71.3
<b>31.5</b>	77.5	73.7	83	84.1	75.7	78.9	78.1	73.5	81.8	78.1	78.4
<b>40</b>	82.7	77.9	85.7	87.3	80.8	82.2	80.6	75.5	85.2	85.1	82.3

<b>50</b>	77.8	77.6	81.2	83.5	83.4	80.1	81.8	76.8	80.8	86.2	<b>80.9</b>
<b>63</b>	73.9	75.7	83	75.3	82.3	75.9	81	75.8	73.2	85.9	<b>78.2</b>
<b>80</b>	71	73.5	74.2	71.8	76.4	71.4	77.5	73.4	69.1	81.7	<b>74.0</b>
<b>100</b>	72.2	69.5	74.5	68.3	75.2	69.7	76.1	71.5	68.6	79.1	<b>72.5</b>

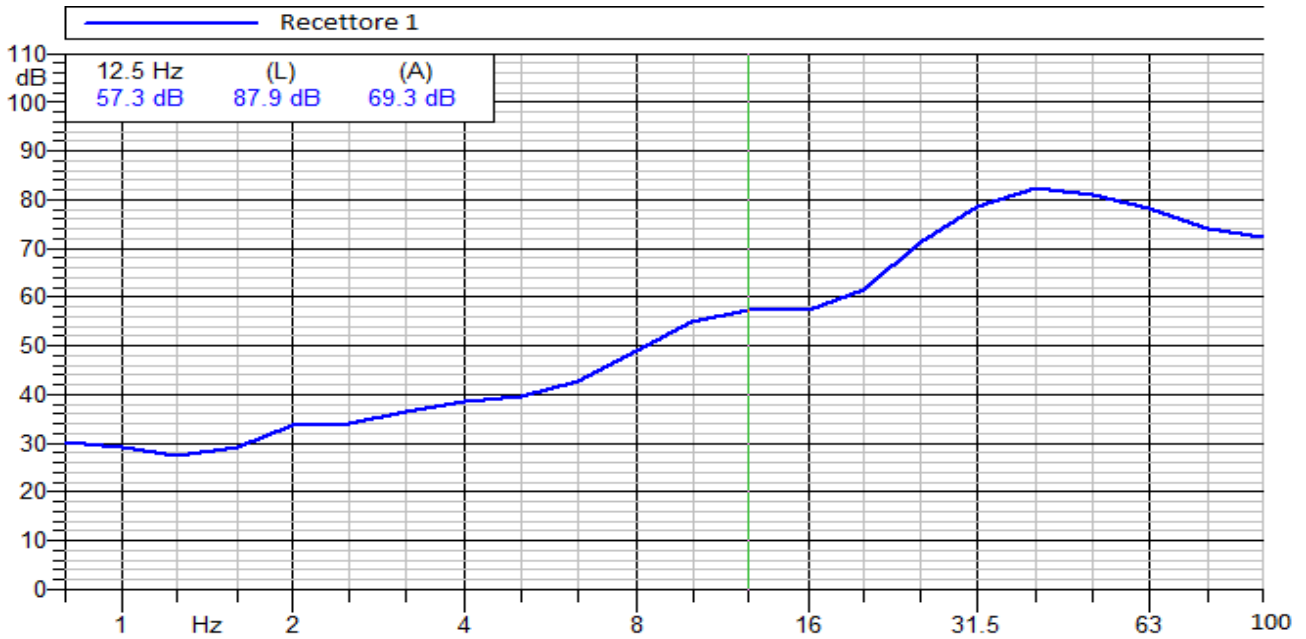


Fig. 161: caratterizzazione del recettore 1

Dalla differenza della curva in sorgente e quella del recettore si ottiene la funzione di trasferimento per la sezione 1:

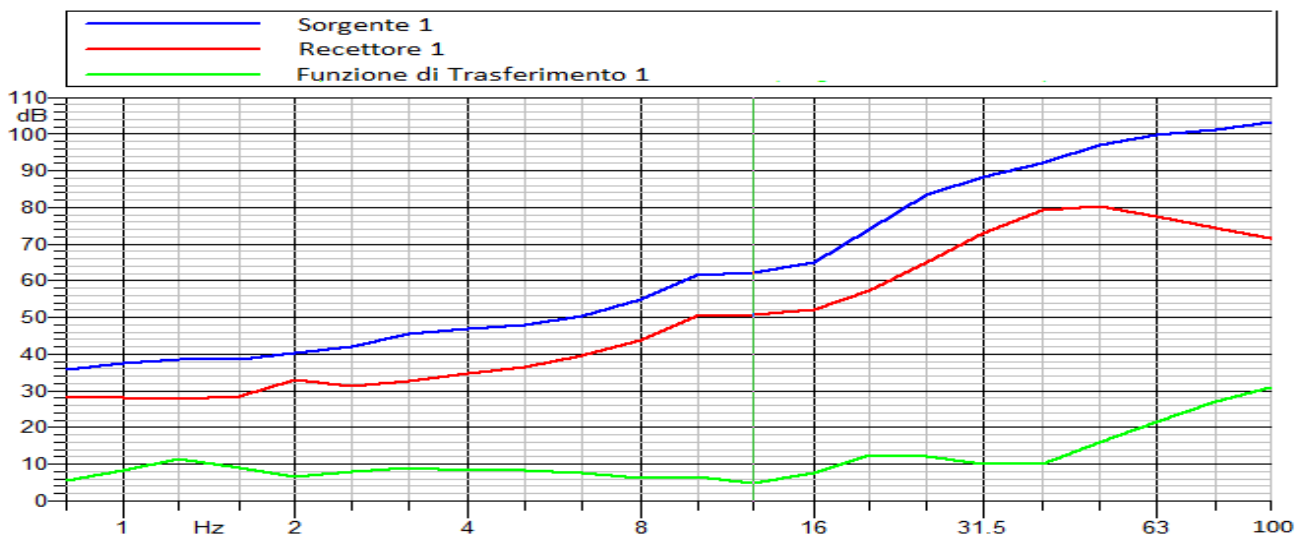


Fig. 162: funzione di trasferimento 1

Con lo stesso procedimento sono state calcolate le altre tre funzioni di trasferimento che vengono riportate nei grafici seguenti

### 2.2.2.5 Analisi delle curve ottenute

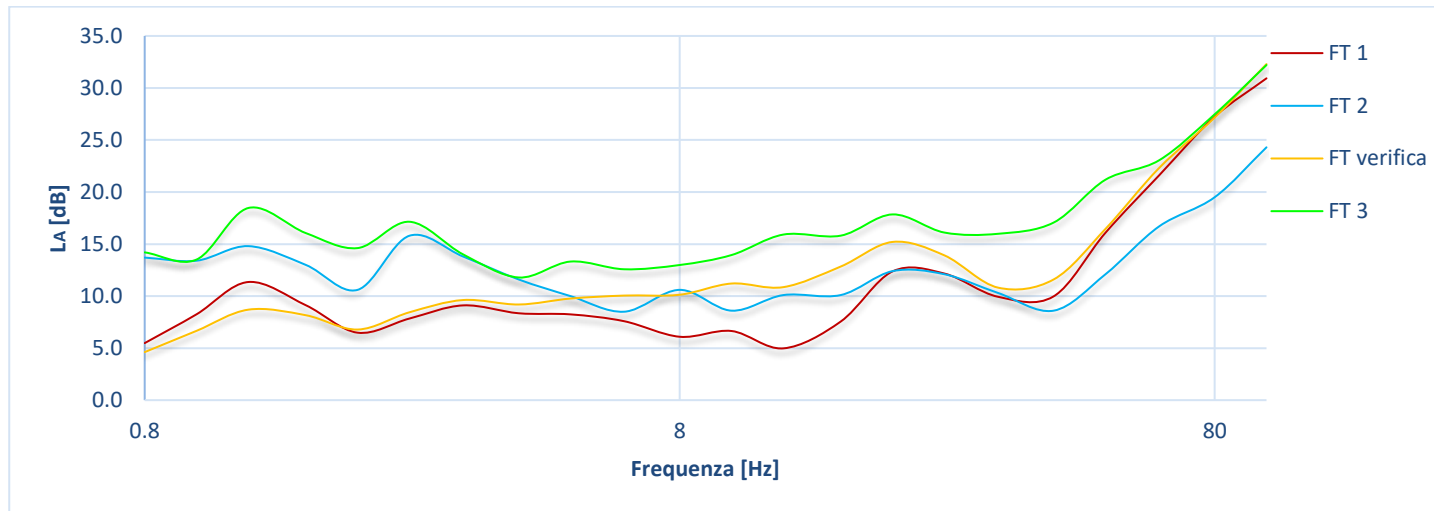


Fig. 163: confronto tra le funzioni di trasferimento ottenute

Le vibrazioni meccaniche rappresentano una forma di energia che si propaga con una certa velocità  $V$  dipendente dal mezzo attraversato in tutte le direzioni imprimendo ai punti del mezzo attraversato movimenti di tipo oscillatorio intorno a una posizione di equilibrio. In generale le vibrazioni si attenuano con l'aumentare della distanza dalla sorgente e a meno che il sistema oscillante non riceva continuamente energia dall'esterno sono per lo più smorzate nel tempo. La natura del terreno riveste molta importanza ai fini della classificazione della severità dell'eccitazione. Basti pensare ai danni causati negli edifici per effetto del consolidamento dovuto alle vibrazioni. Occorre sottolineare il ruolo molteplice esercitato dal mezzo di propagazione. Innanzitutto il terreno opera un'attenuazione dei livelli di vibrazione rispetto a quelli riscontrabili in vicinanza della sorgente. In secondo luogo il terreno in virtù delle proprie caratteristiche dinamiche opera come un filtro ampliando o diminuendo le ampiezze di vibrazione in certe bande di frequenza. Infine il terreno attraverso un meccanismo di irraggiamento di energia meccanica può contribuire ad aumentare lo smorzamento strutturale. Una prima considerazione da fare sulle funzioni di trasferimento ottenute riguarda i differenti valori del livello di attenuazione riscontrati nel range di frequenza considerato. Vari possono essere i motivi che hanno portato a questi risultati e sono tutti causa di *non linearità* della sorgente:

- Presenza di vari materiali lungo la direttrice di propagazione delle onde (asfalto sanpietrini marciapiedi) e quindi differenti velocità di propagazione delle onde nel mezzo;
- Grado di usura dell'asfalto in prossimità della rotaia;
- Differenti caratteristiche delle sezioni considerate;

- Tram pieno-tram vuoto

Riprendendo il concetto di impedenza meccanica essa può assumere valori che sono funzione di tre componenti passivi delle strutture: inerziale (m) elastico (k) dissipativo (c) Fintanto che le caratteristiche di risposta dinamica dei componenti è lineare l'impedenza è una caratteristica costante di una struttura Se uno dei tre componenti all'aumentare delle forze in gioco presenta carattere di non linearità superata la "zona" di comportamento lineare assisteremo ad un cambiamento dell'impedenza Tipicamente è la componente elastica quella che per prima è a rischio di comportamento non lineare seguita da quella dissipativa Nel caso che stiamo studiando si è usato l'accelerazione invece della forza come indicatore della entità della forzante e si è chiamata funzione di trasferimento il rapporto "accelerazione vicino alla sorgente" / "accelerazione al recettore"; ciò non consente di esprimerci in termini assoluti di impedenza ma è rappresentativa delle modalità con la quale quella sezione di "terreno" trasmette le varie componenti in frequenza Il fatto che si rilevino per sezioni apparentemente simili variazioni significative della funzione di trasferimento può stare ad indicare o una non linearità delle componenti (vedi sopra) oppure importanti differenze di caratteristiche delle sezioni Per altro la dimostrazione della diversità delle funzioni di trasferimento nelle varie sezioni può spiegare come lungo una tratta tranviaria apparentemente omogenea vista in superficie si dimostri insorgenza di disturbo da vibrazioni in un tratto e assenza o perlomeno una riduzione dello stesso fenomeno in un altro Una misura assoluta della funzione di trasferimento è operabile utilizzando un martello dotato di trasduttore di forza con il quale si conferisce un impatto nella zona considerata "trasmittente" della struttura misurandone poi l'effetto con un accelerometro o un velocimetro nella zona cosiddetta "ricevente". Tutte le sezioni mostrano un andamento del livello d'attenuazione simile tra loro:

- nel range di frequenze che va da 0,8 Hz a 5 Hz l'andamento della funzione di trasferimento presenta delle irregolarità Le cause attribuibili a tale fenomeno sono da ricercarsi nel:
  - a) Rumore termico
  - b) Mancanza di rigidità nel vincolo
- la propagazione delle vibrazioni nel terreno evidenzia un incremento delle attenuazioni alle frequenze più alte (dai 40 Hz fino al valore limite considerato di 100 Hz) come normalmente accade per effetto della maggiore attenuazione per divergenza geometrica

A questo punto ottenute le funzioni di trasferimento delle quattro sezioni in esame vengono importati i dati in Excel per ottenere mediante il metodo dei minimi quadrati delle rette di interpolazione Viene di seguito brevemente illustrato il metodo utilizzato per ottenere date rette

## Metodo dei minimi quadrati

### *Calcolo delle costanti a e b*

Per ipotesi supporremo che sebbene le misure di  $y$  (nel nostro caso i valori dei livelli di attenuazione) siano soggette a qualche incertezza l'incertezza nelle misure di  $x$  (i nostri valori di frequenza) sia trascurabile. Questa è spesso un'ipotesi ragionevole poiché le incertezze in una variabile sono spesso molto più grandi di quelle nell'altra. Assumeremo inoltre che le incertezze in  $y$  abbiano tutte la stessa grandezza. Più precisamente assumiamo che la misura di ogni  $y_i$  sia governata da una distribuzione di Gauss con lo stesso parametro di larghezza  $\sigma_y$  per tutte le misure.

La stima dei minimi quadrati per le costanti  $A$  e  $B$  è del tipo:

$$A = \frac{\sum x^2 \sum y - \sum x \sum xy}{\Delta}$$
$$B = \frac{N \sum xy - \sum x \sum y}{\Delta}$$

dove è stata introdotta l'abbreviazione

$$\Delta = N \sum x^2 - \left( \sum x \right)^2$$

I risultati appena ottenuti danno le migliori stime per le costanti  $A$  e  $B$  della retta

$$Y = A + Bx$$

basate sui punti misurati  $(x_1, y_1) \dots (x_N, y_N)$ . La retta risultante è chiamata la retta dei *minimi quadrati*.

### *Incertezza della misura di y*

Possiamo calcolare l'incertezza  $\sigma_y$  analizzando i dati delle misure solo dobbiamo ricordare che i valori  $A$  e  $B$  sono stati ricavati dagli stessi dati quindi dobbiamo ridurre il numero di gdl statistici di due. Da qui la relazione:

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{1}{N-2} \sum (y_i - \bar{y})^2} = \sqrt{\frac{1}{N-2} \sum (y_i - A - Bx_i)^2}$$

### *Incertezza nelle costanti a e b*

Le incertezze in  $A$  e  $B$  si ricavano facilmente avendo trovato l'incertezza  $\sigma_y$  nei numeri misurati  $y_1 \dots y_N$ :

$$\sigma_A = \sigma_y \sqrt{\frac{\sum x^2}{\Delta}}$$

$$\sigma_B = \sigma_y \sqrt{\frac{N}{\Delta}}$$

dove  $\Delta$  è lo stesso delle formule sopra

### *Coefficiente di correlazione lineare*

Il *coefficiente di correlazione lineare* ( $r$ ) o semplicemente *coefficiente di correlazione* è un indice che quantifica la bontà delle ipotesi di relazione lineare tra due variabili  $x$  e  $y$  ovvero quanto bene le coppie di punti  $(x_i, y_i)$  si adattano ad una retta. Esso si esprime come:

$$r = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y}$$

Trascurando la diminuzione dei gradi di libertà statistici possiamo scrivere equivalentemente:

$$r = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(y_i - \bar{y})^2}}$$

$r$  è un numero compreso tra  $(-1, 1)$ . Se  $r$  è vicino a  $|1|$  allora i punti giacciono vicino a qualche retta e sono bene approssimati da essa mentre se è vicino allo zero i punti risultano essere non correlati. Più precisamente se indichiamo con  $P_N(|r| \geq r_0)$  la probabilità che  $N$  misure non correlate diano un coefficiente  $r$  più grande di  $r_0$  possiamo estrapolare da tabella i valori di  $r_0$  con cui confrontare il valore di  $r$  trovato dalla nostra legge empirica e dichiarare che la correlazione trovata è significativa ( $P_N \leq 5\%$ ) o altamente significativa ( $P_N \leq 1\%$ ). Dai punti misurati quindi possiamo prima calcolare il coefficiente di correlazione osservato  $r_0$ . In seguito usando le tabelle possiamo trovare la probabilità  $P_N(|r| \geq r_0)$  che  $N$  punti non correlati diano un coefficiente al minimo grande quanto il coefficiente osservato  $r_0$ . Se questa probabilità è “sufficientemente piccola” allora concludiamo che è molto *improbabile* che  $x$  e  $y$  siano non correlati e quindi molto *probabile* che essi siano realmente correlati.

N	$r_0$										
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
3	100	94	87	81	74	67	59	51	41	29	0
4	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0
5	100	87	75	62	50	39	28	19	10	3.7	0
6	100	85	70	56	43	31	21	12	5.6	1.4	0
7	100	83	67	51	37	25	15	8.0	3.1	0.6	0
8	100	81	63	47	33	21	12	5.3	1.7	0.2	0
9	100	80	61	43	29	17	8.8	3.6	1.0	0.1	0
10	100	78	58	40	25	14	6.7	2.4	0.5	0	0
11	100	77	56	37	22	12	5.1	1.6	0.3	0	0
12	100	76	53	34	20	9.8	3.9	1.1	0.2	0	0
13	100	75	51	32	18	8.2	3.0	0.8	0.1	0	0
14	100	73	49	30	16	6.9	2.3	0.5	0.1	0	0
15	100	72	47	28	14	5.8	1.8	0.4	0	0	0
16	100	71	46	26	12	4.9	1.4	0.3	0	0	0
17	100	70	44	24	11	4.1	1.1	0.2	0	0	0
18	100	69	43	23	10	3.5	0.8	0.1	0	0	0
19	100	68	41	21	9.0	2.9	0.7	0.1	0	0	0
20	100	67	40	20	8.1	2.5	0.5	0.1	0	0	0
25	100	63	34	15	4.8	1.1	0.2	0	0	0	0
30	100	60	29	11	2.9	0.5	0	0	0	0	0
35	100	57	25	8.0	1.7	0.2	0	0	0	0	0
40	100	54	22	6.0	1.1	0.1	0	0	0	0	0
45	100	51	19	4.5	0.6	0	0	0	0	0	0

Fig. 164.: Probabilità  $P_N (|r| \geq r_0)$  che N punti non correlati diano un coefficiente al minimo grande quanto il coefficiente osservato  $r_0$

Avendo chiare ora le regole fondamentali per quantificare la distribuzione degli errori di misura come essi si propagano e come costruire una retta di regressione lineare passiamo al calcolo di tutte queste grandezze appena introdotte

### 2.2.2.6 Analisi degli errori e rette di regressione lineari delle sezioni di calcolo

Uno dei più comuni ed interessanti tipi di esperimento riguarda la misura di parecchi valori di due diverse variabili fisiche allo scopo di cercare la relazione matematica che le lega. Gli esperimenti più importanti di questo tipo sono quelli in cui la relazione attesa è *lineare*. In generale consideriamo due variabili fisiche qualsiasi  $x$  e  $y$  che supponiamo siano legate da una relazione lineare della forma:

$$y = A + Bx$$

dove A e B sono costanti

Se le due variabili  $y$  e  $x$  sono in relazione lineare come nella formula sopra allora un grafico di  $y$  in funzione di  $x$  dovrebbe essere una linea retta che ha pendenza B e interseca l'asse  $y$  in  $y = A$ . Se misurassimo N diversi valori  $x_1 \dots x_N$  e i valori corrispondenti  $y_1 \dots y_N$  e se le nostre misure non fossero soggette a incertezze allora ciascuno dei punti  $(x_i, y_i)$  dovrebbe giacere esattamente sulla retta  $y = A + Bx$  come in figura (a)

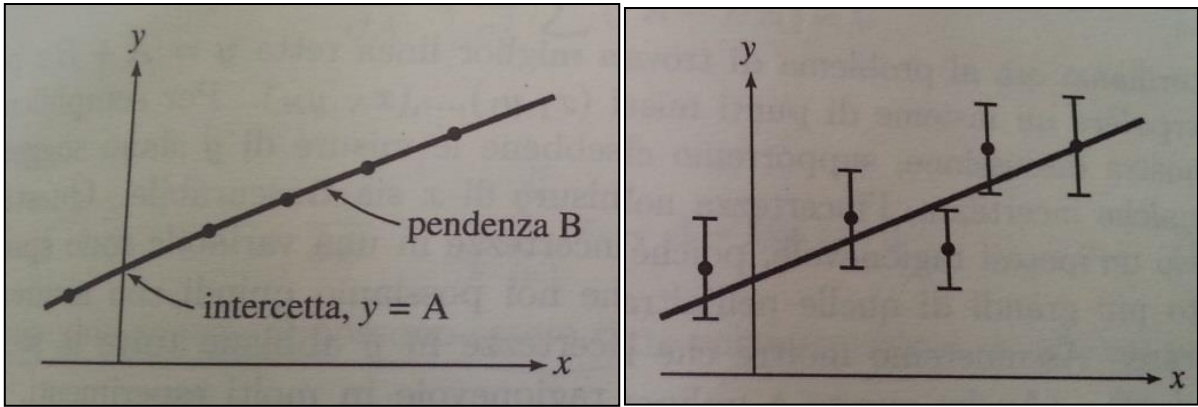


Fig. 165: Misurazioni affette da incertezze in  $y$  (sinistra) e misurazioni non affette da incertezze (destra)

Risultano evidenti delle incertezze e il massimo che possiamo aspettarci è che la distanza di ciascun punto  $(x_i, y_i)$  della retta sarà ragionevolmente confrontabile con le incertezze ( $b$ ) Il metodo analitico che consente di trovare la miglior linea retta che interpola una serie di punti sperimentali è chiamato *regressione lineare* o *adattamento dei minimi quadrati per una retta*

La domanda da porsi è se i valori misurati  $(x_1, y_1) \dots (x_N, y_N)$  soddisfano realmente la nostra aspettativa che  $y$  sia lineare in  $x$  Per rispondere a questa domanda possiamo per prima cosa trovare la retta che meglio interpola i dati e trovare poi il modo di misurare quanto bene questa retta si adatta ai dati stessi

### 2.2.2.7 Confronto tra le sezioni

#### SEZIONE 1

Tabella 69 : livello in decibel per ciascuna frequenza della sezione 1

<b>f [Hz]</b>	<b>L<sub>a</sub> [dB]</b>
0.8	5.5
1	8.3
1.25	11.4
1.6	9.1
2	6.5
2.5	7.8
3.15	9.1
4	8.4
5	8.2
6.3	7.6
8	6.1
10	6.6



12.5	5.0
16	7.6
20	12.4
25	12.2
31.5	9.9
40	10.0
50	16.1
63	21.6
80	27.2
100	30.9

Tabella 70 : valori retta di regressione sezione 1

Valori retta di regressione					
<b>r</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b><math>\sigma_y</math></b>	<b><math>\sigma_A</math></b>	<b><math>\sigma_B</math></b>
0.932	6.213	0.228	2.547	0.671	0.019

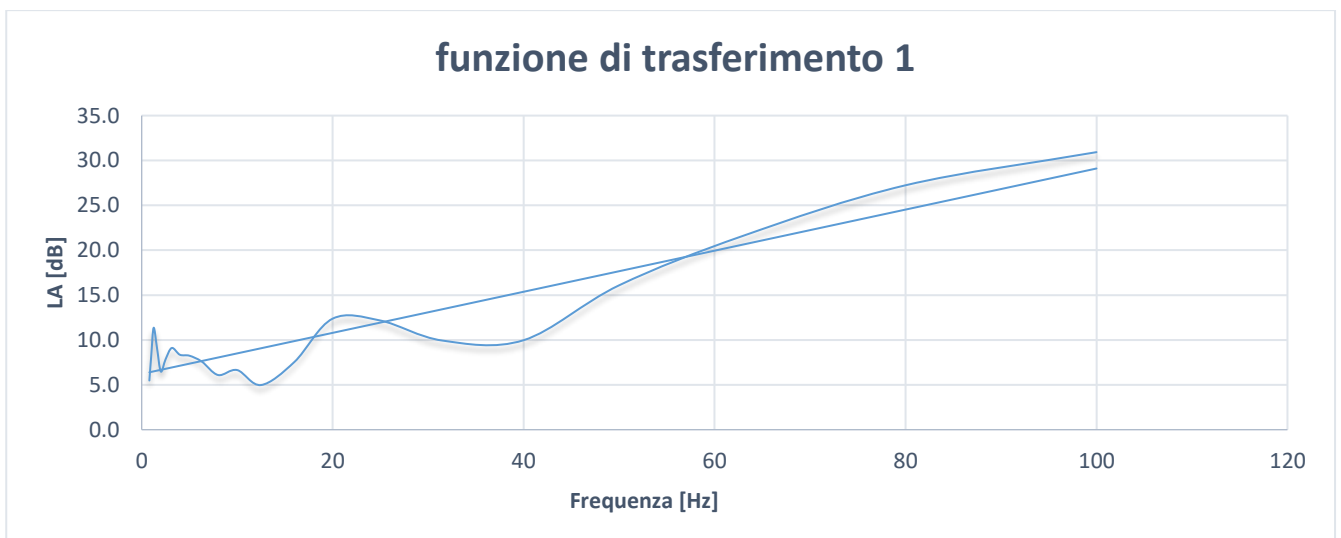


Fig. 166: grafico funzione di trasferimento 1

$$Y_1 = 0.228 F_c + 6.213$$

## SEZIONE 2

Tabella 71 : livello in decibel per ciascuna frequenza della sezione 2

<b>f [Hz]</b>	<b>L<sub>a</sub> [dB]</b>
0.8	13.7
1	13.4
1.25	14.8
1.6	13.0
2	10.6
2.5	15.8
3.15	13.8
4	11.6
5	10.0
6.3	8.5
8	10.6
10	8.6
12.5	10.1
16	10.1
20	12.4
25	12.1
31.5	10.3
40	8.6
50	12.1
63	16.7
80	19.5
100	24.3

Tabella 72 : valori retta di regressione sezione 2

<b>Valori retta di regressione</b>					
<b>r</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b><math>\sigma_y</math></b>	<b><math>\sigma_A</math></b>	<b><math>\sigma_B</math></b>
0.659	10.794	0.089	2.922	0.770	0.022

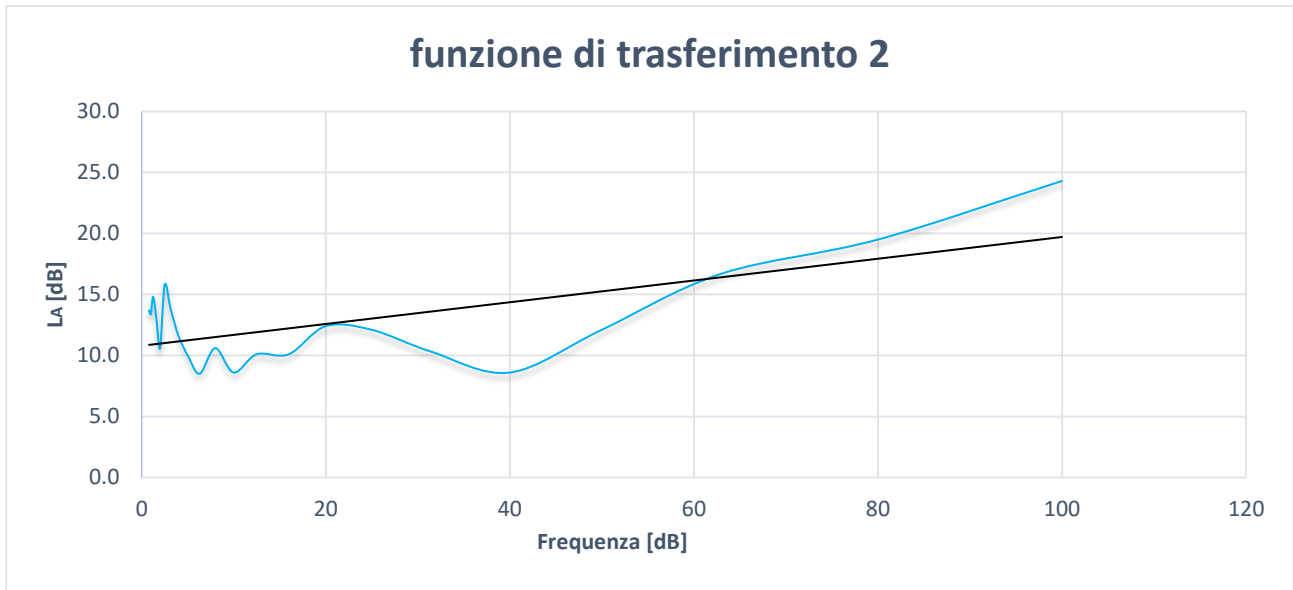


Fig. 167: grafico funzione di trasferimento 2

$$Y_2 = 0.089 F_c + 10.794$$

### SEZIONE 3

Tabella 73 : livello in decibel per ciascuna frequenza della sezione 3

<b>f [Hz]</b>	<b>L<sub>a</sub> [dB]</b>
0.8	14.2
1	13.5
1.25	18.5
1.6	16.1
2	14.6
2.5	17.1
3.15	14.0
4	11.8
5	13.3
6.3	12.6
8	13.0
10	13.9
12.5	15.9
16	15.8
20	17.8

25	16.1
31.5	16.0
40	17.1
50	21.2
63	23.1
80	27.5
100	32.2

Tabella 74 : valori retta di regressione sezione 3

<b>Valori retta di regressione</b>					
<b>r</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b><math>\sigma_y</math></b>	<b><math>\sigma_A</math></b>	<b><math>\sigma_B</math></b>
0.919	12.466	0.163	2.015	0.531	0.015

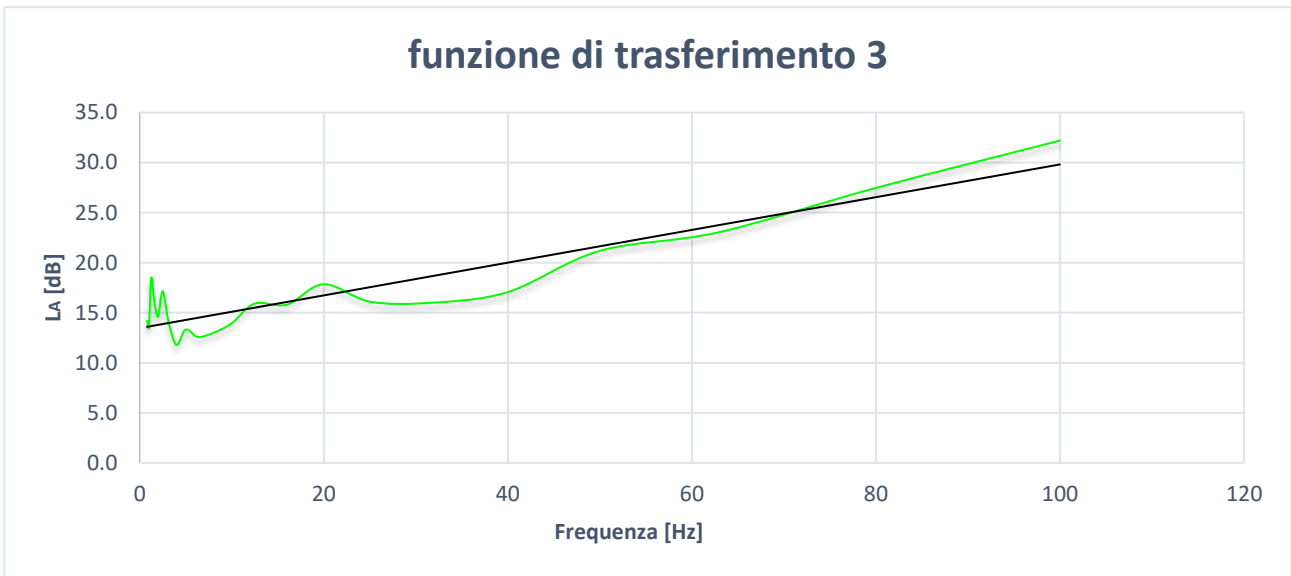


Fig. 168: grafico funzione di trasferimento 3

$$Y_3 = 0.163 F_c + 12.466$$

## SEZIONE DI VERIFICA

Tabella 75 : livello in decibel per ciascuna frequenza della sezione di verifica

<b>f [Hz]</b>	<b>L<sub>a</sub> [dB]</b>
0.8	4.6
1	6.7
1.25	8.7
1.6	8.2
2	6.8
2.5	8.4
3.15	9.6
4	9.2
5	9.8
6.3	10.1
8	10.1
10	11.2
12.5	10.9
16	12.8
20	15.2
25	13.9
31.5	10.8
40	11.6
50	16.5
63	22.3
80	27.2
100	32.3

Tabella 76 : valori retta di regressione sezione di verifica

<b>Valori retta di regressione</b>					
<b>r</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b><math>\sigma_y</math></b>	<b><math>\sigma_A</math></b>	<b><math>\sigma_B</math></b>
0.953	8.549	0.208	2.080	0.548	0.018

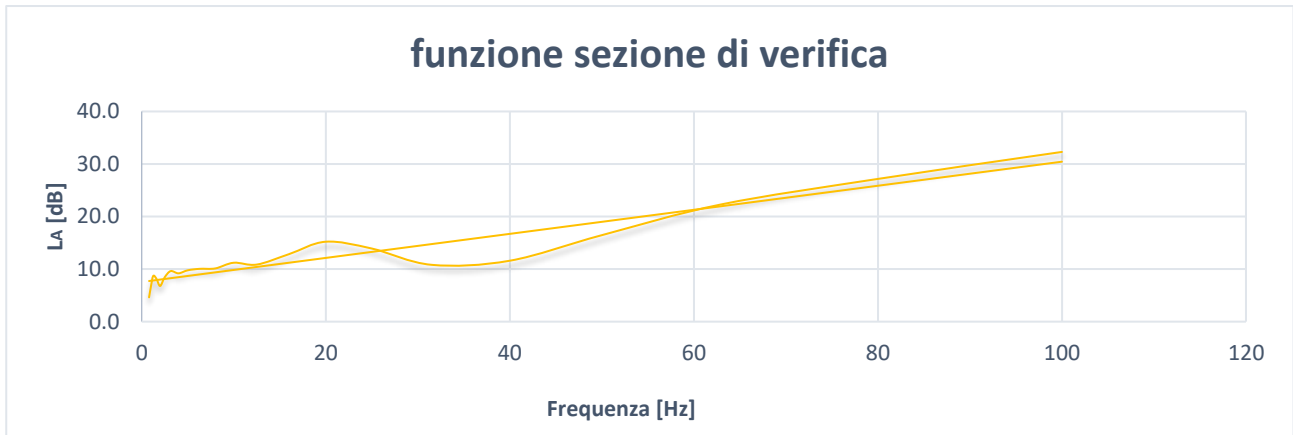


Fig. 169: grafico funzione di trasferimento nella sezione verifica

$$Y_v = 0.208 F_c + 8.549$$

A questo punto ricaviamo una sola retta che rappresenti i primi tre casi facendo una media pesata dei coefficienti delle tre rette. I coefficienti così trovati affetti da un errore ci permetteranno di trovare un range entro il quale questa nuova retta abbia validità. Confrontando questo risultato con l'equazione della retta della sezione di verifica andremo a verificare che essa rientri in questo range in modo tale da verificare la bontà della legge di attenuazione trovata. Come peso per il calcolo della retta (che chiameremo  $Y^*$ ) vengono utilizzate le incertezze assolute  $\sigma_{Ai}$   $\sigma_{Bi}$  di ogni retta:

$$W_{Ai} = \frac{1}{\sigma_{Ai}^2}; W_{Bi} = \frac{1}{\sigma_{Bi}^2} \text{ peso di ciascuna misura}$$

$$A^* B^* = \frac{\sum w_i x_i}{w_i} \text{ miglior stima per i coefficienti A B}$$

$$\sigma_{A^* B^*} = \frac{1}{\sqrt{\sum w_i}} \text{ incertezza in } A^* B^*$$

con  $x_i$  i valori originali misurati di  $A_i$  e  $B_i$

Riportiamo i risultati in tabella:

Tabella 77 : risultati della funzione della d'approssimazione

$W_{A1}$	$W_{A2}$	$W_{A3}$	$W_{B1}$	$W_{B2}$	$W_{B3}$	$A^*$	$B^*$	$\sigma_{A^*}$	$\sigma_{B^*}$
2.219	1.685	3.544	2739.997	2081.502	4376.090	9.701	0.166	0.366	0.010

$$Y^* = 0.166 F_c + 9.701$$

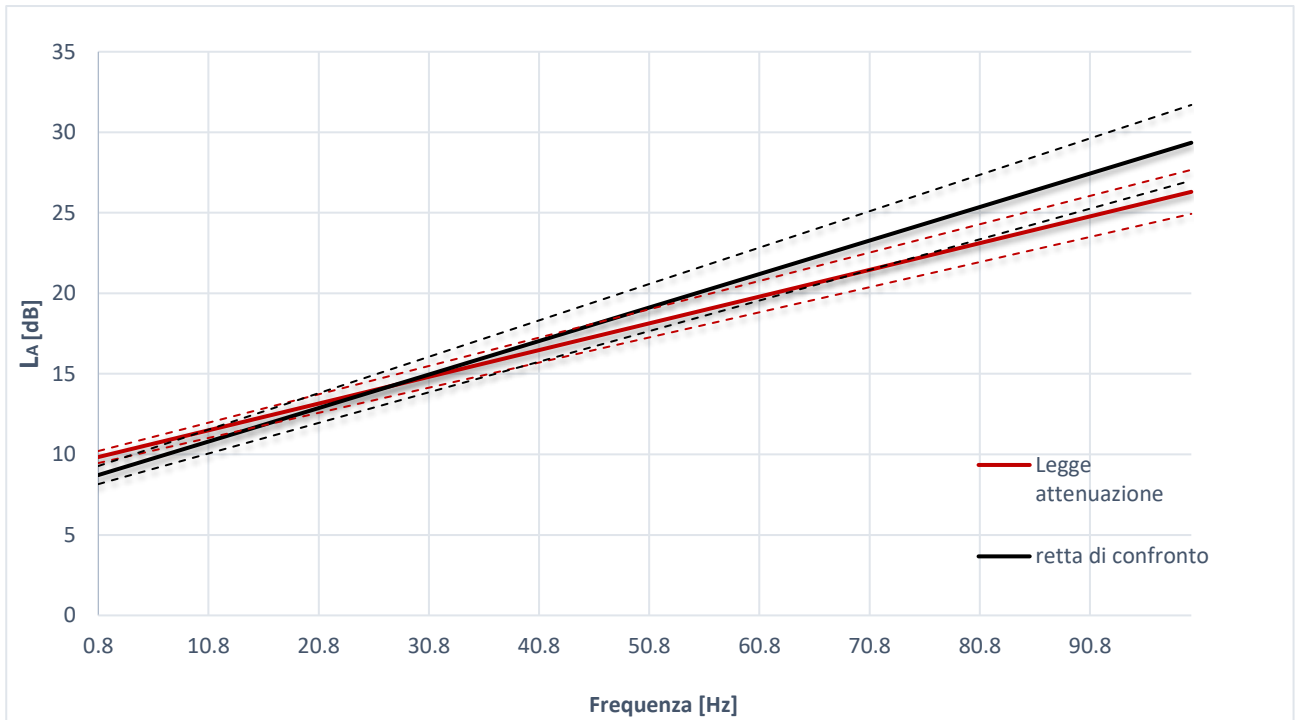


Fig. 170: grafico della funzione di trasferimento

Dal grafico ottenuto risulta come l'intervallo in cui probabilmente giace  $Y^*$  si sovrappone all'intervallo in cui probabilmente giace  $Y_v$  e quindi i nostri risultati sono consistenti con la legge di attenuazione trovata

### 2.2.2.8 Confronto con i valori ammessi della normativa 9916:2004

Come ultima parte della campagna di misure è stata fatta una registrazione nel locale cantine dell'edificio posto in via Ottaviano 91 La misurazione è stata effettuata per mezzo di velocimetro C'è da dire fin da subito che danni strutturali all'edificio nel suo insieme attribuibili a fenomeni vibratorii sono estremamente rari e quasi sempre derivano dal concorso di altre cause Perché le vibrazioni possano arrecare danni strutturali è necessario che esse raggiungano livelli tali da causare prima fastidio e disturbo agli occupanti Sono invece frequenti altre forme di danno di entità definita "di soglia" che senza compromettere la sicurezza strutturale degli edifici ne possono determinare una riduzione del valore Nel caso più generale la risposta di un edificio o dei suoi elementi strutturali sottoposti ad eccitazione dinamica e quindi il danno potenziale che questa può produrre dipendono oltre che dal contenuto spettrale dell'eccitazione stessa dalle caratteristiche dinamiche dell'edificio Sarebbe dunque necessario ottenere una documentazione completa sull'edificio prima di dare una valutazione del rischio di danno connesso con il fenomeno vibratorio in esame

In particolare l'attenzione dovrebbe essere concentrata sui seguenti aspetti:

- Caratteristiche costruttive dell'edificio;
- Stato di conservazione;
- Caratteristiche delle fondazioni ed interazione con il terreno

Tuttavia in relazione agli obiettivi dell'indagine lo studio della risposta degli edifici può essere affrontato in maniera più o meno approfondita e il livello di dettaglio della conoscenza degli aspetti sopra elencati può essere quindi più o meno accurato Così per esempio lo studio finalizzato al riconoscimento del problema per rispondere alla domanda se i livelli di vibrazioni possano essere potenzialmente pericolosi oppure no ovvero la verifica dei livelli di vibrazione rispetto a riferimenti noti o imposti può essere limitato alla sola misurazione in punti prestabiliti dei valori di picco delle vibrazioni ed al calcolo approssimato delle frequenze naturali ricorrendo a metodi empirici basati sulla tipologia e sulla conoscenza dei rapporti geometrici dell'edificio. L'indagine orientata all'identificazione del comportamento dinamico dell'edificio può essere affrontata analizzando la risposta spettrale della costruzione ottenuta da un numero più o meno grande di trasduttori adeguatamente disposti Invece la diagnosi del grado della costruzione e l'effettiva correlazione di questo alla presenza di eccitazione dinamica così come la previsione del comportamento dell'edificio sottoposto a carichi dinamici richiedono l'esame adeguatamente approfondito di tutti gli aspetti sopra elencati che ne determinano la risposta.



### 2.2.2.9 Propagazione del moto nel terreno

“L’energia immessa nel terreno dalla sorgente quando questa è esterna all’edificio genera onde “elastiche” che raggiungono la fondazione modificandosi nel loro contenuto spettrale per effetto delle caratteristiche fisico-meccaniche del terreno attraversato Il fenomeno si traduce nella generalità dei casi in un’attenuazione dell’intensità del moto man mano che ci si allontana dalla sorgente per effetto delle proprietà dissipative del terreno e per un effetto geometrico Usualmente tale fenomeno è più sensibile per le componenti del moto alle alte frequenze e nei terreni incoerenti e di tipo sciolto e dà quindi luogo ad uno spettro caratterizzato da un contenuto spettrale più ricco in basse frequenze In alcuni casi quando si è in presenza di condizioni stratigrafiche particolari possono verificarsi fenomeni di risonanza che tendono ad amplificare alcuni valori spettrali rispetto ad altri ”.

### 2.2.2.10 Metodi di misurazione

Per descrivere in modo corretto il fenomeno in esame il sistema di acquisizione dati dovrebbe in linea di principio permettere l’acquisizione simultanea dei vari segnali così da non perdere le informazioni sulle relazioni di fase Avendo a disposizione nel nostro caso un solo strumento di misura non si è potuto ottemperare a tale richiesta Tuttavia è ammesso come ci indica la normativa operare con un numero ristretto di sensori se il processo in esame è ripetibile e se l’elaborazione successiva non richieda la conoscenza delle relazioni di fasi Per quanto riguarda la misura dell’eccitazione quando si tratta di verificare il livello di vibrazione alla base dell’edificio per esempio in rapporto a valori di riferimento forniti da normative “la posizione di misurazione deve essere scelta in corrispondenza della fondazione o nel caso di edifici senza fondazioni alla base del muro di sostegno esterno ad un’altezza non maggiore di 0,5 m dal livello del terreno” I punti di misurazione sulla fondazione sempre secondo la UNI 9916 par 6.2.1 devono essere predisposti sul lato dell’edificio prossimo alla sorgente di vibrazione Le vibrazioni per ciascun punto devono essere misurate sia in direzione verticale che in due direzioni orizzontali ortogonali È altresì opportuno che i trasduttori non siano fissati vicino o in corrispondenza di punti singolari come fessure piuttosto ampie o di punti di infiltrazione d’acqua o di porte di ventilazione. È importante sottolineare come l’eventuale superamento dei limiti indicati non implichi necessariamente il verificarsi del danno ma è un segnale della necessità di indagini più approfondite

## 2.2.2.11 Elaborazione misure per il confronto con i valori imposti

### a) Analisi delle misure

La misura risulta divisa in due parti poiché nella prima erano stati registrati solamente 7 eventi quindi per arrivare ad almeno 10 è stata fatta ripartire in un secondo momento. Riportiamo di seguito la time history degli eventi registrati da cui si possono osservare i valori di p p v rilevati:

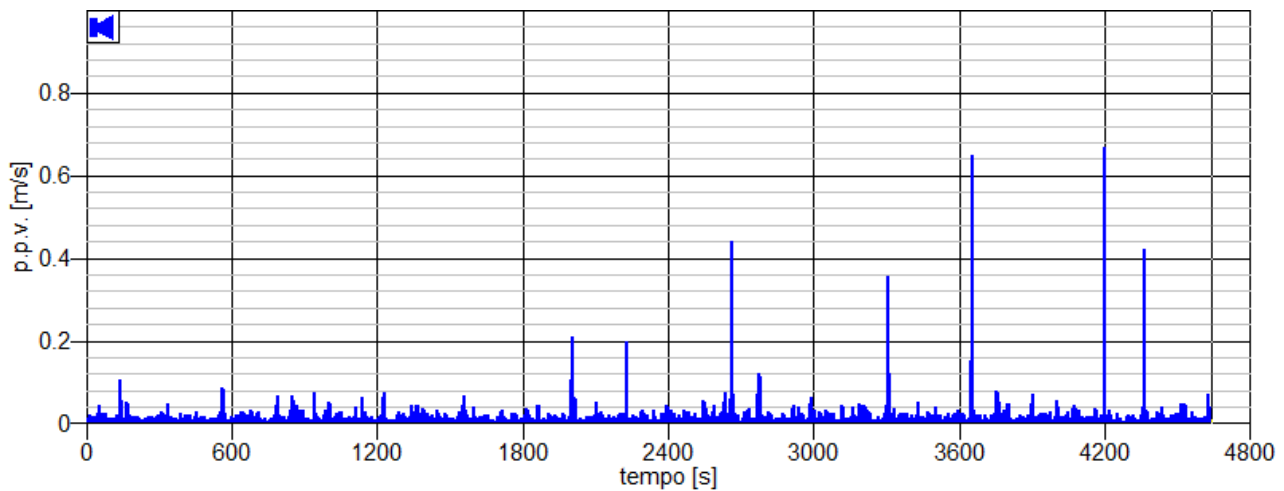


Fig. 171: Time History della prima parte di misura

Gli istanti degli eventi che andremo a caratterizzare sono:

Tabella 78 : valori di velocità per ciasucn istante della prima parte di misurazione

Istante [s]	p p v [m/s]
2003	0.21
2228	0.20
2663	0.44
3307	0.36
3652	0.65
4200	0.67
4364	0.42

I valori di riferimento sono forniti in funzione della frequenza dominante della vibrazione determinata dall'analisi spettrale della componente del vettore velocità con ampiezza maggiore

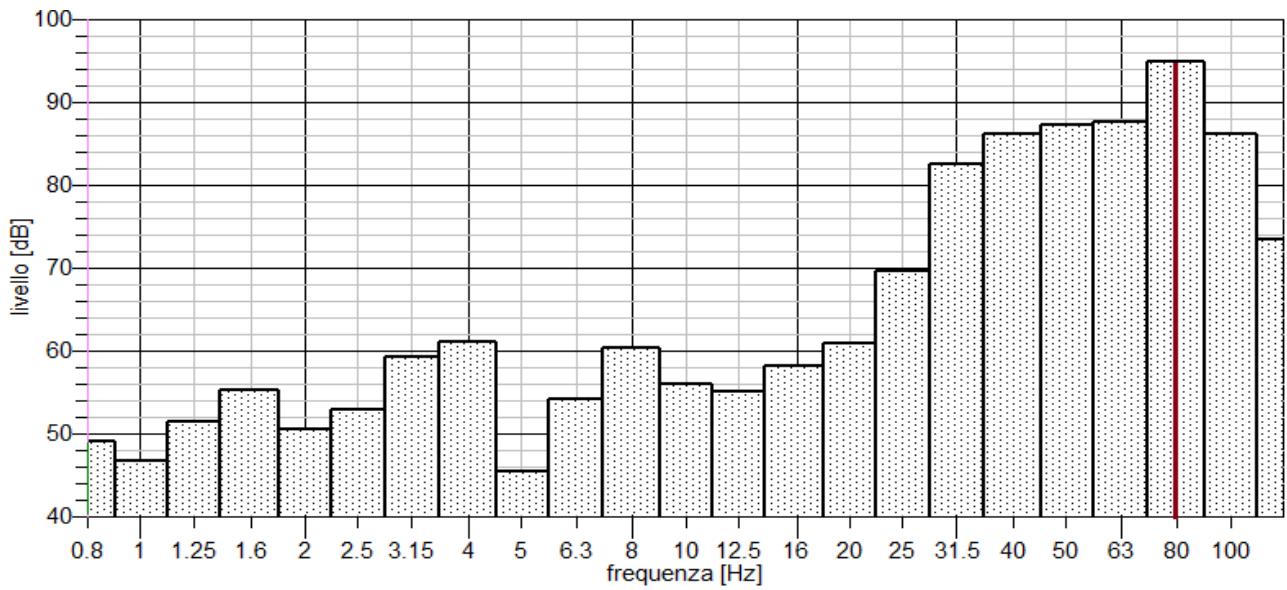


Fig. 172: frequenza dominante della vibrazione all'istante 2003 s Seconda fase

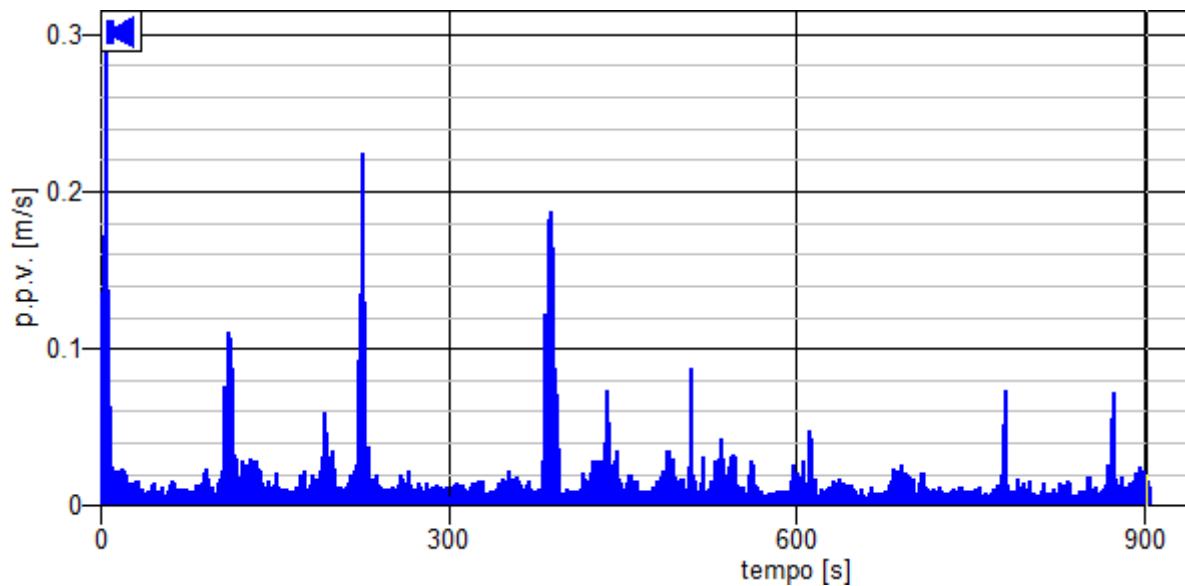


Fig. 173: Time history della seconda parte di misura

Gli istanti degli eventi che andremo a caratterizzare sono:

Tabella 79 : valori di velocità per ciasucln istante della seconda parte di misurazione

Istante [s]	p p v [m/s]
6	0.29
111	0.11
227	0.22
388	0.19

Come fatto per sopra tiriamo fuori gli spettri di ogni singolo evento:

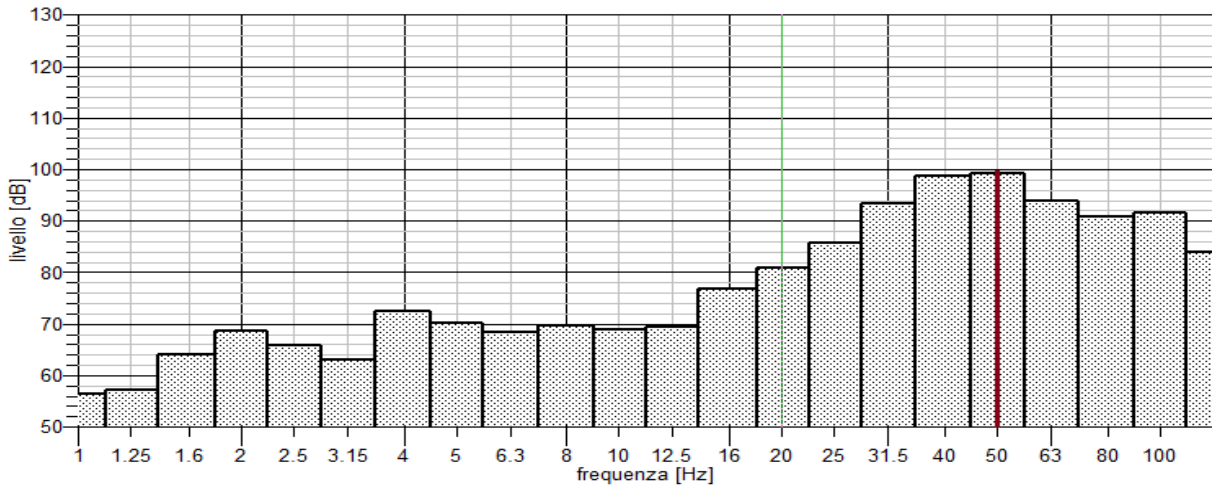


Fig. 174: Frequenza fondamentale della vibrazione all'istante 6 s

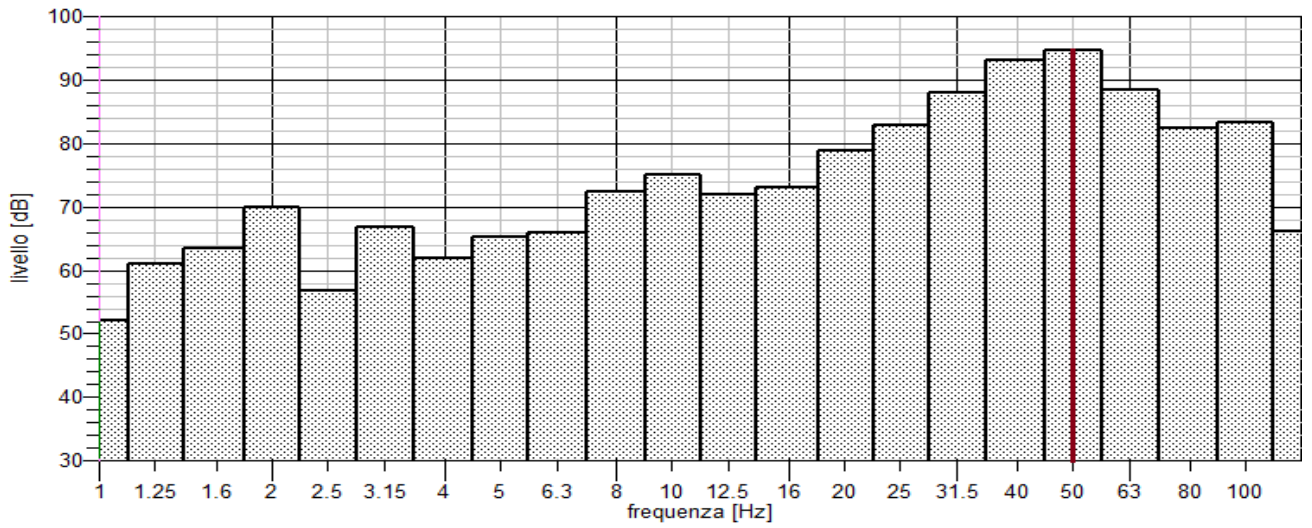


Fig. 175: Frequenza fondamentale della vibrazione all'istante 111 s

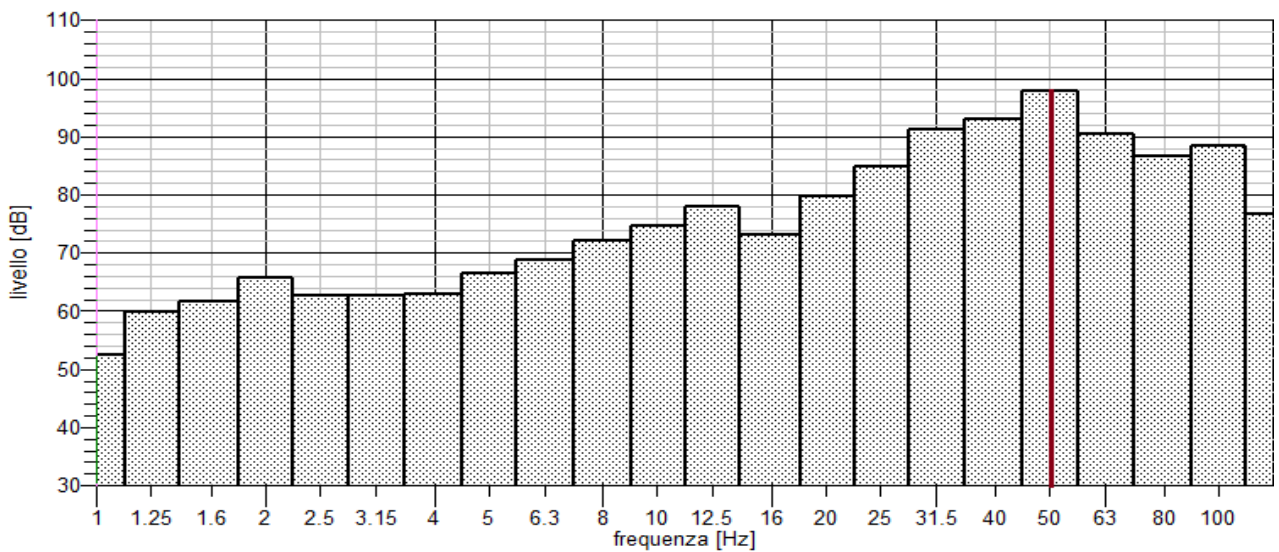


Fig. 176: Frequenza fondamentale della vibrazione all'istante 227 s

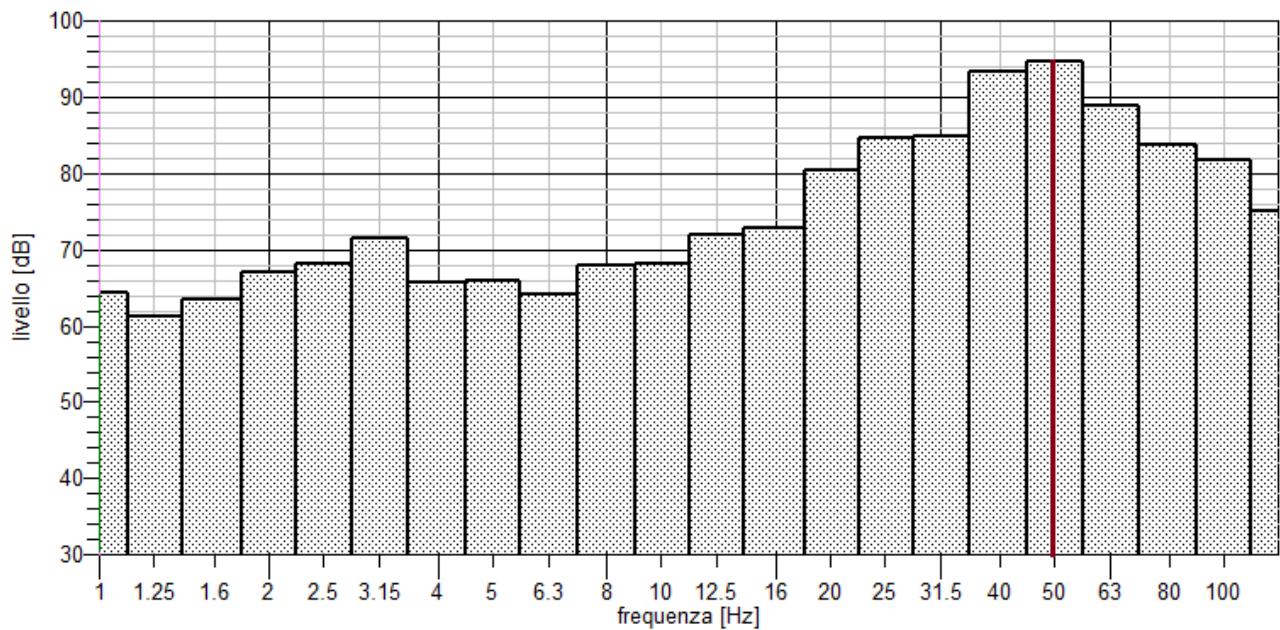


Fig. 177.: Frequenza fondamentale della vibrazione all'istante 388 s

Per le vibrazioni provocate nelle costruzioni dallo scoppio di mine dalle attività di macchine di cantiere e dal traffico su strada e ferroviario la normativa UNI9916 rimanda per i valori di riferimento alla SN 640312 (1992) La grandezza di riferimento è la velocità  $p-p$  cioè il picco nel tempo del modulo del vettore velocità La norma è applicabile solo alle vibrazioni di frequenza maggiore di 8 Hz. Tutti i restanti grafici sono riportati in appendice F.

**Valori di riferimento della velocità di vibrazione (p.p.v.) al fine di valutare l'azione delle vibrazioni transitorie sulle costruzioni**

Classe	Tipo di costruzione	Esposizione	Valori di riferimento per la velocità di vibrazione p.p.v. in mm/s		
			Posizioni di misura <sup>*)</sup>		
			Da 8 Hz fino a 30 Hz <sup>*)</sup>	Da 30 Hz fino a 60 Hz	Da 60 Hz fino a 150 Hz
A	Costruzioni molto poco sensibili (per esempio ponti, gallerie, fondazioni di macchine)	Occasionale Frequente Permanente	Fino a tre volte i valori corrispondenti alla classe C	Fino a tre volte i valori corrispondenti alla classe C	Fino a tre volte i valori corrispondenti alla classe C
B	Costruzioni poco sensibili (per esempio edifici industriali in cemento armato o metallici) costruiti a regola d'arte e con manutenzione adeguata	Occasionale Frequente Permanente	Fino a due volte i valori corrispondenti alla classe C	Fino a due volte i valori corrispondenti alla classe C	Fino a due volte i valori corrispondenti alla classe C
C	Costruzioni normalmente sensibili (per esempio edifici d'abitazione in muratura di cemento, cemento armato o mattoni, edifici amministrativi, scuole, ospedali, chiese in pietra naturale o mattoni intonacati) costruiti a regola d'arte e con manutenzione adeguata	Occasionale	15	20	30
		Frequente	6	8	12
		Permanente	3	4	6
D	Costruzioni particolarmente sensibili (per esempio monumenti storici e soggetti a tutela) case con soffitti in gesso, edifici della classe C nuovi o ristrutturati di recente	Occasionale Frequente Permanente	Valori compresi tra quelli previsti per la classe C e la loro metà	Valori compresi tra quelli previsti per la classe C e la loro metà	Valori compresi tra quelli previsti per la classe C e la loro metà
*) Le posizioni di misura devono essere scelte sugli elementi rigidi della struttura portante o dove sono attesi i maggiori effetti delle vibrazioni.					

Fig. 178 Prospetto originale D 5 norma UNI 9916

*b) Confronto valori*

Tabella 80 : confronto valori tra le due parti della misurazione

<b>PRIMA PARTE</b>			
<b>Istante [s]</b>	<b>p p v [m/s]</b>	<b>Frequenza fondamentale [Hz]</b>	<b>Valori limite di p p v secondo la UNI 9916 [m/s]</b>
2003	0.21	80	6
2228	0.20	80	6
2663	0.44	80	6
3307	0.36	80	6

3652	0.65	80	6
4200	0.67	63	6
4364	0.42	63	6

**SECONDA PARTE**

<b>Istante [s]</b>	<b>p.p.v.[m/s]</b>	<b>Frequenza fondamentale [Hz]</b>	<b>Valori limite di p.p.v.secondo la UNI.9916 [m/s]</b>
6	0.29	50	4
111	0.11	50	4
227	0.22	50	4
388	0.19	50	4

## 2.2.3 Campagna di misurazione in ambiente rurale

### 2.2.3.1 Sviluppo della campagna di misurazione

La campagna svolta nel contesto urbano, descritta precedentemente, è risultata estremamente utile per acquisire quella necessaria praticità con la strumentazione per realizzare le misure e avere un riscontro sperimentale sulla problematica in oggetto. In questa seconda campagna sono state confrontate alcune metodologie d'accoppiamento, raffigurate in figura 4.1, che prevedono differenti modalità di vincolo del dispositivo sul terreno:

A strumento vincolato al profilato metallico

B strumento vincolato al terreno per gravità

C dispositivo interrato ad una determinata profondità

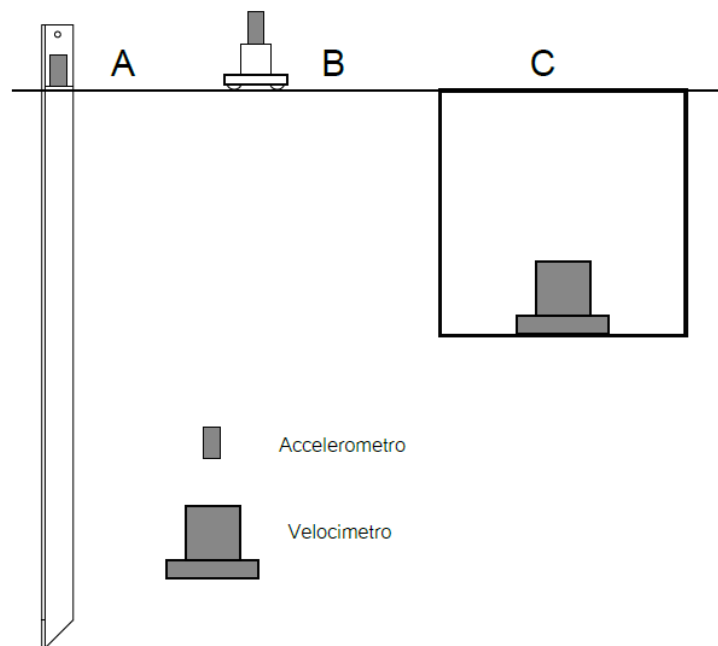


Fig. 179: le metodologie di misura a confronto

La figura 4.1 mostra i tre differenti metodi; il caso (A) idealmente corrisponde ad un incastro, che dovrebbe teoricamente garantire un perfetto grado di vincolo tra il trasduttore ed il terreno, oggetto della misura, il caso (B) mostra una massa vincolata per gravità su una superficie libera mentre il caso (C) è una misura di velocità effettuata con il velocimetro sotterrato ad una determinata profondità,



secondo le indicazioni della norma UNI 9916:2004 Per la realizzazione del lavoro, vi è stata una complessa e articolata fase di preparazione suddivisa tra le seguenti attività:

- scelta e realizzazione dei profilati metallici
- identificazione di una sorgente vibratoria adeguata alla sperimentazione
- scelta di un sito idoneo allo svolgimento delle misure

### 2.2.3.2 I profilati metallici

Come descritto nel primo capitolo, l'utilizzo del profilato metallico come supporto è oggetto di numerosi dibattiti scientifici, con opinioni contrastanti in merito alla loro effettiva applicabilità. Il supporto metallico è un elemento che deve garantire l'aderenza al terreno del dispositivo di misurazione senza alterare al tempo stesso il segnale in ingresso, in termini sia d'ampiezza del segnale che di contenuto in frequenza. Si è deciso di testare l'utilizzo dei supporti in questione per verificarne l'efficacia e capirne meglio le problematiche; uno dei problemi maggiormente riscontrabili durante l'attività sperimentale è la facilità con cui si riesce a vincolare il supporto all'elemento di cui si vogliono valutare le oscillazioni vibratorie, ossia, nel caso in questione, come si riesce ad inserire correttamente ed agevolmente il supporto nel terreno. Così, per avere un rapido e agevole inserimento nel terreno e al tempo stesso proteggere il dispositivo di misura, si è deciso di realizzare un profilato metallico con sezione ad L, corrispondente alla norma UNI 5783-66. Prima della realizzazione è stato analizzato il problema in tutti i suoi aspetti strutturali attraverso delle simulazioni, realizzate con il programma di simulazione COMSOL, fissando i seguenti parametri

- dimensioni del profilato
- dimensioni della piastrina su cui alloggiare il trasduttore
- distanza della piastrina dal terreno
- spessore del materiale

Questi parametri sono stati definiti sulla base delle dimensioni del trasduttore, un accelerometro mono-assiale piezoelettrico vincolato tramite magnete fissato con filettatura, in modo tale che esso possa essere fissato agevolmente e in modo sicuro sul profilato stesso. Il profilato ha lati a sezione ortogonale con una lunghezza 50mm con piastra d'alloggiamento per il dispositivo di (45\*45) mm<sup>2</sup> fissata a 100 mm dall'estremità superiore. Tali valori permettono d'avere una dimensione della superficie minima per fissare l'accelerometro mentre la distanza dall'estremità superiore consente di avere una protezione parziale dello strumento e del cavo di collegamento da eventuali urti accidentali. Lo spessore, è stato fissato a 5mm per motivi di produzione tecnologica (valore standard di

produzione), ritenendoli idonei a garantire una sufficiente robustezza del supporto La lunghezza di prova è stata fissata pari a 500mm.

## 1° SIMULAZIONE

La simulazione è stata realizzata, definite le dimensioni geometriche del supporto, al fine di studiare i modi propri della struttura e le frequenze associate Il programma di simulazione utilizza la metodologia FEM agli elementi finiti, utilizzata in numerosi casi per le analisi modali di tutte le tipologie di strutture La prima prova è stata realizzata sotto l'ipotesi che il supporto non sia incastrato nel terreno ma semplicemente appoggiato, quindi libero di muoversi La figure seguenti riportano la simulazione realizzata con le relative frequenze proprie, definite auto-frequenze, evidenziando, attraverso una scala cromatica, lo stato di sollecitazione a cui viene sottoposta la superficie in esame Generalmente l'interesse maggiore è rivolto alla prima auto- frequenza, che caratterizza al meglio il sistema ma per maggiore accuratezza vengono analizzate le prime 3 frequenze proprie di sollecitazione di seguito riportate con i rispettivi grafici (sono riportati quelli della prima simulazione, i rimanenti sono riportati in appendice H).

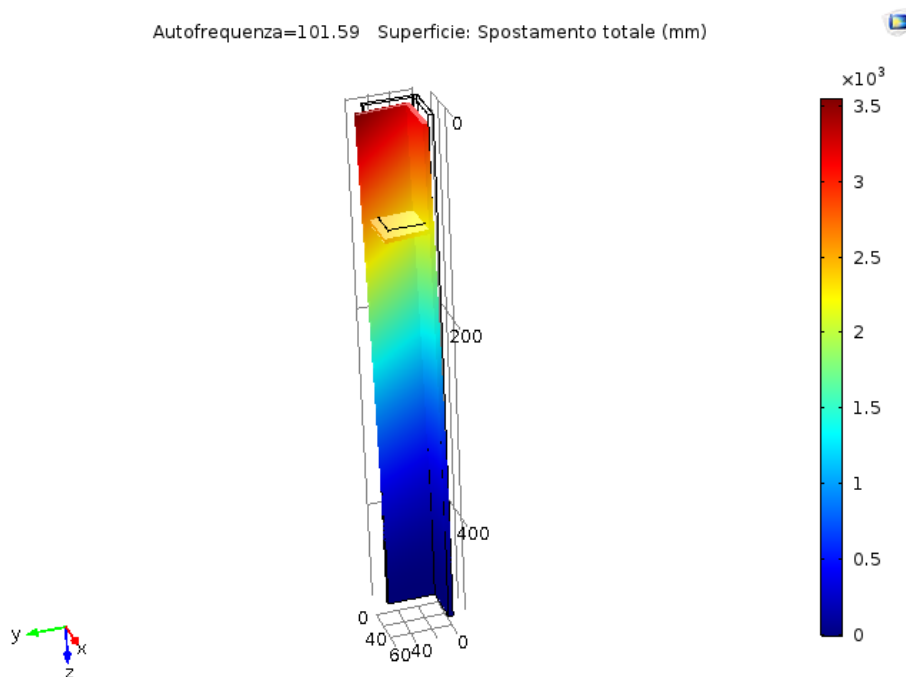


Fig. 180: grafico della prima auto-frequenza

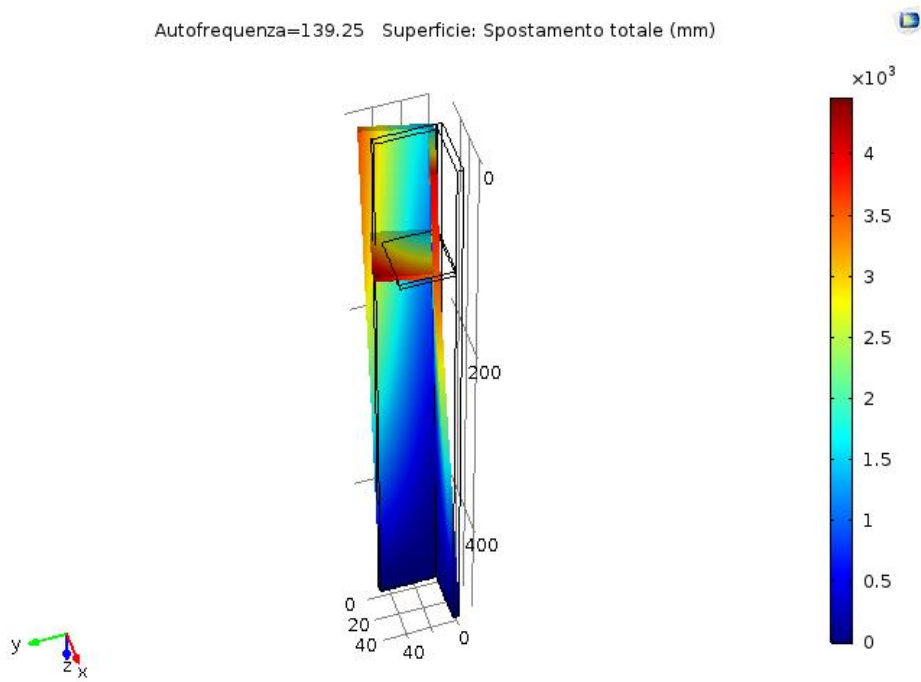


Fig. 181: grafico della seconda auto-frequenza

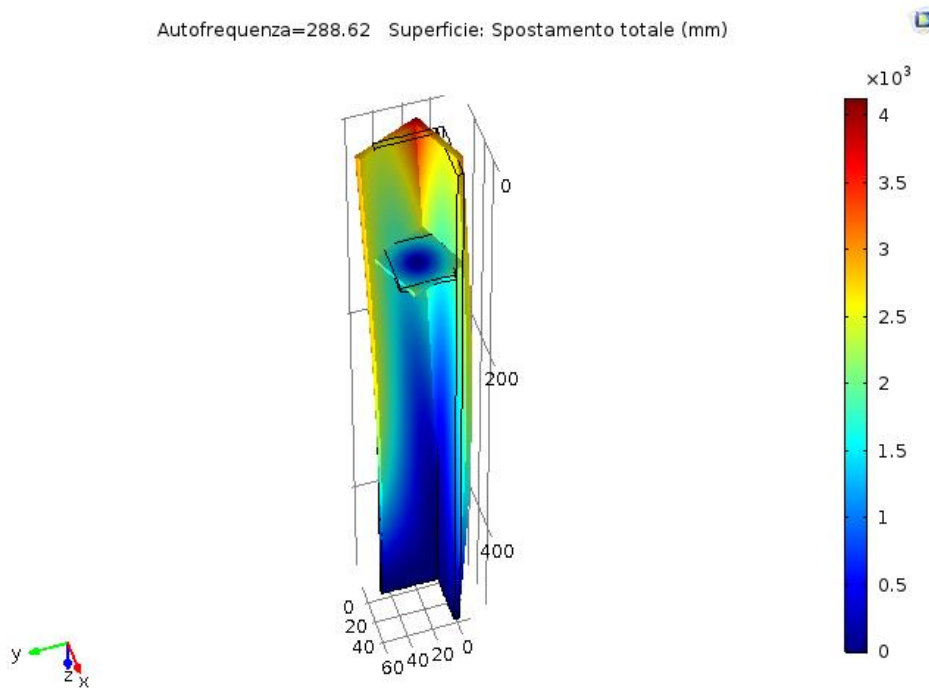


Fig. 182: grafico della terza auto-frequenza

Le immagini mostrano, secondo una scala cromatica riportata sulla destra dell'immagine, lo stato di sollecitazione del materiale e quindi della deformazione che si può manifestare. La prima frequenza mostra un momento flettente del supporto (asse  $x$  e  $y$ ) sulla sommità della struttura, particolare sulla

piastra d'alloggiamento dell'accelerometro; la seconda e la terza evidenziano invece una sollecitazione di tipo torsionale (asse  $z$ ) ma ridotta.

## 2° SIMULAZIONE

La prima simulazione è stata eseguita sotto l'ipotesi ideale di profilato appoggiato sul terreno senza nessun tipo di vincolo. Nella realtà il supporto deve essere inserito nel terreno, formando così un sistema equivalente ad un incastro. In questa situazione si hanno due parti che rispondono in modo differente ad una sollecitazione; la parte esterna è un elemento a due gradi di libertà mentre quella inserita nel terreno è teoricamente perfettamente vincolata. Nella realtà ovviamente non è così in quanto qualsiasi modalità di fissaggio, non permette un perfetto vincolo. Sulla base di queste considerazioni sono state realizzate altre 5 simulazioni con un profilato delle stesse dimensioni geometriche della prima simulazione e ipotizzando profondità d'inserimento via via crescenti. La prima è stata svolta ipotizzando 10 cm d'inserimento nel terreno (parte teoricamente perfettamente vincolata), lasciando così una parte libera di 40cm. I grafici delle relative simulazioni sono riportati in appendice H. I risultati mostrano che al diminuire della superficie uscente dal terreno si ha un aumento delle frequenze proprie di risonanza. La parte strutturale maggiormente interessata dallo stato di sollecitazione è quella superiore, in particolare la piastrina di supporto, e, all'aumentare della frequenza propria di sollecitazione, si verifica una generale diminuzione dello stato di sollecitazione del materiale.

## 3° SIMULAZIONE

La terza simulazione è stata svolta con l'inserimento del supporto ad una profondità di 20 cm al fine d'approfondire la risposta propria del supporto e trovare un valore di profondità da applicare nella campagna sperimentale. Anche in questo caso è apparso evidente un aumento delle frequenze proprie di risonanza all'aumentare della profondità. Risulta sicuramente interessante il fatto che la prima autofrequenza mostra uno stato di sollecitazione, nella parte d'alloggiamento dell'accelerometro prossima alle due superfici ortogonali, sensibilmente inferiore. Questo aspetto incoraggia il proseguo del lavoro con l'ipotesi di un ulteriore profondità d'inserimento.

## 4° SIMULAZIONE

Sulla base di quanto esposto si è proseguita a profondità d'inserimento a 30 cm e, sempre in appendice H, si riportano i grafici delle simulazioni. Questa prova mostra come la strada intrapresa sia efficace nell'avere una superficie d'appoggio dell'accelerometro il meno sollecitata possibile. Si conferma un

aumento delle frequenze proprie all'aumentare della superficie vincolata, corrispondente ad un aumento della profondità d'inserimento nel terreno.

## 5° SIMULAZIONE

L'ultima simulazione è stata realizzata portando la piastra di fissaggio a 1 cm dal terreno, avendo quindi inserito quasi del tutto il profilato all'interno del terreno. La parte di struttura libera risultata mostra che. I risultati della simulazione confermano come all'aumentare della profondità del profilato nel terreno, e quindi della superficie vincolata per incastro, aumenti il valore delle auto-frequenze. Tale soluzione permette d'ottenere una piastra di supporto che mostra valori nulli di deformazione e quindi idonea per poter effettuare le misurazioni. La distanza dalla terra di 1cm è stata mantenuta al fine d'evitare qualsiasi influenza del terreno. Tutte le simulazioni fin qui trattate mostrano come i modi a cui si riferiscono le frequenze proprie si manifestano sia come torsionale che flessionali a tutte le auto-frequenze, ossia sono modi accoppiati.

### 2.2.3.3 Prove sperimentali

Sulla base delle prove effettuate si è deciso di realizzare i profilati di supporto secondo i parametri geometrici impostati, ossia dimensioni dei lati pari a 50mm, spessore 5mm, piastrina quadrata di lati (45 \* 45) mm<sup>2</sup> e spessore di 5mm saldata a 100mm dall'estremità superiore del supporto per consentire l'alloggiamento dello strumento mentre la lunghezza è variabile per ciascun profilato. Per facilitare la penetrazione nel terreno, sul lato inferiore del supporto è effettuato un invito a V con due intagli a quarantacinque gradi, mentre in prossimità della sommità, al fine di facilitare la rimozione, è stato eseguito un foro di 10mm di diametro per permettere l'inserimento di un gancio d'estrazione. La dimensione dei profilati è standard in moduli da 6 metri di lunghezza; quindi, una volta acquistati, sono stati avviati ad un laboratorio specializzato per il taglio e la successiva lavorazione per avere le specifiche richieste. Tutte le caratteristiche fin qui richieste sono riportate nella tabella seguente.

*Tabella 81: Sigla, massa e lunghezze di ciascun profilato*

<b>Codice</b>	<b>Massa(kg)</b>	<b>Lunghezza(mm)</b>
P1	1.9	500
P2	2.8	750
P3	3.8	1000
P4	4.7	1250

Uno dei problemi maggiori che si può avere durante la fase d'inserimento del supporto nel terreno, è la deformazione del materiale conseguente alla battitura. Così, durante la fase di fissaggio, viene appoggiato uno spessore di legno sulla sommità del supporto, al fine di contenere le possibili deformazioni dovute ai colpi di battitura. Invece, per l'estrazione al termine delle misure, viene impiegato un sistema composto da due cric che, contrapposti in modo adeguato, riescono ad esercitare una sufficiente pressione su un perno inserito nel foro realizzato vicino la sommità del palo. La superficie d'alloggiamento di ciascun profilato è stata attentamente levigata al fine di renderla il più possibile omogenea e creare le migliori condizioni d'aderenza possibili dello strumento con la superficie.

### *a) Identificazione della sorgente*

Il secondo passo è stato quello d'individuare una sorgente vibratoria adeguata per la comparazione tra le varie metodologie. Il principio adottato è stato quello di poter realizzare segnali vibratorii di intensità contenuta, o meglio che non ricadessero nella casistica indicata dalla norma UNI9916 (accelerazioni maggiori di 1g), per avere un primo riscontro sulla risposta del sistema di montaggio. Le principali tipologie di sorgenti vibratorie sono:

- grandi industrie
- industria estrattiva
- cantieri edili
- traffico veicolare
- traffico ferroviario
- traffico tramviario

Si è deciso di procedere per una sorgente vibratoria da traffico ferroviario per le seguenti ragioni:

- le caratteristiche morfologiche in prossimità della linea ferroviaria facilitano l'inserimento del terreno dei profilati metallici e il seppellimento del trasduttore
- la facilità d'accesso ai punti di misurazione
- la previsione di una buona ripetibilità del fenomeno vibratorio, con discreta regolarità delle ampiezze di vibrazione attese
- la definizione di una finestra temporale in cui poter considerare il fenomeno come stazionario, ipotesi che non è possibile con altri tipi di sorgenti, come le volate nelle attività estrattive o nel caso di traffico veicolare

## *b) Scelta del sito*

Per l'identificazione del sito di misurazione, si è proceduto identificando dapprima le principali tratte ferroviarie uscenti da Roma, focalizzandosi, attraverso l'uso di google earth, sulle località in prossimità delle tratte individuate ritenute potenzialmente adeguate per lo svolgimento delle prove. Una prima valutazione, su una distanza massima di 25km dal Grande Raccordo Anulare ha portato all'individuazione di 30 siti, dove è stato svolto un sopralluogo per valutare la corrispondenza ai seguenti requisiti:

- regolarità da un punto di vista morfologico e stratigrafico
- spazio sufficiente per poter inserire tutta la strumentazione
- assenza di fattori esterni di disturbo
- facilità di accesso
- tracciato ferroviario a raso (facoltativo)
- accesso ad una fonte di energia per l'alimentazione degli strumenti

L'identificazione del sito è stata molto lunga e complessa a causa delle innumerevoli problematiche che si sono manifestate in diverse occasioni. A titolo di esempio si riporta quanto di seguito accaduto: è stato scelto un sito, tramite google earth, apparentemente idoneo poiché soddisfaceva in pieno tutti i requisiti sopraesposti, ad eccezione della fornitura dell'energia per gli strumenti. Così è stata effettuata una ricognizione con una prima misura di prova; il luogo, mostrato nelle immagini di figura 4.3, si trova sulla direttrice Roma-Orte, al km 21 della SS4 ed era stato ritenuto particolarmente interessante poiché la tratta ferroviaria oggetto dell'analisi è percorsa, oltre che dai treni per passeggeri, anche da treni merci che garantiscono livelli di segnali di vibrazione adeguati allo scopo del lavoro. Dopo aver effettuato una prima misura di prova, si è deciso di non rimuovere il profilato, lasciandolo in loco con una protezione di plastica, in attesa dell'inizio della campagna sperimentale che sarebbe avvenuto pochi giorni dopo. La sera stessa si è abbattuto un violento temporale che ha causato l'allagamento della zona a tal punto che il recupero del profilato è stato possibile solamente dieci giorni dopo.



*Fig. 183: visuale da google earth del sito oggetto del primo sopralluogo*



*Fig. 184: particolare panoramica del sito*

A causa della lunga impraticabilità del terreno e del timore che tale imprevisto si verificasse di nuovo, si è deciso di cambiare sito e, grazie alla disponibilità di RFI S.p.A. che ha prontamente accolto la richiesta di collaborazione fornendo un sito idoneo e assistenza necessaria per poter effettuare le misurazioni Il sito consiste in una zona rurale di proprietà delle ferrovie dello stato destinata esclusivamente all'attività sperimentale, localizzato al Km 91 della tratta ad alta velocità Roma-Napoli, contrada Farneta 36, 03020, Castro dei Volsci, FR Come si può vedere nella figura 4 2 , la zona oggetto del lavoro è divisa in due aree, contraddistinte con (A) e (B); la prima è prossima al binario in direzione dispari mentre la seconda in direzione pari (per convenzione il binario pari è quello in cui transita qualsiasi treno diretto come se dovesse recarsi a Parigi mentre quello dispari è ovviamente quello in direzione opposta) Si è scelta la zona A principalmente per la facilità dell'accesso al sito e la possibilità d'avere la fornitura di corrente elettrica, potendo così garantir la continuità delle misure Il cerchio rosso evidenzia l'area in cui si sono stati posizionati gli strumenti





Fig. 185: veduta aerea del sito RFI Fonte immagine: Google

### c) Strumentazione impiegata

Stessa strumentazione campagna precedente La strumentazione impiegata per il confronto dei metodi d'accoppiamento consiste in :

- tre accelerometri mono-assiali ICP 393A03 della PCB Piezotronics
- velocimetro triassiale Sinus 3D Seismometer
- sound-book con quattro canali

Lo svolgimento delle misurazioni è avvenuto in tre differenti fasi sulla base dei criteri riportati di seguito:

- valutazione dei valori d'accelerazione nelle tre direzioni ortogonali secondo il sistema di riferimento standard al fine di individuare la direzione interessata dal livello di vibrazioni maggiore e stabilire gli assi su cui effettuare la comparazioni successive
- confronto del segnale di risposta dei quattro profilati, descritti nella sezione 4 3, in termini di ampiezza di vibrazione lungo lo stesso asse di sollecitazione

Tale comparazione è stata effettuata mediante accelerometri mono-assiali, strumenti estremamente flessibili e facilmente installabili sulle superfici dei profilati metallici Potendo disporre al momento del lavoro solamente di tre accelerometri, i confronti sono stati effettuati simultaneamente su un asse alla volta, acquisendo dapprima il segnale e successivamente elaborando dati

- confronto tra le diverse metodologie di misura: in questa fase prevede il confronto tra i valori misurati con l'accelerometro montato sul profilato con il segnale acquisito dal velocimetro

interrato ad una profondità di  $(40 \pm 50)$ cm La disposizione degli strumenti è mostrata nella figura seguente

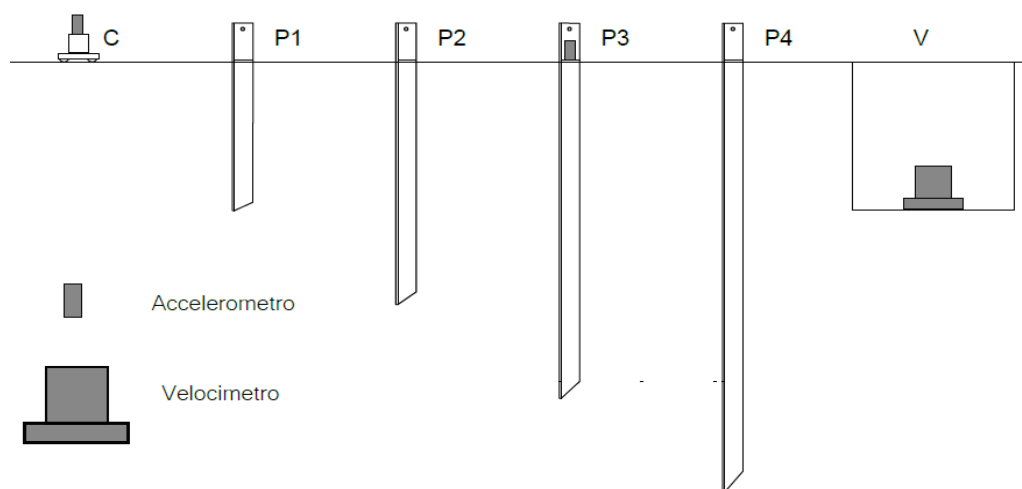


Fig. 186: disposizione degli strumenti

#### 2.2.3.4 Le giornate di misura

Tutte le misurazioni sono state eseguite in accordo al sistema di riferimento standard per le misurazioni nel terreno; asse  $z$  - direzione perpendicolare al terreno, asse  $x$  - direzione ortogonale all'asse della linea ferroviaria e asse  $y$  ortogonale a quest'ultimo. Ad eccezione della misura svolta il primo giorno, effettuata nella fase d'identificazione degli assi di confronto, tutte le altre misure sono state fatte lungo le direzioni  $z$  e  $x$ .

##### *Missione I*

Durante la prima giornata ci si è recati sul campo di misura RFI descritto precedentemente e si è effettuata l'installazione dei profilati P1, P2, effettuando una prima misura caratterizzando la sorgente come da cronoprogramma descritto precedentemente. L'inserimento è avvenuto in modo agevole a equidistanza dalla ferrovia in condizioni climatiche serene, ci si è assicurati l'alimentazione da sorgente elettrica per la strumentazione e si è proceduto con i primi confronti riportati di seguito. La strumentazione a disposizione ha permesso un confronto tra tre canali che hanno acquisito contemporaneamente il segnale in ingresso. Nelle seguenti figure sono visibili gli accelerometri installati sulla terna accelerometrica e una tabella che sintetizza le diverse configurazioni di misurazione effettuate, con i relativi confronti.



Fig. 187: accelerometri montati sul cubo (terna)



Fig. 188: accelerometro montato su profilato metallico

## **Misura 1**

Tabella 82 : caratteristiche di montaggio per ciascun canale nella misurazione 1

<b><i>CANALE</i></b>	<b><i>ASSE CONFRONTO</i></b>	<b><i>SUPPORTO</i></b>	<b><i>TIPO DI COLLEGAMENTO</i></b>
<i>CH1</i>	<i>Z</i>	Terna	coll filettato
<i>CH2</i>	<i>Y</i>	Terna	coll filettato
<i>CH3</i>	<i>X</i>	Terna	coll filettato

La prima misurazione è stata realizzata al fine d'avere una prima idea della tipologia di sollecitazione  
I punti di misurazione sono rimasti sempre gli stessi durante tutta la giornata

## **Misura 2**

Tabella 83 : caratteristiche di montaggio per ciascun canale nella misurazione 2

<b><i>CANALE</i></b>	<b><i>ASSE CONFRONTO</i></b>	<b><i>SUPPORTO</i></b>	<b><i>TIPO DI COLLEGAMENTO</i></b>
<i>CH1</i>	Z	P2	magnete permanente
<i>CH2</i>	Z	P1	magnete permanente
<i>CH3</i>	Z	Terna	coll filettato

Dopo la prima misura realizzata sullo stesso tipo di supporto, la terna, è iniziato il confronto con i profilati metallici, partendo con i primi due perché, essendo più corti, sono stati inseriti rapidamente. La superficie della piastrina d'alloggiamento dello strumento di ciascun profilato è stata attentamente pulita prima dell'inserimento dello strumento al fine di rimuovere materiale che influenzasse l'azione di fissaggio del magnete.

## **Misura 3**

Tabella 84 : caratteristiche di montaggio per ciascun canale nella misurazione 3

<b><i>CANALE</i></b>	<b><i>ASSE CONFRONTO</i></b>	<b><i>SUPPORTO</i></b>	<b><i>TIPO DI COLLEGAMENTO</i></b>
<i>CH1</i>	Z	P2	magnete permanente
<i>CH2</i>	Z	P1	magnete permanente
<i>CH3</i>	Z	Terna	coll filettato

Questa misura è stata realizzata come la precedente ma è stato necessario aumentare il guadagno nelle impostazioni poiché è stato registrato un *overload*. Questo fenomeno si manifesta nel caso in cui lo strumento possa superare gli estremi del campo di misura, causando l'invalidazione della misurazione.

## **Misura 4**

Tabella 85 : caratteristiche di montaggio per ciascun canale nella misurazione 4

<b><i>CANALE</i></b>	<b><i>ASSE CONFRONTO</i></b>	<b><i>SUPPORTO</i></b>	<b><i>TIPO DI COLLEGAMENTO</i></b>
<i>CH1</i>	X	P2	magnete permanente
<i>CH2</i>	X	P1	magnete permanente
<i>CH3</i>	X	Terna	coll filettato



Dopo le prime tre misurazioni, è stato cambiato l'asse di confronto portandolo lungo X. Le modalità di misura sono rimaste sempre le stesse

## **Misura 5**

*Tabella 86 : caratteristiche di montaggio per ciascun canale nella misurazione 5*

<b><i>CANALE</i></b>	<b><i>ASSE CONFRONTO</i></b>	<b><i>SUPPORTO</i></b>	<b><i>TIPO DI COLLEGAMENTO</i></b>
<i>CH1</i>	Z	P2	magnete permanente
<i>CH2</i>	Z	P1	magnete permanente
<i>CH3</i>	Z	Terna	coll filettato

Questa misurazione è stata realizzata reimpostando le stesse condizioni della misurazione 3

### *Missione II*

La seconda giornata sono continuate le misure su Terna-P1-P2 mentre sono stati installati i profilati P3 e P4. Nonostante gli accorgimenti adottati, nella fase d'inserimento nel terreno, si sono manifestate delle deformazioni sulla sommità del profilato



*Fig. 189: deformazione sull'estremo superiore del profilato P4*

Nella seconda parte della giornata sono iniziate le misure su Terna-P3-P4 mentre è iniziato lo scavo per il seppellimento del velocimetro. Al fine d'evitare l'invalidazione delle misurazioni a seguito degli over-load, come nel caso della Misura 3 della Missione I, la misurazione non è avvenuta in modo

continuo ma è stata intervallata da interruzioni prestabilite al fine di verificare la corretta acquisizione su software e analizzare immediatamente eventuali anomalie

## **Misura1**

*Tabella 87 : caratteristiche di montaggio per ciascun canale nella misurazione 1*

<b><i>CANALE</i></b>	<b><i>ASSE ACCELEROMETRO</i></b>	<b><i>SUPPORTO</i></b>	<b><i>TIPO DI COLLEGAMENTO</i></b>
<i>CH1</i>	<i>Z</i>	<i>Terna</i>	<i>coll filettato</i>
<i>CH2</i>	<i>Z</i>	<i>P1</i>	<i>magnete permanente</i>
<i>CH3</i>	<i>Z</i>	<i>P2</i>	<i>magnete permanente</i>

## **Misure 2-3-5**

*Tabella 88 : caratteristiche di montaggio per ciascun canale nella misurazione 2,3 e 5*

<b><i>CANALE</i></b>	<b><i>ASSE ACCELEROMETRO</i></b>	<b><i>SUPPORTO</i></b>	<b><i>TIPO DI COLLEGAMENTO</i></b>
<i>CH1</i>	<i>Z</i>	<i>Terna</i>	<i>coll filettato</i>
<i>CH2</i>	<i>Z</i>	<i>P3</i>	<i>magnete permanente</i>
<i>CH3</i>	<i>Z</i>	<i>P4</i>	<i>magnete permanente</i>

## **Misura 4: come Misura 2 lungo assi x**

### *Missione III*

In questa giornata sono proseguiti i confronti con le misure ottenute con la terna accelerometrica e i profilati metallici e, contemporaneamente, si è completato lo scavo per il seppellimento del velocimetro, come mostrato in figura 4 7 (a) Il posizionamento è avvenuto con la seguente procedura:

- Posizionamento del velocimetro sul fondo dello scavo
- Regolazione della posizione con la messa in bolla per garantire un corretto funzionamento dello strumento
- Sotterramento dello strumento con particolare premura di non alterare la posizione

La prima parte della giornata è avvenuta secondo le modalità delle giornate precedenti utilizzando gli accelerometri al fine ampliando la casistica dei giorni precedenti, nel primo pomeriggio sono iniziate le misure con il velocimetro



Fig. 190: seppellimento del traduttore nel terreno

### 2.2.3.5 Risultati

#### *Missione I*

- **Misura 1**
- 

La prima giornata di misurazione è stata realizzata allo scopo di caratterizzare i livelli di vibrazione indotti dal transito dei treni ad alta velocità sulle tre direzioni da indagare avere un'idea del fenomeno in esame

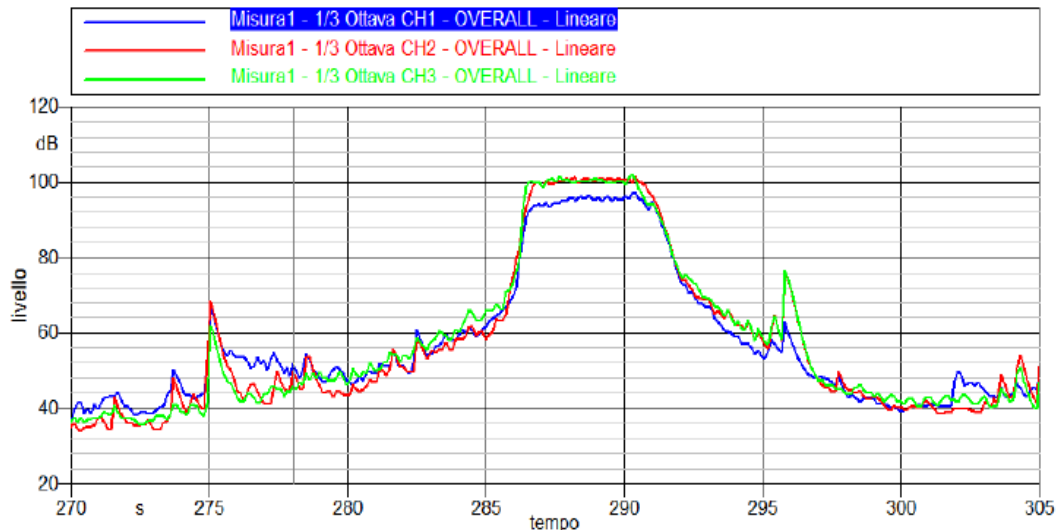


Fig. 191: misura sulla terna accelerometrica montata su terna accelerometrica

Il grafico in figura rappresenta l'andamento del segnale vibratorio lungo i tre assi  $x, y$  e  $z$ , di colore, rispettivamente blu, rosso e verde. Come si vede in figura X, l'evento è caratterizzato da tre fasi principali

- un transitorio iniziale dovuto all'avvicinamento del treno
- una fase di passaggio del convoglio di fronte al luogo in cui si effettua la misura. In questo intervallo il segnale lo si può considerare stabilizzato e quindi approssimarlo come se fosse un moto stazionario
- la parte del segnale finale che descrive l'allontanamento del treno si allontana e il moto si smorza fino a raggiungere il livello del rumore di fondo

Il grafico mostrato in figura mostra un livello di sollecitazione misurato sull'asse  $z$  (di colore blu) minore, contrariamente a quanto atteso. Infatti, dagli studi già presenti in letteratura e dalla precedente campagna, è sempre risultato come asse dominante quello verticale nei tracciati a raso ma in questo caso, essendo il tracciato ferroviario in rilevato, si ha un discostamento dai risultati previsti.



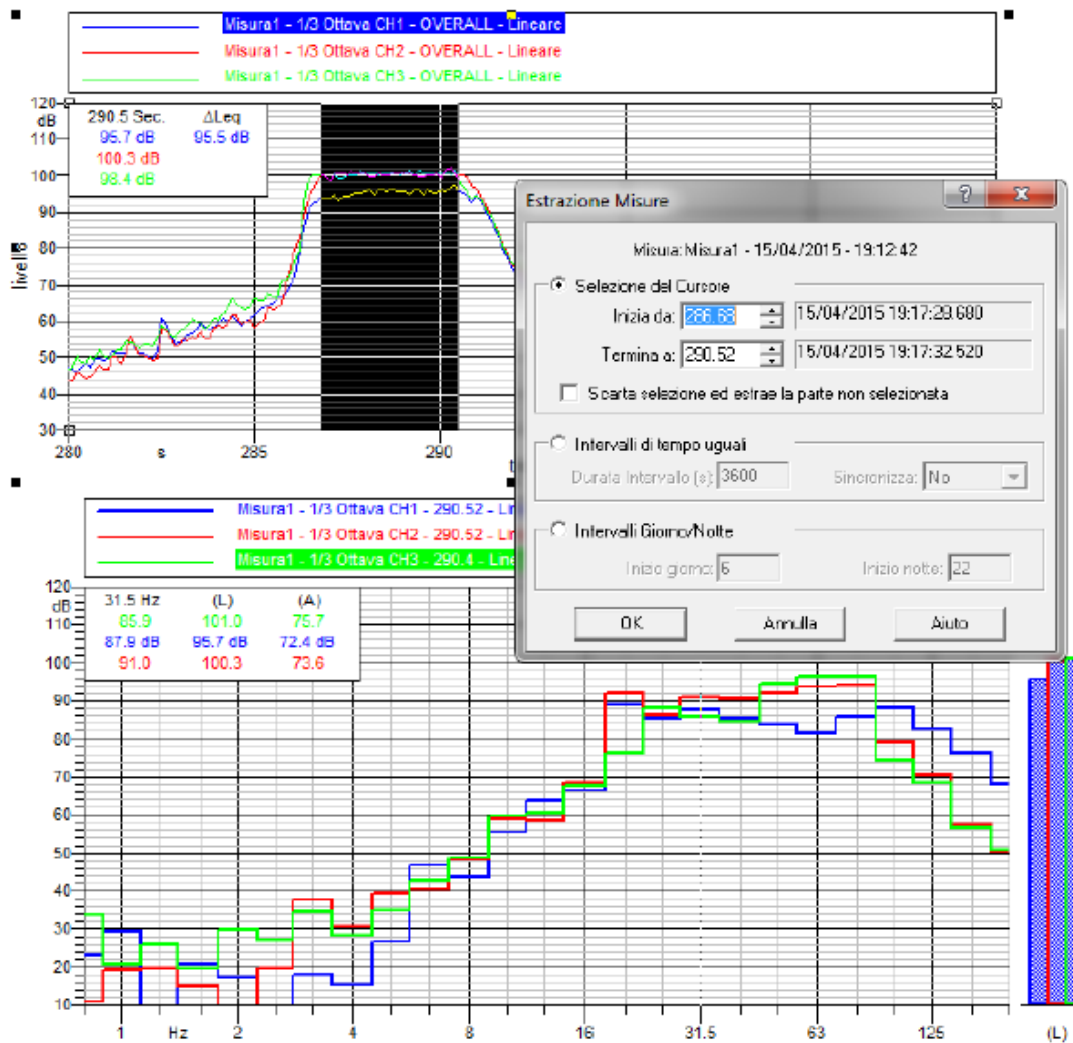


Fig. 192: estrazione dell'evento dall'History plot del software Noise Vibration Work

Nella figura sopra riportata si vede parte della procedura utilizzata per caratterizzare l'evento Il grafico sopra è un ingrandimento sull'asse delle ordinate dello storico dell'andamento dei livelli di accelerazione in RMS nel dominio del tempo La parte evidenziata in nero sta venendo spezzata dal resto della misura per essere analizzata e valutata separatamente Il grafico in basso, sempre nella figura 5 2, in questa immagine mostra i livelli di accelerazione medi dell'evento relativi ad ogni terzo di banda d'ottava in cui è stato analizzato il segnale

## Misura 2

In questa misura è stato effettuato il confronto tra la terna e i profilati P1 e P2, lungo l'asse verticale z. Il primo convoglio è giunto in prossimità del punto di misurazione appena terminata la fase di montaggio degli accelerometri (gli strumenti sono stati montati a inizio di ciascuna giornata e rimossi alla fine delle misurazioni); il grafico evidenzia chiaramente il transitorio iniziale (1-2 minuti, secondo le indicazioni fornite dal costruttore) necessario all'accelerometro per la stabilizzazione del segnale. Passato un tempo sufficiente a risolvere questo problema, si è misurato un secondo transito ma il software Samurai ha evidenziato un over-load e quindi la misurazione è stata interrotta per modificare il guadagno dello strumento. In figura 5.3 si vede il secondo evento della misura, con evidenziate le differenze degli spettri equivalenti dei livelli misurati dalla terna (verde) e dai profilati P1 e P2 (rispettivamente rosso e blu).

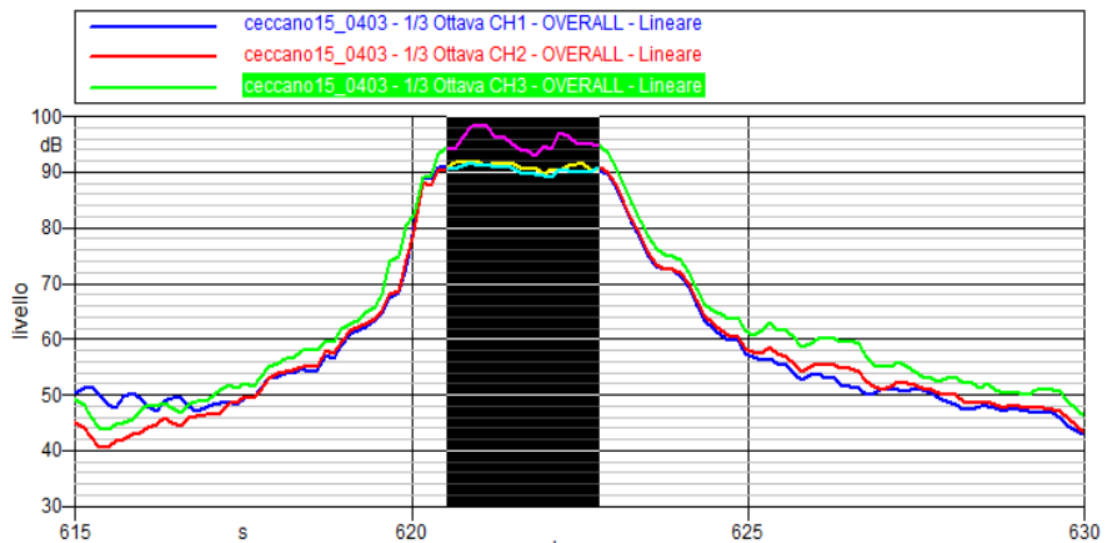


Fig. 193: particolare del segnale del transito del treno

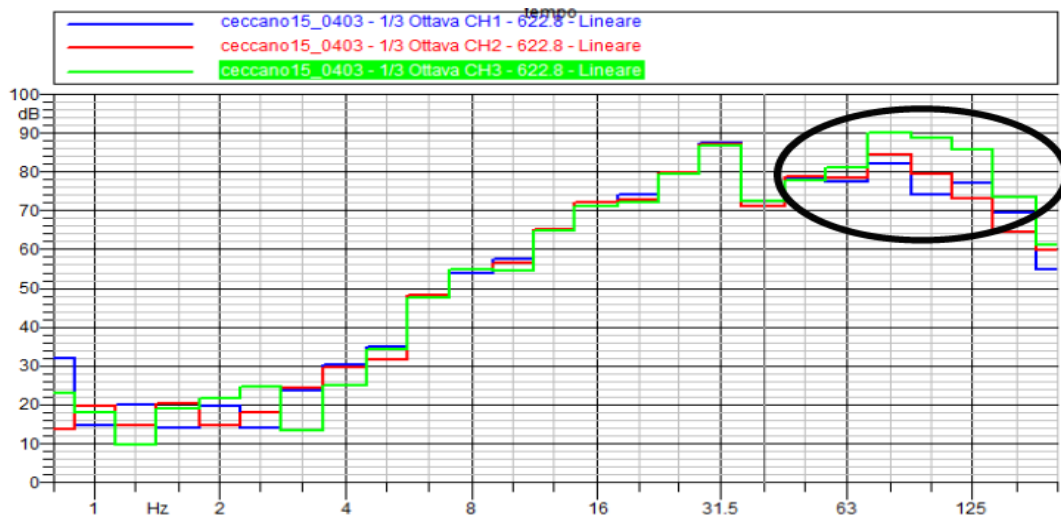


Fig. 194: evidenze del segnale alle alte frequenze (1/3 bande d'ottava)

### Misura 3

In questa misura, uguale alla precedente, si è osservato un evento singolare del quale non si è potuta determinare la causa, evidenziato in figura 5 4, che ha alterato la misura

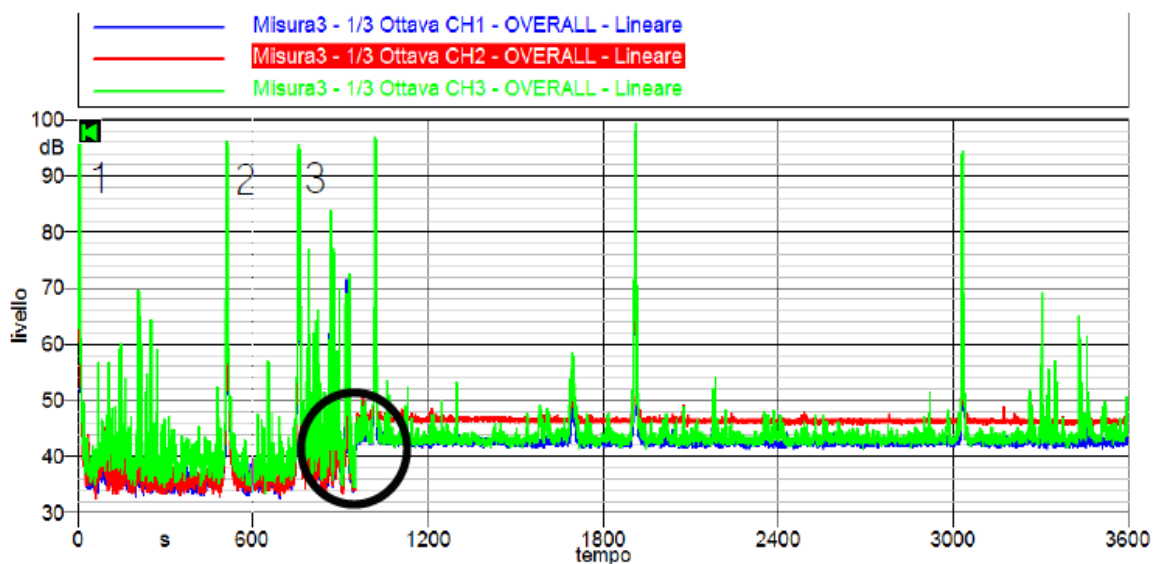


Fig. 195: anomalie registrate evidenziate nel cerchio

Nelle figure seguenti, si mettono a confronto tre differenti eventi, sia come Time- History che come spettri in frequenza; il primo grafico rappresenta il segnale all'avviamento dello strumento, mostrando

i tipici transitori a bassa frequenza e una diminuzione del livello vibratorio misurato sui profilati a partire dai 50 Hz, con una differenza rilevante oltre gli 80 Hz

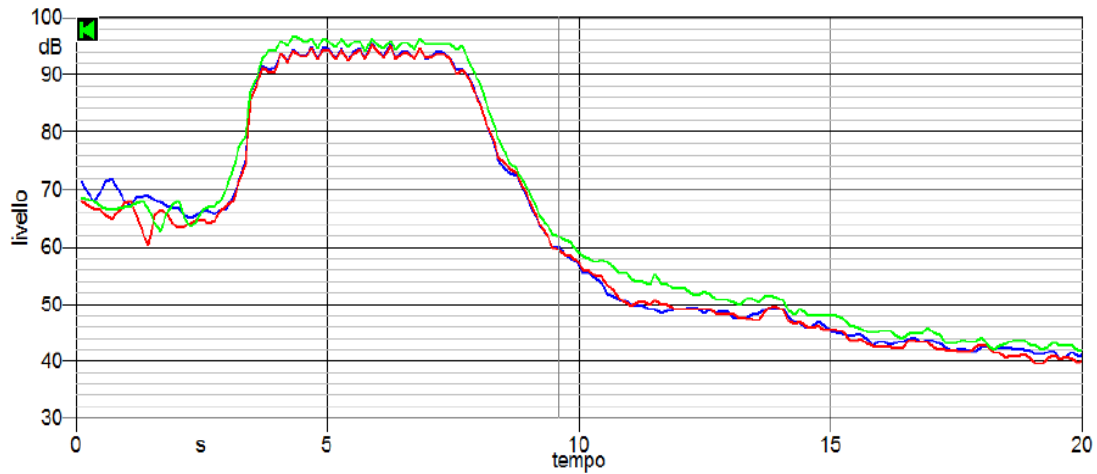


Fig. 196: Time History dell'evento 1

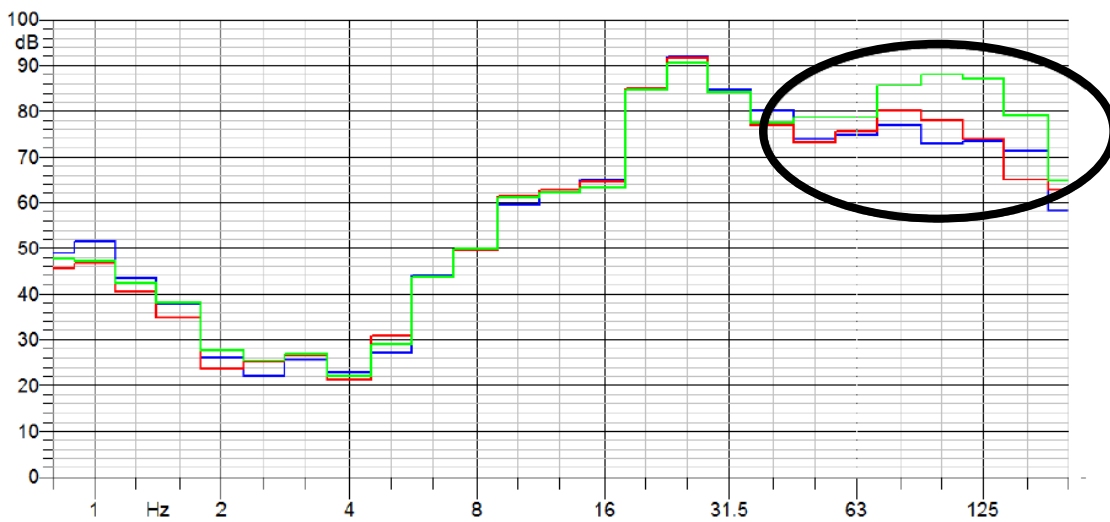


Fig. 197: spettro in frequenza (1/3 bande d'ottava) evento 1 con evidenze del segnale alle alte frequenze

Le altre misurazioni poste a confronto evidenziano effetti molto simili a quelli sopra citati per la prima misurazione, sia come asse di sollecitazione che come diminuzione alle alte frequenze dei livelli vibratorio lungo le direzione  $x$  e  $y$

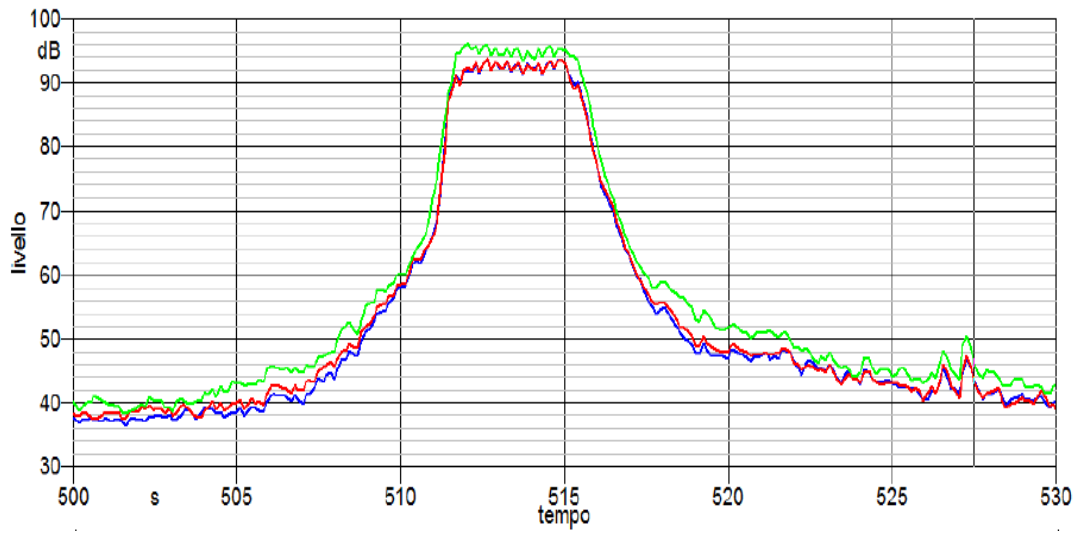


Fig. 198: Time History evento 2 lungo i tre assi di riferimento

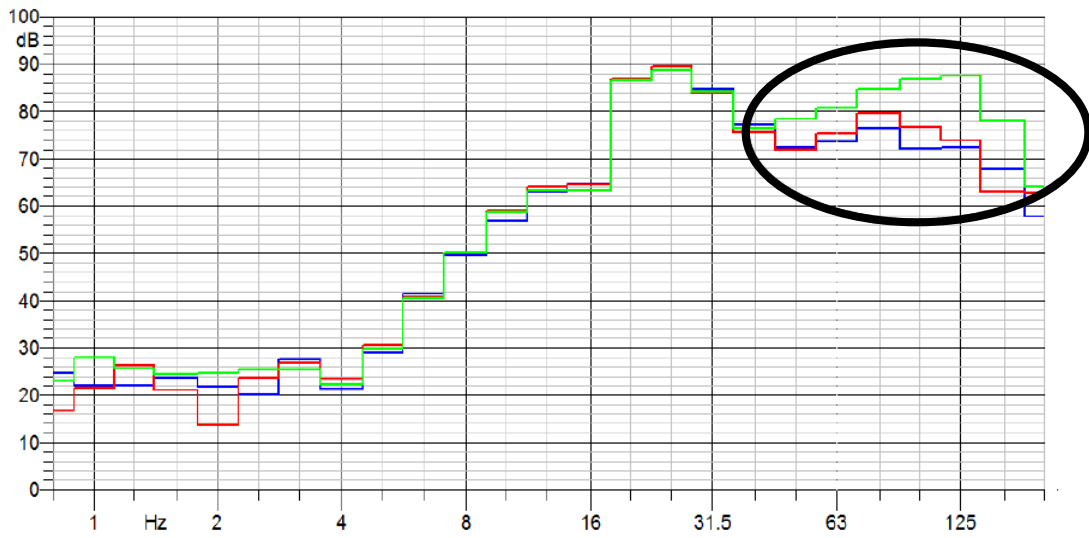


Fig. 199: spettro in frequenza (1/3 bande d'ottava) evento 2 con evidenziati livelli alte frequenze

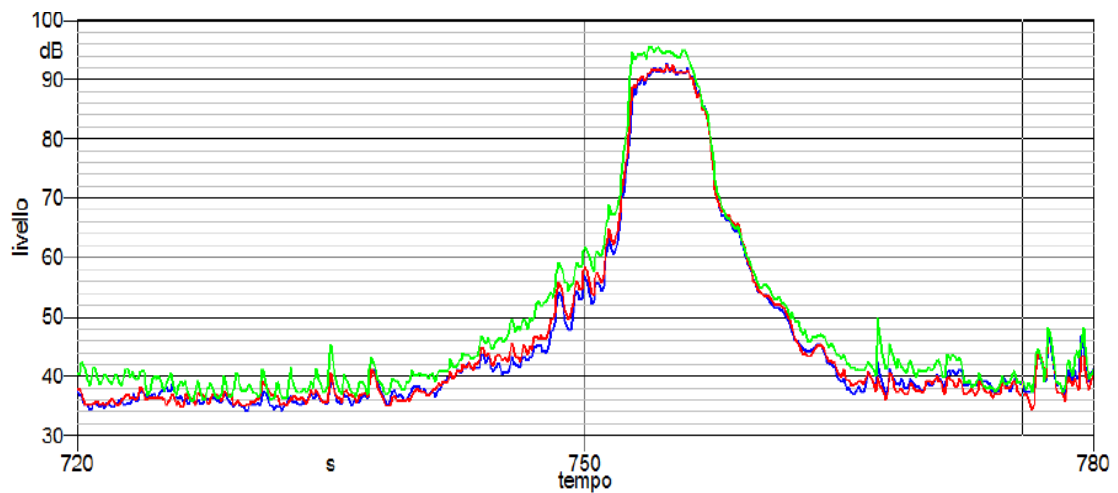


Fig. 200: time history evento 3

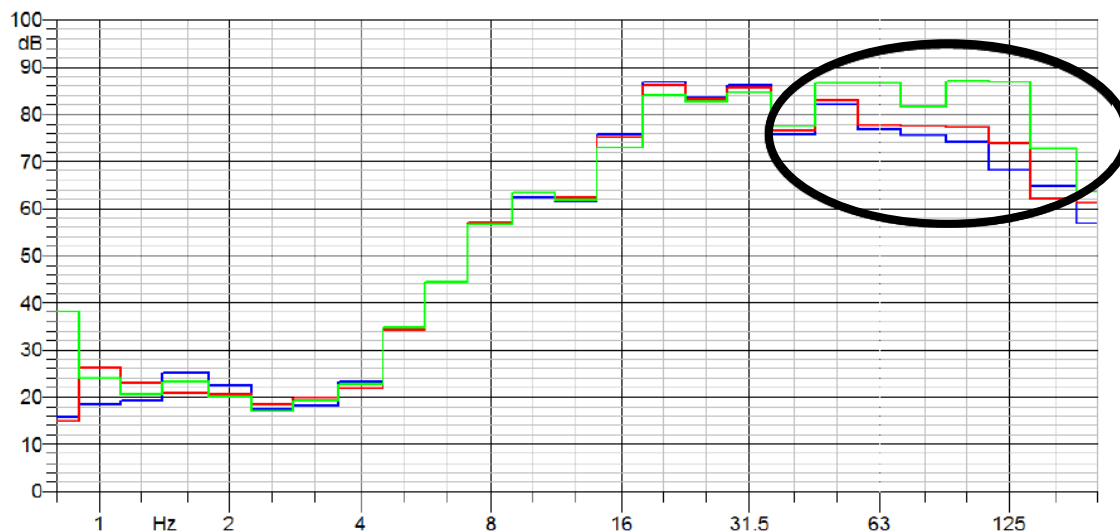


Fig. 201: spettro in frequenza (1/3 bande d'ottava) evento 3 con evidenziati livelli alte frequenze

## Misura 4

In questa misura è avvenuto il confronto è avvenuto sull'asse x, registrando undici eventi, come mostrato in gura 5 6 Nella figura 5 1 4 si vedono due eventi selezionati, con evidenziati negli spettri (c) e (d) le marcate di differenze Infatti nell'intervallo di banda da 50Hz ad 80Hz si riscontra una risposta maggiore sulla terna (verde), mentre il profilato P2 mostra una risposta maggiore per frequenze superiori a 125Hz Si osserva anche una certa instabilità del profilato P2 alle basse frequenze, caratterizzate da livelli molto bassi di accelerazione Nell'intervallo caratterizzato dai centro banda ad 4Hz a 31 5Hz la risposta delle tre tipologie di supporto rimane invariata

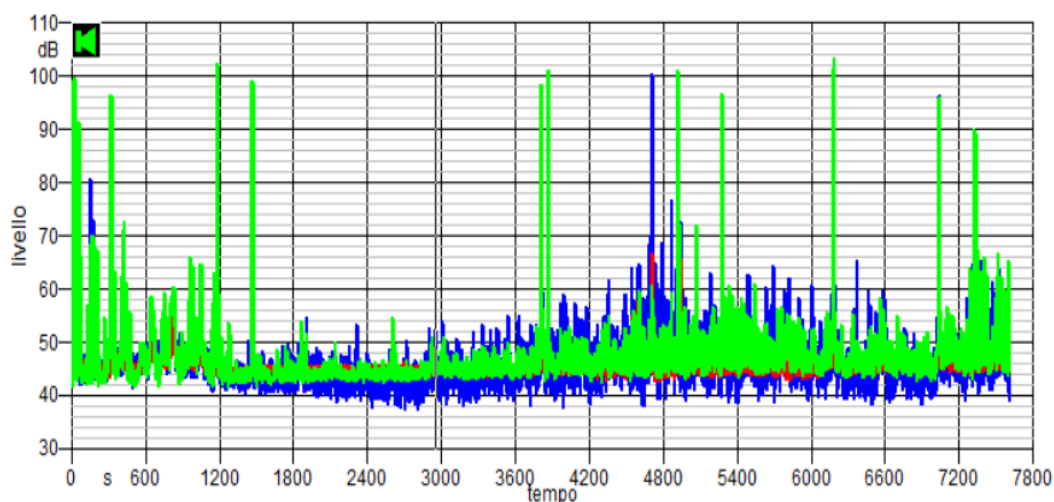


Fig. 202: Time History della Misura 4

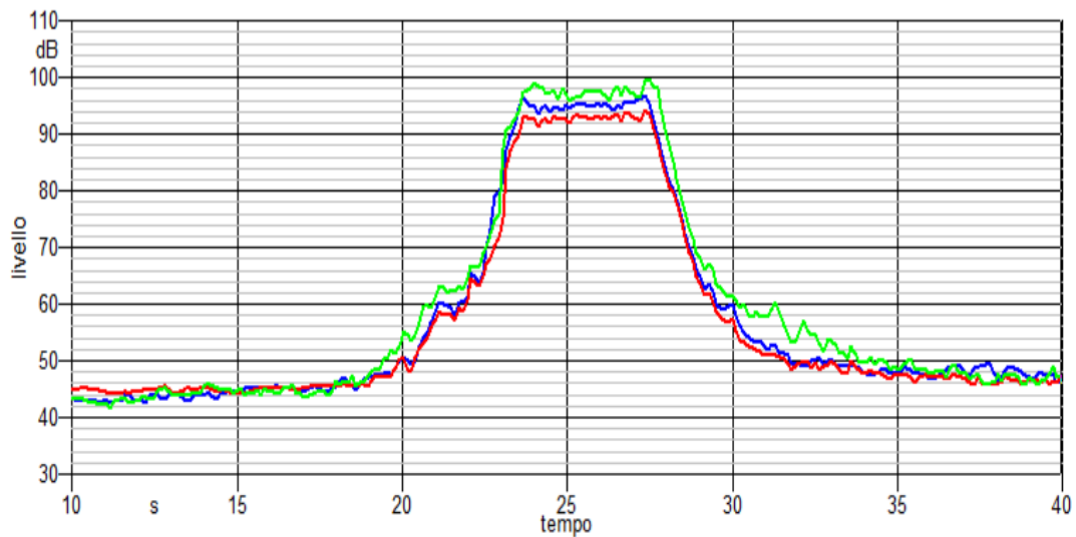


Fig. 203: Evento 1 con evidenziato il segnale della Time History

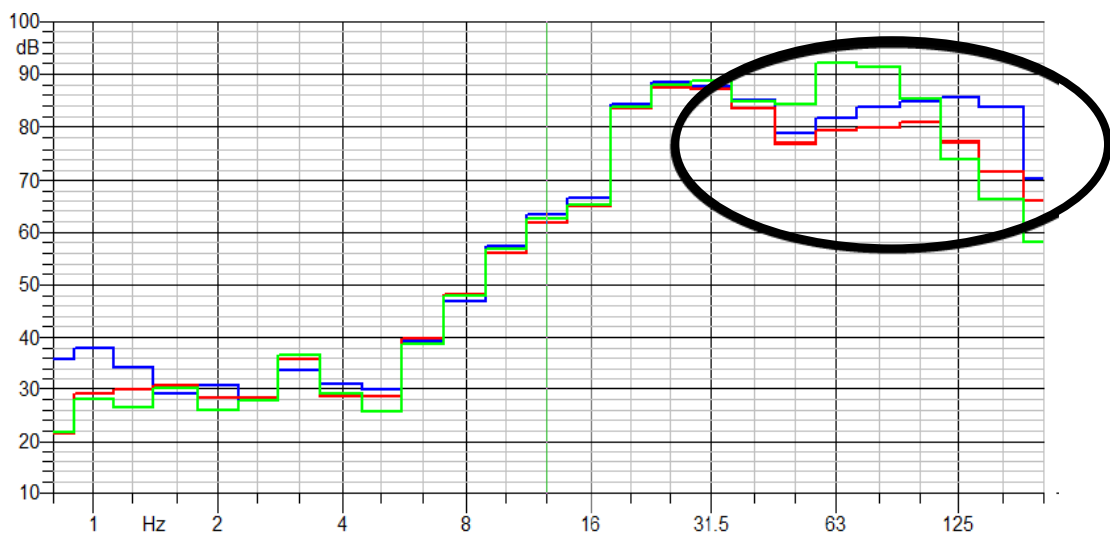


Fig. 204: Evento 1 spettro in frequenza (1/3 bande d'ottava) con evidenziate i segnali ai valori elevati

## Misura 5

La quinta misurazione è avvenuta secondo le stesse modalità della Misura 3, registrando quattro passaggi, come mostrato nella history di figura 205

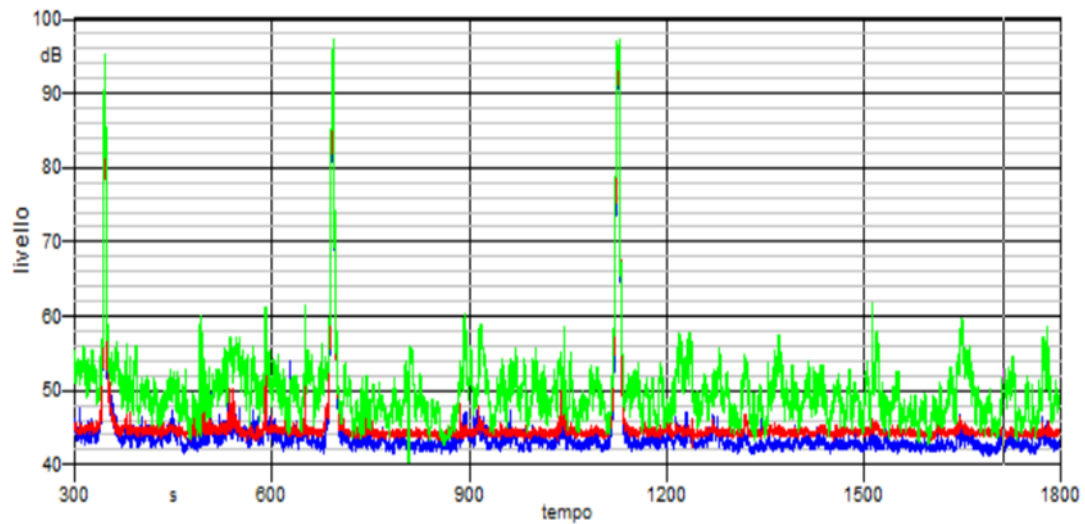


Fig. 205: registrazione dei 4 passaggi del convoglio

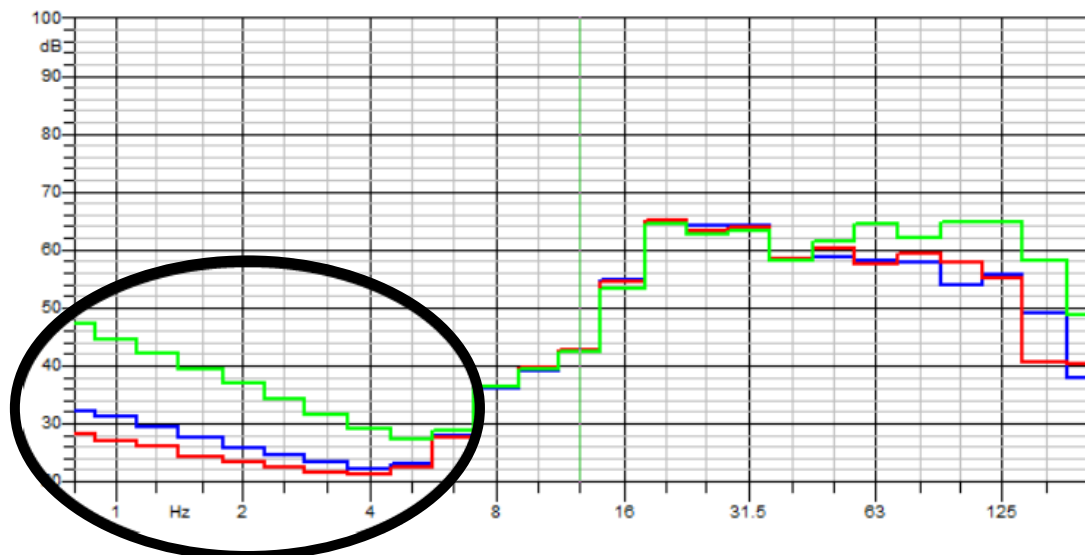


Fig. 206: livello equivalente della Misura 5 con evidenza delle basse frequenze (1/3 bande d'ottava)

Le registrazioni sono avvenute a pomeriggio inoltrato e, cambiando la posizione del sole, si è avuto un irraggiamento diretto della strumentazione; questo fatto ha portato l'insorgere di un comportamento irregolare dell'accelerometro montato sulla terna, come mostrato nelle figure seguenti



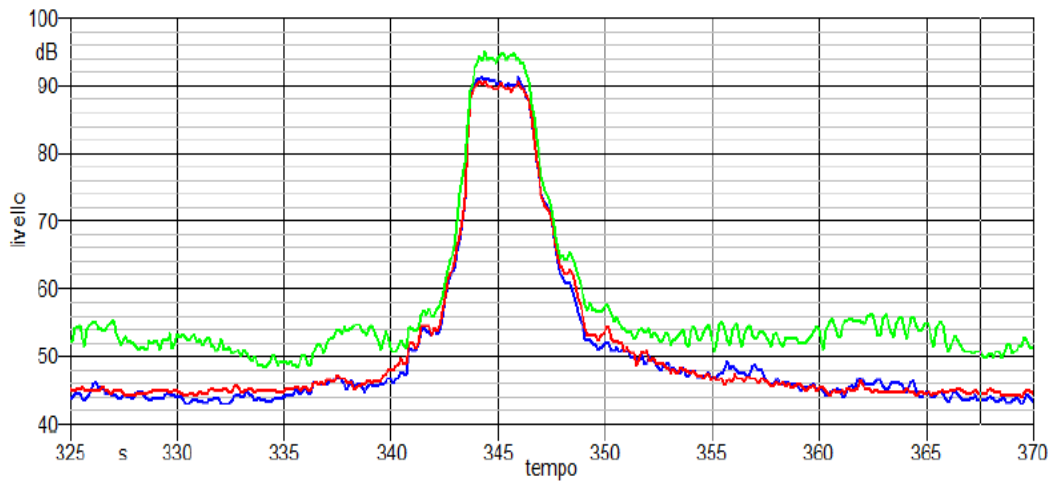


Fig. 207: le figure seguenti mostrano due eventi della Misura 5

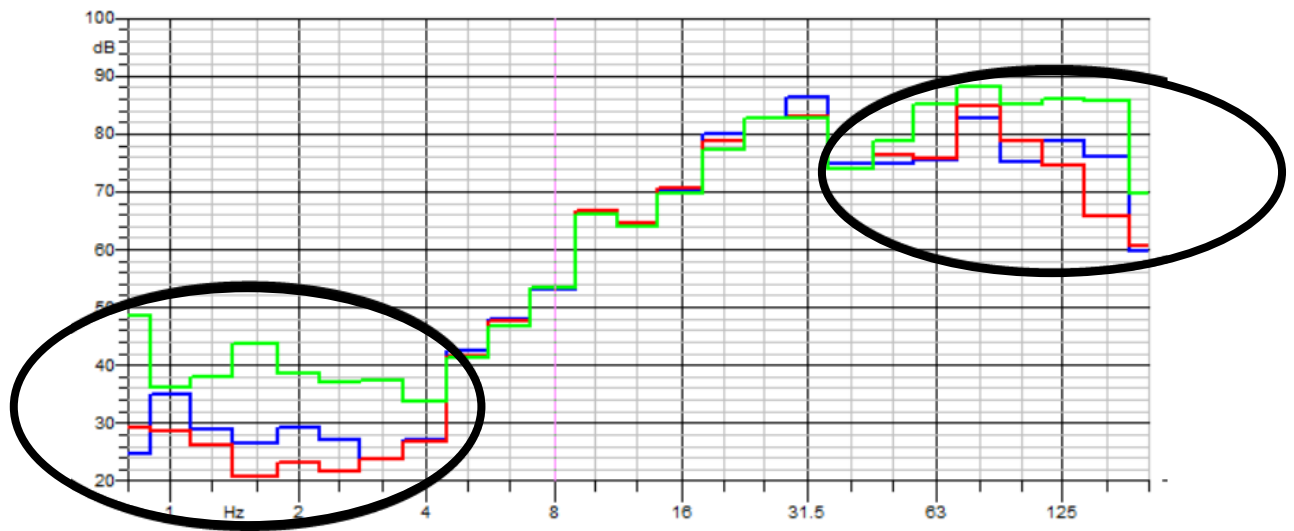


Fig. 208: spettro (1/3 bande d'ottava) evento 1

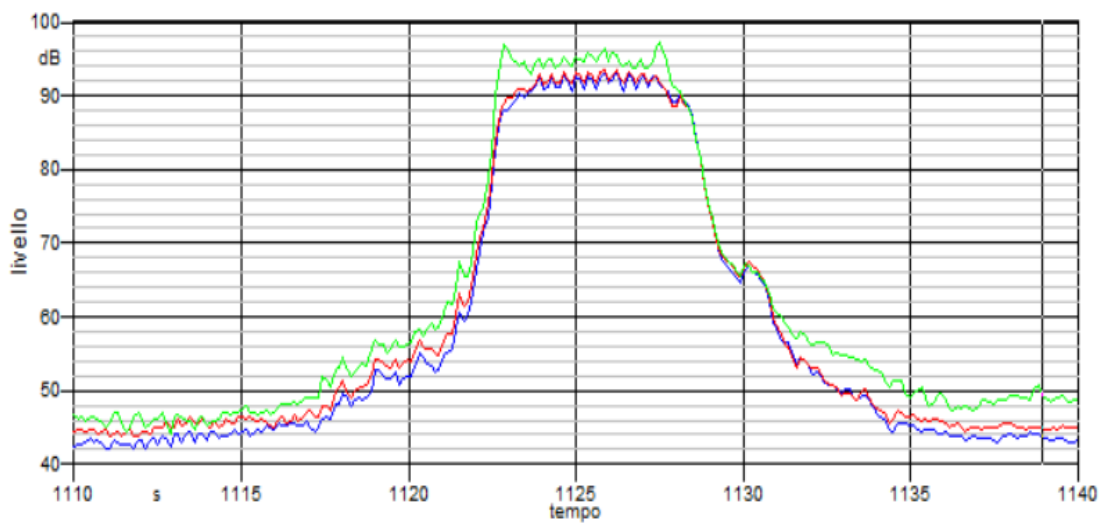


Fig. 209: evento 2 History

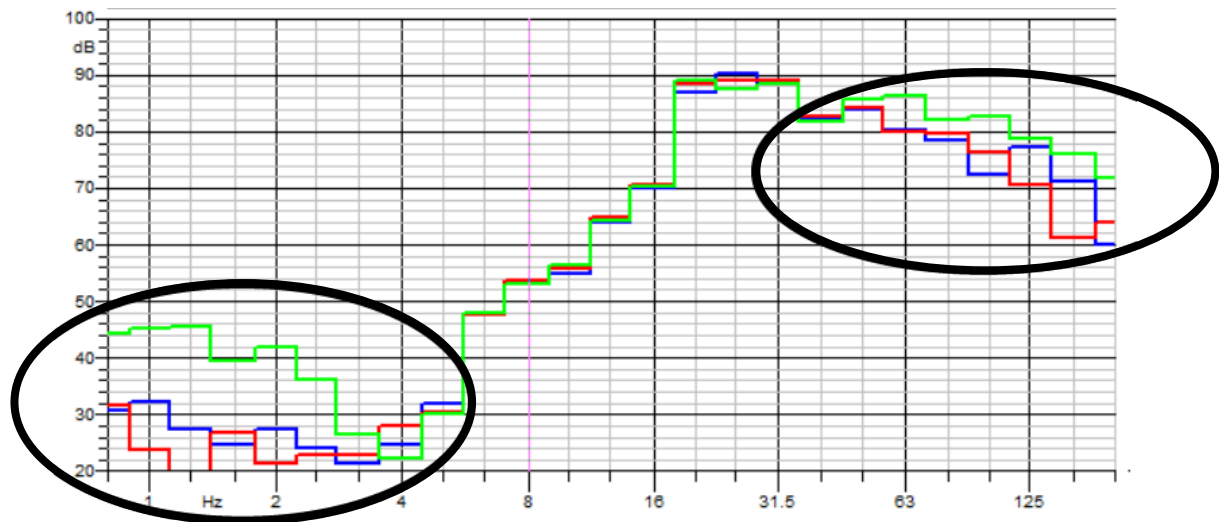


Fig. 210:spettro (1/3 bande d'ottava) evento 2

Nei grafici che riportano le time history si vede che il rumore di fondo misurato dall'accelerometro montato sulla terna mostra una rilevante variabilità nel tempo, mentre l'analisi spettrale degli eventi evidenzia i seguenti aspetti:

- alle alte frequenze la stessa tendenza della Misura 3;
- alle basse frequenze (fino ai 5Hz di centro banda) una forte differenza tra il cubo e i pali;
- tra i centro banda di 6 3Hz e 40Hz una risposta identica

Il rilevante contributo di rumore a bassa frequenza si vede chiaramente nella gura 5 10, dove è stato calcolato il livello equivalente di accelerazione spettrale nella durata della misura. Questo contributo è molto probabilmente dovuto al riscaldamento della terna che, avendo solamente tre punti di contatto con il terreno, mantiene un certo isolamento dal terreno, mentre i profilati metallici, grazie ad una maggiore superficie di scambio, riescono a diffondere bene nel terreno il calore fornito per irraggiamento solare diretto.

## *Missione II*

### **Misura 1**

Durante la prima parte della giornata si è continuato a confrontare i livelli misurati lungo i profilati P1 e P2 con la terna accelerometrica C, e al tempo stesso si è proceduto con l'inserimento dei profilati P3 e P4 nel terreno. Per motivi logistici non si è potuto effettuare l'operazione in un altro momento e quindi, per poter svolgere contemporaneamente le due operazioni, si è interrotta la battitura al

momento del passaggio dei treni e si è registrato il preciso istante in modo tale da poterlo analizzare separatamente in fase di post-processing. Gli eventi transitori dovuti al passaggio dei treni, analizzati singolarmente, come si vede nelle figure seguenti, sono stati caratterizzati da andamenti simili a quelli già evidenziati precedentemente.

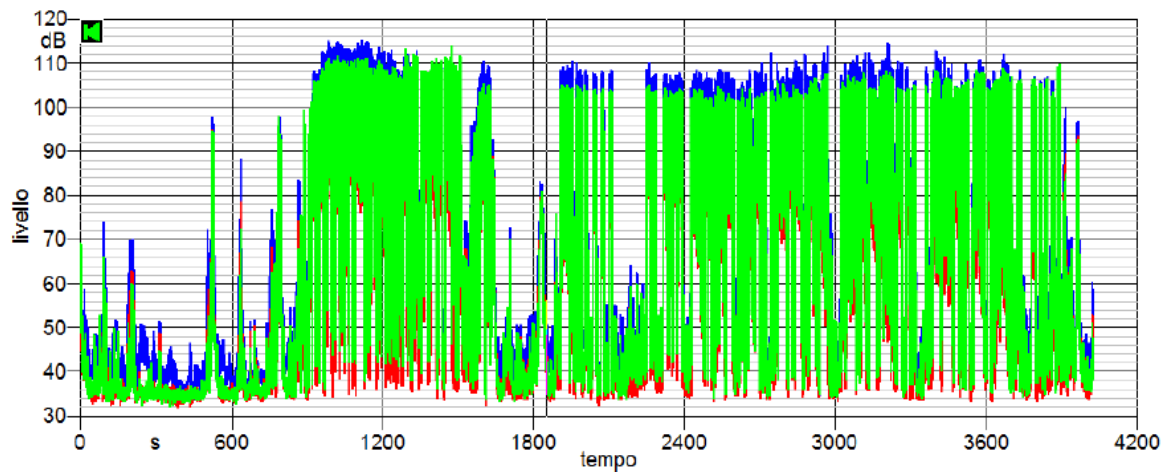


Fig. 211: Time History time della Misura 1

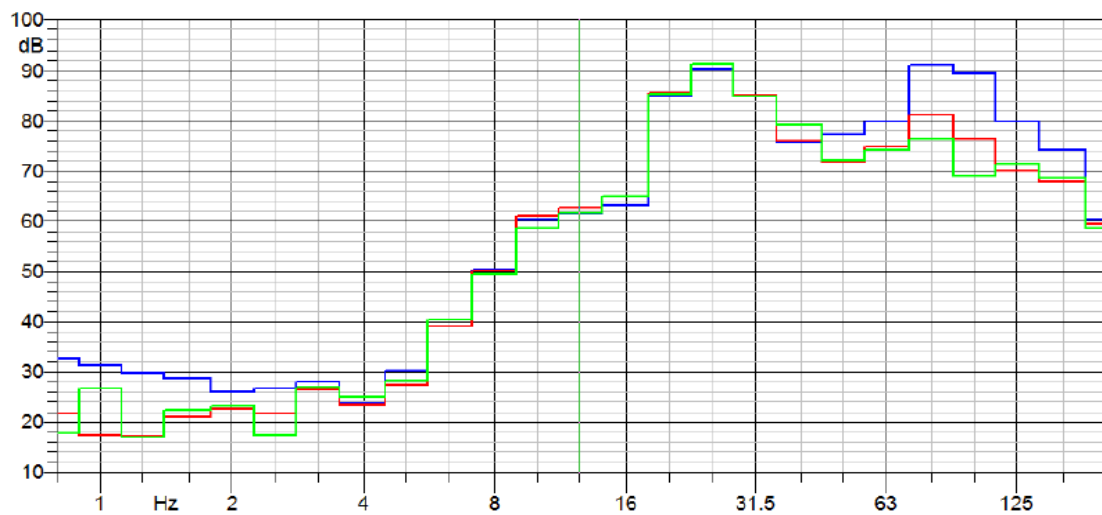


Fig. 212: spettro (1/3 bande d'ottava) dell'evento 1

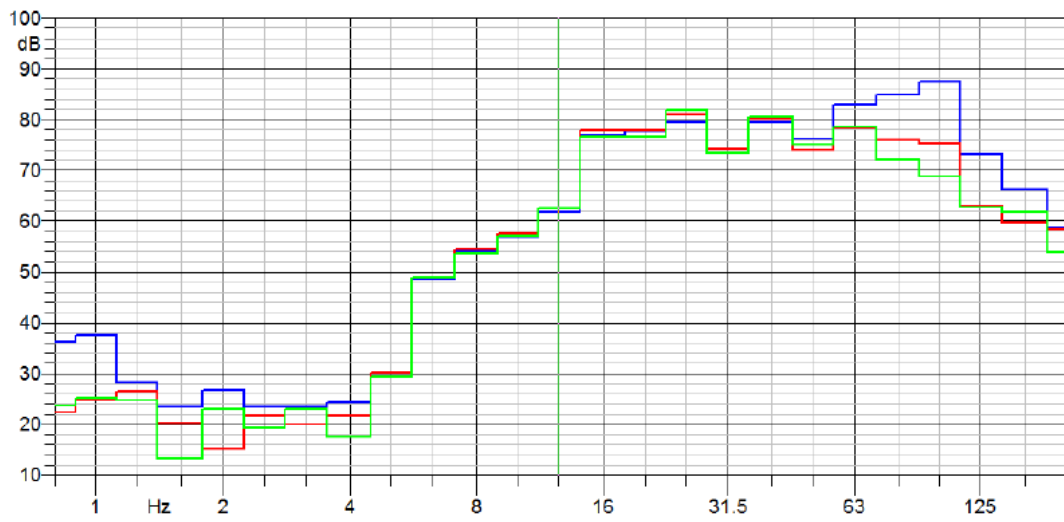


Fig. 213: spettro (1/3 bande d'ottava) dell'evento 1

## Misura 2, 3 e 5

Finito il fissaggio dei profilati P3 e P4, si è proseguita la misurazione valutando i livelli vibratori lungo l'asse verticale  $z$  tra i profilati appena inseriti e la terna accelerometrica. Il segnale tracciato di colore blu rappresenta la terna accelerometrica, mentre quelli rosso e verde sono i segnali rispettivamente di P3 e P4. In totale sono stati valutati undici eventi.

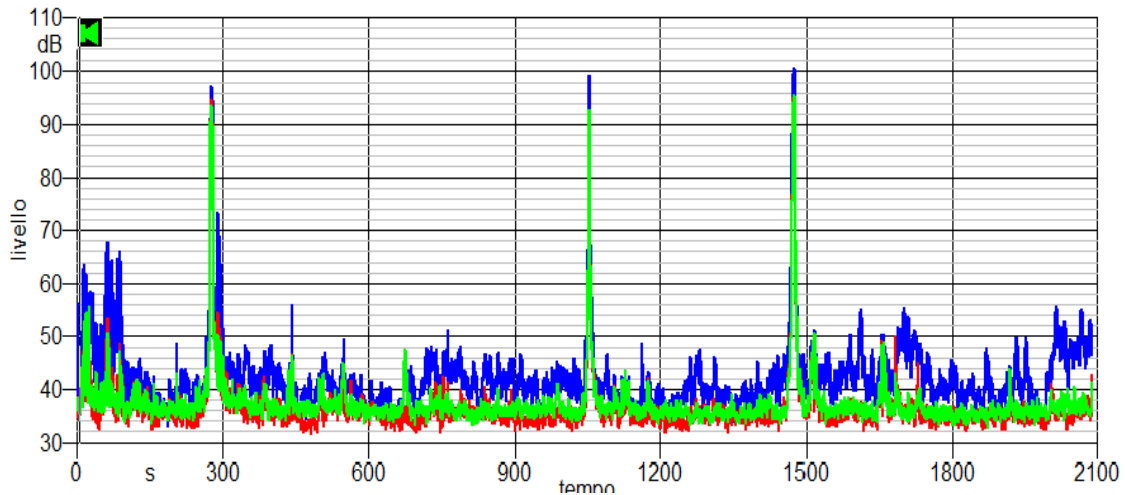


Fig. 214: Time History della misura 2

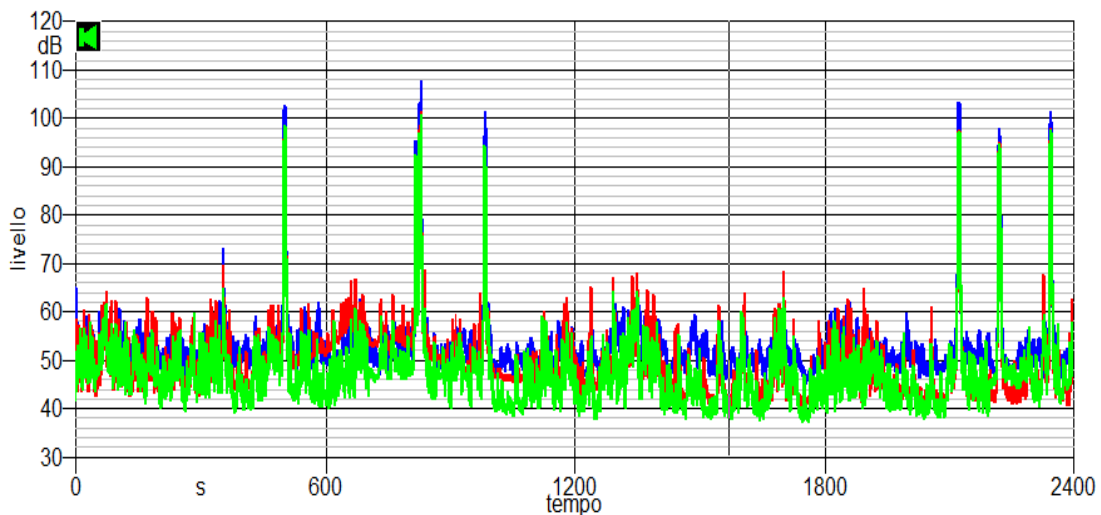


Fig. 215: Time History della misura 5

Nelle figure seguenti si vede invece come, dalle prime misure effettuate in mattinata in assenza di irraggiamento diretto (a) alle prime ore del pomeriggio (b), con irraggiamento diretto, si alzi notevolmente il rumore termico in C, mentre i profilati P3 e P4 non ne sembrano assolutamente influenzati. Inoltre, nel grafico (b), si evidenzia la tendenza dei supporti a misurare livelli d'accelerazione maggiore della terna alle frequenze pari e superiori ai 125Hz di centro banda.

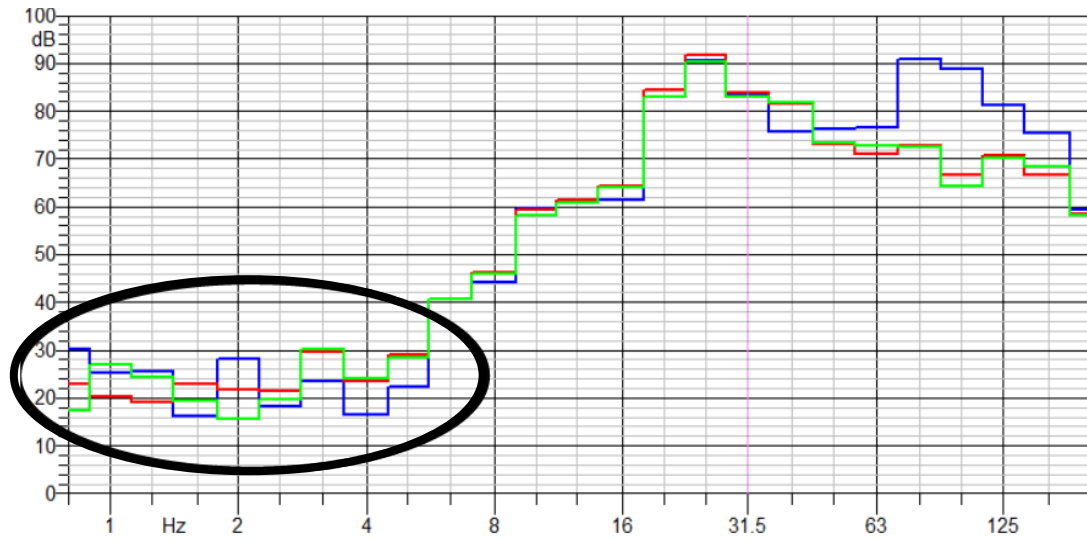


Fig. 216: spettro(1/3 bande d'ottava) evento Misura 2

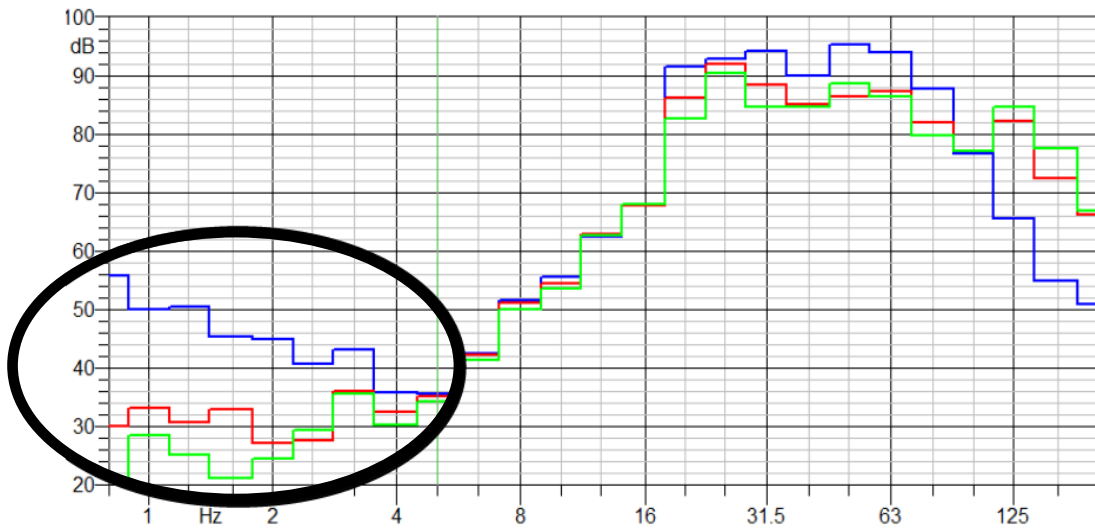


Fig. 217: spettro(1/3 bande d'ottava) evento Misura 5

I grafici seguenti mostrano un test di risonanza di carattere pratico effettuato attraverso delle sollecitazioni meccaniche effettuate sia sulla terna che sui profilati

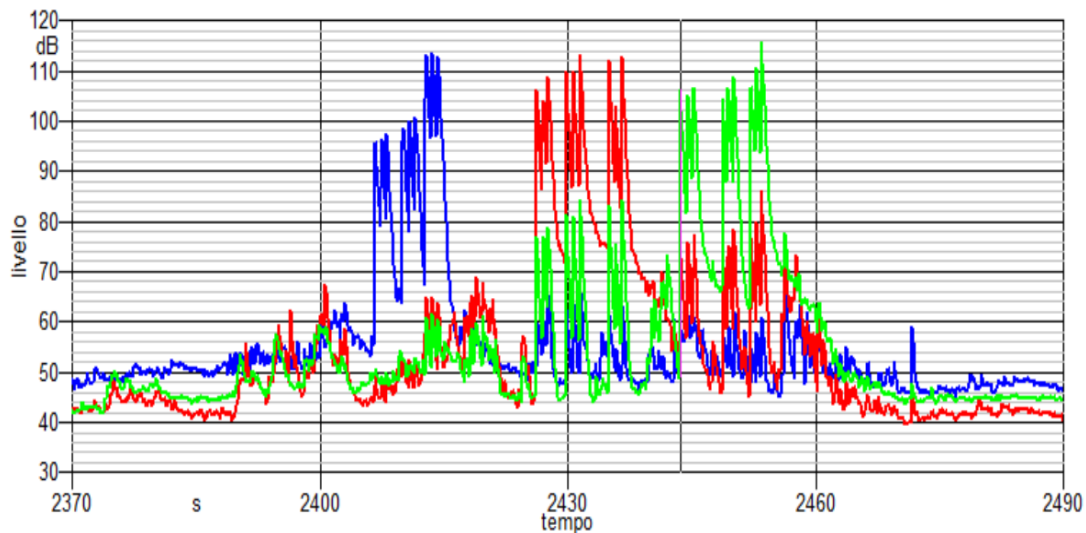


Fig. 218: Time History plot delle prove effettuate

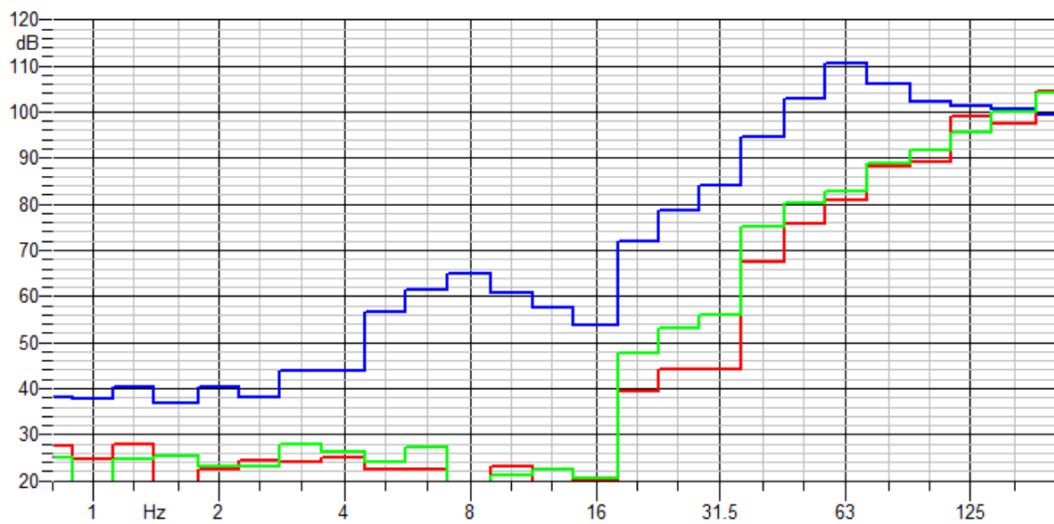


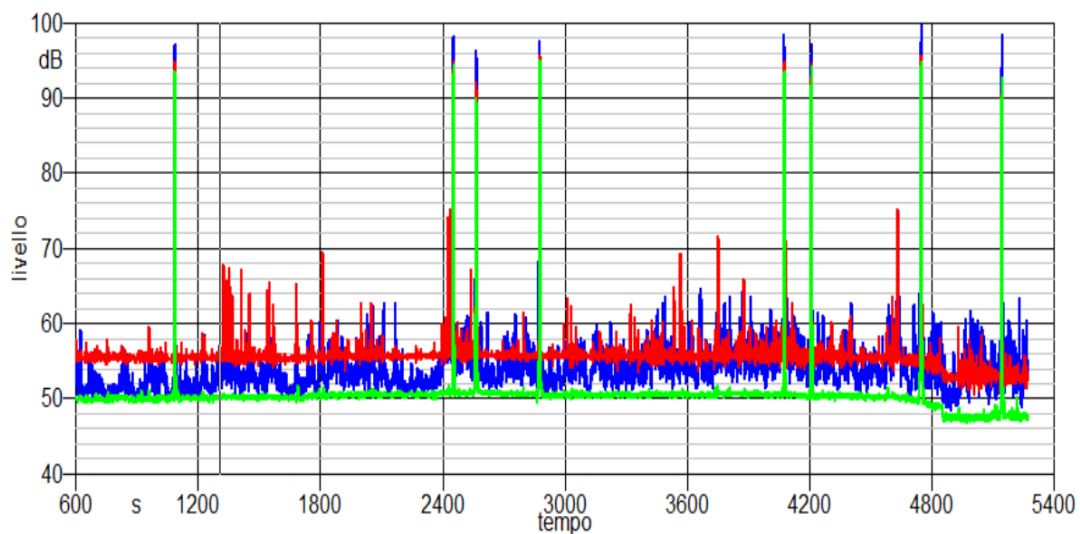
Fig. 219: spettro (1/3 bande d'ottava) caratteristico delle prove svolte

La time history mostrano gli urti, mentre il grafico spettrale mostra i contenuti energetici dei picchi stessi Il test è stato pensato per comprendere meglio la risposta dei supporti e valutare una possibile risonanza dei profilati Si è osservato che i profilati mostrano di non avere una frequenza risonante nel range di frequenze studiate mentre la terna evidenzia un picco energetico a 63Hz di centro banda, proprio nell'intorno di frequenze che mostra un andamento divergente rispetto ai profilati Normalmente, la risonanza di un elemento a forma cubica appoggiato sopra un piano rigido avviene sopra ai 300Hz ma, trovandosi il cubo appoggiato sul terreno si comporta come un sistema massa-molla La differenza di risposta alle alte frequenze dei grafici in figura 5 13 potrebbe essere spiegata dalla stessa considerazione, ovvero la misura effettuata la mattina (caratterizzata da una risposta più ampia alle frequenze elevate) fa riferimento ad un terreno ancora molto umido in superficie, mentre nel pomeriggio il terreno appare essere più secco, sia visivamente che al tatto, mentre sembra logico

presumere che in profondità fosse ancora molto umido (durante la notte trascorsa tra una giornata e l'altra si sono registrati eventi piovosi)

## **Misura 4**

Questa misurazione è stata effettuata lungo l'asse di confronto  $x$  tra la terna di supporto, i profilati P1 e P2. Si è riscontrata un'anomalia, come visibile in figura 5.15, che ha pregiudicato la validità della misura stessa, possibilmente imputabile ad un urto dei cavi durante l'operazione di scavo.



*Fig. 220: Time History plot Misura 4*

## ***Missione III***

Nella terza missione si è deciso d'aumentare il range di frequenza d'acquisizione del segnale, effettuando quattro misure che hanno mostrato variazioni del segnale estremamente contenute (figura 5.17) nelle risposte dei profilati metallici. Tale fatto è stato imputato al distacco del palo dal terreno, come osservabile nelle figure seguenti.





*Fig. 221: distacco del palo dal terreno*

Le misure effettuate con il velocimetro hanno mostrato complicazioni maggiori del previsto: le prime due non è stato possibile registrarle a causa di problemi del software Samurai che non permetteva l'arresto della misurazione per il salvataggio. Dopo una sequenza di tentativi di riavvio del sound-book, si è riusciti ad ottenere una sequenza di misure che hanno evidenziato chiaramente la presenza di un'interferenza con frequenza fondamentale di 50Hz e una prima armonica a 150Hz, il che è imputabile quasi sicuramente alla presenza di correnti di dispersione elettriche nelle vicinanze. A causa di questi inconvenienti, non si è potuto procedere con il confronto.

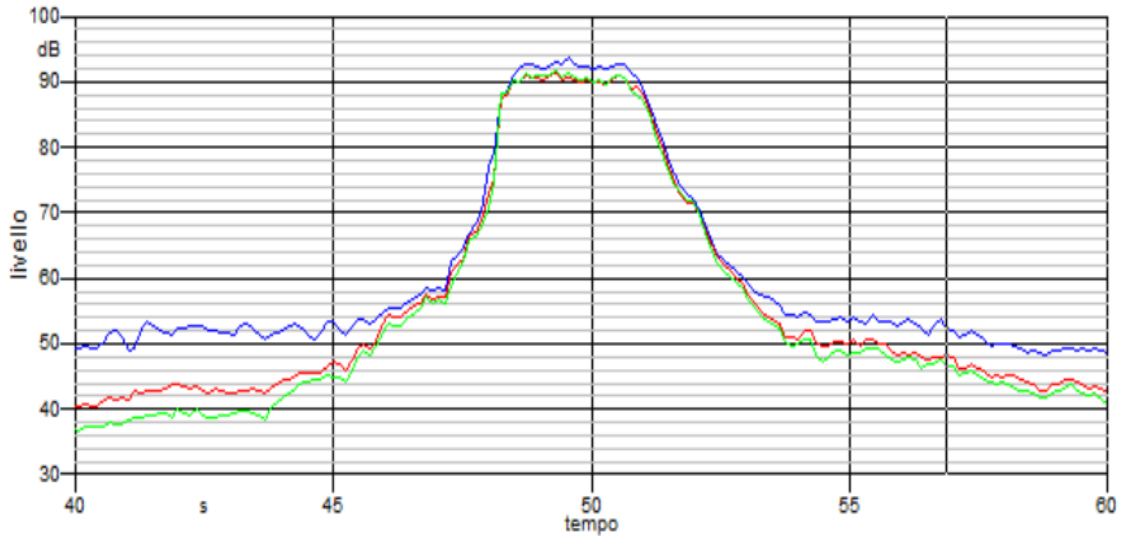


Fig. 222: Time History del passaggio del convoglio ferroviario

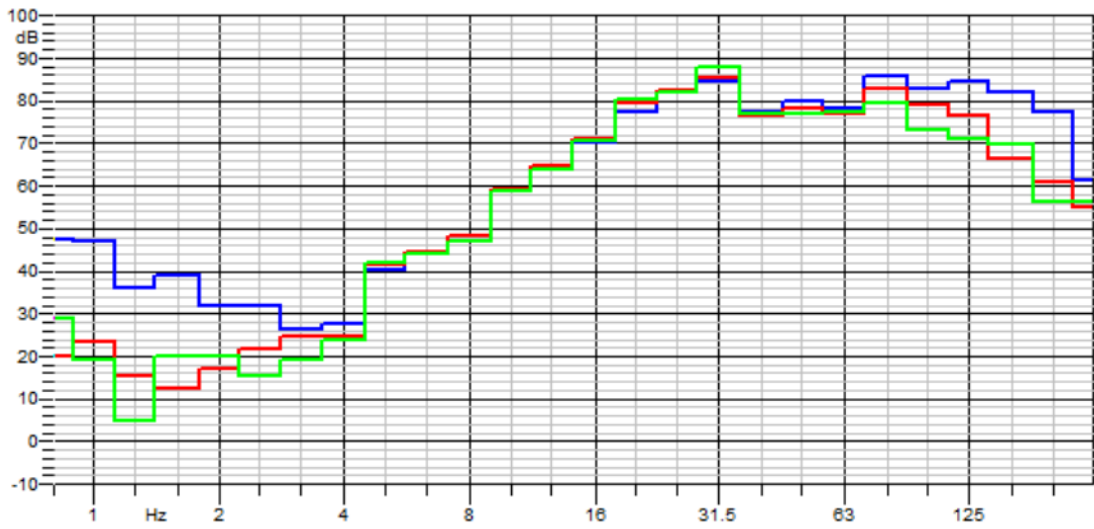


Fig. 223: estrapolato dello spettro in frequenza (1/3 bande d'ottava)

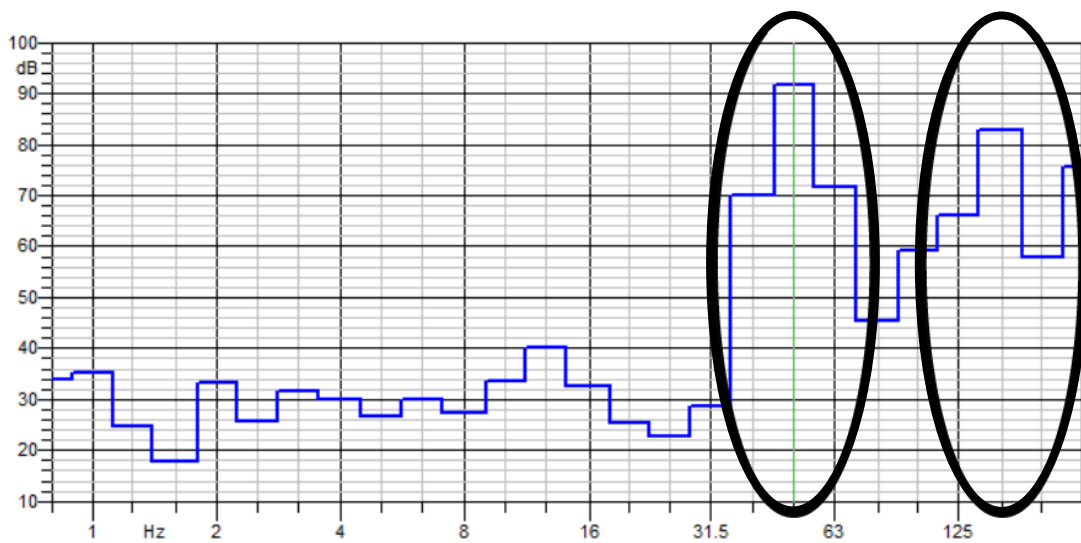


Fig. 224: evidenza della corrente elettrica di disturbo misurata dal velocimetro

I dati acquisiti sul software Samurai sono stati esportati su Noise Vibration Work per i confronti preliminari sopraesposti, successivamente sono stati selezionati gli eventi e ne è stato calcolato il livello equivalente. I valori numerici sono stati organizzati su blocco note, quindi importati su MATLAB, dove è avvenuto il confronto numerico. L'analisi numerica è stata effettuata calcolando dapprima la differenza di risposta tra cubo e palo per ogni evento, poi ne è stata calcolata una media. I risultati sono visibili sui grafici rappresentati nelle figure 225 e 226

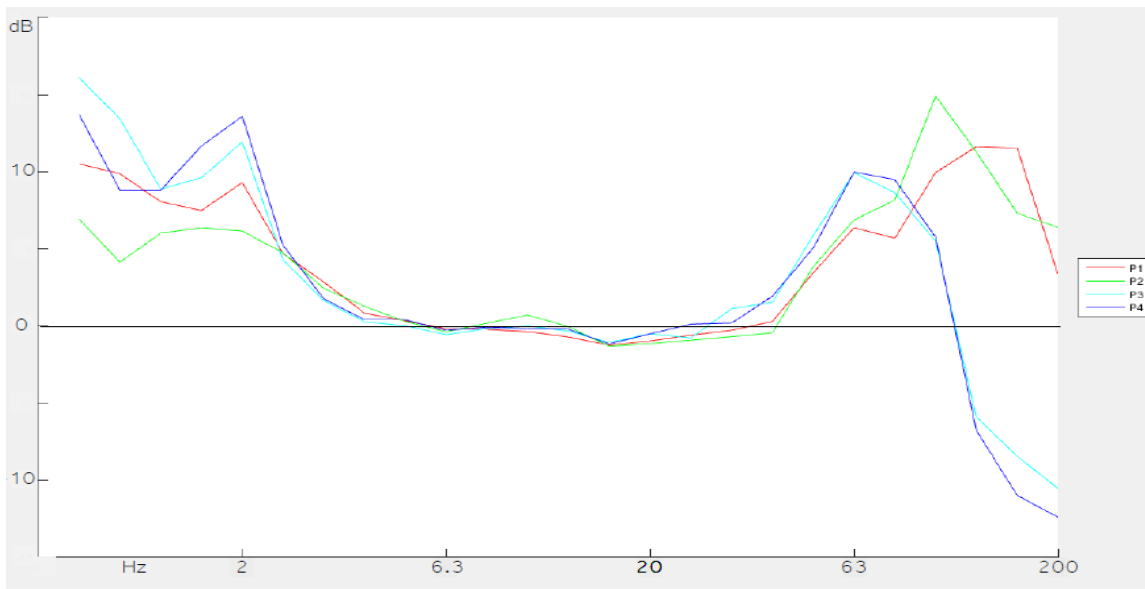


Fig. 225: confronto in direzione z della risposta del cubo rispetto ai pali

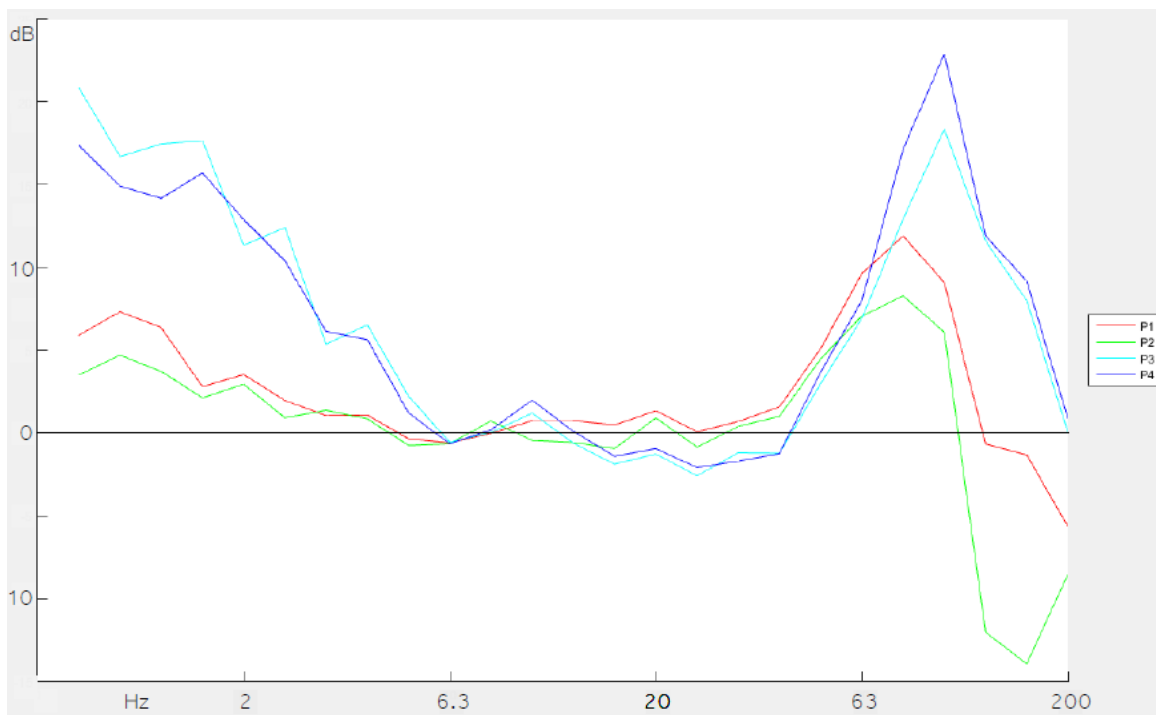


Fig. 226 :confronto in direzione x della risposta del cubo rispetto ai pali

Il confronto tra i diversi risultati ha mostrato una risposta della terna maggiore rispetto a quella dei pali che valutata in termini di spettro in frequenza permette le seguenti considerazioni:

- 1) livelli maggiori alle bassissime frequenze (no 4Hz)
- 2) livelli uguali alle frequenze centrali (dai 4Hz ai 40Hz)
- 3) livelli maggiori nell'intervallo (50-100Hz)
- 4) comportamento instabile sopra i 125 Hz con le puntazze più lunghe che nella direzione z mostrano un'amplificazione della risposta che non si vede nelle puntazze P1 P2

La risposta maggiore del cubo alle basse frequenze sembra imputabile al rumore termico indotto dal riscaldamento del cubo a causa del calore da irraggiamento solare diretto, che non riesce a smaltire a causa della scarsa superficie di contatto con il terreno, Le puntazze invece riescono a smaltire bene il flusso termico conseguente a tale irraggiamento, avendo una grande superficie di contatto con il terreno, I livelli maggiori di vibrazione misurati con il cubo alle alte frequenze sembrano, in base al test di risonanza effettuato sul cubo, imputabili ad una possibile risonanza alla frequenza di centro banda di 63 Hz, probabilmente variabile in funzione del grado di umidità del terreno, mentre la frequenza di risonanza delle puntazze sembra giacere esternamente alle frequenze indagate



## 2.2.4 Campagna di misura in ambiente estrattivo

### 2.2.4.1 Caratterizzazione del terreno

Al fine di poter comprendere le caratteristiche di risposta del terreno, sono state effettuate delle misurazioni con differenti sorgenti vibratorie. La prima campagna di misurazione è stata realizzata con sorgente vibratoria di carattere transitorio (mezzi gommati), applicando la stessa metodologia della campagna realizzata in ambiente urbano. Sulla base dei risultati ottenuti si è proceduto ad una successiva campagna di misurazioni con sorgente vibratoria costante, impianto di trattamento e movimentazione del materiale abbattuto, per realizzare un'analisi preliminare della risposta del terreno

#### ▪ *Caratterizzazione terreno tramite sorgente da sorgente mobile*

La campagna di misurazione è stata realizzata nello stesso sito estrattivo dove è stata realizzata la campagna sull'esposizione a corpo intero. Le misure sono state effettuate nel piazzale di lavorazione dove avviene il transito dei mezzi dal punto di caricamento del materiale al punto di scarico dell'impianto



*Fig. 227: visuale del piazzale di cava oggetto della campagna di misurazione*

Il tipo di camion che costituisce la sorgente vibratoria è un dumper, modello PERLINI DP405, impiegato per il trasporto di rocce o materiali frammentati che transita in due differenti condizioni di trasporto: configurazione a vuoto e configurazione a carico



*Fig. 228: configurazione a carico (sinistra) e configurazione a vuoto (destra)*

Il metodo di lavoro si basa su quattro punti principali ed è stato ripetuto per entrambe le condizioni di passaggio dei mezzi

1. misurazioni dei passaggi del camion in prossimità del tratto di passaggio in tre diversi punti, con le stesse condizioni del contorno, per caratterizzare la sorgente
2. misurazioni nella direzione ortogonale alla strada a 2 distanze diverse e calcolo della specifica funzione di trasferimento sperimentale
3. definizione di una funzione media sperimentale sulla base delle tre funzioni ottenute da tre punti di misurazione
4. confronto del grado d'accuratezza delle due leggi di attenuazione ottenute con le due configurazioni di trasporto
5. confronto della funzione di trasferimento con quella ottenuta in un quarto punto di misurazione, sempre sulla stessa zona di cava, al fine di verificare la validità della funzione sperimentale ricavata

I punti di misurazione sono stati scelti a una distanza reciproca di 5 metri per caratterizzare in modo ottimale la risposta del terreno, visualizzati nelle seguenti figure all'interno del piazzale della cava. In ogni punto sono state effettuate 4 misurazioni; il primo vicino al punto di transito del mezzo, ad una distanza  $0,5 \pm 0,3$  m per evitare eventuali danni alla strumentazione e gli altri a una distanza di 3 m e 9 m



Fig. 229: misurazioni realizzate nel piazzale di cava

Sono stati registrati 20 passaggi dei mezzi in entrambe le direzioni di transito in ogni punto di misura, 10 in una direzione in condizioni di carico e 10 nell'altra condizione di vuoto. Lo strumento è stato posizionato con l'asse  $x$  in parallelo alla direzione di transito gli altri assi sono stati definiti di conseguenza secondo il sistema di riferimento standard. La velocità del camion è stata di circa  $30 \pm 5$  Km / h lungo in configurazione vuota e  $22 \pm 3$  Km / h nell'altra direzione in configurazione caricata, con un intervallo di tempo tra un passaggio e l'altro di circa 3 minuti. L'ipotesi che stata effettuata alla base del lavoro è quella di considerare la sorgente come lineare, somma delle sorgenti puntiformi rappresentate da ciascun pneumatico. Il mezzo, come descritto all'inizio, ha un sistema di supporto due pneumatici fissati sull'asse anteriore e quattro sull'asse posteriore, con un peso complessivo di 30 tonnellate in condizioni di vuoto e 70 tonnellate in condizioni di carico. Tutti i pneumatici sono stati considerati con lo stesso grado di usura. Per misurare correttamente le onde meccaniche generate dal transito dei mezzi, prima dell'avvio delle misurazioni, è stato valutato il livello del rumore di fondo, generato dalle altre attività contemporanee (operazioni di foratura e movimentazione terra alla base della bancata). Il valore rilevato è stato pari a 0.0015 mm/s. Lo strumento utilizzato è il velocimetro, utilizzato nella campagna precedente. I parametri di settaggio sono riportati nella tabella seguente

Tabella 89 : caratteristiche tecniche del velocimetro

<i>Trasduttore</i>	<i>Sensibilità</i>	<i>Frequenza di campionamento [Hz]</i>	<i>Guadagno [V]</i>	<i>Dispositivo Acquisizione</i>
3D Sinus Seismometer	30 [mV/(mm/s <sup>-1</sup> )]	1250	1	4 channel sound book

Tabella 90 : prospetto delle caratteristiche per ciascun punto di misurazione

<b><i>Punto di misurazione</i></b>	<b><i>Cond. meteo</i></b>	<b><i>passaggi</i></b>	<b><i>durata</i></b>
<i>misura sorgente 1/ recettore 1A/ recettore 2A</i>	soleggiato	20	1h :40 min 1h :35 min
<i>misura sorgente 2/ recettore 1B/ recettore 2B</i>	soleggiato	20	1h :38 min
<i>misura sorgente 3/ recettore 1C/ recettore 2C</i>	soleggiato	20	1h :32 min
<i>misura sorgente 4/ recettore 1D/ recettore 2D</i>	soleggiato	20	1h :55 min 1h:42 min

Lo spettro di frequenza è stato settato sul range tipico del movimento del terreno, in un intervallo da 1 a 500 Hz. Tutti i transiti dei dumper sono stati elaborati seguendo questo metodo

- 1) Acquisizione della Time History di ciascun passaggio ed estrapolazione dell'evento in ogni direzione ( $x, y, z$ ). Le due direzioni di passaggio con rispettive configurazioni sono state separate
- 2) Identificazione dell'istante del transito di valore di picco definito rispetto al segnale del rumore di fondo attraverso l'operazione di mascheratura
- 3) Identificazione dello spettro caratteristico ( $Leq$ ) per ogni evento in tutte le direzioni e calcolo della somma vettoriale degli spettri nelle tre direzioni di ogni evento e delle medie delle somme vettoriali di tutti gli eventi

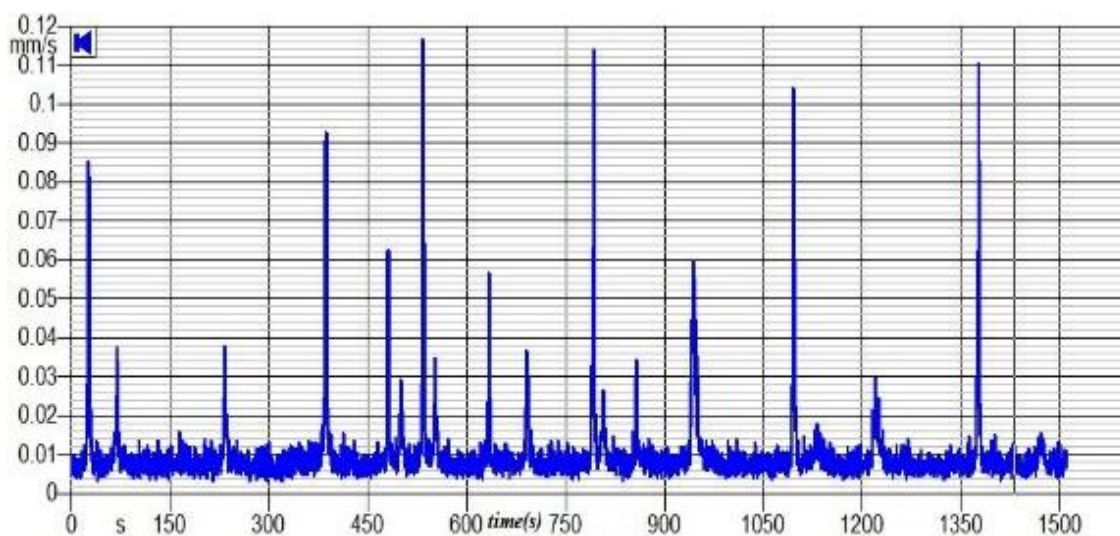


Fig. 230: Time History della prima giornata di misurazione che evidenzia il passaggio dei mezzi



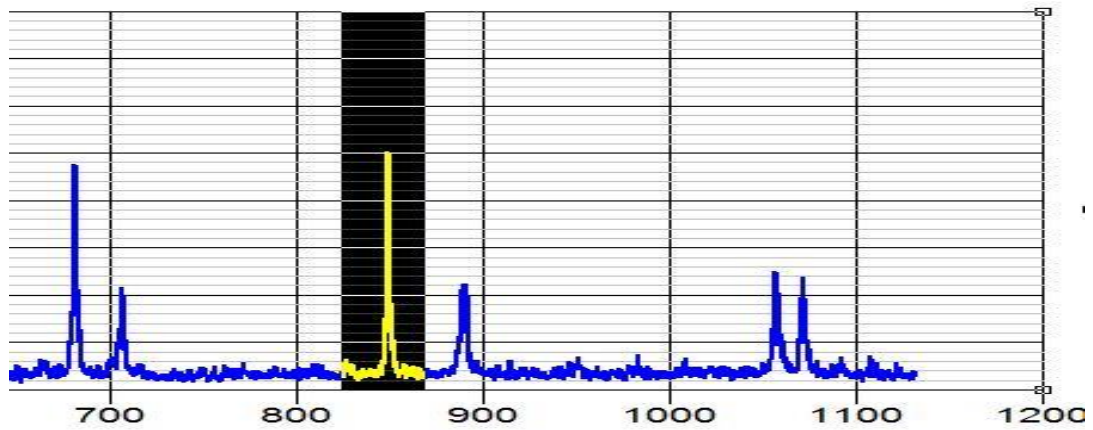


Fig. 231: procedura d'extrapolazione del passaggio di un mezzo

Il tempo medio di ciascun passaggio è risultato variabile dai 10 ai 20 secondi. In ogni posizione di misurazione è stata ottenuta una funzione di attenuazione come rapporto tra lo spettro del recettore e la sorgente per ciascuna frequenza. Questa funzione discreta è stata ottenuta in bande di terza ottava per analizzare meglio ogni passaggio

$$L_a = \frac{L_r}{L_s}$$

$L_a$  = livello d'attenuazione (mm/s)  $L_s$  = livello sorgente (mm/s)  $L_r$  = livello recettore (mm/s)



Fig. 232: confronto tra gli spettri in frequenza del passaggio di un mezzo in prossimità della strada

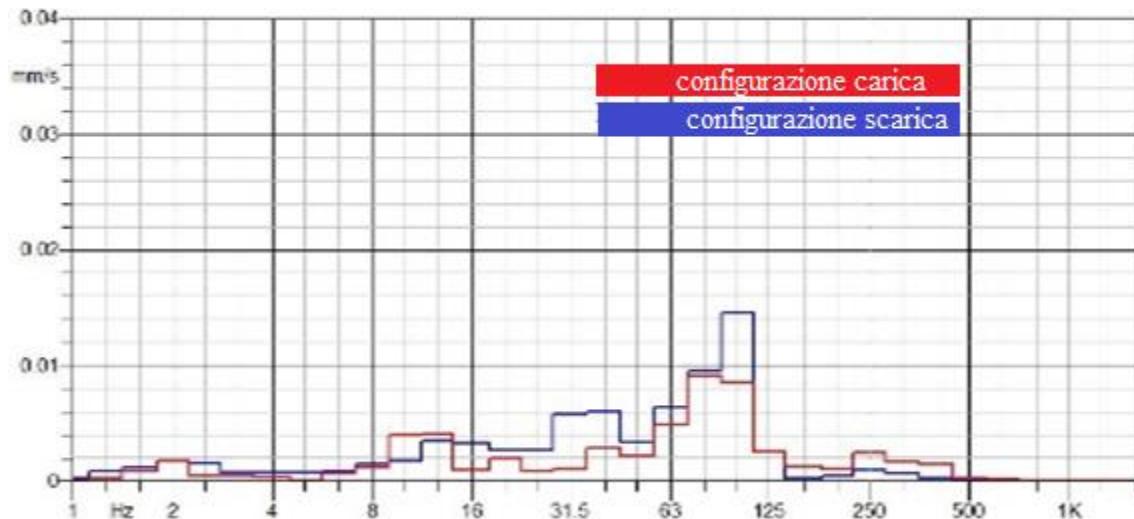


Fig. 233: confronto tra gli spettri in frequenza del passaggio di un mezzo ad una distanza di 3m

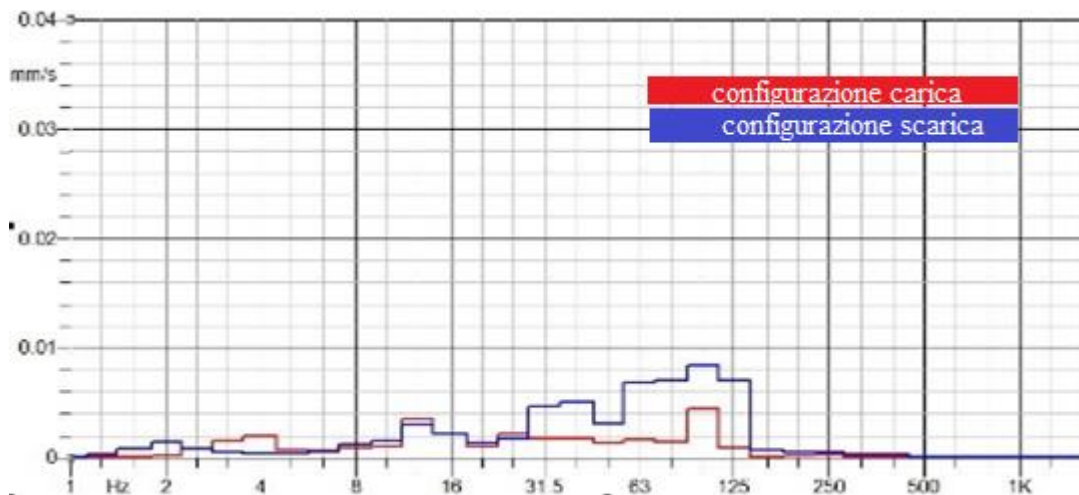


Fig. 234: confronto tra gli spettri in frequenza del passaggio di un mezzo ad una distanza di 9m

Come già accennato, è stata ottenuta una funzione di attenuazione nei primi tre punti di misurazione e ciascuna funzione è stata approssimata con una linea retta che l'approssima. Attraverso il metodo di mini quadrati media è stata condotta l'interpolazione tra le diverse funzioni

$$y = a + b(x)$$

I valori di a e b delle righe sono calcolati con le seguenti formule

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 \sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n x_i y_i}{\Delta} \quad b = \frac{N \sum_{i=1}^n x_i^2 \sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n x_i y_i}{\Delta} \quad \Delta = N \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2$$

dove y è il valore di attenuazione, x è il valore di frequenza, N è il numero di coppie di valori di x e y. Le seguenti formule sono state utilizzate per calcolare l'incertezza di a, b e y. Si ipotizza che le incertezze siano presenti solo sui valori di y (attenuazione) e non su x (frequenze)

$$\sigma_a = \sigma_y \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x^2}{\Delta}} \quad \sigma_b = \sigma_y \sqrt{\frac{N}{\Delta}} \quad \sigma_y = \sqrt{\frac{1}{N-2} \sum_{i=1}^n (y_i - a - bx_i)^2}$$

$$a^* = \frac{\sum_{i=1}^3 w_i A_i}{\sum_{i=1}^3 w_{Ai}} \quad b^* = \frac{\sum_{i=1}^3 w_i B_i}{\sum_{i=1}^3 w_{Bi}}$$

dove  $w_a = \frac{1}{\sigma_a^2}$   $A_i$  = frequenza d'attenuazione  $w_b = \frac{1}{\sigma_b^2}$   $B_i$  = frequenza d'attenuazione

Il parametro dell'incertezza  $a^*$  e  $b^*$  è stato definito su questa funzione

$$\sigma_{A^*} = \frac{1}{\sqrt{\sum_{i=1}^n w_{Ai}}} \quad \sigma_{B^*} = \frac{1}{\sqrt{\sum_{i=1}^n w_{Bi}}}$$

Una volta ottenute le funzioni di attenuazione e la loro incertezza per le diverse configurazioni della sorgente vibrazionale (in configurazione di mezzo vuoto e carico), queste funzioni sperimentali sono state testate confrontando i valori previsti con i dati ottenuti applicando la stessa metodologia per il quarto punto di misurazione. L'obiettivo è stato quello di verificare la validità della funzione di attenuazione calcolata. Per i due punti di misurazione è stata definita una funzione di trasferimento in frequenza per entrambi le configurazioni del dumper con il metodo descritto nel precedente paragrafo. La funzione viene ottenuta come rapporto tra lo spettro del segnale del recettore e quello della sorgente di vibrazione. Nel punto di misura a una distanza di 3 metri le funzioni di trasferimento mostrano un incremento già alla frequenza di 1 Hz al valore di 0.56 mm/s per la configurazione vuota e a 1 Hz al valore di 1.01 mm/s per la configurazione a mezzo carico. A distanza di 9 metri i valori ottenuti sono invece rispettivamente di 0.44 mm/s a 1 Hz e 0.35 mm/s a 2 Hz

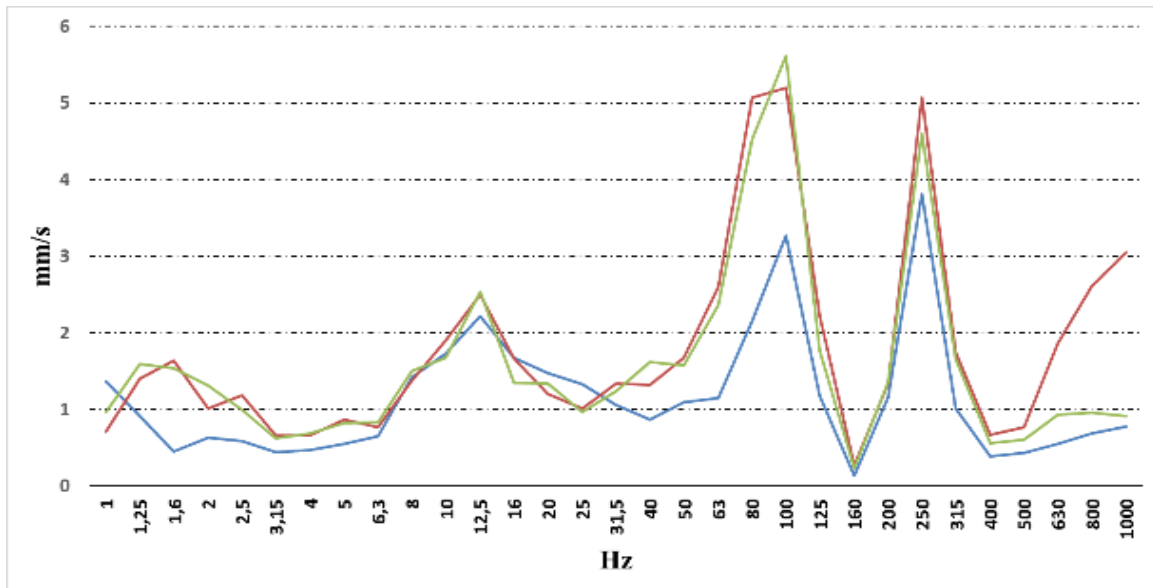


Fig. 235: funzione di trasferimento a 3metri per configurazione carica

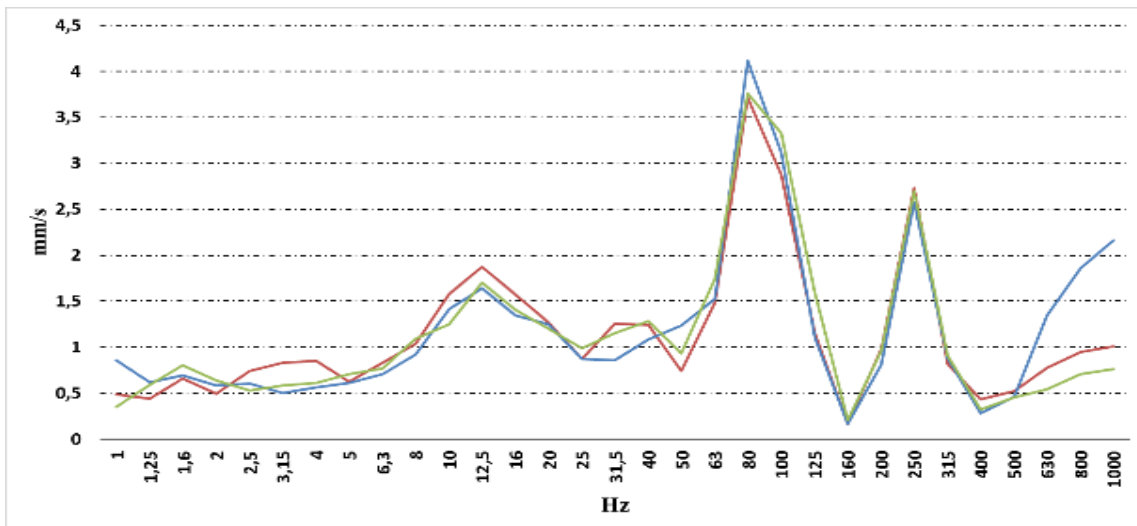


Fig. 236: funzione di trasferimento a 3 metri per configurazione vuota

La tabella seguente mostra i risultati ottenuti evidenziando le caratteristiche dello spettro di frequenza, la frequenza massima di sollecitazione e il valore della velocità di picco per entrambe le configurazioni

Tabella 91 : risultati della misurazione per il recettore 1 e recettore 2

<b>RECETTORE 1 (DISTANZA=3M)</b>			
<i>Configurazione</i>	<i>Velocità di picco (mm/s)</i>	<i>Range di frequenza[Hz]</i>	<i>Massima frequenza di sollecitazione [Hz]</i>
<i>vuoto</i>	0.0132	1.3-500	100
<i>carico</i>	0.0093	1.3-160	100

<b>RECETTORE 2 (DISTANZA=9M)</b>			
<i>Configurazione</i>	<i>Velocità di picco (mm/s)</i>	<i>Range di frquenza [Hz]</i>	<i>Massima frequenza di sollecitazione [Hz]</i>
<i>vuoto</i>	0.0082	1.3-500	40
<i>carico</i>	0.0068	1.3-160	31.5

Tutte le funzioni di trasferimento sono state approssimate tramite linee rette e la funzione di trasferimento definitiva è stata ottenuta come media ponderata delle prime tre funzioni con la relativa configurazione d'incertezza. Successivamente ogni funzione è stata confrontata con la funzione di trasferimento dei 4 punti di misura. La tabella seguente mostra le funzioni di trasferimento definitive per tutte le configurazioni del dumper

*Tabella 92 : funzioe di trasferimento per ciascuna configurazione di trasporto*

	<b><i>Configurazione carica</i></b>	<b><i>Configurazione vuota</i></b>
$A_{3m}$	$y = (0.0278 \pm 0.002)f + (1.062 \pm 0.078)$	$y = (0.0502 \pm 0.009)f + (1.064 \pm 1.248)$
$A_{9m}$	$y = (0.0075 \pm 0.009)f + (0.06 \pm 0.096)$	$y = (0.809 \pm 0.07)f + (1.4223 \pm 0.049)$

I risultati mostrano differenze rilevanti delle funzioni di trasferimento in tutti i punti di misurazione, considerando il fatto che le condizioni del terreno sono estremamente variabili a causa dello stato di fratturazione superficiale, nonostante si sia cercato un punto del piazzale della cava che fosse il più compatto possibile. I valori più alti della velocità di picco sono stati registrati nei passaggi dei dumper in configurazione vuota, generati dal minor peso e dalle maggiori velocità. I risultati dei grafici mostrano che il terreno ha un effetto d'attenuazione del segnale per entrambe le tipologie di configurazione, sia carico che vuoto, in tutta la gamma di frequenza tranne che nell'intervallo dai 63 Hz ai 160 Hz e dai 200 Hz ai 400 Hz. Questo aspetto di variabilità d'attenuazione in alcuni range di frequenze specifici può essere spiegato con tre motivazioni. La prima è dovuto alle difficoltà di contatto dello strumento sulla superficie di un suolo particolarmente discontinuo, con grande presenza di fratture e frammentazioni dovute al rippaggio. La seconda è la consistente variabilità della sorgente del segnale nella stessa configurazione (sia a mezzo carico che vuoto): in particolare, in tutte le configurazioni in cui il mezzo è carico, il peso è sensibilmente diverso a seconda della quantità di

materiale caricata dall'escavatore, la velocità di transito è in tutti i casi variabile, in base allo stile di guida dell'autista e alla traiettoria del mezzo è risultata sensibilmente variabile all'interno della pista di transito, variando così di volta in volta la distanza con il recettore, ossia lo strumento di misurazione. L'ultimo fattore è rappresentato dalla mancanza di omogeneità delle condizioni del terreno che influenza la propagazione dell'onda e quindi i livelli di vibrazione indotti da ciascun passaggio. Basti pensare che a brevi distanza tra un punto e l'altro di misura è possibile riscontrare la presenza di numerose fratturazioni e disomogeneità consistenti

#### ▪ *Caratterizzazione terreno tramite sorgente fissa*

Come descritto nella parte introduttiva del lavoro, le operazioni primarie d'abbattimento della roccia calcarea possono avvenire generalmente attraverso la volata di mine oppure mediante l'utilizzo di martelli idraulici montati su escavatori cingolati. Il materiale del fronte cava che deve essere lavorato viene trasportato tramite dumper e autocarri sino al piazzale principale dove è presente un frantoio mobile unito a un sistema di nastri il quale, alimentato da un gruppo elettrogeno autonomo, realizza una prima frantumazione del materiale per ridurre la pezzatura. Successivamente tramite un imbuto viene rilasciato il materiale sul primo nastro trasportatore; da qui inizia il movimento fino a fine corsa dove passa per gravità al nastro successivo. Il meccanismo si ripete per altre tre volte, per una lunghezza totale di circa 50m ad un'altezza che varia da un minimo di 3m fino a un massimo di 8m e quindi attraverso questa sequenza di nastri trasportatori, il materiale viene rilasciato al fornello di scarico posizionato al lato del piazzale della cava. Tutto quanto cade per gravità all'interno di una galleria dove, in seguito a un trattamento preventivo effettuato per asportare impurità e fini terrosi, viene trasportato attraverso un altro sistema di nastri a un impianto secondario. A questo punto del processo, a seconda della granulometria e dimensioni che si vogliono ottenere, viene mandato a diverse macchine di frantumazione per poi essere depositato in coni di stoccaggio, in attesa che le pale gommate lo carichino sui mezzi. Il sistema appena descritto rappresenta una fonte di vibrazioni considerevole e per questo, come già accennato precedentemente, prima di testare i metodi d'accoppiamento, si è cercato d'avere un'idea della risposta del terreno a fronte di una sollecitazione meccanica approssimativamente costante. L'impianto è stato scelto come sorgente adeguata per ricavare un set di misure dalle quali poter fare un'analisi preliminare della risposta del terreno, monitorando in diversi punti le vibrazioni indotte dalla sollecitazione vibratoria di tutte le parti meccaniche sulla struttura. Il dispositivo (velocimetro triassiale) è stato vincolato al terreno solo per gravità, essendo i valori d'accelerazione attesi inferiori a 1 g e le misurazioni sono state effettuate a distanza crescenti secondo i parametri riportati nella tabella seguente

Tabella 93 : prospetto dei punti di misurazione

<i>Misura</i>	<i>Punto della sorgente</i>	<i>Distanza</i>
1	tramoggia dell'impianto	5m
2	imbuto per scarico su nastro trasportatore	5m
3	1 salto nastro trasportatore	5m
4	1 salto nastro trasportatore	9m
5	1 salto nastro trasportatore	18m
6	3 salto nastro trasportatore	15m
7	3 salto nastro trasportatore	18 m



Fig. 237: visuale dei nastri trasportatori e dell'impianto di macinazione

I punti d'acquisizione sono identificati a inizio e fine impianto ma tale scelta è stata condizionata da due problemi di carattere pratico; uno dovuto al fatto che in prossimità dell'impianto alcune parti di materiale sono eiettate, rischiando di colpire sia l'attrezzatura per la misurazione che gli operatori. L'altro, invece, consiste nell'impossibilità di effettuare le misure poiché l'acqua gettata dagli ugelli in prossimità dei salti dei nastri per l'abbattimento delle polveri, crea una zona di fango nel terreno che impedisce il posizionamento della strumentazione. Ecco spiegato perché le misurazioni per il 3 nastro sono solo a distanze superiori 10m. L'ipotesi di partenza alla base di queste misurazioni è stata quella di considerare l'impianto come una sorgente lineare, ossia un unico forzante vibratoria somma di più sorgenti. Di seguito sono riportati grafici più significativi delle misurazioni effettuate alla diverse distanze dall'impianto, mentre i restanti sono riportati in appendice I.

## Misura 1

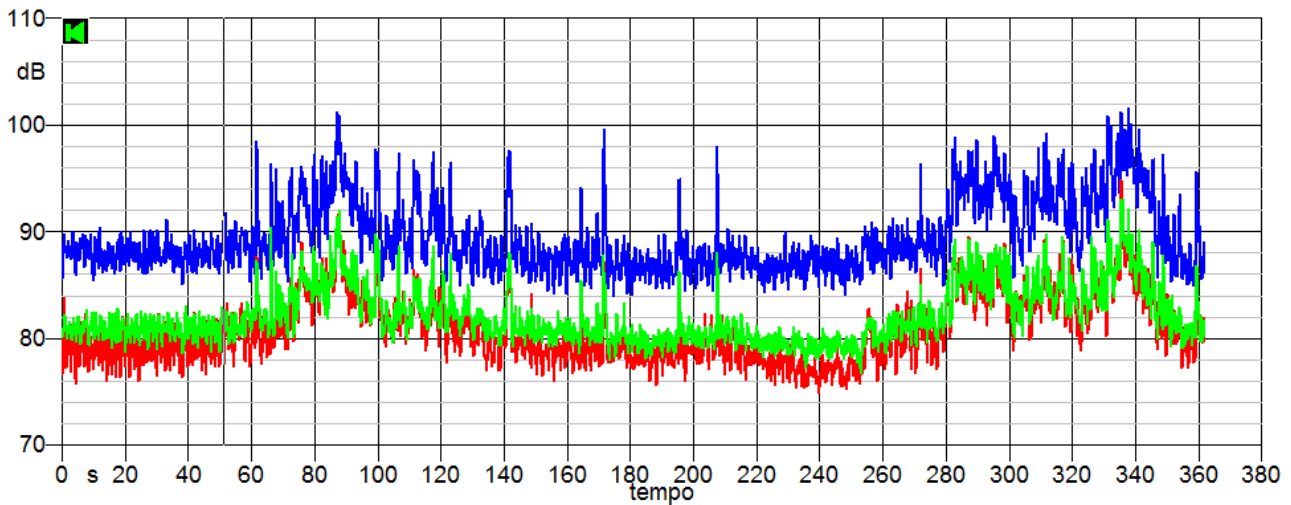


Fig. 238: andamento del segnale vibratorio nel tempo del punto di misura 1

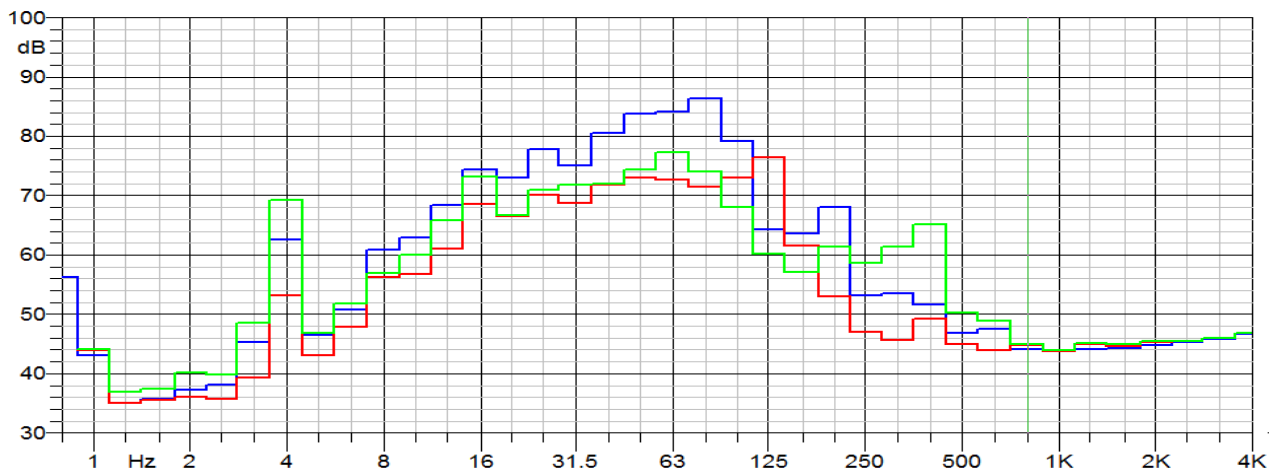


Fig. 239: spettro in frequenza (1/3 bande d'ottava) del punto di misura 1

La misurazione 1,2 e 3 sono state realizzate sono quelle effettuate in prossimità dell'impianto di frantumazione alla medesima distanza ma in posizione differente; la prima in punto interposto tra la base del frantoio e la parete delimitante la sede d'alloggiamento del frantoio stesso mentre la altre due in punti in prossimità dei rulli trasportatori nel mezzo del piazzale della cava. Questa differente posizione può essere una spiegazione del maggior contributo d'energia vibratoria in direzione longitudinale. Infatti le Time History mostrano nella prima misurazione un maggior livello vibratorio nella direzione longitudinale  $x$  mentre nelle altre due si hanno contributi simili lungo tutte e tre le direzioni di sollecitazione ( $x$ ,  $y$  e  $z$ ). Ciò trova conferma anche negli spettri in frequenza, il cui contenuto è compreso tra 1 Hz e 80Hz con un particolar elevato livello energetico riscontrabile sotto i 2Hz. L'andamento degli spettri mostra generalmente un segnale che diminuisce fino ai 2 Hz poi aumenta o in modo graduale fino alle frequenze di centro banda, tranne che a 4 Hz, dove si manifesta sempre una componente maggiore rispetto alla bande adiacenti. Tale componente in frequenza può



essere considerata come la componente fondamentale della sorgente vibratoria in esame, ossia la frequenza che caratterizza la forzante del sistema impianto – terreno. Per poter meglio comprendere il comportamento del terreno in termini di risposta e in particolare d’attenuazione è stata implementata la campagna con ulteriori misure realizzate nei medesimi punti ma attraverso punti d’acquisizione a raddoppio di distanza, secondo quanto riportato nella tabella seguente

Tabella 94 : misurazioni effettuate dal nastro trasportatore

<i>Misura</i>	<i>Punto della sorgente</i>	<i>Distanza</i>
1	1 salto nastro trasportatore	2m
2	1 salto nastro trasportatore	4m
3	1 salto nastro trasportatore	8m
4	1 salto nastro trasportatore	16m
5	1 salto nastro trasportatore	32m

Come nel caso precedente vengono riportati di seguito tutti i grafici delle misurazioni effettuate alle diverse distanze dall’impianto di lavorazione

### Misura 1

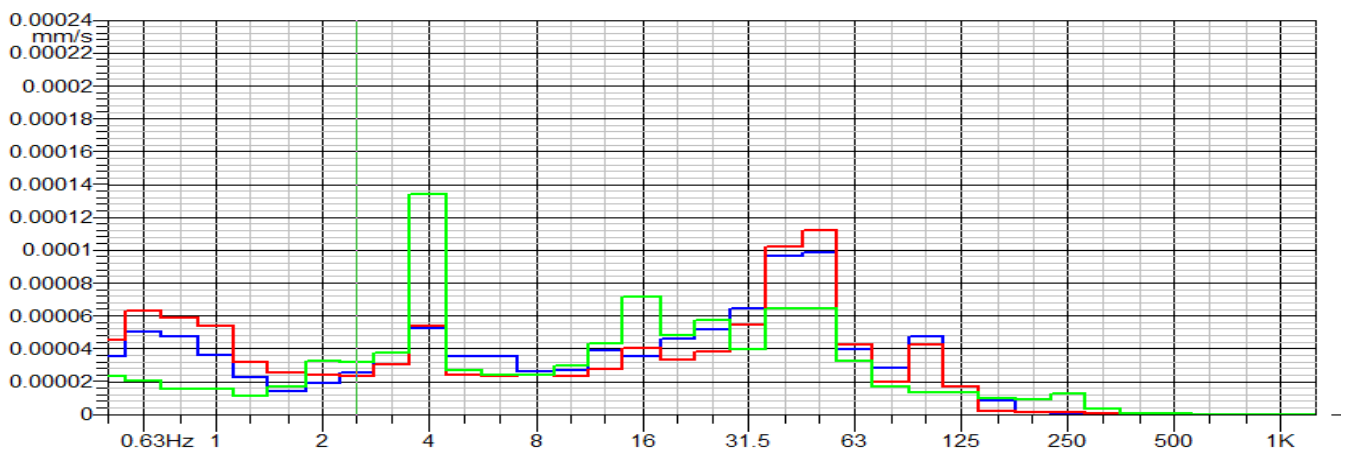


Fig. 240: spettro in frequenza (1/3 bande d’ottava) rilevato a 2 m dall’impianto

## Misura 2

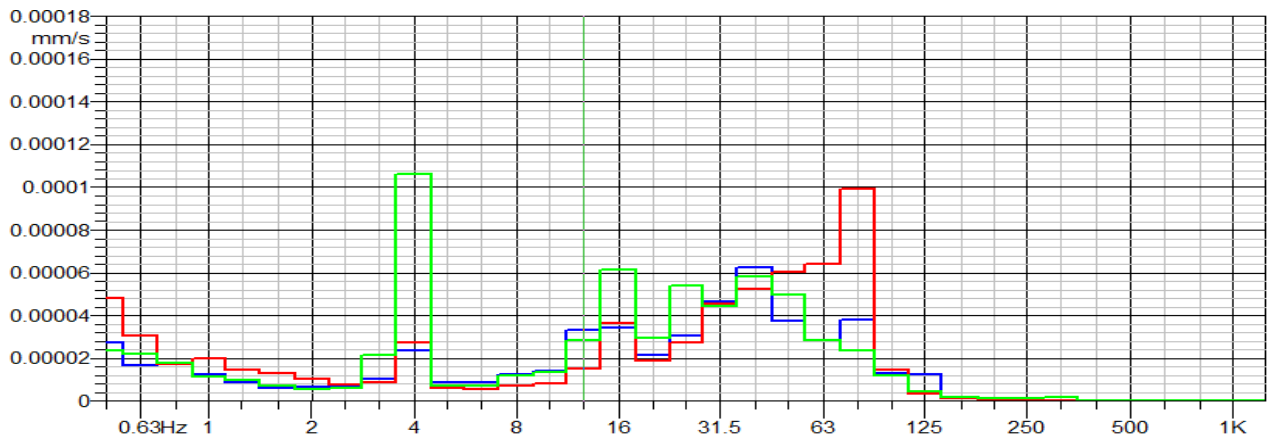


Fig. 241: spettro in frequenza (1/3 bande d'ottava) rilevato a 4 m dall'impianto

## Misura 3

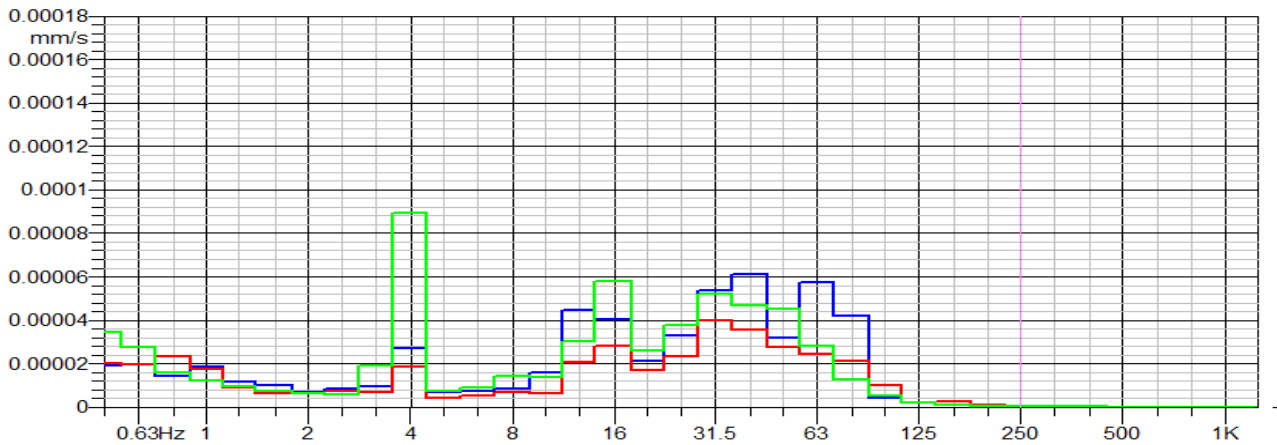


Fig. 242: spettro in frequenza (1/3 bande d'ottava) rilevato a 8 m dall'impianto

## Misura 4

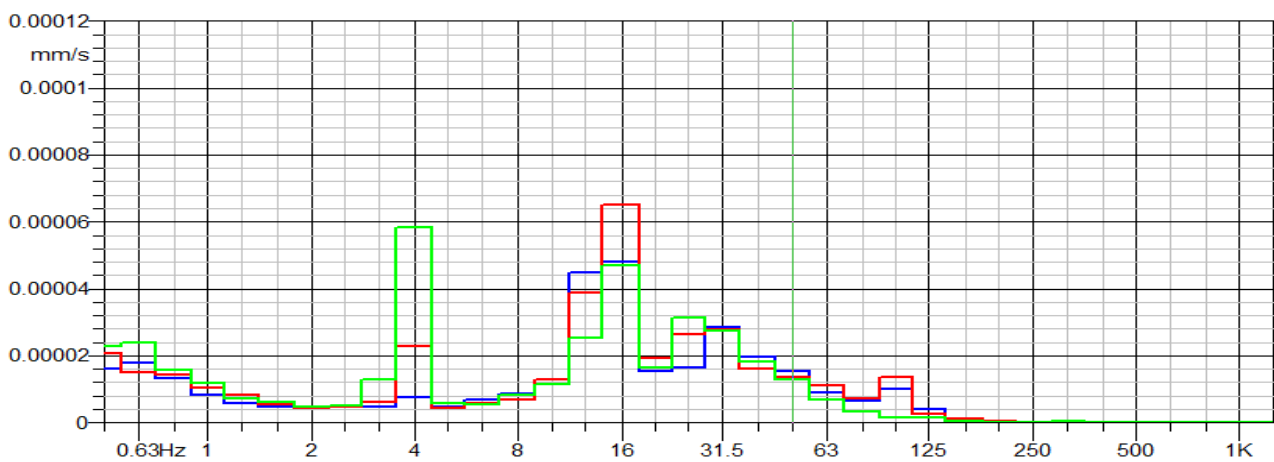


Fig. 243: spettro in frequenza (1/3 bande d'ottava) rilevato a 16 m dall'impianto

## Misura 5

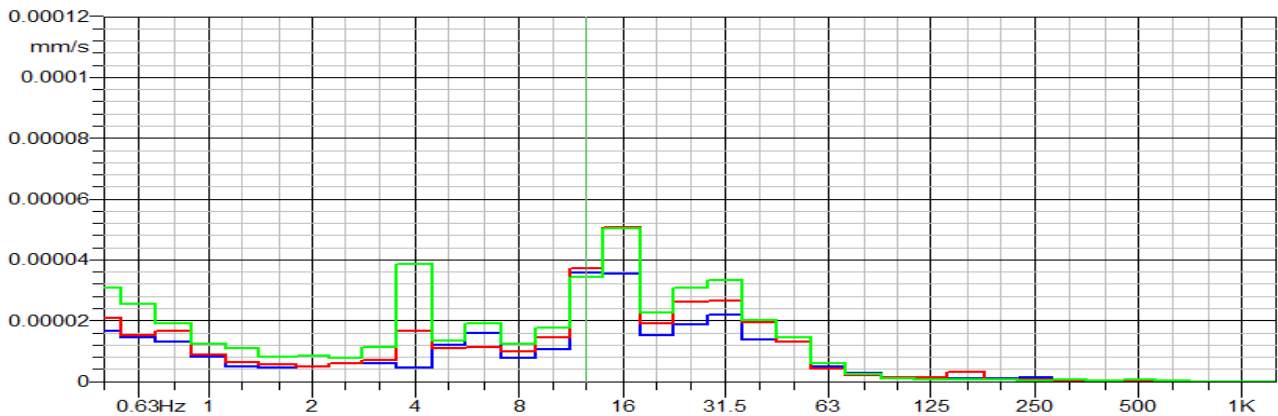


Fig. 244: spettro in frequenza (1/3 bande d'ottava) rilevato a 32 m dall'impianto

I grafici riportano gli spettri in frequenza delle misure, effettuate raddoppiando la distanza tra un punto e l'altro, confermano come frequenza fondamentale della sorgente in considerazione a 4 Hz. Il terreno mostra una buona trasmissibilità del segnale e addirittura, ciò che induce una riflessione, è la presenza di componenti a frequenze maggiori per le misure realizzate all'aumentare della distanza dalla sorgente. Generalmente le componenti a bassa frequenza sono quelle che si trasmettono a maggiori distanza nel terreno mentre quelle ad alta frequenza vengono smorzate quasi subito. Questo si è potuto constatare su quasi tutti i rilevamenti effettuati ed è attribuibile al fatto che, durante le misurazioni, sono attive altre sorgenti che non si è potuto, per ovvie ragioni di produzione, arrestare, quali i mezzi di trasporto del materiale, il generatore d'alimentazione dell'impianto, l'escavatore e la trivella, e il cui contributo in termini di sollecitazione è risultato tale da annullare l'ipotesi fatta all'inizio di sorgente puntiforme. Al fine di poter comprendere meglio la propagazione delle onde lungo le diverse direzioni è stata calcolata una funzione di risposta in frequenza FRF, Frequency Responce Function, lungo ciascun asse di sollecitazione. La funzione è stata calcolata come rapporto tra lo spettro in frequenza di una misurazione aggiuntiva, considerata come sorgente, che si è riusciti ad effettuare in prossimità dell'impianto in un solo punto dove il terreno permetteva il posizionamento dello strumento. L'ipotesi fatta è che tale punto sia rappresentativo di tutto l'impianto. Infatti come, descritto precedentemente, vicino all'impianto, oltre al problema dell'acqua, si accumula la polvere generata dal movimento del materiale roccioso sui nastri formando uno strato soffice; tale spessore impedisce un posizionamento corretto del velocimetro in quanto le viti posizionate alla base dello strumento, ruotando permettono di regolare l'altezza da terra al fine di metterlo, come si dice in gergo, "in bolla". Non trovando resistenza nel terreno, affondano perdendo completamente la capacità di regolare la posizione dello strumento. I grafici delle funzioni ottenute mostrano che per poter definire una funzione di trasferimento accurata per un terreno, siano necessari una consistente base di dati.

Quello che viene illustrato è la base per uno studio preliminare del terreno che evidenzia una trasmissibilità del segnale vibratorio alle basse frequenze, oggetto del nostro interesse.

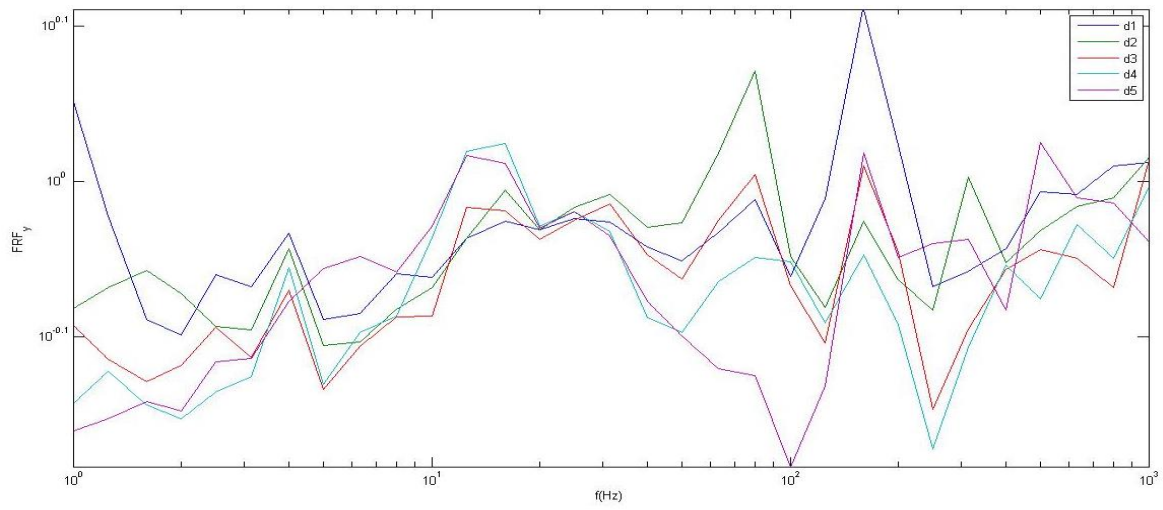


Fig. 245: FRF lungo la direzione y alle varie distanze

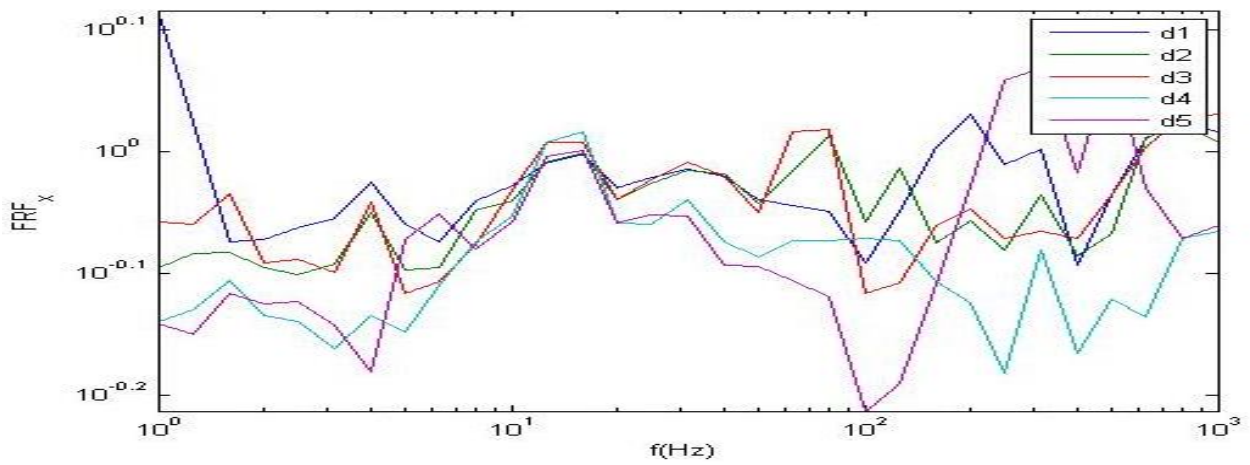


Fig. 246: FRF lungo la direzione x alle varie distanze

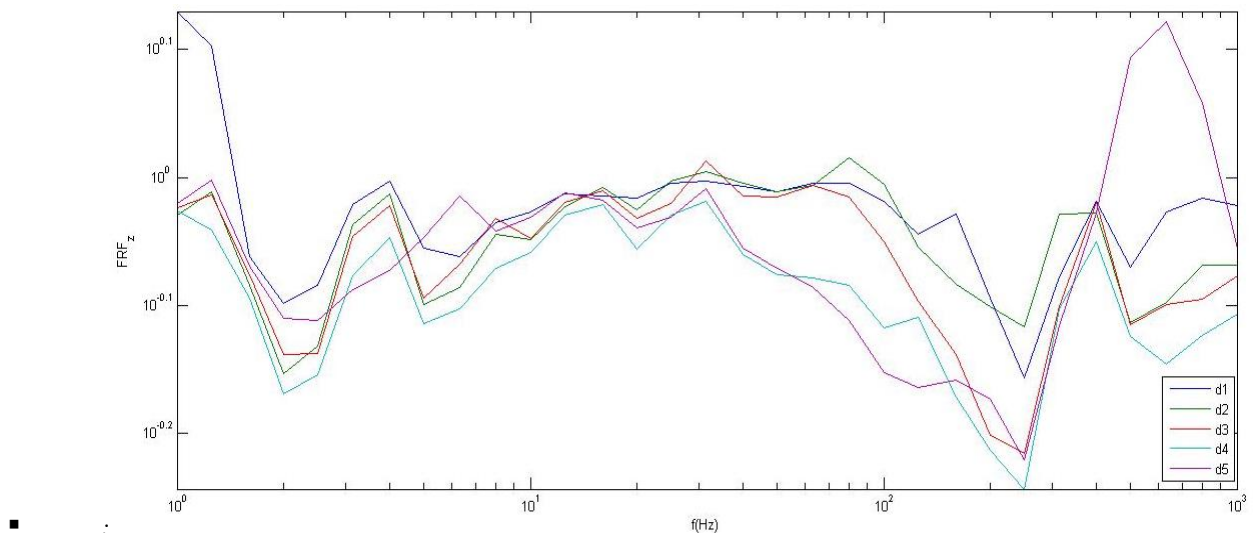


Fig. 247: FRF lungo la direzione z alle varie distanze

I risultati ottenuti descrivono il comportamento del terreno che mostra una trasmissibilità in un ampio spettro di frequenze. La presenza di più sorgenti, come già detto, ha portato all'impossibilità di poter effettuare una completa caratterizzazione dell'ambiente oggetto dello studio. Per approfondire quest'aspetto si è cercato di studiare il comportamento del terreno per una delle potenziali sorgenti di disturbo, la trivella perforatrice. La scelta è stata dettata dal fatto che penetrando a considerevoli profondità nel terreno per la realizzazione dei fori di bancata, le sollecitazioni vibratorie sono state ritenute consistenti, rappresentando quindi una sorgente tutt'altro che trascurabile. Le misure sono state realizzate in prossimità della trivella che stava effettuando il lavoro di perforazione su una bancata posizionata alle spalle dell'impianto di lavorazione; per motivi di sicurezza non è stato possibile misurare in prossimità del punto di perforazione per poter caratterizzare la sorgente vibratoria. Il criterio di lavoro è stato lo stesso di quello dell'impianto e i punti d'acquisizione sono stati 4 per motivi di limite di spazio della bancata di lavoro

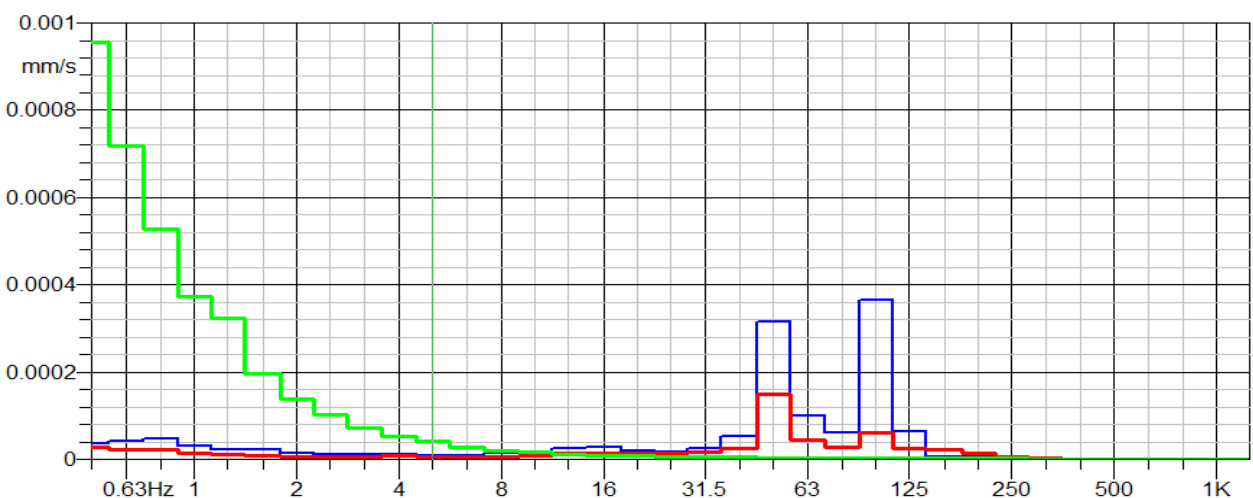


Fig. 248: spettro delle misure nel punto 1 rispetto alla trivella

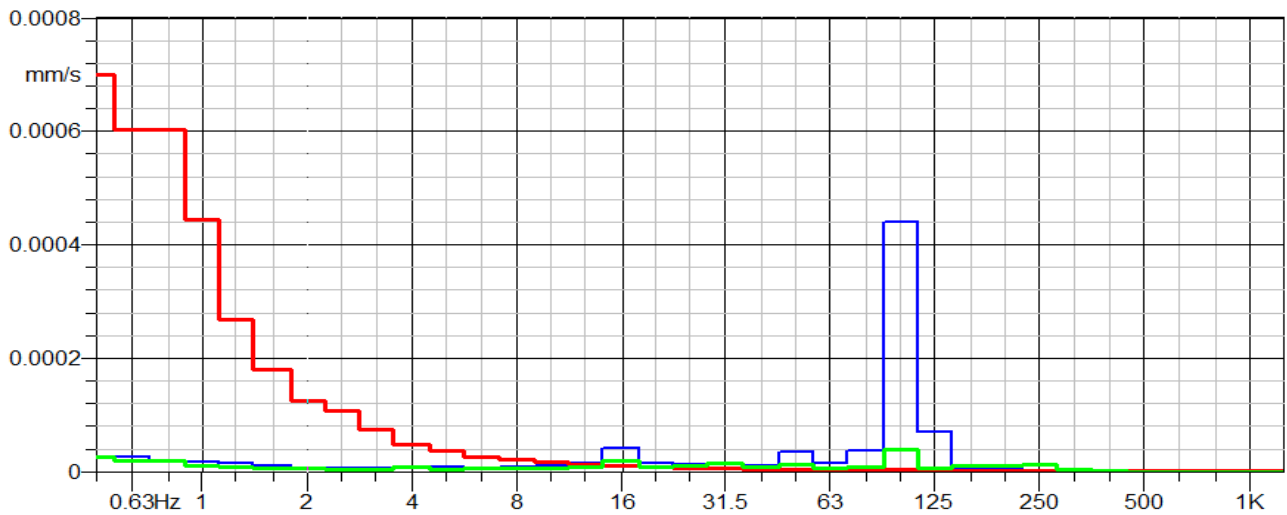


Fig. 249: spettro delle misure nel punto 2 rispetto alla trivella

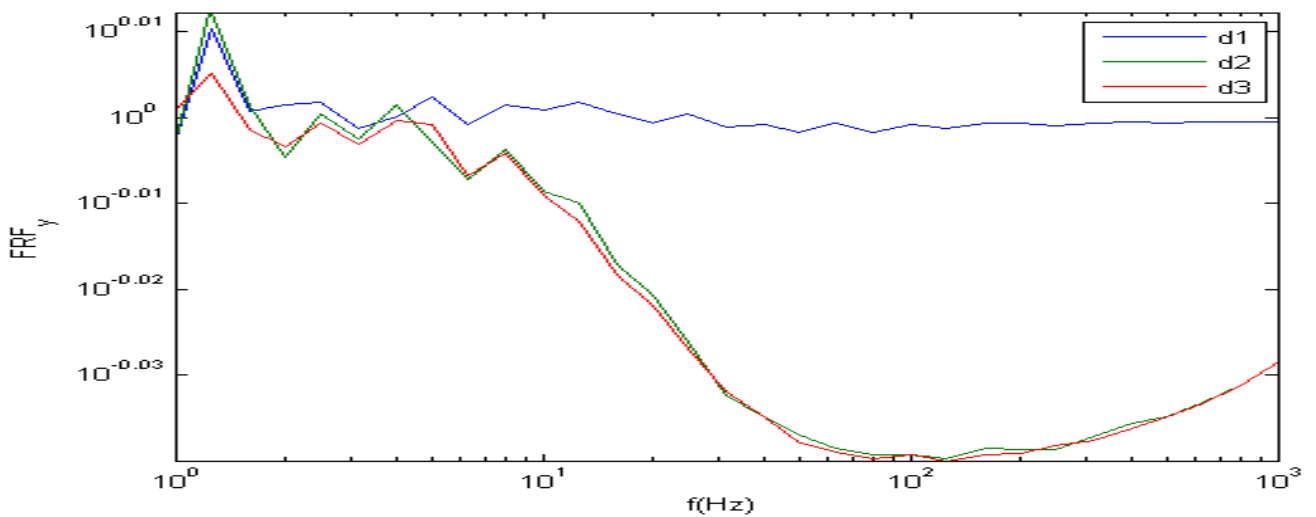


Fig. 250: andamento della funzione FRF lungo y

Le misure in prossimità della perforatrice hanno mostrato una risonanza a 100 Hz lungo la direzione  $x$ , e dal grafico della FRF mostrato, si evidenzia come una trasmissibilità nel terreno, ossia nessuna attenuazione del segnale che invece si può riscontrare all'aumentare della distanza, lungo l'asse  $z$  ma soprattutto  $y$ . È bene evidenziare che all'aumentare della distanza dal punto di immissione della vibrazione non c'è campo libero ma la parete che delimita la bancata, la quale rappresenta una superficie di discontinuità e quindi un'elevata impedenza per la propagazione dell'onda meccanica. È possibile supporre che l'attenuazione sia attribuibile a fenomeni di riflessione delle onde in controfase che vanno a diminuire i valori misurati

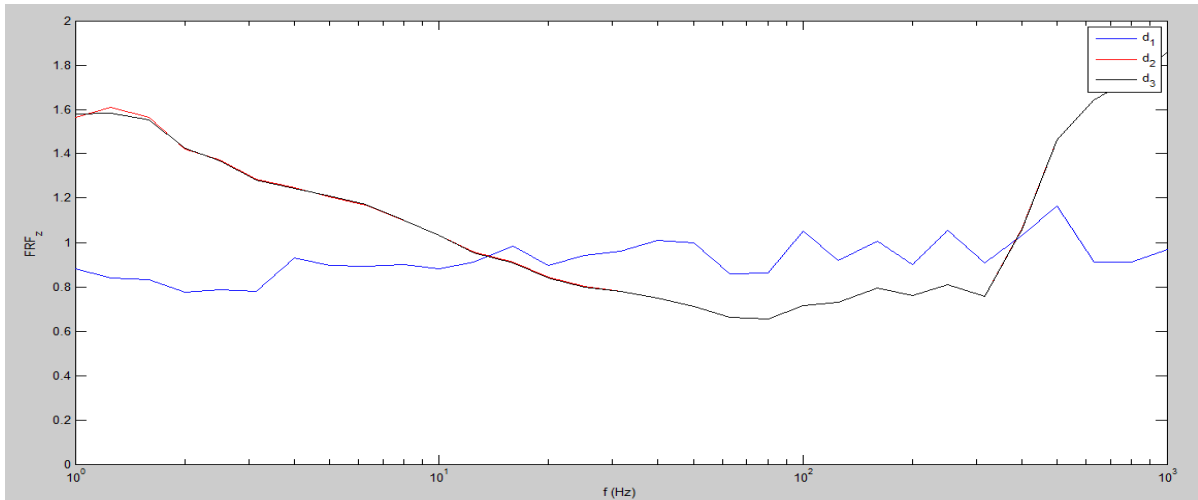


Fig. 251: andamento della funzione FRF lungo z

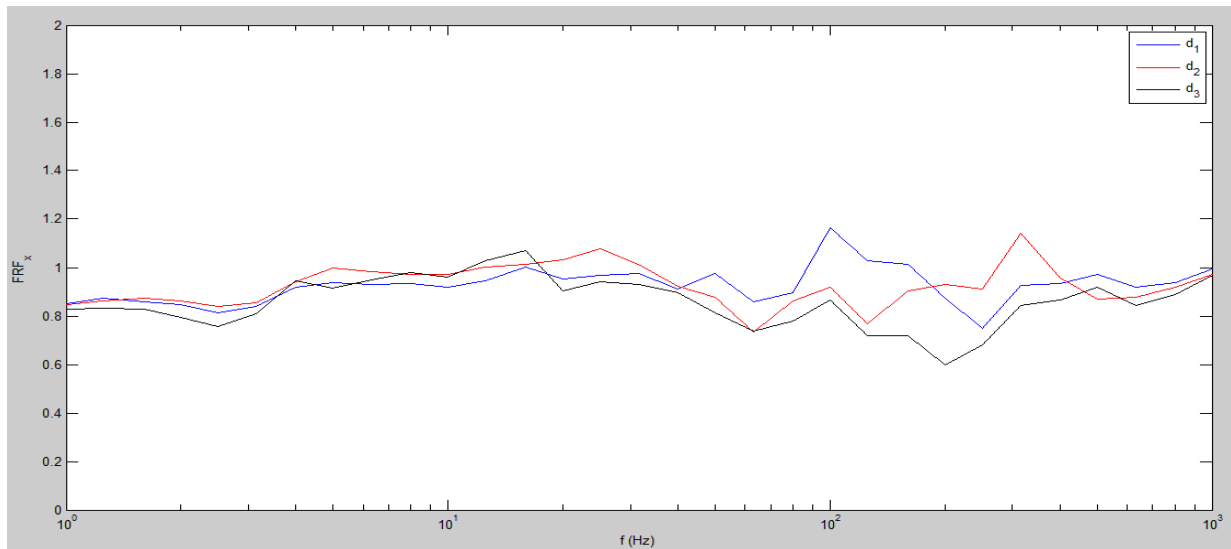


Fig. 252: andamento della funzione FRF lungo x

Non si è potuto quantificare in modo univoco la risposta del terreno a questo tipo di sorgente, ma questa parte di studio ha evidenziato caratteristiche dello spettro e di trasmissibilità del terreno, dalle quali è lecito pensare che le sollecitazioni vibratorie generate possano influenzare quelle dell'impianto, confermando le conclusioni sopra citate e rendendo quindi difficile la caratterizzazione dell'impianto stesso

#### 2.2.4.2 Confronto delle metodologie d'accoppiamento seppellimento-sacco

I lavori svolti nel contesto rurale e rubano hanno permesso una definizione di comprendere alcune delle principali problematiche connesse all'accoppiamento del trasduttore con il terreno e ad acquisire quella praticità fondamentale con la strumentazione per poter svolgere una campagna di misurazione. Da qui si è partiti per affrontare il delicato contesto delle attività estrattive e, nell'ottica d' avere stime affidabili dei valori di sollecitazione delle vibrazioni indotte dalle operazioni di brillamento, ci si è focalizzati su diverse metodologie d'accoppiamento utilizzate al fine di garantire un efficace accoppiamento con il terreno. E' stata realizzata una lunga campagna sperimentale applicando, come citato precedentemente, due differenti metodologie d'accoppiamento; la prima seppellendo il trasduttore in una cavità di dimensioni definite, la seconda fissando un sacco di materiale calcareo di peso prefissato (10Kg) sopra il trasduttore al fine di garantire l'aderenza dello strumento al terreno senza dover modificare quest'ultimo. L'allineamento del trasduttore rispetto al suolo è stato dimostrato essere molto importante per ottenere misure corrette. Un allineamento difettoso può infatti portare ad un errore di misurazione evidente. Infatti il sensore deve essere livellato correttamente rispetto al terreno e pochi gradi di inclinazione possono generare errori nel rilevare i segnali. Inoltre la letteratura scientifica suggerisce che al di sotto di un'ampiezza di 60 Hz, la distorsione del segnale maggiormente influenzata dall'allineamento verticale del trasduttore rispetto al meccanismo di accoppiamento. Essendo questa gamma di frequenze, la principale area di interesse di questo studio, prima di ogni misurazione è stato verificato l'allineamento corretto e orizzontale rispetto al suolo. La posizione corretta del velocimetro è stata controllata per mezzo di viti fissate sulla base dello strumento. Il corretto posizionamento dell'accelerometro a tre assi è stato controllato altrimenti con un livello di bolla

##### ▪ Campagna di prova

Il contesto estrattivo per le sue caratteristiche è estremamente diverso da quelli affrontati nelle prime due campagne di misurazione, sia in termini di tipologia di sorgenti vibratorie che di caratteristiche morfologiche del terreno. E' stata realizzata una prima campagna di prova per testare l'impiego della strumentazione in un sito di misurazione nuovo e testare la metodologia d'accoppiamento del seppellimento. Questa parte del lavoro è stata realizzata secondo quanto riportato dalla norma UNI 9916 che suggerisce il seppellimento dello strumento, per valori d'accelerazione superiori a 1g, ad



una profondità pari a 3 volte la dimensione del sistema trasduttore-supporto per garantire un efficiente contatto con il terreno, riducendo al minimo la possibilità di slittamento

### *Missione di prova*

L'alloggiamento del dispositivo d'acquisizione nel terreno è avvenuto attraverso la procedura basata su tre differenti fasi:

- 1) realizzazione di due cavità nel terreno distanti 20m dall'ultima fila di fori, ad uguale profondità ( $50 \pm 5$  cm), ad una distanza reciproca di 1.5 m attraverso una macchina movimento terra
- 2) verifica del corretto allineamento del trasduttore rispetto al terreno
- 3) riempimento del foro con il materiale escavato e sua compattazione



*Fig. 253: realizzazione del foro con martello demolitore e verifica della profondità*

Questa metodologia ha consentito un buon meccanismo di accoppiamento tra il sensore e il suolo ma, l'impiego di un martello demolitore su un materiale roccioso ha causato la fratturazione della roccia nell'intorno del punto d'acquisizione. Sebbene queste fratture possano generare un errore di inserzione della misura, quest'ultimo è stato valutato come un metodo sistematico e quantificato come costante e che quindi non pregiudica l'affidabilità della lettura del segnale vibratorio. Le caratteristiche tecniche degli strumenti, già descritte precedentemente, e i valori del settaggio sono gli stessi riportati per comodità nella seguente tabella

Tabella 95: caratteristiche strumenti impiegati

<b>Caratteristiche dello strumento</b>			
<i>Trasduttore</i>	Sensibilità	Frequenza di Campionamento [Hz]	Guadagno [V]
<i>Accelerometro Triassiale PCB 393A03</i>	10 55 [mV/(m/s <sup>2</sup> )]	1.250	0.315
<i>Velocimetro 3D Sinus</i>	27 [mV/(mm/s <sup>-1</sup> )]	1.250	1

Il valore della frequenza di campionamento è stata impostato uguale per entrambi gli strumenti, sulla base del segnale in esame composto da una fondamentale e più armoniche, in accordo con il teorema di Nyquist-Shannon. Esso definisce la minima frequenza di campionamento pari ad almeno il doppio della frequenza massima in corrispondenza della componente armonica del segnale non trascurabile. La frequenza di campionamento era di 1250 Hz per entrambi gli strumenti. Il segnale è stato acquisito lungo le tre direzioni del sistema di riferimento standard stabilito dalla norma di riferimento UNI 9916 che definisce: asse  $x$  =perpendicolare alla bancata- asse  $y$  = ortogonale all'asse  $x$  - asse  $z$  = perpendicolare al terreno. Gli strumenti sono stati sempre posizionati ad una distanza reciproca di 150 cm. Infine prima di ogni misurazione è stata fatta una prova, in prossimità dei due strumenti, per verificare la registrazione dello stesso segnale e l'assenza di rilevanti differenze nelle condizioni del terreno in prossimità dei due punti d'acquisizione



Fig. 254: posizionamento degli strumenti nel terreno

L'acquisizione dei segnali è avvenuta su una bancata posizionata al centro del piazzale di lavorazione della cava, con una configurazione simile alla ad una penisola, delimitata da 3 superfici libere (le pareti del fronte d'attacco) con le seguenti caratteristiche geometriche (riferite al volume da abbattere): altezza pari a 13 metri, larghezza approssimativamente di 10 metri di e profondità 12 metri di lunghezza considerando la distanza dall'ultimo foro. La superficie dove sono state effettuate le

misurazioni, e attraverso la quale accedono i macchinari per la preparazione della volata, ha mostrato rilevanti discontinuità e irregolarità



*Fig. 255: visuale della bancata di lavorazione*

La volata è stata preparata con 16 fori, avevano un diametro di 90 mm ed una profondità di 13m , pari all'altezza della bancata: l'esplosivo totale impiegato è stato di 550 Kg ( 22 casse di tritolo, ogni cassa del peso complessivo di 25 kg contenente 12 candelotti d'esplosivo MARTIA SEI, dal peso di 2.1 kg ciascuno). Il caricamento generalmente non avviene mai in modo omogeneo; a seconda della posizione del foro, della fila e dalla compattezza del materiale estratto durante la perforazione e si può variare la quantità di caricamento (numero dei candelotti d'esplosivo variabile fra i 13 e i 18 per foro). Per regola di buona prassi, le prime mine sono quelle maggiormente caricate per creare delle onde d'apertura e ottimizzare l'energia rilasciata dalle mine successive, agevolando il lavoro di fratturazione della roccia. Per i collegamenti sono stati utilizzati sempre 250 metri di miccia detonante (15 g/m di Pentrite) e per l'innescò della volata sempre due detonatori con circa 1m di miccia nera accuratamente fissati fra loro tramite nastro isolante. La file di mine sono state separate tramite relais da 25 millesimi di secondo La strumentazione è stata coperta al fine d'evitare danneggiamenti dovuti alla proiezione di frammenti rocciosi e, avviata la registrazione prima dell'accensione della miccia lenta, ci si è portati a distanza di sicurezza per assistere al brillamento





Fig. 256: relais impiegato nella volata e brillamento dell'esplosivo

I dati acquisiti nella misurazione della prima missione hanno permesso di analizzare per la prima volta una sorgente vibratoria di tipo impulsivo. Il problema che si è mostrato immediatamente è stato il fenomeno dell'over-load, che rappresenta una fuoriuscita dal campo di misurazione dello strumento e quindi la conseguente invalidazione della misurazione, su entrambi gli strumenti. Ciò è possibile verificarlo dal grafico che mostra la forma d'onda del segnale acquisito, evidenziata in rosso

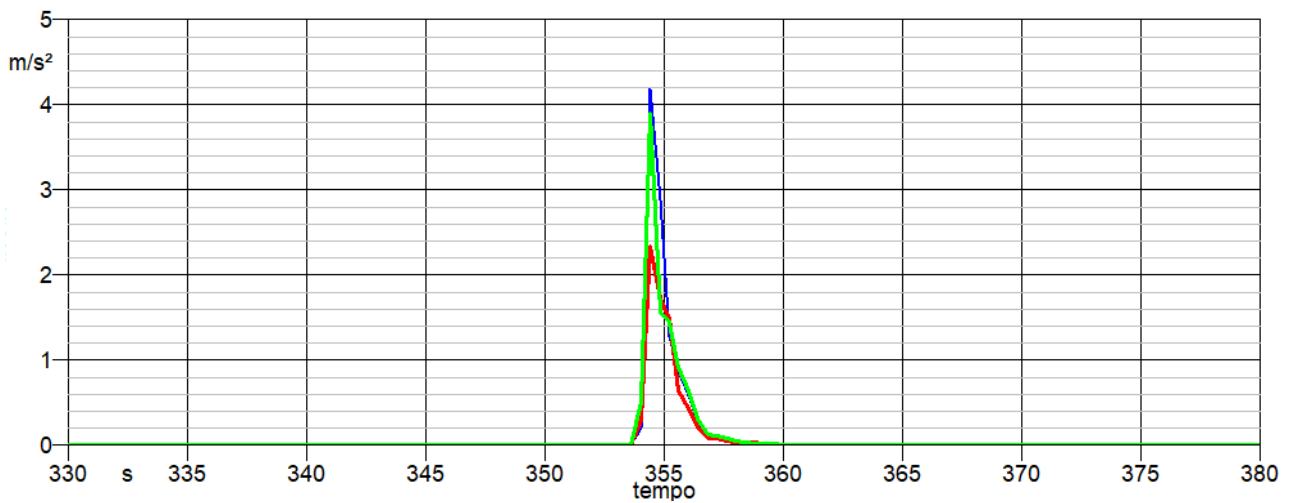


Fig. 257: Time History volata I missione

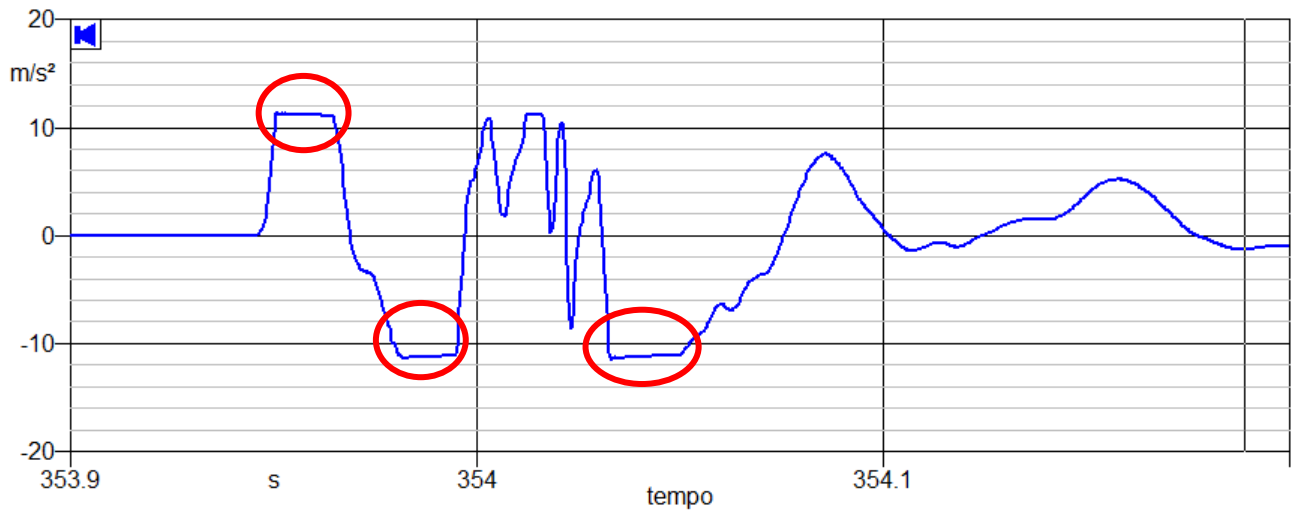


Fig. 258: forma d'onda volata I missione

Si è ipotizzato che tale fenomeno sia dovuto o alla non sufficiente distanza degli strumenti dall'ultima fila di mine, o da un'anomalia di carico della volata oppure è stato attribuito al fatto che la bancata presenta tre superfici laterali che rappresentano una discontinuità del mezzo di propagazione e quindi generano una riflessione l'onda meccanica impulsiva che porta ad un'elevata sollecitazione

### *Missione I*

La seconda missione è stata svolta al fine di verificare se l'annullamento della misura fosse dovuto a un fenomeno casuale oppure se fosse impraticabile. La procedura di realizzazione della misurazione è stata identica alla precedente missione, il punto d'acquisizione del segnale è stato il medesimo e l'unico parametro cambiato era stata la distanza dall'ultima fila di mine, essendo avanzato il fronte di lavorazione. Così è stata ripetuta la procedura di seppellimento degli strumenti per realizzare punti di misurazione sempre a una distanza di 20m. La bancata è stata preparata con 2 mine per ciascuna delle prime due file, 4 nella successiva, dovute all'allargamento della bancata, successivamente 3 e l'ultima fila da 5 mine. In totale sono state posizionate 16 mine su 5 file con 4 relais



Fig. 259: particolari di preparazione della volata

Purtroppo anche la seconda misurazione ha mostrato le stesse problematiche di quella precedente evidenziando il fenomeno dell'over-load. Si può notare che dal grafico della Time History dei valori efficaci non si riesce a comprendere la presenza di tale problematica ed è necessario analizzare il segnale nella sua forma d'onda originale

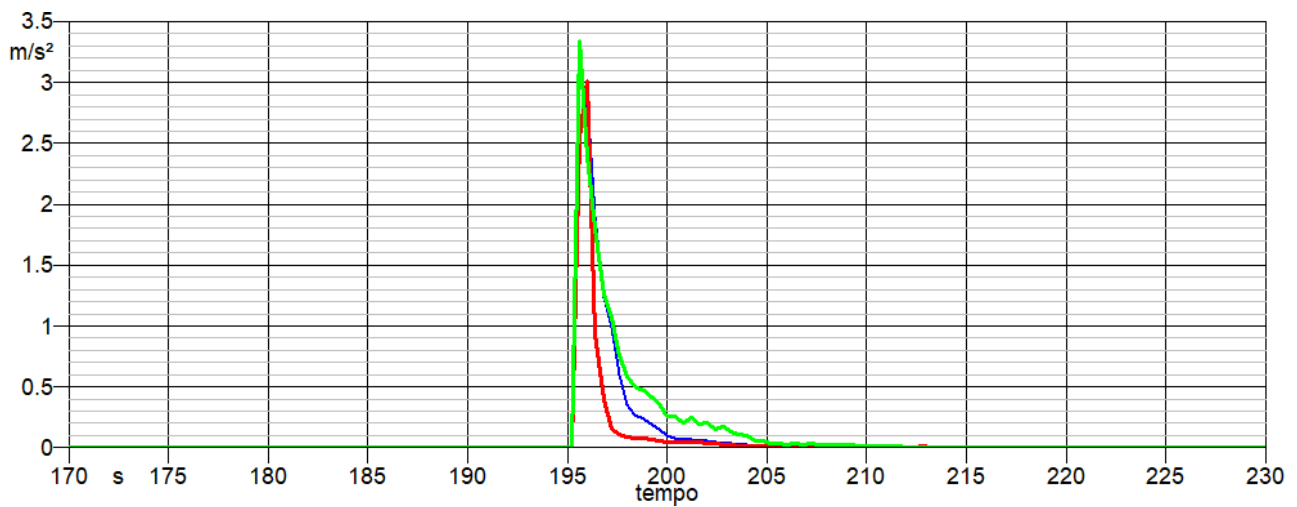


Fig. 260: Time History della volata

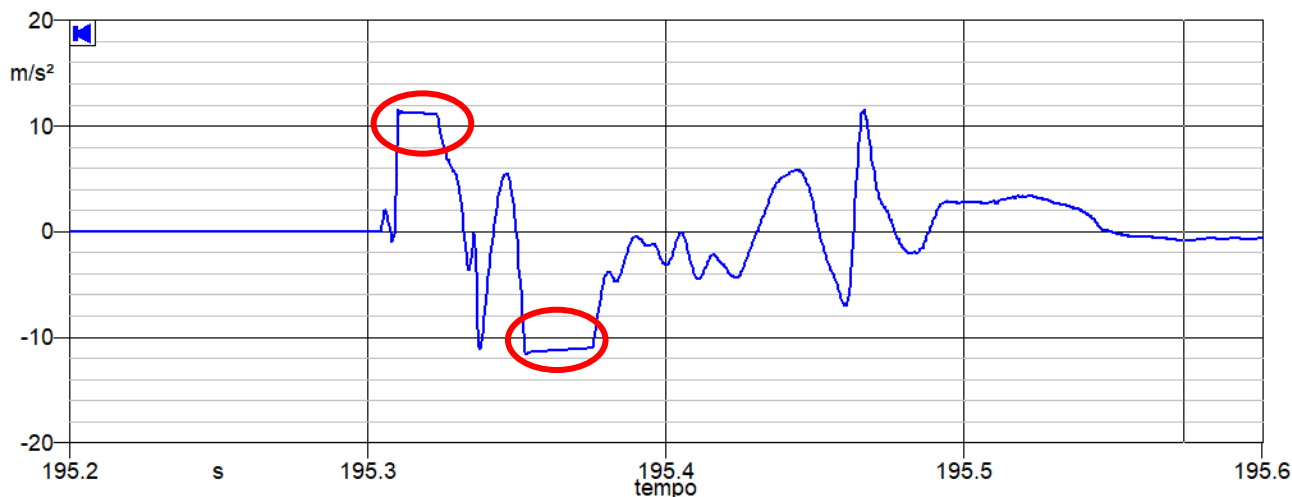


Fig. 261: fenomeno dell'over-load nella forma d'onda del segnale

Sulla base di queste considerazioni si è deciso di cambiare posizionamento del punto d'acquisizione

### ▪ Prima campagna di misurazione

I risultati della campagna di prova hanno evidenziato le rilevanti problematiche connesse al posizionamento dei trasduttori nel terreno. Sulla base di queste considerazioni è stata avviata una prima campagna di misurazione testando le stesse metodologie d'accoppiamento. Sono state rilevate 10 differenti volate, tutte misurate alle spalle della bancata ad una distanza costante pari a  $105 \pm 5$  m. La quantità totale d'esplosivo impiegata è sempre costante (600 Kg) ma, al fine d'evitare l'effetto di sovrapposizione degli impulsi, viene considerata la carica che detona simultaneamente, carica per ritardo (Charge Per Delay-CPD), su ogni singola fila di mine (ognuna con un ritardo determinato dal relais). Tutti gli esplosivi di tipo *polverulenti* e la tipologia è riportata di seguito secondo le tabelle stabilite dal Ministero dello Sviluppo Economico nell'elenco degli esplosivi, degli accessori detonanti e dei mezzi di accensione riconosciuti idonei all'impiego nelle attività estrattive: a) Martia 6 Codice Map 1Aa 2175 b) Vittoria Super Codice Map1Aa 2184 c) Tritamon A Codice Map1Aa 2118. Si riportano i grafici delle prime misurazioni per una migliore comprensione mentre i rimanenti sono riportati nelle appendici L e M

### *Fase I*

I trasduttori sono stati sepolti nelle prime 5 misurazioni e nelle successive 5 vincolati tramite un sacco di materiale calcareo dal peso di 10 Kg. Il posizionamento è stato eseguito mantenendo il corretto allineamento dello strumento rispetto al terreno senza danneggiare i cavi di collegamento. Gli

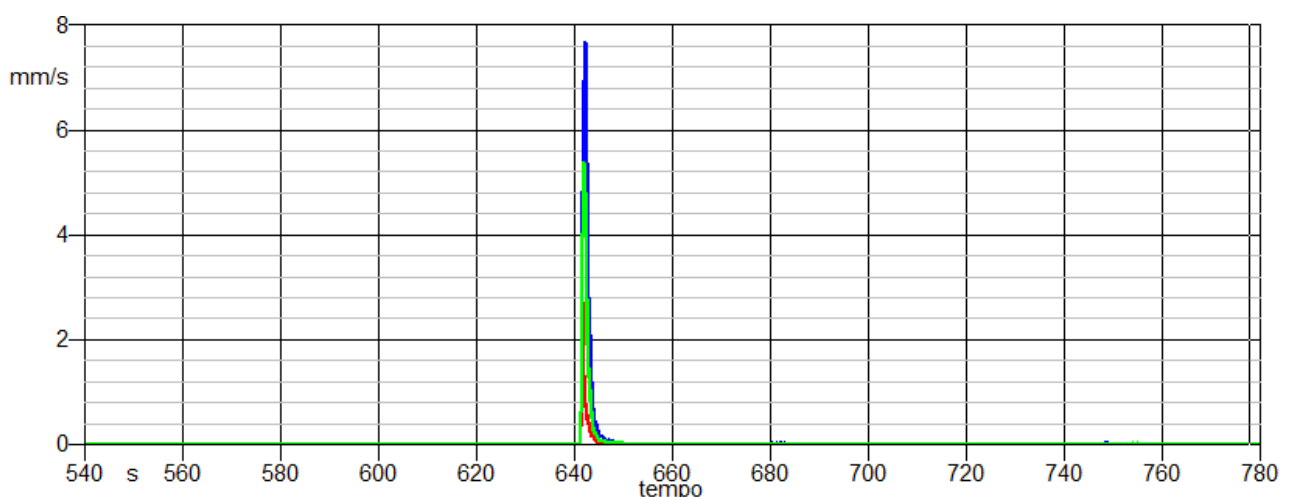
strumenti sono stati posizionati nel terreno come nella campagna precedente secondo lo stesso sistema di riferimento standard; asse  $x$  = perpendicolare al punto di esplosione (longitudinale), asse  $y$  = ortogonale all'asse  $x$  (trasversale), asse  $z$  = perpendicolare al suolo (verticale)



*Fig. 262: visuale del piazzale dove avvengono le misurazioni*

Come nella prima campagna di misurazione, gli strumenti sono stati collocati alla stessa distanza di 105 metri dal foro di esplosione. Le misurazioni realizzate vincolando il dispositivo tramite il sacco di materiale hanno richiesti tempi di preparazione inferiori rispetto alla precedente metodologia, poiché non richiedevano la realizzazione del foro e il relativo seppellimento. La prima campagna di misurazione è stata realizzata seppellendo lo strumento secondo le stesse identiche procedure della campagna precedente e di seguito sono riportati i grafici delle misurazioni degli accelerometri e del velocimetro. Il confronto tra le due metodologie è avvenuto in termini di PPV e per questo si riportano i valori in mm/s sull'asse delle ascisse.

### **1 Volata 26 Novembre**



*Fig. 263: Time History accelerometro completa della 1 volata*



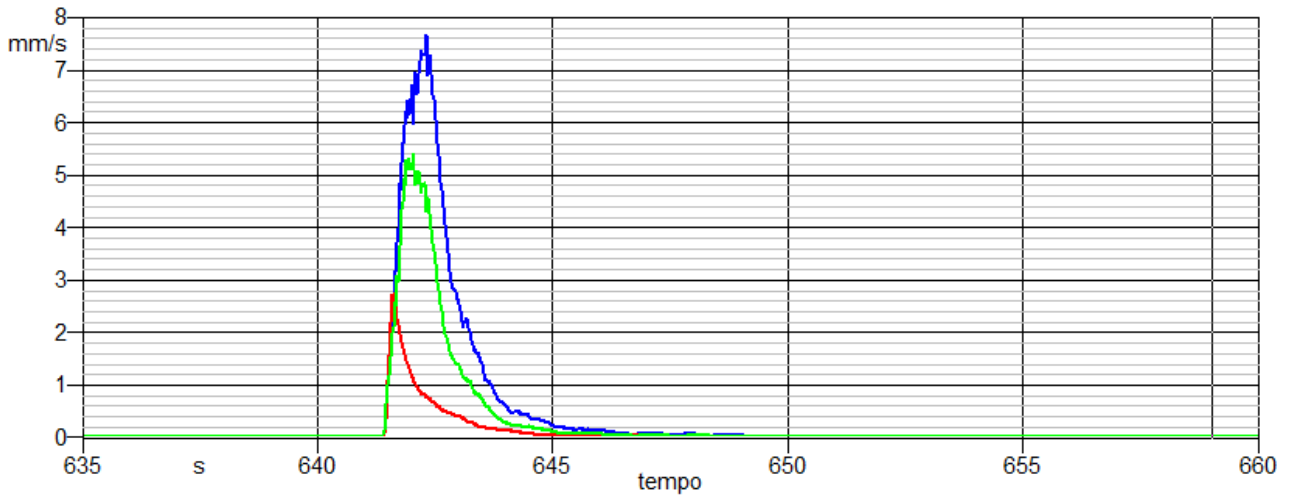


Fig. 264: ingrandimento dell'impulso della volata lungo le tre direzioni misurato con accelerometro

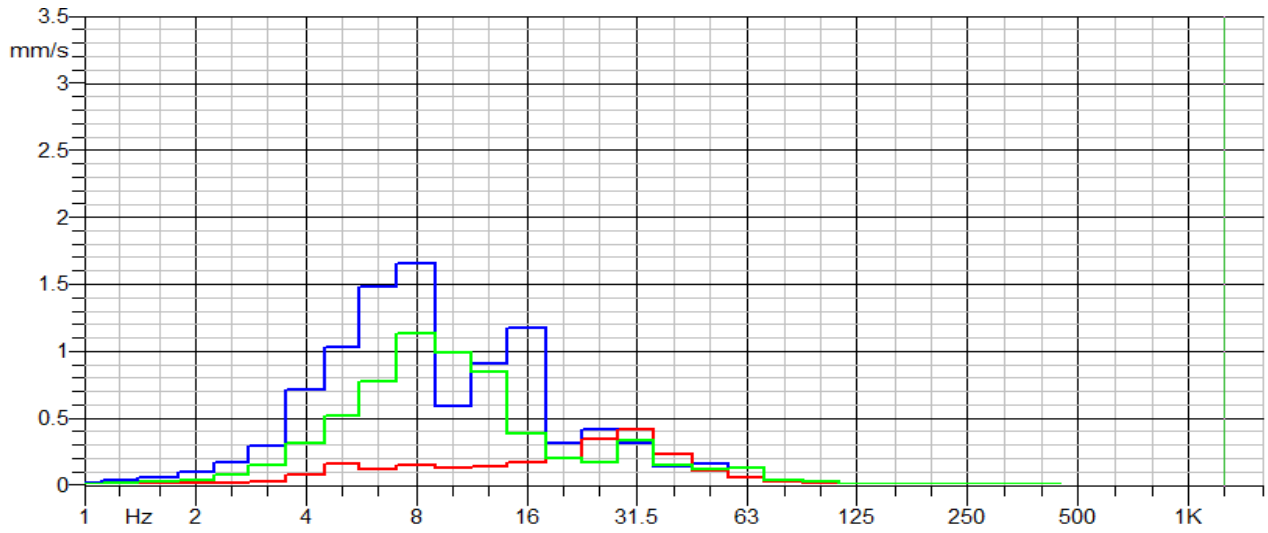


Fig. 265: spettro in frequenza della volata con accelerometro

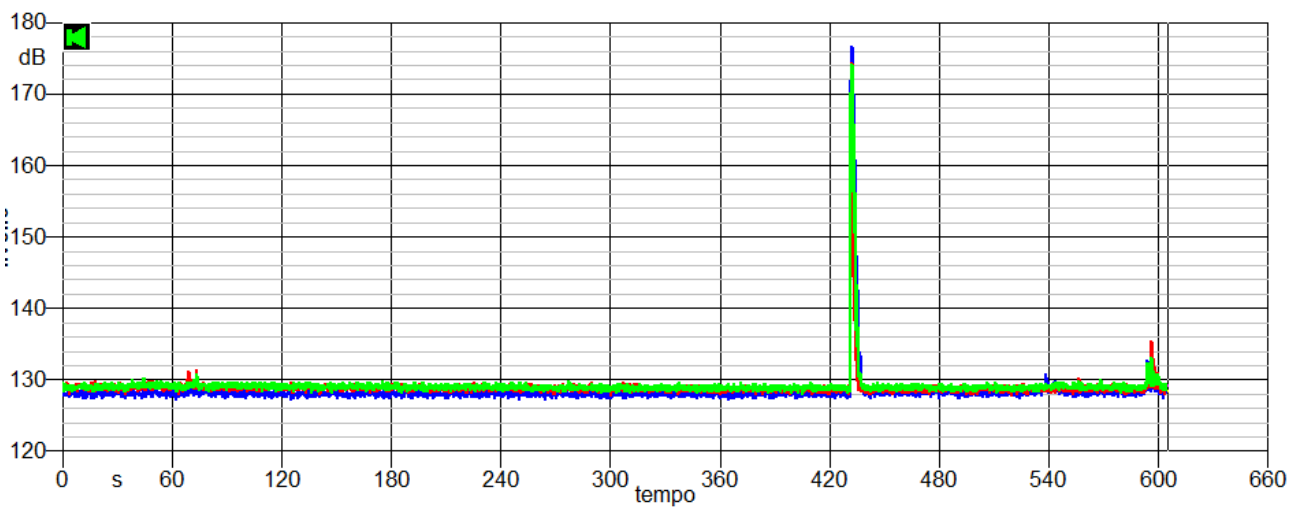


Fig. 266: Time History velocimetro completa della 1 volata

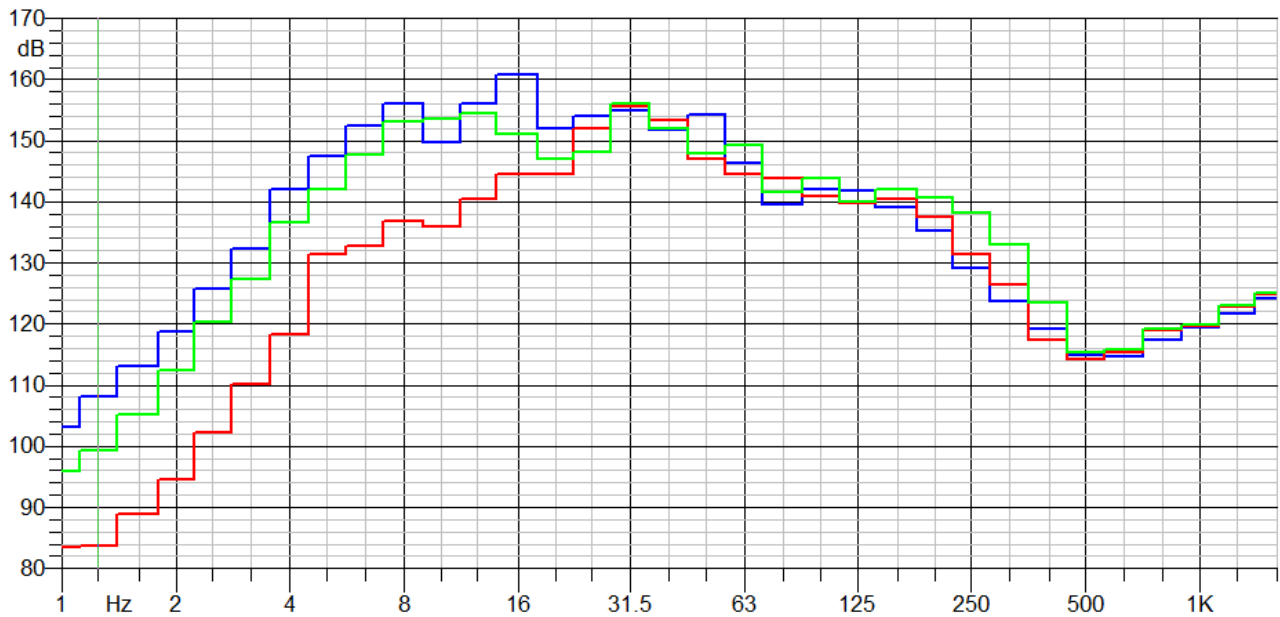


Fig. 267: spettro in frequenza della 1 volata con velocimetro

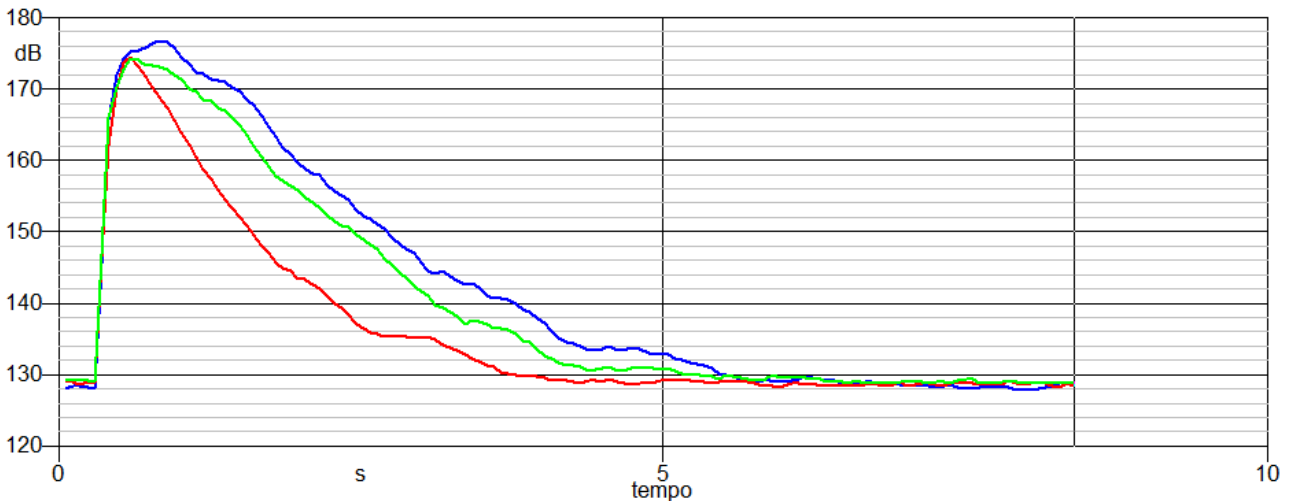


Fig. 268: ingrandimento dell'impulso della volata lungo le tre direzioni misurato con velocimetro

## ***Fase II***

Nella seconda campagna di misurazione, il trasduttore è stato poggiato sul terreno, collocando sopra d'esso un sacco di materiale calcareo dal peso di 10 Kg. Un aspetto estremamente importante è quello del collocamento del sacco poiché esso deve essere fissato in modo tale da mantenere la posizione corretta del trasduttore e al tempo stesso evitare il danneggiamento dei cavi di collegamento con l'analizzatore



Fig. 269: vincolo dello strumento tramite sacco

Questa metodologia, rispetto alla precedente, presenta il vantaggio di una facile e rapida realizzazione. I grafici riportati mostrano l'andamento del segnale, espresso in mm/s, dell'impulso registrato, con entrambi gli strumenti, su tutti gli assi del sistema di riferimento scelto e i rispettivi spettri in frequenza. I dati sono riportati sempre in riferimento alla stessa volata, sia le Time History che i rispettivi spettri in frequenza

### 6 Volata 22 dicembre

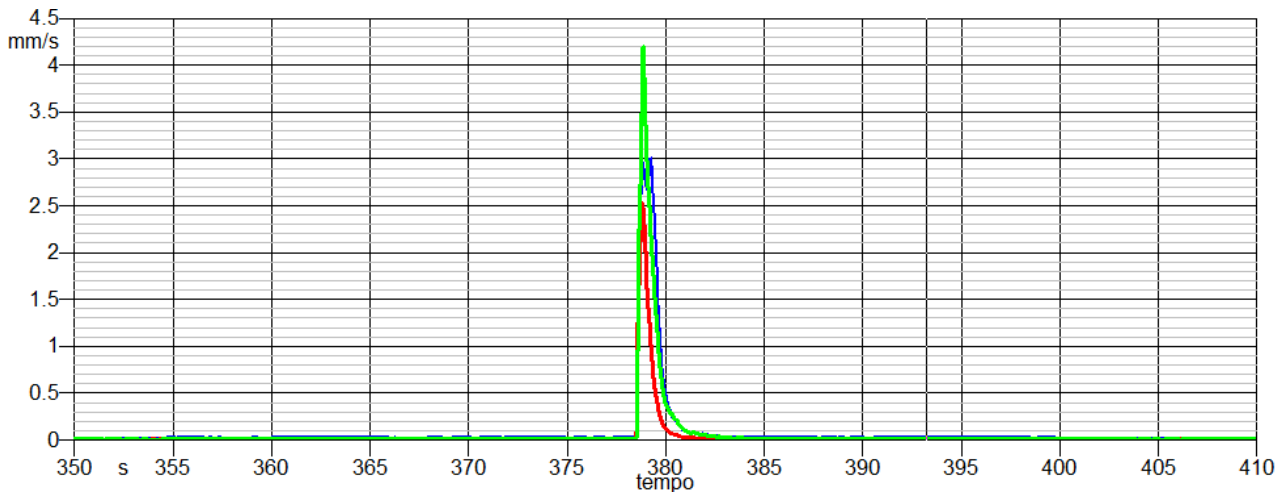


Fig. 270: Time History completa della 6 Volata con accelerometro

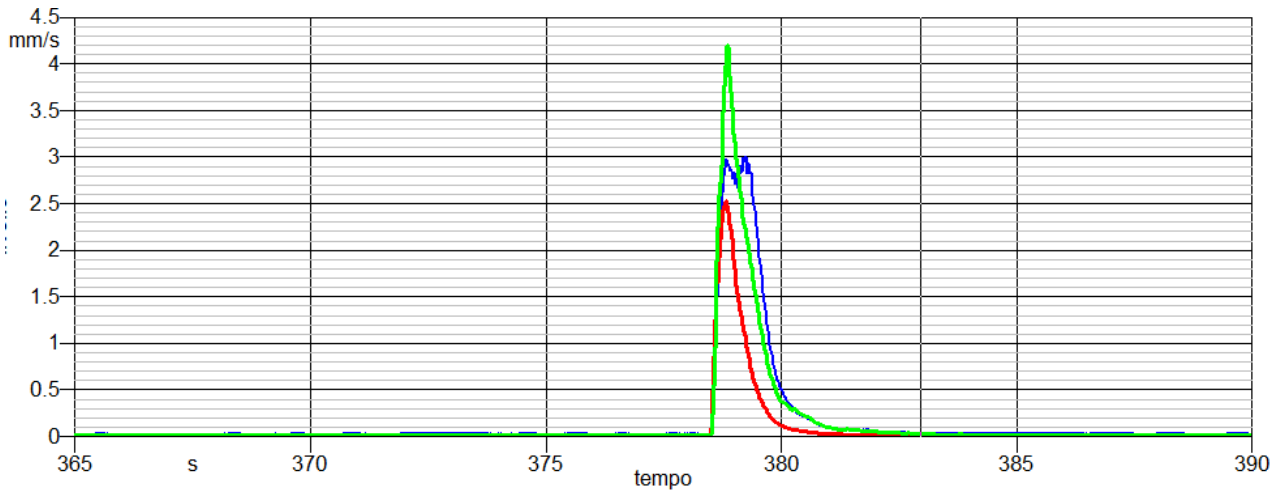


Fig. 271: ingrandimento dell'impulso della volata lungo le tre direzioni con accelerometro

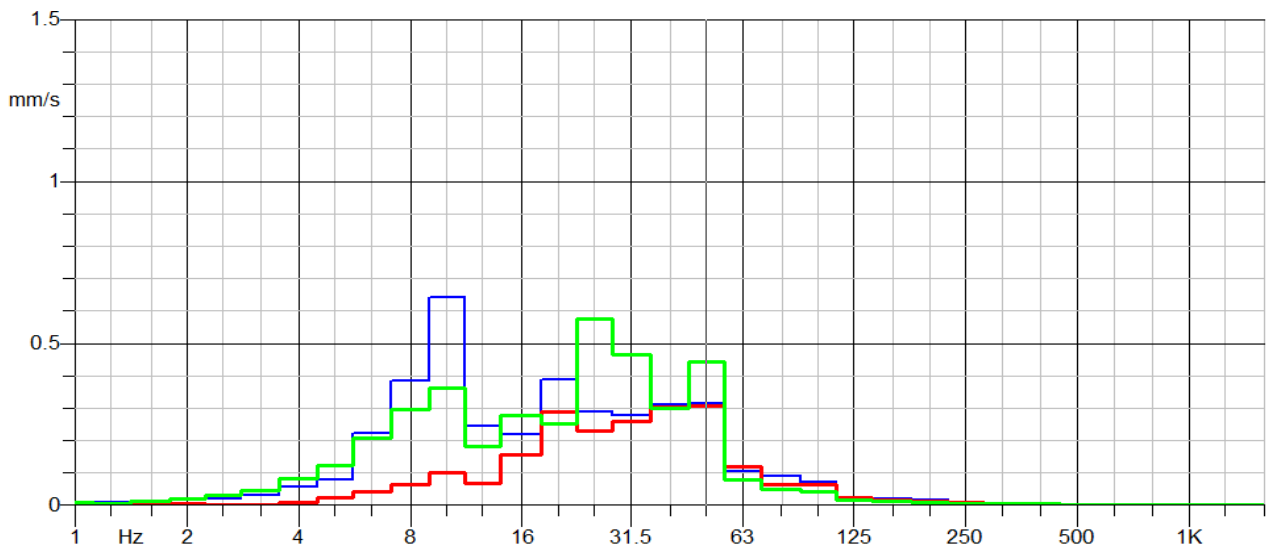


Fig. 272: spettro in frequenza della volata con accelerometro

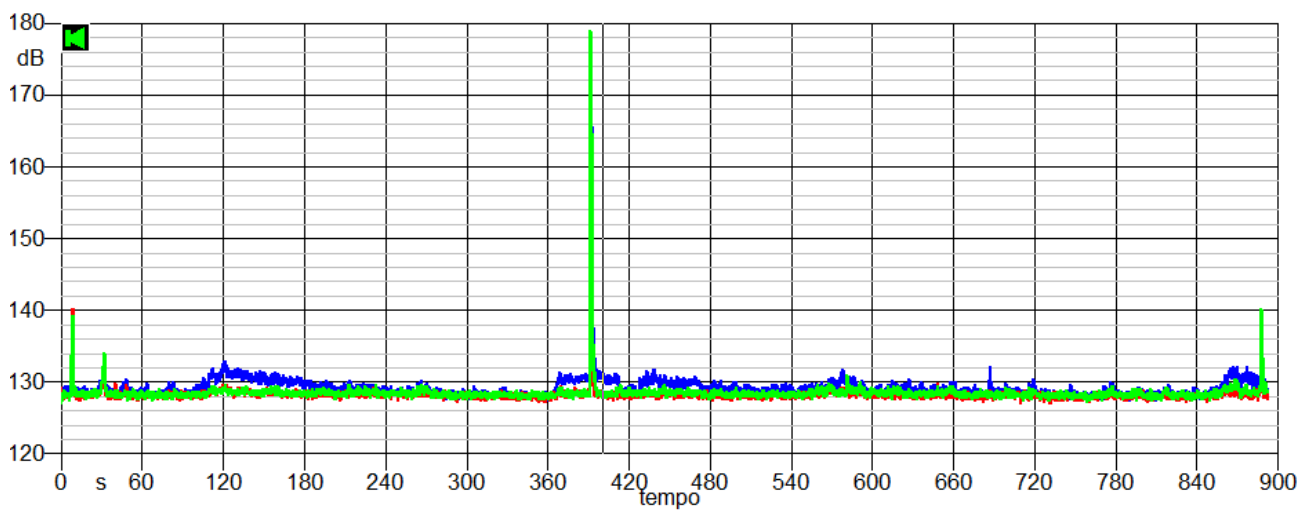


Fig. 273: Time History velocimetro completa della 6 volata

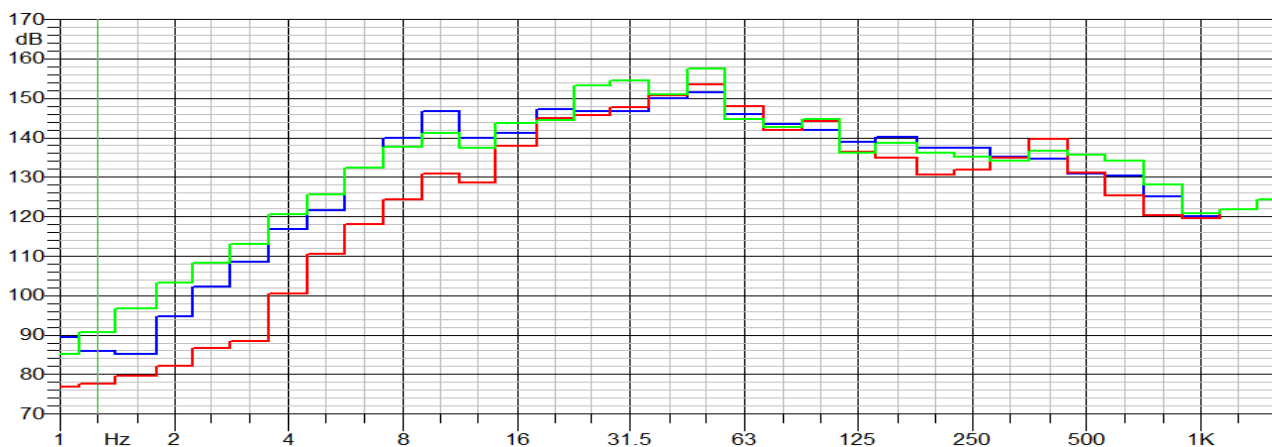


Fig. 274: spettro in frequenza della 6 volata con velocimetro

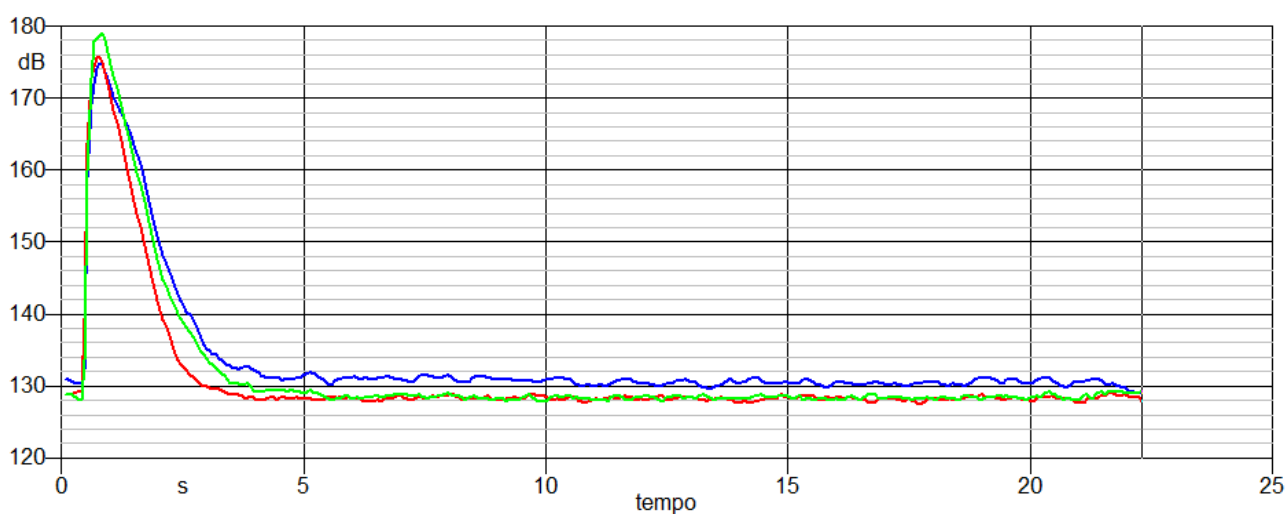


Fig. 275: ingrandimento dell'impulso della volata lungo le tre direzioni misurato con velocimetro

Di seguito vengono sintetizzate tutte le caratteristiche principali di ciascuna volata; nelle colonne vengono riportati per ciascuna misurazione l'esplosivo impiegato, la metodologia d'accoppiamento e i parametri geometrici della bancata espressi in metri

Tabella 96: sintesi dei dati tecnici delle volate rilevate

N	Esplosivo	Metodologia		N File	N Fori	Interasse [m]	Distanza file [m]	Altezza [m]	Larghezza [m]	Lunghezza [m]
1	Martia 6 (CPD 200 Kg)	Veloc Sepolto	Acc Sepolto	3	46	3	3	5 ± 1.5	21 ± 2	11 ± 2
2	Martia 6 (CPD 120 Kg)	Veloc Sepolto	Acc Sepolto	5	41	3	3	5 ± 1.5	25 ± 2	8 ± 2
3	Martia 6 (CPD 120 Kg)	Veloc Sepolto	Acc Sepolto	5	55	3	3	5 ± 1.5	17 ± 2	10 ± 2
4	Martia 6 (CPD 150 Kg)	Veloc Sepolto	Acc Sepolto	4	47	3	3	5 ± 1.5	32 ± 2	13 ± 2
5	Vittoria (CPD 150 Kg)	Veloc Sepolto	Acc Sepolto	4	33	3	3	5 ± 1.5	37 ± 2	9 ± 2

6	Vittoria (CPD 150 Kg)	Veloc Sacco	Acc Sacco	5	47	3	3	5 ± 1 5	33± 2	14± 2
7	Vittoria (CPD 85 Kg)	Veloc Sacco	Acc Sacco	7	37	3	3	5 ± 1 5	14± 2	16± 2
8	Vittoria (CPD 150 Kg)	Veloc Sacco	Acc Sacco	4	60	3	3	5 ± 1 5	26± 2	16± 2
9	Tritamon (CPD 150 Kg)	Veloc Sacco	Acc Sacco	4	40	3	3	11 ± 1 5	45± 2	9± 2
10	Tritamon (CPD 200 Kg)	Veloc Sacco	Acc Sacco	3	41	3	3	5 ± 1 5	25± 2	12± 2
Metodo d'innescio			600Kg d'esplosivo totali in ogni volata, 400±50 m di miccia veloce (pentrite 10 g/m), 1 m di miccia lenta (polvere nera), relais (micro-ritardo di 25ms), detonatore a fuoco							

Nella tabella successiva sono sintetizzati i risultati di tutta la campagna di misurazione, confrontando i valori ottenuti in termini di PPV (vettore somma delle 3 componenti ortogonali della vibrazione del terreno misurate dallo strumento) per le due metodologie d'accoppiamento. I dati sono stati rilevati in 10 volate totali, le prime 5 vincolando il trasduttore mediante il metodo del seppellimento e le rimanenti vincolando il trasduttore con un sacco di materiale roccioso. Per ogni volata, è stata registrata la massima velocità di picco (PPV) del movimento del terreno e la frequenza dominante delle componenti di ciascun asse (longitudinale, trasversale e verticale). Il valore di velocità è stato ricavato dalla forma d'onda del segnale come valore massimo efficace del vettore somma delle tre componenti ortogonali nello stesso istante. Tutti i valori sono espressi in mm/s e la frequenza dominante è determinata come la frequenza in cui l'ampiezza spettrale, derivata dalla trasformata di Fourier, è massima. Inoltre, la somma pseudo-vettoriale (Max PPV) è stata calcolata come somma dei valori massimi per ogni componente, indipendentemente dall'istante temporale in cui si manifesta. La tabella mostra i dati ottenuti; le colonne a sinistra mostrano i valori di PPV, M<sub>AX</sub> PPV e le corrispondenti differenze di percentuale mentre le altre colonne mostrano i valori di frequenza lungo ciascuna direzione

Tabella 97: prospetto dei risultati ottenuti con il velocimetro e con l'accelerometro

<b>Velocimetro sepolto</b>						
<b>Volata</b>	<b>PPV</b>	<b>MAX PPV</b>	<b>Δ%</b>	<b>X [Hz-mm/s]</b>	<b>Y [Hz mm/s]</b>	<b>Z [Hz mm/s]</b>
1	8.99	9.38	3.53%	(50 Hz) 0.37	(63Hz) 0.33	(63Hz) 0.19
2	9.33	9.43	1.05%	(10 Hz) 5.27	(16Hz) 1.92	(10Hz) 2.89
3	7.19	7.26	1.01%	(10 Hz) 4.03	(10Hz) 1 45	(10 Hz) 3.01
4	14.94	15.19	1.61%	(20 Hz) 2.78	(16Hz) 5.38	(20 Hz) 9.50
5	13.64	13.84	1.49%	(25 Hz) 7.39	(25Hz) 3.24	(40 Hz) 2.06
<b>Velocimetro vincolato con sacco</b>						
6	5.30	5.71	7.27%	(25 Hz) 1.30	(25 Hz) 1 07	(25 Hz) 2.62
7	4.62	4.68	1.36%	(40 Hz) 1.84	(40 Hz) 1 62	(40 Hz) 1.95
8	11.30	12.25	7.75%	(31.5 Hz) 7.04	(25 Hz) 5 79	(31.5 Hz) 2.20

9	2.26	2.41	6.37%	(31.5Hz) 0.80	(31.5Hz) 0.82	(50Hz) 0.91
10	3.90	3.97	1.76%	(12.5Hz) 1.64	(12.5Hz) 0.79	(12.5Hz) 1.46
<b>Accelerometro sepolto</b>						
	<b>PPV</b>	<b>MAX PPV</b>	<b>Δ%</b>	<b>X [Hz]</b>	<b>Y [Hz]</b>	<b>Z [Hz]</b>
1	8.83	9.78	9.69%	(8 Hz) 5.34	(8 Hz) 0.40	(8 Hz) 3.18
2	9.34	10.10	7.59%	(40 Hz) 0.08	(40 Hz) 0.09	(50 Hz) 0.07
3	7.75	7.77	0.30%	(10 Hz) 1.65	(10 Hz) 4.31	(10 Hz) 2.99
4	14.35	14.67	2.18%	(20 Hz) 2.23	(16 Hz) 4.97	(20 Hz) 9.07
5	12.44	12.68	1.89%	(25 Hz) 7.06	(25 Hz) 3.10	(20 Hz) 2.08
<b>Accelerometro vincolato con sacco</b>						
6	5.70	5.75	0.90%	(25 Hz) 1.38	(25Hz) 1.04	(25 Hz) 2.75
7	4.26	4.81	1.49%	(40 Hz) 2.01	(40 Hz) 0.63	(40 Hz) 1.86
8	10.86	11.24	1.92%	(31.5 Hz) 3.59	(25 Hz) 2.12	(31,5 Hz) 1.82
9	2.15	2.24	4.25%	(16 Hz) 0.75	(16 Hz) 0.71	(12.5 Hz) 0.74
10	4.19	4.23	0.78%	(10 Hz) 1.89	(10 Hz) 0.56	(10 Hz) 1.48

I dati mostrano che, quasi in ogni misura, l'asse maggiormente sollecitato appartiene al piano orizzontale ( $x$  o  $y$ ), ad eccezione di tre misurazioni dove, seppur di poco, è risultato essere  $z$ , risultato riscontrabile sia nel velocimetro che nell'accelerometro. Quasi sempre si evidenzia un valore di una componente vettoriale maggiore rispetto alle altre due mentre la frequenza di massima sollecitazione, oscilla in un range compreso tra gli 8 e 50 Hz. Successivamente è stato confrontato il valore di PPV il pseudo-vettore somma (PPV-Max), calcolato come somma delle tre componenti vettoriali, indipendentemente dall'istante temporale. Esso è un riferimento per la valutazione della massima sollecitazione possibile e generalmente ha un valore del 5÷10% maggiore rispetto al valore di PPV, ma può raggiungere anche valori del 40%. Confrontando i valori di PPV e PPV-Max in ciascuna volata, si è evidenziata una differenza percentuale tra i due parametri compresa tra il 3% e il 10%). Ultimo passo è stato il confronto del parametro HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratios); esso, rapportando lo spostamento sul piano orizzontale rispetto a quello verticale, consente una valutazione di massima sull'efficacia dell'accoppiamento impiegato; viene definito come rapporto fra le ampiezze spettrali medie del rumore ambientale misurato nelle componenti orizzontali (H) e verticali (V) del moto ed è alla base del cosiddetto "metodo di Nakamura" per fornire, attraverso il suo andamento, indicazioni di massima sulle caratteristiche dinamiche del sottosuolo e sui possibili effetti di amplificazione del sottosuolo. È bene evidenziare che in questo lavoro è stato impiegato per valutare l'efficacia dell'accoppiamento. Nel grafici seguenti sono riportati i confronti di tale parametro tra il velocimetro e l'accelerometro con entrambe le metodologie d'accoppiamento

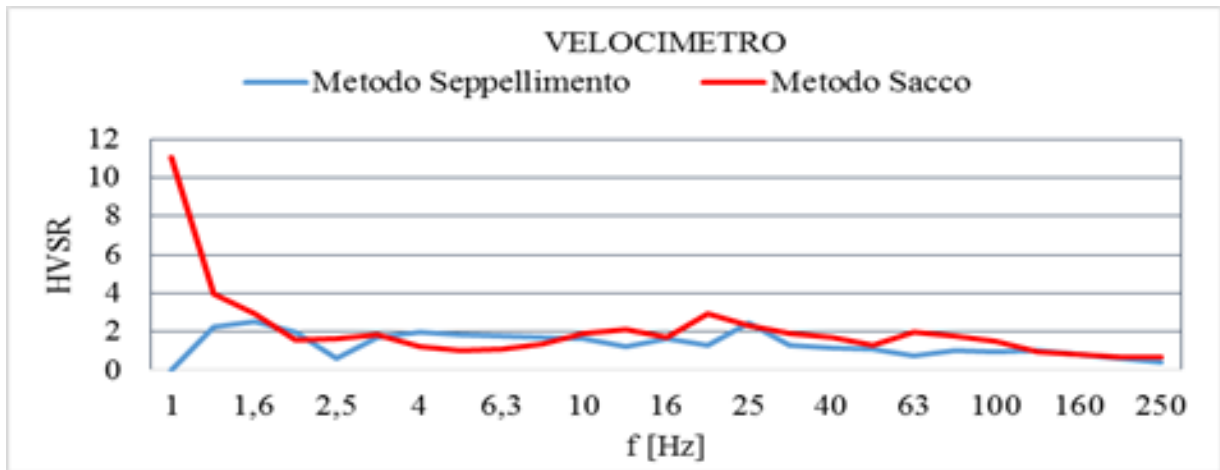


Fig. 276: confronto del parametro HVSR del velocimetro con entrambi le metodologie d'accoppiamento

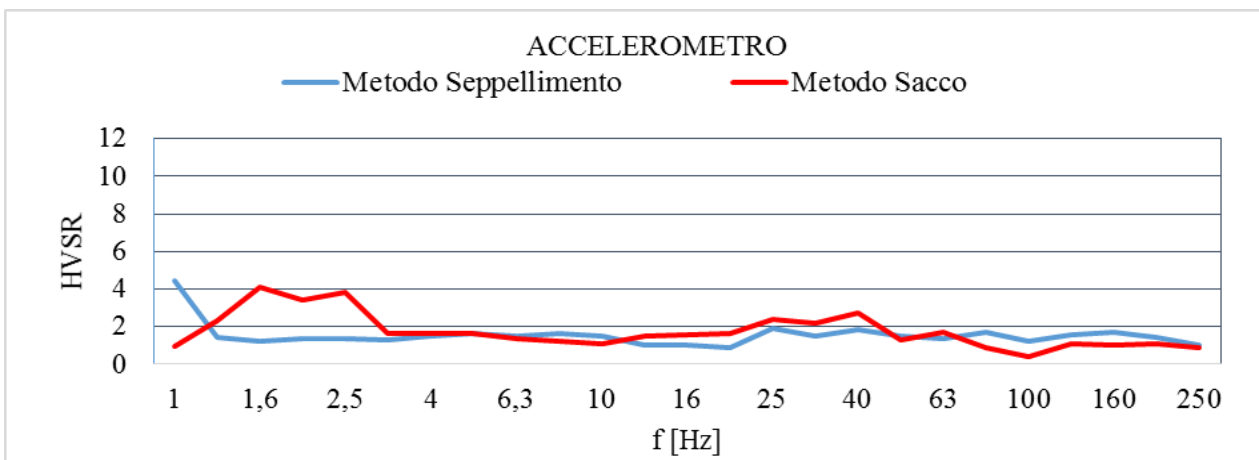


Fig. 277: dell'accelerometro con entrambi le metodologie d'accoppiamento

Sia nel caso dell'impiego del velocimetro che dell'accelerometro, si può notare come l'andamento del parametro HVSR, al variare della frequenza, sia approssimativamente costante (buona aderenza dello strumento al terreno) con entrambe le metodologie d'accoppiamento, ad eccezione, però, delle bassissime frequenze quando viene impiegato il sacco. Ciò rappresenta un spostamento sul piano orizzontale maggiore rispetto a quello verticale e quindi un difetto d'aderenza al terreno. Questo andamento si può spiegare nel caso del velocimetro (al contrario dell'accelerometro) dipendente dall'estrema sensibilità dello strumento alle bassissime frequenze (1÷2 Hz) quando non vi è un perfetto allineamento rispetto al terreno (difetto che si può manifestare quando viene posizionato il sacco sullo strumento stesso) mentre per l'accelerometro (1,6÷2,5 Hz) ciò può essere dovuto al rumore termico (spostamento d'aria). Un altro limite di questa metodologia si evidenzia nel non poter rendere lo strumento solidale al terreno in modo uniforme come nel seppellimento. Infine il sacco, al momento dell'esplosione, può avere dei micro-spostamenti dovuti air-blast (propagazione dell'onda sonora nell'istante del brillamento)



Al fine di evidenziare le peculiarità delle metodologie, le variazioni percentuali dei dati PPV ottenuti dalle campagne di misura sono stati raccolti in una stessa tabella

Tabella 98: confronto tra le metodologie di vincolo

	<i>Seppellimento</i>					<i>Sacco</i>				
<b>Volata</b>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>					
<b>Δ% PPV</b>	1.79%	-0.05%	-7.71%	3.98%	8.79%	-7.60%	7.84%	3.92%	4.99%	-7.48%
<b>Δ% PPV-Max</b>	-4.24%	-7.14%	-6.94%	3.42%	8.41%	-0.69%	-2.79%	8.26%	-7.48%	-6.41%

Per testare le differenze tra i due gruppi di valori e quindi le due metodologie, viene adottata la stessa tecnica utilizzata spesso per valutare le differenze tra i vari dispositivi di campionamento. Quindi viene presentata un'analisi di correlazione, viene valutato un coefficiente di correlazione del prodotto-momento Pearson (PPMCC) e viene modellata una regressione lineare in base all'espressione mostrata nella figura seguente in cui vengono presentati i risultati. La scatterplot mostra una buona forza di correlazione lineare ( $R^2 = 0.985$ ), anche se si può osservare una polarizzazione

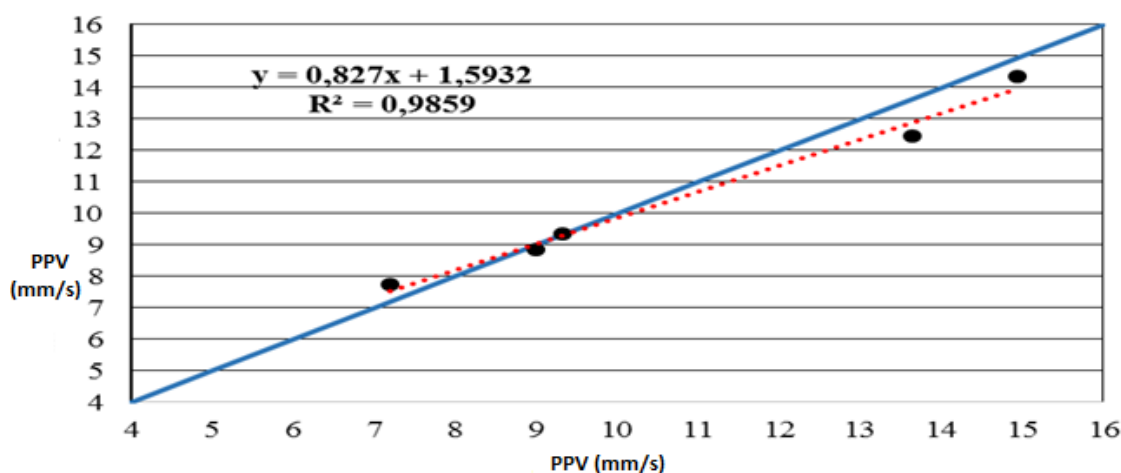


Fig. 278: confronto dei valori PPV ottenuti con il velocimetro (asse x) e l'accelerometro (asse y)

## ▪ Seconda Campagna di misurazione

In questa seconda campagna di misurazione si è proseguito il confronto tra i differenti metodi d'accoppiamento del trasduttore con il terreno. Sulla base dei risultati della campagna precedente si è deciso di continuare ad impiegare il metodo di fissaggio tramite sacco posizionato sopra lo strumento e confrontarlo il vincolo dei trasduttori attraverso un profilato metallico inserito nel terreno. Sono stati misurati 10 diversi livelli di vibrazione generati da volate, suddividendo la campagna di misurazione in due differenti fasi che verranno descritte di seguito. Rispetto alla campagna precedente il punto di misurazione è stato sempre lo stesso per mantenere il profilato fisso nel terreno. Come

nelle precedenti misure, il punto d'acquisizione del segnale è stato scelto tenendo conto che i frammenti di roccia generati dalla volata possono essere proiettati a lunga distanza e quindi causare rischi di danneggiamento per gli strumenti di misura, non potendo così caratterizzare il segnale della sorgente vibratoria. Questo differente tipo d'approccio ha fatto sì che la distanza punto di misura-bancata di lavorazione fosse variabile per ciascuna volata, da una distanza minima di 80 metri fino ad un massimo di 180 metri. L'obiettivo del lavoro è stato quello di verificare l'efficacia della tipologia d'accoppiamento presa in considerazione, acquisendo simultaneamente il segnale vibratorio di due trasduttori accoppiati in modo differente. La strumentazione impiegata è la stessa della campagna precedente con la stessa terna triassiale e in aggiunta un accelerometro mono-assiale

### ***Fase I***

Nella prima fase della campagna di misurazione sono state effettuate 5 rilevazioni di volate in un punto prossimo al confine di cava. Il trasduttore tri-assiale è stato vincolato ad un profilato metallico identico a quello impiegato nella campagna svolta nell'ambiente rurale mentre il secondo mono assiale è stato fissato tramite un sacco posto al di sopra della terna di supporto



Fig. 279: confronto tra le due metodologie di vincolo (sinistra), vincolo tramite profilato (centro) e tramite sacco (destra)

Il peso del sacco è stato di 10 Kg, con dimensioni di 40 x 10 x 15 cm mentre il profilato metallico è stato descritto nel paragrafo precedente ma per comodità si riportano nella tabella seguente le principali caratteristiche

Tabella 99: caratteristiche tecniche del profilato

<b><i>Peso [Kg]</i></b>	<b><i>Lunghezza [m]</i></b>	<b><i>Spessore [m]</i></b>	<b><i>Densità [Kg/m<sup>3</sup>]</i></b>
1.9	0.5	0.05	7.96

Prima di ogni misurazione, è stata controllata la corretta posizione del sacco sullo strumento al fine d'evitare il danneggiamento dei cavi o un cambiamento dell'allineamento dello strumento rispetto al terreno. Stessa identica operazione è stata svolta sul profilato metallico e tra il supporto e il suolo per assicurare un buon contatto e mantenere l'allineamento corretto. Entrambi i dispositivi sono stati posizionati, rispetto al banco di volata, secondo lo stesso sistema di riferimento standard; asse  $x$  = perpendicolare al punto di esplosione (longitudinale), asse  $y$  = asse ortogonale all'asse  $x$  (trasversale), asse  $z$  = perpendicolare al suolo (verticale). Una volta preparati gli strumenti è stato eseguito un test con un colpo di martello sul terreno (impulso rapido sul terreno vicino al punto di misura) con l'obiettivo di verificare l'eventuale presenza di difetti interni ad uno dei sistemi d'accoppiamento e verificare che i due dispositivi leggessero lo stesso segnale. Al fine di ridurre gli eventuali errori termici, tutte le prove sono state eseguite nelle stesse condizioni meteorologiche. L'accelerometro a tri-assiale ha acquisito, attraverso i tre canali, il segnale vibratorio lungo tutte le direzioni ( $x$ ,  $y$  e  $z$ ). Il canale rimanente è stato collegato ad un accelerometro mono-assiale, per acquisire il segnale lungo una sola direzione di confronto, diversa per ciascuna operazione di brillamento

## ***Fase II***

Nella seconda fase sono state effettuate altre 5 misurazioni di volate nello stesso punto del precedente test. Lo scopo è stato quello proseguire il confronto delle stesse metodologie d'accoppiamento, ma fissando il profilato nel terreno, attraverso una base di cemento. Il primo passo è stato quello di realizzare un foro nel terreno roccioso, impiegando la macchina perforatrice; la profondità del foro è stata fissata a 0.55 m, con il diametro di 0.1 m. Successivamente il profilato metallico è stato inserito all'interno e lo spazio vuoto è stato riempito gradualmente con il cemento, al fine di garantire la corretta posizione del profilato ed evitare spostamenti che portassero ad un disallineamento. Prima di collegare lo strumento ed iniziare le misurazioni, è stato necessario trascorrere una giornata in modo che il materiale si asciugasse



Fig. 280: verifica del corretto allineamento (sinistra), realizzazione foro (centrale) e profilato immobilizzato con il cemento (destra)

Gli strumenti sono stati posizionati secondo lo stesso sistema di riferimento standard della precedente campagna e anche la procedura di misurazione è stata identica. I dati della prima campagna hanno evidenziato che l'asse maggiormente sollecitato è stato  $y$  oppure  $x$ , mai  $z$ . Per questa ragione in questa campagna di misurazione le vibrazioni a livello sono state ottenute solo lungo l'asse  $x$  e  $y$ , e quindi il confronto è stato possibile sempre nelle stesse direzioni di sollecitazione in tutte le misurazioni

Tabella 100: metodo d'accoppiamento per i vari canali

	<b>Canale 1</b>	<b>Canale 2</b>	<b>Canale 3</b>	<b>Canale 4</b>
Asse di misura	$x$	$y$	$x$	$y$
Metodo d'accoppiamento	Profilato	Sacco ghiaia	Profilato	Sacco ghiaia

## ■ Risultati

L'intera analisi si basa sui dati ottenuti dalle volate in due differenti fasi della campagne di misura e sono stati raggruppati e riportati nei grafici e nelle tabelle seguenti. Come precedentemente descritto, i risultati evidenziano tre diversi metodi d'accoppiamento del trasduttore con il terreno. Nella prima fase i trasduttori sono stati fissati attraverso un sacco di roccia e un profilato metallico fissato direttamente nel terreno. Nella seconda fase di misurazione il profilato è stato fissato nel terreno attraverso una base di cemento.

### ■ *Prima campagna di misurazione*

I dati riportati nella tabella seguente sono riferiti a 5 volate, espressi in termini di  $m/s^2$  per entrambe le metodologie d'accoppiamento. Nella tabella seguente, il primo metodo d'accoppiamento viene riportato nelle colonne di sinistra e centrale, dove sono mostrati i valori d'accelerazione e la rispettiva

frequenza dominante per i componenti longitudinali, trasversali e verticali del movimento del terreno. Le altre mostrano i risultati del secondo metodo d' accoppiamento (valori di accelerazione e rispettiva frequenza dominante), l'asse di confronto e la differenza in termini di accelerazione  $m/s^2$  tra le due tecniche d'accoppiamento

Tabella 101: risultati della prima campagna con entrambi i metodi nella prima campagna

<b>Prima campagna di misura</b>										
	<b>Profilato metallico</b>						<b>Sacco di ghiaia</b>			
	<b>a [<math>m/s^2</math>]</b>			<b>f [Hz]</b>			<b>Axis</b>	<b>a [<math>m/s^2</math>]</b>	<b>f [Hz]</b>	<b><math>\Delta a</math> [<math>m/s^2</math>]</b>
	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>				
<b>1</b>	0.647	0.471	0.463	40-630	25	40	x	0.650	40	0.184
<b>2</b>	0.451	0.364	0.513	31.5-800	25-1000	40	z	0.583	40	0.07
<b>3</b>	0.059	0.083	0.041	25-63	25-1000	31.5	z	0.053	50	0.012
<b>4</b>	0.654	0.48	0.553	12.5-315	40-400	40	y	0.637	40	0.104
<b>5</b>	0.488	0.712	0.326	31.5-800	40-315	40	y	0.286	31.5-160	0.04

I grafici seguenti sono riferiti alla stessa volata, mostrando le Time History con i valori d'accelerazione per l'asse  $x$  espressi in termini di  $m/s^2$ . La curva blu si riferisce al primo metodo d'accoppiamento (profilato metallico) mentre la linea rossa descrive l'altro metodo (vincolo tramite sacco di ghiaia). Nella figura successiva sono riportati gli spettri di frequenza corrispondenti

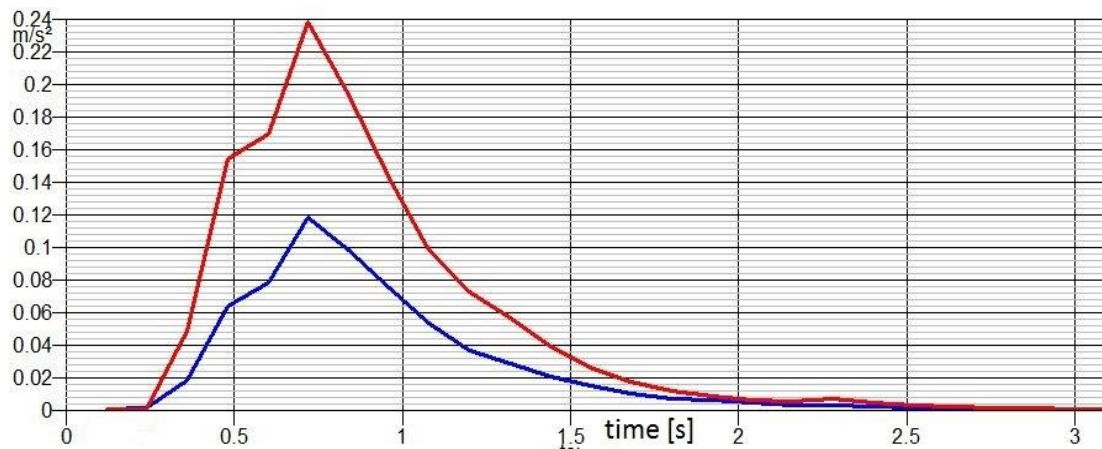


Fig. 281: Time History del segnale rilevato dal profilo metallico (linea blu) e tramite sacco (linea rossa) di ghiaia lungo l'asse Y

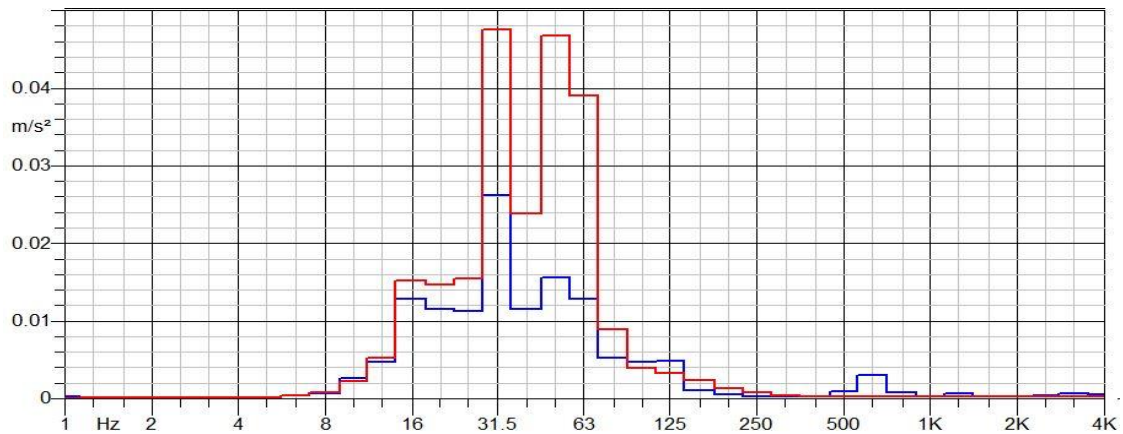


Fig. 282: spettro in frequenza risultante dal profilato metallico ( linea blu) e dal sacco ( linea rosso) lungo l'asse y

▪ *Seconda campagna di misurazione*

I risultati della seconda campagna di misura sono mostrati nei grafici seguenti. Tutti i dati sono espressi in termini  $m/s^2$ . Nella tabella che segue per ogni volata, i valori misurati lungo l'asse  $x$  e  $y$  vengono confrontati in termini di  $m/s^2$ . Nell'ultima colonna viene riportata la differenza di misura

Tabella 102: sintesi dei risultati della seconda campagna di misurazione

<b>Seconda campagna di misura</b>										
	<i>Profilato metallico</i>				<i>Sacco di ghiaia</i>				$\Delta a [m/s^2]$	
	$a [m/s^2]$		$f [Hz]$		$a [m/s^2]$		$f [Hz]$			
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
1	0.133	0.128	12.5	12.5	0.171	0.195	31.5	25	0.038	0.067
2	0.181	0.11	25-1250	12.5-1250	0.203	0.139	25-80	12.5-40	0.022	0.029
3	0.111	0.119	31.5-630	31.5-630	0.181	0.259	31.5-50	31.5-50	0.07	0.14
4	0.596	0.349	25-1250	25	0.889	0.655	20-1250	40	0.293	0.306
5	0.404	0.312	40-315	50-315	0.510	0.359	40	40	0.106	0.047

Nelle seguenti figure vengono visualizzati i tempi e lo spettro di frequenza per entrambi i metodi (sacco di roccia e profilato metallico immobilizzato attraverso il cemento)



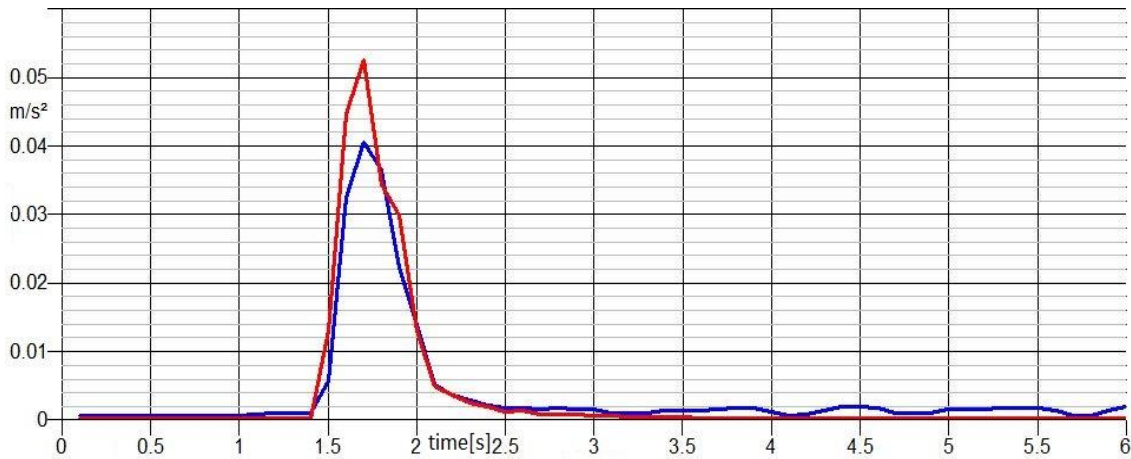


Fig. 283: Time History del segnale dell'accelerometro fissato con il profilo metallico (linea blu) e tramite sacco di ghiaia lungo l'asse Y

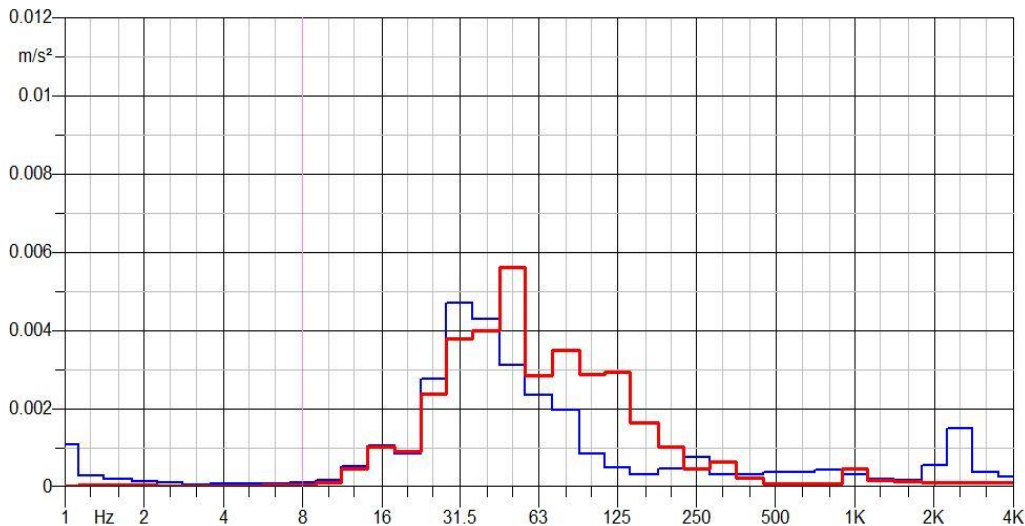


Fig. 284: spettro in frequenza del segnale dell'accelerometro fissato con il profilo metallico nel cemento (linea blu) e tramite sacco di ghiaia (linea rossa) di ghiaia lungo l'asse Y

Le due tabelle sintetizzano i valori d' accelerazione della prima e della seconda campagna di misurazione espressi in termini di  $m/s^2$  con le frequenze dominanti per un totale di 10 volate. Il valore d' accelerazione viene valutato dalla forma d'onda ricavata dal dispositivo come valore massimo istantaneo della componente vibratoria, come nella prima campagna di misurazione. In tutti i casi, si osserva che i valori ottenuti con il metodo d' accoppiamento del sacco di roccia sono superiori rispetto a quelli misurati con il profilato di ferro fissato nel terreno. La differenza media tra due metodi di accoppiamento è pari a  $0.082 m/s^2$ , da un valore minimo di  $0.04 m/s^2$  ad un massimo di  $0.184 m/s^2$ . È possibile chiarire questo fatto perché il sacco posizionato sulla parte superiore del dispositivo costituisce un sistema di accoppiamento che può essere influenzato dall'onda d'urto dell'aria e di conseguenza le condizioni di contatto con il terreno possono essere modificate. Inoltre, i dati indicano

che in quasi ogni misura l'asse  $x$  e  $y$  sono le direzioni di maggiore sollecitazione in quasi tutte le misurazioni. Solo un caso dimostra che l'asse  $z$  è più sollecitato, probabilmente a causa del distacco del profilato metallico dal suolo. Per quanto riguarda la frequenza dominante essa è stata ricavata come la frequenza in cui l'ampiezza spettrale, ottenuta dalla trasformata di Fourier, è massima. La frequenza principale è quasi uguale in tutte le misure, in un intervallo dai 12.5 Hz ai 63 Hz. Il metodo d' accoppiamento del profilato metallico mostra una componente armonica di frequenza rilevante lungo l'asse  $x$  e  $y$ , da 800 a 1250 Hz. Su questo aspetto si può osservare che queste componenti di frequenza armonica possono essere attribuite al supporto stesso, in particolare alla massa del profilato. Solo una misura mostra un componente di frequenza minima con il metodo del sacco di roccia. Inoltre i risultati evidenziano un effetto di smorzamento nel metodo di accoppiamento con il supporto metallico; il suo spettro di frequenza rispetto al sacco di roccia, a partire dalla frequenza dominante (12.5-30 Hz), diminuisce rapidamente rispetto all'altro sistema di accoppiamento. Per quanto riguarda i dati acquisiti nella seconda campagna di misura, in questo caso i segnali vibratorii sono stati acquisiti simultaneamente lungo l'asse  $x$  e  $y$ . I risultati mostrano una tendenza simile della campagna precedente; il metodo del sacco di roccia evidenzia valori di accelerazione superiori rispetto a quelli ottenuti con il profilato e confrontando i valori d'accelerazione misurati con entrambi i metodi di accoppiamento, è possibile rilevare una differenza maggiore tra i valori ottenuti. Nella prima campagna, la media delle differenze ha un valore di  $0.082 \text{ m/s}^2$  lungo ciascun asse di confronto, mentre in questo caso raggiunge  $0.105 \text{ m/s}^2$  lungo l'asse  $x$  e  $0.117 \text{ m/s}^2$  lungo l'asse  $y$ . Un'ipotesi per la spiegazione di questo aspetto, perché quando un'onda sismica si verifica su un sistema di montaggio accoppiato al suolo vengono generati effetti complessi di scattering. Le impedenze acustiche tra il materiale di montaggio (profilato metallico) e il suolo circostante generano un'energia radiante nel terreno. Questo meccanismo riduce efficacemente l'energia di ingresso al montaggio del sistema e viene amplificata dalla base di cemento presente tra il profilato e il suolo circostante. Inoltre, lo spettro di frequenza indica la frequenza di frequenza simile alla campagna precedente (12.5 Hz-80 Hz) La direzione più stressata è simile per entrambi i metodi nello stesso intervallo (12.5-80 Hz) e una componente armonica è presente lungo entrambi gli assi (800-1250Hz) Infine i grafici evidenziano lo stesso effetto di smorzamento del metodo di accoppiamento con il profilato metallico.



## ■ Prova sperimentale a 6 canali

Un'ultima prova è stata realizzata con una nuova strumentazione costituita da un analizzatore Apollo Sinus a 8 canali che permette d'acquisire simultaneamente il segnale lungo tutte le 3 direzioni di sollecitazioni con entrambe le metodologie d'accoppiamento della precedente campagna di misurazione. Di seguito vengono riportati i grafici in cui si confrontano i segnali acquisiti lungo ciascun asse; in rosso il segnale rilevato con il vincolo del sacco mentre in blu quello con il profilato metallico vincolato nella base di cemento.

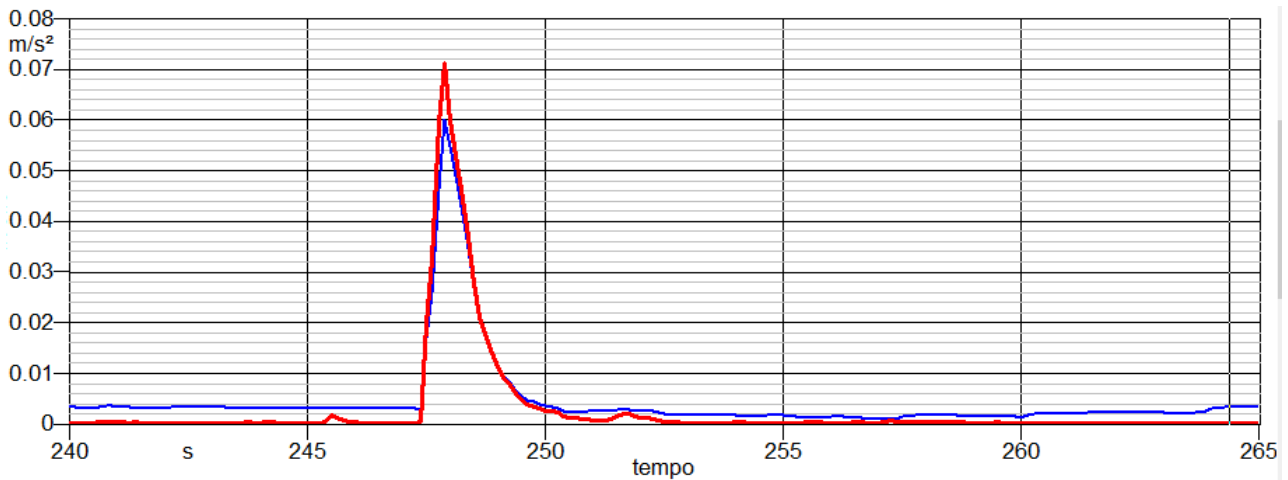


Fig. 285: confronto dei segnali lungo l'asse x

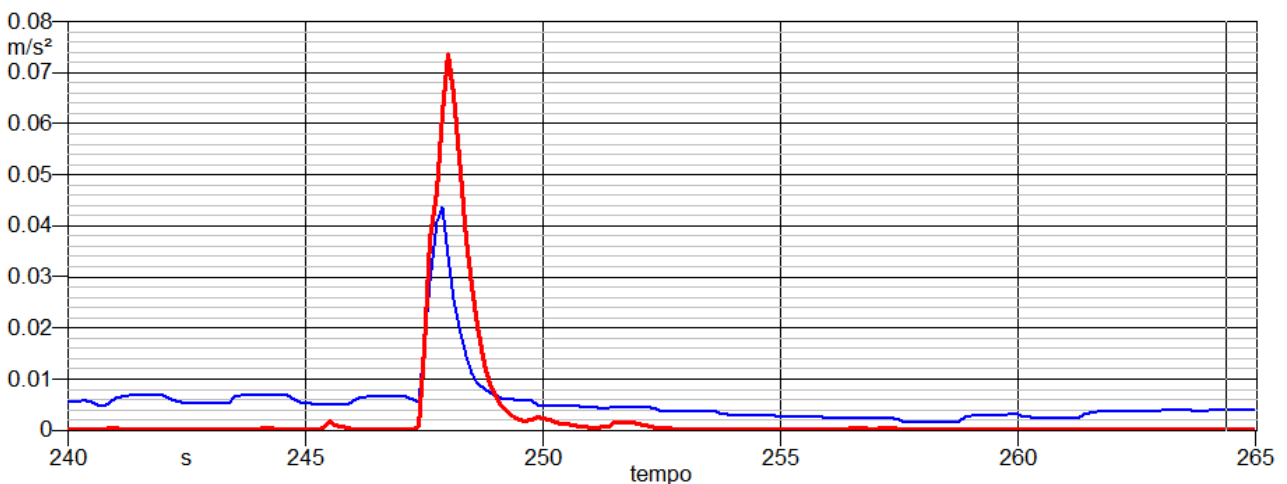


Fig. 286: confronto dei segnali lungo l'asse y

I grafici mettono in evidenza come lungo le direzioni  $x$  e  $y$  si confermino valori maggiori con la metodologia d'accoppiamento del sacco rispetto a quella con il profilato metallico. Quello che però si mostra interessante è l'asse  $z$ ; in questa direzione infatti il segnale ricavato dal profilato metallico mostra valori maggiori e anche un sensibile ritardo tra i due picchi di valore massimo.

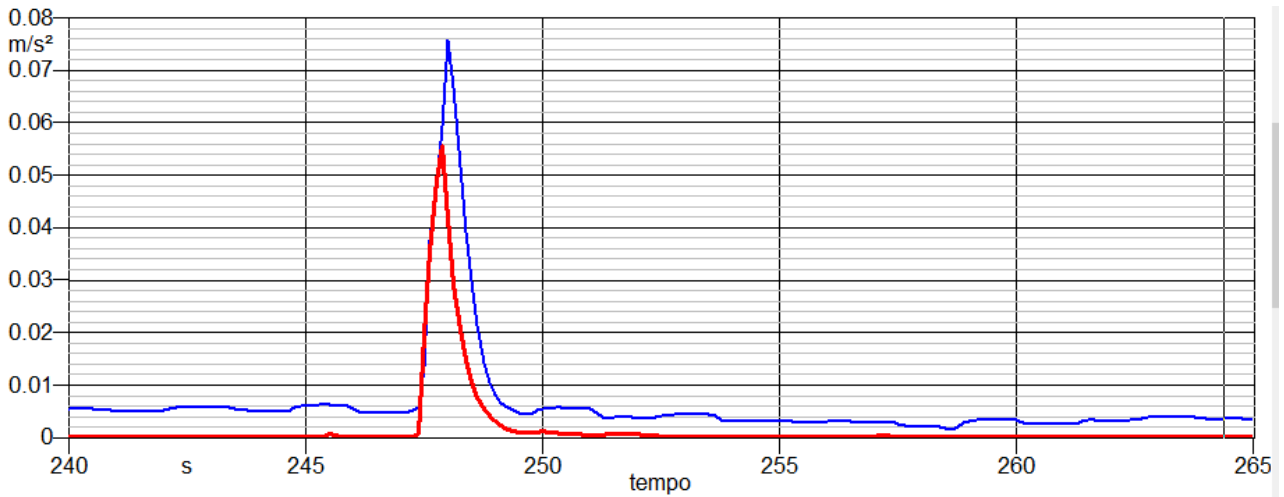


Fig. 287: confronto dei segnali lungo l'asse y

Gli spettri in frequenza riportati di seguito per entrambi i dispositivi mostrano valori simili come intervalli in cui ricade il contenuto energetico del segnale misurato, tra gli 8 e i 63Hz.

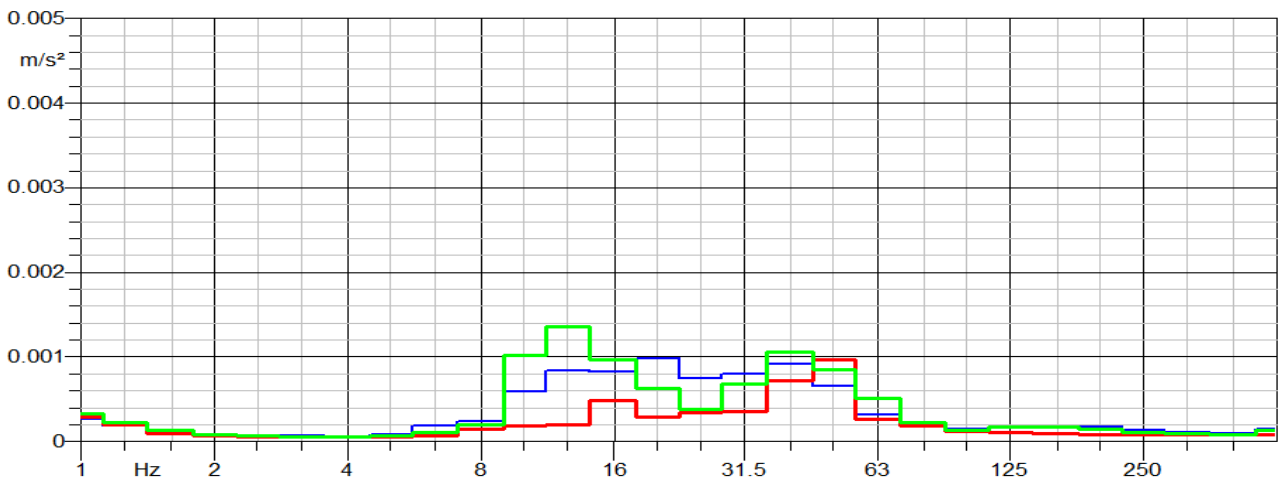


Fig. 288: spettro in frequenza del segnale acquisito sul profilato metallico

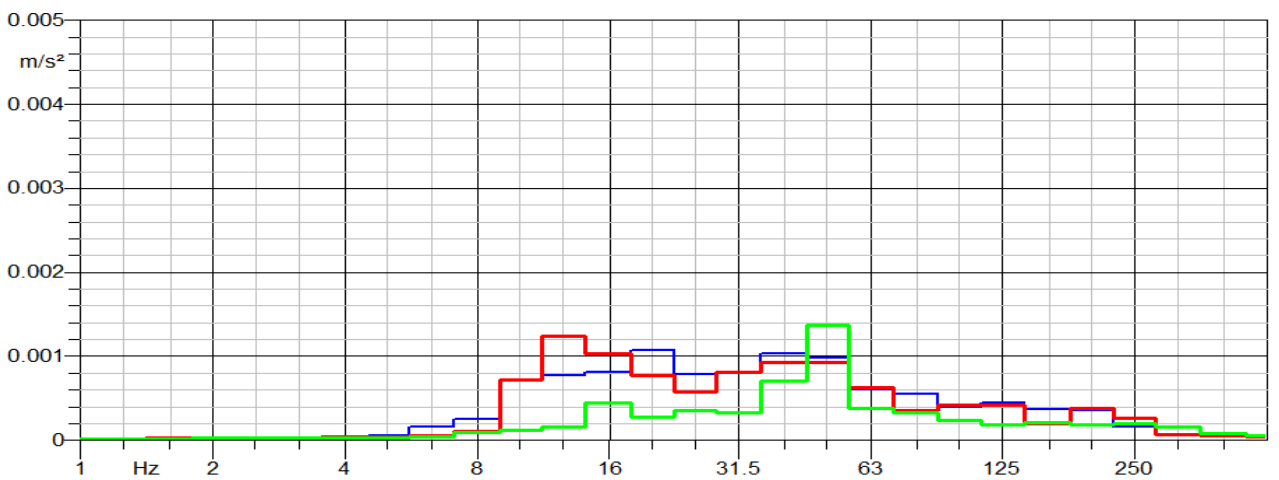


Fig. 289: spettro in frequenza del segnale acquisito sul sacco

## 3 ANALISI DEI RISULTATI OTTENUTI

### 3.1 SEZIONE I - CAMPAGNA SPERIMENTALE SULL'ESPOSIZIONE ALLA VIBRAZIONE A CORPO INTERO

#### 3.1.1 Campagna sperimentale in ambiente estrattivo

La complessa e articolata campagna sperimentale, svolta in cava su differenti mezzi d'opera, attraverso misurazioni ripetute, ha mostrato quanto sia vasta e complessa la casistica dell'esposizione alla Whole-Body-Vibration. Il primo aspetto critico è rappresentato dalla difficoltà di poter realizzare misure in un contesto lavorativo, dove le problematiche di carattere pratico-operativo sono molteplici, non sempre prevedibili a priori, ed emergendo nel corso delle attività sperimentali, vengono spesso richiesti accorgimenti e correzioni della metodologia di lavoro durante lo svolgimento della campagna stessa. In merito ai risultati ottenuti dalle misure effettuate su ogni veicolo, si è rilevata l'importanza dell'analisi a priori della sorgente vibratoria, caratterizzandola sia in termini d'ampiezza del segnale che di contenuto dello spettro in frequenza. Si è ampiamente illustrato in questo elaborato quanto la tipologia del segnale possa incidere sull'esposizione di un soggetto; questo aspetto si traduce, in termini concreti, nel problema che si riscontra quando un operatore, per svolgere una o più mansioni all'interno dello stesso contesto, viene a contatto con diversi sorgenti, ossia può lavorare su più mezzi, risultando esposto a tipi di sollecitazioni sostanzialmente differenti. Ciò può rendere la previsione della dose d'esposizione molto complessa, spesso non corretta e quando viene effettuata, per una determinata tipologia di mezzo, non può sicuramente essere considerata indicativa per tutti i veicoli di quella categoria. Un elemento determinante, infatti, risulta essere la definizione delle condizioni al contorno in cui il mezzo opera e quindi dove viene effettuata l'analisi. In altre parole se uno stesso soggetto svolgesse la medesima attività su un identico mezzo ma in un contesto sensibilmente diverso, ad esempio un autista di una macchina movimentazione terra trasferito ad un'altra sito d'estrazione o in un'altra zona della cava, si potrebbero ottenere valori d'esposizione sostanzialmente differenti. Questo fatto è emerso chiaramente su tutti i mezzi analizzati e, in particolare, nello studio approfondito effettuato sui conducenti dei dumper appartenenti alla stessa classe di trasporto (modello 769 Caterpillar e 405 Perlini). I risultati hanno evidenziato come, nelle medesime condizioni al contorno, differenti fattori incidano significativamente sull'esposizione del conducente, in particolare

- velocità del mezzo durante il trasporto
- stile di guida dell'operatore
- giri del motore variabili durante le diverse fasi d'esercizio del ciclo produttivo
- caratteristiche della superficie delle piste di passaggio
- condizioni di compattezza e granulometria del materiale caricato e movimentato

Nonostante le problematiche appena esposte, i dati raccolti dalle misurazioni sono stati incoraggianti poiché confermano come asse di maggior sollecitazione vibratoria quello verticale, fatto più volte evidenziato nella letteratura scientifica. Altro punto importante riguarda i valori della dose d'esposizione di un soggetto guidatore; appare chiaro che essi sono fortemente vincolati al tempo e all'intensità delle vibrazioni, ossia all'ampiezza del segnale vibratorio. Risulta chiaro che, al fine d'ottenere la riduzione dell'esposizione, una delle vie migliori può essere quella di ridurre, durante l'attività giornaliera, il tempo di un specifico compito svolto dall'operatore. Altro modo per raggiungere lo stesso scopo può essere l'investimento in innovazione tecnologica, con nuovi modelli di macchinari che prevedano soluzioni avanzate per la riduzione delle vibrazioni. Tutti i mezzi oggetto delle prove, infatti, sono stati acquistati nell'arco degli ultimi 12 anni, con una vita operativa relativamente lunga, ossia migliaia d'ore di funzionamento all'attivo e, nonostante ciò, rientrano tutti nei limiti imposti dalla norma. Questo fatto dimostra come le scelte fatte al momento del cambio parco mezzi si siano dimostrate efficaci sul lungo periodo. Un'altra modalità per tutelare la salute degli operatori può essere svolta da parte del datore di lavoro, effettuando un programma di lavori individuali per ciascun lavoratore attraverso l'inserimento di pause supplementari oppure con lo svolgimento d'altre attività, ad esempio pulizia e manutenzione mezzi, al fine di trovare un compromesso tra le esigenze di produzione e la riduzione del tempo in cui egli è esposto alla sorgente vibratoria. Per quanto riguarda le metodologie per la valutazione della dose d'esposizione, si è già fatto riferimento alla normativa ISO 2631-1 (97). È stata implementata tale metodologia, inizialmente, modificando il termine d'accelerazione (dal metodo dell'asse peggiore a quello della somma vettoriale) con il risultato di un incremento del valore della valutazione della dose d'esposizione. Successivamente è stato inserito un parametro correttivo definito sulla base delle caratteristiche antropometriche del guidatore. L'idea di questo termine nasce dall'esigenza di ridurre il margine d'incertezza nel momento in cui viene effettuata, da parte del datore di lavoro, la valutazione della dose d'esposizione senza eseguire le misurazioni ed incrementare il margine di sicurezza. Il punto di partenza è stata la normalizzazione dei valori rispetto alle caratteristiche antropometriche di un soggetto standard e la valutazione del discostamento, rispetto a tale valore, del soggetto in esame.

Rispetto alla metodologia tradizionale, i dati mostrano una sovrastima della previsione, al variare del parametro, ossia a seconda delle caratteristiche del soggetto. Inoltre, nonostante il numero di campioni limitato, i dati ottenuti evidenziano anche una variazione di tale sovrastima al variare di  $K_i$ ; in particolare, a parità di condizioni al contorno, all'aumentare di  $K_i$  (caratteristico di ogni soggetto), non si è sempre riscontrata una diminuzione della dose come ci si attendeva. Questo fatto ha posto diversi interrogativi sulla correlazione tra caratteristiche corporee e dose d'esposizione; si può ipotizzare che i diversi soggetti, pur operando nelle medesime condizioni al contorno, siano stati esposti a sollecitazioni vibratorie sostanzialmente differenti, andando così a ottenere risultati diversi da quelli previsti. Purtroppo non si è potuto indagare ulteriormente questo aspetto a causa del numero limitato di misurazioni che è stato possibile effettuare e del numero di soggetti disponibili per la realizzazione delle prove. Nonostante tutto, i dati ottenuti in questa prima fase di lavoro sono stati fondamentali per la realizzazione dei lavori successivi.

## 3.1.2 Campagna sperimentale su autovetture blindate

### 3.1.2.1 Prima campagna di misurazione

Questa seconda parte del lavoro, nell'ambito dell'esposizione alla vibrazione a corpo intero, è stata condotta al fine d'evidenziare come la modifica della sorgente vibratoria incida sull'esposizione per un soggetto guidatore. Sono state realizzate delle prove su due veicoli dello stesso modello ma con differente telaio, uno standard e un altro con installati materiali anti-proiettili. I test sono stati effettuati nelle medesime condizioni al contorno cercando di realizzare prove quanto più ripetibili, secondo i criteri descritti in precedenza. I due veicoli, fabbricati dalla stessa casa costruttrice, hanno medesime caratteristiche meccaniche, strutturali e identico sedile del conducente, ma si differenziano per il peso totale, dovuto alla blindatura, all'assetto e alla tipologia di pneumatici. Tale modifiche meccaniche portano a una variazione del segnale della sorgente vibratoria a cui viene esposto il soggetto e, di conseguenza, a differenti risultati, evidenziando una correlazione tra tipologia di veicolo e dose d'esposizione alla WBV. Anche in questo caso, si è avuta conferma di come l'asse di maggiore sollecitazione risulti  $z$ , ossia la direzione verticale del sistema di riferimento. Inoltre, i valori rilevati sul sedile del conducente, in termini di livello equivalente dell'intera misurazione, risultano inferiori sul veicolo blindato rispetto al modello standard mentre sono sensibilmente maggiori in termini di valori massimi. Questo risultato può essere spiegato con la differente modalità di montaggio del sedile sul telaio del veicolo. A conferma di ciò, dall'analisi dei valori d'accelerazione

registrati sulla sorgente, il telaio, è stata rilevata una maggiore sollecitazione sul veicolo blindato rispetto a quello in configurazione standard. Una spiegazione di quanto appena esposto si basa sul fatto che la vettura blindata è soggetta ad alcune modifiche sostanziali rispetto alla configurazione standard, in particolare:

- Pneumatici runflat
- Rivestimento del pianale in kevlar

La diversa configurazione del pneumatico è dovuta ad una spalla molto più rigida, rispetto a quella della vettura destinata ad uso civile, e ad una pressione maggiore (3.3 atm) per sostenere il peso maggiorato causato dalla blindatura. Oltre a diminuire in parte l'effetto della sospensione, ogni gomma ha una massa di circa 4Kg in più rispetto alle normali. Lo pneumatico del mezzo standard, avendo una pressione d'esercizio inferiore pari a 2.2 atm, attenua maggiormente l'energia vibratoria causate dal contatto con la strada e consente alla sospensione di lavorare come prefissato dal costruttore. Inoltre, la vettura in configurazione blindata, è fornita di un materiale speciale per la protezione balistica che viene inserito sul telaio della vettura sia per la protezione laterale dai colpi d'arma da fuoco che sulla parte inferiore del corpo vettura contro eventuali esplosioni provenienti dal fondo stradale. Tale materiale ha la proprietà d'attenuare il segnale vibatorio su un ampio spettro di frequenze, in particolare su segnale continuo ma non sulle componenti impulsive. Nel complesso queste caratteristiche permettono una riduzione della dose professionale all'esposizione alla WBV in un intervallo compreso tra il 5% e 11%. Quanto esposto permette le seguenti considerazioni:

- Si è confermata l'importanza della caratterizzazione della sorgente vibratoria prima dell'inizio della campagna di misurazione a fine di poter fare un'analisi preliminare della tipologia di segnale che bisognerà trattare.
- Il criterio adottato nella realizzazione delle prove è stato quello della ripetizione delle medesime condizioni al contorno, come nella campagna in ambiente estrattivo, ma rispetto a prima si è riusciti a realizzare i test con una migliore ripetibilità. Ciò ha permesso la realizzazione di un segnale vibatorio in ingresso quanto più ripetibile e poter quindi analizzare in modo più corretto la dipendenza tra i parametri antropometrici e il fenomeno in esame.

- I risultati ottenuti dalle prove mostrano come le modifiche, apportate a una struttura per determinati motivi come l'inserimento di particolari materiali balistici, possano avere un effetto benefico su altre problematiche non direttamente connesse a quelle in esame.
- Un punto critico è rappresentato dal non poter caratterizzare in modo dettagliato alcuni elementi della sorgente vibratoria poiché le informazioni specifiche sulle caratteristiche strutturali della vettura, per motivi di segreto industriale, non sono state rese disponibili.
- Infine la realizzazione dei test con le modalità precedentemente descritte presenta il limite di descrivere una parziale rappresentazione rispetto a quelle che sono poi le reali condizioni operative in cui sono impiegate le autovetture.

### 3.1.2.2 Seconda campagna di misurazione

Questa parte di ricerca rientra nel globale lavoro inerente alla valutazione della dose d'esposizione di un soggetto esposto alla vibrazione a corpo intero, focalizzandosi sulle caratteristiche antropometriche. La seconda campagna di misurazione è stata realizzata con lo stesso approccio di quella precedente, con simili modalità di prove sperimentali per poter implementare il lavoro e avere un confronto con i risultati precedentemente ottenuti. Per avere una base di dati più ampia e poter proseguire la ricerca dell'implementazione del coefficiente correttivo, anziché per un solo soggetto, sono state effettuate misurazioni per più guidatori. Inoltre, un ulteriore passo d'approfondimento nel lavoro di ricerca, è stato effettuato definendo alcune funzioni sperimentali per la previsione della dose d'esposizione alla vibrazione a corpo intero sulla base delle caratteristiche antropometriche del soggetto esposto. L'analisi dei dati ottenuti è stata realizzata con lo stesso approccio della precedente campagna, con lo svolgimento di tutti i test sperimentali in un tratto stradale differente sempre in ambiente urbano e con le stesse condizioni del contorno. Poiché le vetture testate possono essere condotte solamente da personale autorizzato, la maggiore difficoltà riscontrata in fase d'organizzazione del lavoro, è stata l'individuazione di un sufficiente numero di soggetti, e con caratteristiche antropometriche simili, a cui far effettuare i test. Nonostante tutto si è riusciti ad avere un adeguato numero di guidatori e a realizzare un significativo numero di prove che portano alle seguenti considerazioni

- Si è evidenziata una variazione dei valori della dose d'esposizione sulle vetture blindate, confermando come l'installazione sul telaio di componenti anti-proiettili contribuisca a

modificare il peso della vettura, la sua distribuzione di massa e quindi il segnale della sorgente vibratoria.

- I valori di accelerazione ponderata hanno avuto un'attenuazione su tutto lo spettro di frequenza, generando una riduzione generalizzata della dose professionale d'esposizione compresa tra il 10% e il 20%.
- Nonostante il numero limitato di campioni di prova, è emerso un aspetto particolarmente interessante legato alla variazione del parametro  $A(8)$  tra soggetti a seconda delle loro caratteristiche antropometriche. Le funzioni sperimentali hanno evidenziato una riduzione dell'accelerazione a cui è esposto il soggetto quando, a parità d'altezza, si ha un aumento della massa corporea. Al contrario, prendendo a riferimento il peso, all'aumentare dell'altezza si ha un incremento del valore dell'accelerazione.

Bisogna oltretutto evidenziare, però, che a tali considerazioni, ricavate sulla base dei risultati ottenuti nelle prove, si sono evidenziati alcuni risultati inaspettati per alcuni soggetti. Questo a dimostrazione del fatto che la risposta biodinamica dell'uomo, a parità di caratteristiche antropometriche, è fortemente vincolata al tono muscolare e alle caratteristiche individuali. Basti pensare alla differente risposta di un tessuto muscolare allenato rispetto ad uno che non presenti tali tonicità. Inoltre, come nel caso della campagna sperimentale precedente, il calcolo della dose d'esposizione, attraverso l'implementazione della formula con il termine correttivo sperimentale, ha fornito interessanti spunti di riflessione. Innanzitutto si è confermata la sovrastima della dose d'esposizione ma si è riscontrato una diminuzione di quest'ultima all'aumentare del valore del parametro correttivo normalizzato, ossia per valori di  $F_c$  crescenti, confermando, quindi, in parte quanto riscontrato nella campagna svolta in ambito estrattivo, ma anche dando nuovi spunti di ricerca. Questo risultato ottenuto, su un campione di soggetti maggiore, ha incoraggiato ulteriori approfondimenti e ha stimolato l'interesse nello svolgere un'altra campagna di misurazione sempre nel contesto urbano.



### 3.1.3 Campagna sperimentale su mezzi adibiti al trasporto pubblico

Le attività di ricerca sull'esposizione alla WBV nel comparto estrattivo e quello urbano hanno portato ad alcune interessanti considerazioni di carattere metodologico e scientifico che hanno stimolato l'interesse a proseguire il lavoro. Sulla base dei risultati ottenuti ed avendo avuto la possibilità di realizzare prove in un settore particolarmente interessante, come quello del trasporto pubblico urbano, si è continuato a focalizzare i propri sforzi sulle metodologie di valutazione della dose d'esposizione, implementando quanto ottenuto nei precedenti lavori e ponendo anche la propria attenzione sulla problematica della trasmissibilità del sedile. Un ulteriore passo è stato quello d'impostare la campagna di misure con un duplice approccio operativo, unione d'entrambi quelli effettuati nei precedenti lavori. Da una parte la realizzazione di misurazioni che rappresentino le effettive condizioni d'impiego durante l'attività quotidiana, con tutte le aleatorietà riscontrabili, e dall'altra prove standard in condizioni al contorno definite e ripetibili. I dati hanno confermato ciò che è stato riscontrato nelle campagne precedenti in merito all'implementazione delle metodologie di valutazione tramite il fattore correttivo legato ai parametri antropometrici. Inoltre il sistema di valutazione VDV conferma come la metodologia di calcolo possa incidere sulla valutazione complessiva dell'esposizione giornaliera. Questo metodo, infatti, viene suggerito come particolarmente adatto per quelle valutazioni nelle quali si abbiano valori di sollecitazione particolarmente rilevanti, cosa che nel caso del mezzo pubblico è riscontrabile a causa dell'elevata variabilità delle condizioni del manto stradale. Inoltre, come mostrato nella letteratura scientifica, l'analisi del problema della trasmissibilità del sedile, è un argomento di grande interesse in quanto risulta essere un fattore determinante sull'esposizione del conducente. Tutte le funzioni hanno mostrato una capacità d'attenuazione del segnale in ingresso generato dal veicolo alle varie frequenze, evidenziando come quelle basse, ritenute le più delicate per l'esposizione, riescano ad essere smorzate. L'analisi della sorgente vibratoria si conferma essere fondamentale per poter comprendere il funzionamento e l'azione di un qualsiasi elemento finalizzato alla riduzione della dose d'esposizione. Ecco perché l'efficacia di un sedile su un mezzo potrebbe essere completamente invalidata qualora venisse impiegato su un'altra vettura, ossia con una sorgente differente in termini d'ampiezza e contenuto in frequenza. In merito all'implementazione delle formule previsionali, tramite parametro correttivo, si è avuto un riscontro su quanto trovato nelle precedenti campagne; i dati mostrano una diminuzione della sovrastima della dose d'esposizione all'aumentare del  $K_i$ . Questo risultato incoraggia ulteriori lavori d'approfondimento del tema al fine di poter identificare un parametro univoco che permetta la previsione della dose d'esposizione basandosi solo sulle caratteristiche corporee senza effettuare le misurazioni.

## 3.2 METODOLOGIE D'ACCOPPIAMENTO TERRENO-TRASDUTTORE

### 3.2.1 Campagna di misurazione in ambiente urbano

La prima parte del lavoro sull'accoppiamento terreno-trasduttore è stata svolta al fine d'approfondire lo studio del fenomeno vibratorio nel terreno caratteristico dell'ambiente urbano e acquisire confidenza con la strumentazione specifica. È bene sottolineare che negli ultimi anni il continuo aumento del traffico su gomma e su rotaia in ambito urbano ed extraurbano, ha portato ad una maggiore attenzione del problema relativo alle vibrazioni indotte da traffico sia gommato che tramviario poiché tale fenomeno rimane un tema delicato nell'ambito dell'impatto ambientale. La risoluzione di tale fenomeno risulta complessa per diversi motivi :

- la forte dipendenza dei risultati dal punto in cui viene effettuata la misura
- la difficoltà di caratterizzazione delle emissioni vibratorie da parte delle sorgenti
- la varietà dei moti di propagazione dell'energia meccanica nel terreno

In questa sezione di lavoro si è cercato di fornire un contributo alla problematica delle vibrazioni generate da traffico tramviario all'interno di un ambiente altamente urbanizzato, con la finalità di valutarne le caratteristiche e di fornire una stima dei livelli di vibrazioni riscontrati. Nella prima parte della campagna di misure si è cercato di ottenere una legge di attenuazione che risultasse valida per un'area oggetto dello studio, andando a caratterizzare la sorgente vibratoria e vedere come le vibrazioni da essa emesse si attenuassero (o amplificassero) considerando un recettore ad una prefissata distanza dalla sorgente. Tra i punti aperti resta l'esigenza di effettuare misurazioni in condizioni sperimentali ottimali al fine d'ottenere risultati che meglio possano descrivere il fenomeno reale e poter, quindi, creare una solida base per costruire un modello univoco di previsione della propagazione. In prospettiva futura, risulterebbe sicuramente utile effettuare ulteriori campagne di misurazioni per operare un monitoraggio al fine di acquisire segnali in diversi orari e con differenti condizioni al contorno (condizioni atmosferiche, giorno-notte, traffico. etc.) per poter così approfondire meglio la problematica. Nella seconda parte del lavoro, invece, sono stati registrati livelli vibratorii trasmessi alle fondazioni dal terreno svolgendo misurazioni al piano interrato di un edificio al fine di valutare l'effettiva energia vibratoria che viene recepita dalle fondamenta. I dati ottenuti sono stati utilizzati confrontati con i limiti stabiliti dalla normative vigenti, UNI 9916 e UNI 9614, finalizzate alla stima dei livelli delle vibrazioni all'interno degli edifici. I risultati sono un interessante punto di partenza e si prevede in futuro di poterli integrare con misure effettuate ai vari

piani al fine di valutare la propagazione del fenomeno vibratorio all'interno dell'edificio stesso. Altro obiettivo di ricerca futura è quello di svolgere ulteriori analisi per poter caratterizzare la risposta ai fenomeni vibratorii di diverse tipologie di infrastrutture presenti nel panorama edilizio moderno.

### 3.2.2 Campagna di misurazione in ambiente rurale

La campagna svolta in ambito rurale è stata molto interessante poiché, per la prima volta, sono stati impiegati supporti sperimentali (profilati metallici) e i dati ottenuti hanno permesso un ulteriore passo in avanti per la comprensione delle problematiche connesse all'accoppiamento del trasduttore con il terreno di tipo disciolto. Rispetto al precedente lavoro, svolto nel contesto urbano, sono sorte numerose problematiche connesse alle difficoltà pratiche d'impiego sul campo (caratteristiche del terreno complesse e fortemente influenzate dalle condizioni meteorologiche). A seguito dei risultati mostrati, i profilati metallici sembrerebbero essere più affidabili, in particolare l'analisi in frequenza mostra rilevanti discostamenti rispetto ai segnali ottenuti con la terna accelerometrica. Inoltre è emersa la non validità dell'ipotesi d'incastro perfetto poiché impossibile da replicare nelle applicazioni pratiche a causa della non costante compattezza del terreno. Infatti il profilato metallico mostra numerosi micro distacchi dalla terra dovuti a varie ragioni per il mutamento delle condizioni al contorno; tale cambiamento porta alla formazione di uno spazio che rappresenta una discontinuità per la trasmissione del segnale e quindi una variazione per la trasmissibilità dell'onda meccanica che, attraverso il terreno impatta, sul profilato. Altro problema si è riscontrato nella prolungata presenza sul campo dei dispositivi d'acquisizione; l'esposizione a fattori ambientali esterni per tempi consistenti può rappresentare un fattore d'influenza tutt'altro che trascurabile, come ad esempio l'irraggiamento solare o il cambiamento della densità del terreno dovuta alle precipitazioni. Anche in questo caso sarebbe interessante svolgere ulteriori misure al fine di ridurre l'influenza di tali fattori di disturbo (ad esempio considerando opportune fasce orarie con minore irraggiamento solare, caratterizzando le proprietà elastiche del terreno al variare del grado di umidità). Infine un limite dei risultati ottenuti è rappresentato da un confronto svolto solo su ogni singolo asse; per approfondire la conoscenza delle risposte dei profilati, si potrebbero condurre le stesse identiche misurazioni, con una strumentazione che permetta l'acquisizione del segnale contemporaneamente lungo i tre assi di sollecitazione, sia sulla terna che sul profilato metallico.

## 3.2.3 Campagna di misurazione in ambiente estrattivo

### 3.2.3.1 Caratterizzazione del terreno

#### *Vibrazioni indotte da sorgente gommata*

La metodologia testata nella parte del lavoro esposta evidenzia come sia difficile definire un modello di propagazione per la previsione dei livelli di vibrazione generati da una sorgente di un'attività di cava, pur essendo ricavate nelle medesime condizioni al contorno. Altro elemento critico è l'applicazione delle metodologie d'accoppiamento del trasduttore al terreno nelle reali condizioni operative. Il principale fattore, fonte di elevata incertezza nella definizione della previsione, è rappresentato dal fatto che il terreno, pur avendo le medesime caratteristiche geologiche, presenta condizioni superficiali molto variabili, sia per la sua natura intrinseca, sia perché sottoposto a continui cambiamenti dovuti ai processi di lavorazione. Da qui la notevole influenza che si riscontra sulla propagazione dell'onda meccanica e le difficoltà di posizionamento del trasduttore sul terreno. Sulla base di queste considerazioni, l'area di studio è stata oggetto di una profonda indagine antecedente l'avvio della campagna di misurazione al fine di comprendere al meglio le caratteristiche del suolo, in particolare per individuare la zona del piazzale di lavorazione il più omogenea possibile. Altro elemento di aleatorietà nell'analisi del problema è rappresentato dalla sorgente vibratoria; si è riscontrato come la ripetibilità di un segnale, sia dal punto di vista del contenuto in frequenza che dell'ampiezza, sia particolarmente complessa in un contesto sperimentale. Ogni impulso rappresentato dal passaggio di un mezzo risulta significativamente differente al variare di qualsiasi parametro (punto di passaggio del dumper sul pista, velocità, carico ecc.). Nonostante tutte queste problematiche, il modello realizzato costituisce una buona base di partenza per uno studio preliminare della risposta dinamica del terreno e poter così valutare l'attenuazione dei fenomeni vibratorii nel particolare contesto di riferimento oggetto dell'indagine.

#### *Vibrazioni da sorgente fissa*

Il lavoro svolto con sorgenti vibratorie mobili ha evidenziato le molteplici complessità che si incontrano in un lavoro di tesi sperimentale in un ambito particolare come quello estrattivo. Da qui, per eliminare tali criticità, si è deciso di proseguire con un'analisi della risposta del terreno dovuta

alla presenza di una sorgente vibratoria fissa; il lavoro ha permesso d'evidenziare quelle che sono le caratteristiche di risposta del terreno in termini di contenuto in frequenza e capire quali siano le componenti più significative. Il primo importante riscontro che si è avuto con entrambe le forzanti, l'impianto di trattamento del materiale e la trivella, è stata la forte dipendenza della risposta del terreno alla direzione di sollecitazione. Questa metodologia, non propriamente standard per una rigorosa descrizione del terreno, ha mostrato una buona validità in termini di valutazione preliminare del comportamento del terreno. Un elemento critico è rappresentato dal fatto che, durante le misurazioni, vi era la presenza di una molteplicità di sorgenti attive contemporaneamente, e quindi non è stato possibile caratterizzare in modo univoco il segnale proveniente da un'unica sorgente. L'impossibilità di lasciare in funzionamento soltanto quella in esame, spegnendo momentaneamente tutte le altre, ha condizionato il lavoro dimostrando come le condizioni al contorno di misura possano condizionare le prove. Va evidenziato, però, che tale problematica assume rilevanza quando si debbano acquisire segnali dello stesso ordine di grandezza, ad esempio passaggio di mezzi, mentre è trascurabile quando con segnali i cui ordini di grandezza completamente diversi, come ad esempio le volate.

### 3.2.3.2 Confronto delle metodologie d'accoppiamento seppellimento-sacco

- Campagna di prova

La campagna di prova è stata la prima realizzata nell'ambito estrattivo per valutazioni di vibrazioni indotte da volate, molto diverso come condizioni del terreno, tipologia di sorgente e contesto rispetto a tutte quelle precedenti. Immediatamente sono apparse evidenti diverse problematiche per realizzare le misurazioni già nelle campagne per le misure da sorgente fissa e mobile. In primo luogo la notevole difficoltà d'individuazione del punto d'acquisizione del segnale per poter scongiurare eventuali danni alla strumentazione e riuscire a realizzare adeguati alloggiamenti nel terreno. Poi il corretto posizionamento degli strumenti, spesso difficile a causa delle condizioni superficiali estremamente variabili. Inoltre il collegamento con i dispositivi d'acquisizione ed elaborazione (Soundbook e computer portatile) è risultato essere una delle operazioni più lunghe e delicate, per non danneggiare né i cavi né i connettori da urti accidentali nelle fasi di seppellimento. Infine la rimozione degli strumenti si è rivelata essere anch'essa particolarmente delicata per scongiurare qualsiasi danneggiamento o lesione durante l'asportazione del terreno di compattazione attorno ad essi.

Purtroppo le prime misure non hanno portato i risultati sperati in quanto sono state invalidate da una non adeguata distanza tra il punto d'acquisizione e le file di mine. In fase preliminare, dopo una ricognizione in loco, il punto di fissaggio degli strumenti era stato individuato alle spalle della bancata in modo tale da garantire la protezione degli strumenti dalla proiezione dei detriti ed essere al tempo stesso in posizione ortogonale ad essa. Tale scelta è stata dovuta alle condizioni in loco che non hanno permesso d'ottenere una distanza maggiore ma ritenuta comunque sufficiente, in prima approssimazione, per una corretta misurazione. Un aspetto sicuramente molto utile di questa prima parte del lavoro è stato quello d'avere un primo riscontro operativo sulle problematiche connesse ad una misurazione in un contesto estrattivo, completamente differenti da quelle incontrate fino a quel momento. Purtroppo i risultati ottenuti sono stati invalidati a causa di alcune inesattezze che, tuttavia, si sono rivelate assai proficue per effettuare una correzione della metodologia di lavoro nelle successive campagne di misurazioni.

### ▪ Prima campagna di misurazione

La prima campagna di misurazione è stata improntata al confronto dell'affidabilità delle metodologie d'accoppiamento. Tutte le misurazioni sono state effettuate alla stessa distanza, essendo questo l'unico parametro che si potesse fissare, per poter definire condizioni al contorno quanto più simili. Nonostante un numero limitato di misurazioni disponibili, i risultati della campagna permettono alcune considerazioni. Il metodo del seppellimento del dispositivo nel terreno ha mostrato una maggiore affidabilità rispetto all'impiego del sacco di materiale posizionato sopra lo strumento, evidenziato chiaramente nel confronto del parametro HVSR. L'andamento differente alle basse frequenze (elevate lunghezze d'onda con maggiore contributo energetico), indica uno spostamento sul piano orizzontale risultante maggiore rispetto a quello verticale, mostrando come il vincolo del sacco non riesca a garantire una perfetta aderenza dello strumento al terreno. Al contrario seppellendo lo strumento, l'andamento dell'HVSR mantiene un andamento approssimativamente costante a tutte le frequenze, evidenziando quindi un buon contatto terreno-trasduttore. Un problema rilevante del metodo del seppellimento riguarda l'alterazione delle condizioni del terreno in prossimità del punto di misurazione (elevato grado di fratturazione delle rocce) e una scarsa facilità d'applicazione in quanto le operazioni di scavo richiedono l'impiego di macchinari appositi e tempi di lavorazione non trascurabili. Altro aspetto di rilievo riguarda la direzione di sollecitazione la quale indica un utile riferimento sulla direzione di propagazione dell'onda nel terreno. Le registrazioni del segnale hanno evidenziato gli assi appartenenti al piano orizzontale ( $x$  e  $y$ ) come quelli di maggior sollecitazione, ad

eccezione di tre sole volate, dove l'asse interessato dalla massima propagazione dell'onda è stato  $z$  (piano verticale). Si può ipotizzare che tale fatto sia attribuibile al maggior contributo delle onde di Rayleigh nella propagazione nel terreno, le quali, grazie alle loro caratteristiche di moto, portano ad una rilevante sollecitazione sul piano orizzontale.

## ▪ Seconda campagna di misurazione

La seconda campagna di misurazione è proseguita sulla stessa impostazione di quella precedente attraverso un metodo comparativo tra due differenti tecniche di montaggio; l'accoppiamento del trasduttore al terreno tramite un sacco di materiale roccioso posizionato al di sopra d'esso e l'impiego di un profilato metallico, fissato prima direttamente nel terreno disciolto e successivamente nel terreno roccioso tramite una base di cemento. Da questa campagna sperimentale si è dimostrato come un differente impiego di metodologia sia estremamente complesso in termini d'affidabilità e i risultati hanno confermato come il sistema di montaggio possa influenzare in modo considerevole il livello di vibrazione trasmessa allo strumento. In altri termini i due dispositivi d'acquisizione, fissati attraverso diversi metodi d'accoppiamento e in condizioni al contorno molto simili, investiti dalla stessa onda di propagazione, mostrano differenti risultati dei livelli di vibrazione, sia in termini d'ampiezza del segnale che in contenuto in frequenza. In particolare, nonostante un numero di misurazioni disponibili contenuto, gli accelerometri, ad eccezione di un caso, hanno rilevato valori di accelerazione superiori quando il dispositivo è stato vincolato tramite un sacco di roccia rispetto a quando è stato fissato con un profilato metallico. Inoltre in merito alle direzioni sollecitazioni, si è confermato quanto visto nella precedente campagna, con l'asse  $x$  (longitudinale) e l'asse  $y$  (trasversale) essere quelli maggiormente sollecitati, ad eccezione di un solo caso in cui è risultata la direzione  $z$  (ortogonale al suolo) come quella di maggior interesse. L'impiego del sacco di roccia si è confermata essere una metodologia applicabile in modo rapido e semplice, confermando, però, i limiti nel mantere le condizioni di contatto tra il dispositivo e il suolo per diverse ragioni. Il sacco posizionato sopra lo strumento, grazie alla sua forza peso, riesce a garantire il vincolo al terreno ma al tempo stesso forma un sistema con una diversa impedenza trasduttore-terreno, poichè si sviluppa in direzione verticale e quindi risente inevitabilmente dell'effetto generato dal colpo d'aria prodotto dall'esplosione, il cosiddetto air-blast. Per quanto riguarda, invece, il vincolo tramite profilato metallico, si conferma la capacità d'ottenere un buon contatto con il terreno ma, purtroppo, sono emersi limiti non trascurabili, già evidenziati nella precedente campagna di misurazione svolta nel contesto rurale. Il fissaggio del profilato nel terreno, sia tramite pressione dei colpi di martello che tramite base di cemento, richiede tempi di gran

lunga superiori rispetto al posizionamento del sacco. Poi, nel caso di terreno disciolto, si ha la possibilità di estrarre il supporto al termine del processo di misurazione, ma si può verificare un parziale distacco dal terreno a causa del cambiamento della coesione di quest'ultimo, dovuto ad esempio alle piogge o all'umidità. Inoltre la battitura sull'estremità del supporto, necessaria all'inserimento nel terreno, può portare a deformazioni della superficie interessata, che, seppur trascurabili ai fini della misurazione, possono comportare problemi per un eventuale riutilizzo. Al contrario l'uso di una base di cemento non richiede una sollecitazione meccanica del profilato con eventuali colpi di utensili ma rende necessario l'impiego di una macchina perforatrice per la realizzazione della cavità d'inserimento, l'uso della malta cementizia per la realizzazione del vincolo e il relativo tempo d'attesa per permettere il tiraggio del cemento. Inoltre, in presenza di un terreno roccioso, la superficie interna del foro non è omogenea per la presenza di sassi e asperità di vario tipo e, di conseguenza, è necessario inserire un'elevata quantità di malta per creare un volume di materiale che renda solidale il profilato al terreno. Infine un grande limite di questo sistema è rappresentato dall'impossibilità di rimozione del supporto dal terreno. In termini di livelli vibratorii misurati, la base di cemento rappresenta un elemento di ulteriore modifica dell'impedenza del sistema, poiché l'onda meccanica generata dall'esplosione si propaga attraverso terreno, ma anziché incidere direttamente sul supporto, incontra prima la base cementizia e si verifica un effetto di smorzamento del segnale che poi verrà rilevato dallo strumento. Infine uno spunto d'interesse di ricerca è quello del confronto d'entrambe le metodologie, con l'acquisizione del segnale simultaneamente lungo tutte e tre le direzioni di sollecitazione per comprendere meglio le caratteristiche di risposta dei diversi metodi d'accoppiamento, evidenziandone limiti e peculiarità.



## 4 CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

In questo elaborato è stato affrontato il tema dell'impatto del fenomeno vibratorio sull'uomo come fonte di malattia professionale e sull'ambiente come fattore di disturbo. La comprensione delle modalità di propagazione delle onde meccaniche nel supporto in cui vengono alloggiati i trasduttori, per essere vincolati al terreno, si è mostrata essere estremamente complessa. Le condizioni di prova effettive incidono significativamente sul modo in cui lo strumento, a contatto con il terreno, rileva gli impulsi vibratorii e i modelli teorici, assieme alle simulazioni, hanno mostrato risultati che possono discostarsi in modo significativo dalla realtà. Le conoscenze inerenti alla risposta dinamica del terreno si sono dimostrate fondamentali per avere una comprensione più chiara sulla risposta degli strumenti vincolati per la rilevazione dei segnali vibratorii. Da qui nasce l'interesse di proseguire l'analisi preliminare della risposta terreno per cercare di determinare con maggiore accuratezza lo spettro in frequenza al fine di caratterizzare il segnale della sorgente vibratoria (la volata), fatto, che come descritto, non è stato possibile realizzare. Per poter effettuare tale lavoro si ritiene necessario proseguire le campagne di misurazione al fine di implementare i dati acquisiti nello stesso sito estrattivo e poter così analizzare il segnale in più punti in modo da poter avere una base di dati sufficienti a caratterizzare il terreno. Per quanto riguarda invece le metodologie d'accoppiamento sarebbe utile svolgere ulteriori misurazioni in un altro sito estrattivo, magari prossimo a quello in esame, costituito da materiale calcareo molto simile a quello in oggetto del lavoro al fine di avere un feedback sull'efficacia dei metodi testati. Si è riscontrato come le condizioni di trasmissibilità del segnale vibratorio, attraverso il terreno, siano determinanti per la propagazione dell'onda meccanica che poi andrà a impattare sul sistema d'accoppiamento. Nelle misurazioni effettuate con il profilato in ambito rurale si è riusciti ad avere una buona ripetibilità delle prove per il mantenimento delle medesime condizioni al contorno, mentre in ambito estrattivo vi è stata una continua variabilità delle condizioni del terreno dovute ai processi di lavorazione che hanno mutato continuamente le condizioni del materiale sia in superficie che in profondità. L'aspetto interessante da approfondire è quello inerente al cambiamento della risposta del sistema d'accoppiamento in funzione della tipologia d'onda che impatta su d'esso. Per far ciò, si potrebbe pensare a proseguire la campagna di misurazione applicando la stessa metodologia d'acquisizione dell'ultima volata, ossia rilevando il segnale contemporaneamente lungo tutte e tre le direzioni di sollecitazione, confrontando i diversi metodi d'accoppiamento. Inoltre sarebbe interessante poter caratterizzare il terreno con il funzionamento di una singola sorgente alla volta al fine di comprenderne meglio le caratteristiche di risposta. Lo svolgimento del lavoro, nonostante le competenze acquisite durante la formazione di dottorato, ha fatto emergere la necessità di implementare le conoscenze in materia di geotecnica ed ha evidenziato,

per l'ampliamento dell'argomento, una necessaria interdisciplinarietà con le altre materie concernenti questo ambito di ricerca, in particolare tutte quelle inerenti alla caratterizzazione del terreno e delle rocce. In merito, invece, alla vibrazione a cui viene esposto l'uomo, di sicuro interesse sarà la possibilità di arricchire la base dei dati nei diversi settori di lavoro. Nell'ambito dei mezzi di trasporto e vetture blindate si potrebbe ampliare il programma di ricerca con ulteriori misurazioni su più soggetti per approfondire il tema della risposta biodinamica dell'intero del corpo umano in funzione delle caratteristiche antropometriche al variare della sorgente vibratoria e verificare validità dell'implementazione effettuata nei metodi previsionali dell'esposizione. Nel comparto estrattivo sarebbe di sicuro interesse proseguire con ulteriori misurazioni sulle stesse tipologie di mezzi, variando le condizioni al contorno, ossia scegliendo altri siti estrattivi in cui vengano svolte analoghe operazioni, sempre al fine di avere un riscontro sulla bontà delle implementazioni effettuate. Ulteriore elemento d'interesse potrebbe esser quello di realizzare delle prove in qualsiasi di questi settori con un consistente campione di soggetti, caratterizzati o dalla medesima altezza o dal medesimo peso, in modo tale da poter migliorare l'accuratezza del parametro correttivo in funzione di una sola delle due variabili e poter così migliorare la previsione della dose d'esposizione. In particolare si può ipotizzare di svolgere ulteriori prove sperimentali andando ad indagare soggetti con fattore  $K_i$  minori di 7 o maggiori di 9 per poter comprendere meglio l'effettiva correttezza di tali implementazioni che in questo lavoro non è stato possibile approfondire. In conclusione, poichè l'obbiettivo che la ricerca si pone da anni è quello di permettere al tecnico una valutazione della dose d'esposizione di un lavoratore con un sufficiente grado d'accuratezza senza dover necessariamente effettuare le misurazioni, il lavoro svolto può sicuramente fornire un valido contributo a tale tematica. In altri termini, fissato il parametro d'accelerazione dalla tabelle professionali e noto il tempo d'esposizione dal processo produttivo, attraverso il fattore  $K_i$ , si può valutare quale sia il discostamento dalla previsione d'esposizione, rispetto a un soggetto standard, in funzione delle caratteristiche antropometriche del soggetto in esame (peso e altezza).

## 5 BIBLIOGRAFIA

### 5.1 BIBLIOGRAFIA WBV

- Rakheja S , Dong R G , Patra S , Boileau P -É , Marcotte P , Warren C , Biodynamics of the human body under whole-body vibration: Synthesis of the reported data, *International Journal of Industrial Ergonomics* 40, pp 710-732, 2010
- Alfaro Degan G, Lippiello D, Pinzari M A geostatistic approach to the Functional Analysis Space Technique: A case of study *Advances in Safety and Reliability – Proceedings of 16th European Safety and Reliability Conference* (ESREL) Ed: Kolowrocki K, Taylor & Francis, Vol 1, pp 45-52, 2005
- Alfaro Degan G, Lippiello D, Pinzari M (2009) Occupational Health and safety management systems: comparison between BS OHSAS 18001: 2007 and Italian Decree 81/2008 *WIT Transactions on Biomedicine and Health*, Vol 14, WIT Press, ISSN: 1734-3525, pp 401-409, doi: 10 2495/EHR090391 ,2009
- Alfaro Degan G , Lippiello D , Pinzari M , Whole body vibrations: experimental assessment of anthropometric differences on the effects of WBV exposure in quarry workers *Safety and Security Engineering VI*, 151: pp 61-72, 2015
- Alfaro Degan G , Lippiello, D , Lorenzetti, S , & Pinzari, M (2013) Vibration assessing model: comparison between methods *WIT Transactions on Biomedicine and Health*, Vol 16, WIT Press, 2013, ISSN: 1743-3525, pp 59-69,doi:10 2495/EHR 130061
- Alfaro Degan, G, Lippiello, D , Lorenzetti, S & Pinzari, M , Vibration assessing models: comparison between methods *WIT Transactions on Biomedicine and Health*, 16, pp 59–69, 2013 ISSN: 1743-3525, doi: 10 2495/EHR130061
- Alfaro Degan, G A , Coltrinari, G , Lippiello, D , & Pinzari, M , Risk Assessment Of The Whole-body Vibration Exposure For Drivers Of Armored Vehicles: A Case Study *International Journal of Safety and Security Engineering*, 6(1), pp 53-62, (2016)
- Alfaro Degan, G , Lippiello, D & Pinzari, M Whole body vibrations: experimental assessment of anthropometric differences on the effects of WBV exposure in quarry workers *WIT Transactions on the Built Environment*, 151, pp 61–72, 2015 ISSN: 1743-3509, doi: 10 2495/SAFE150061

- Alfaro Degan, G , Lippiello, D , & Pinzari, M , Whole body vibrations: experimental assessment of anthropometric differences on the effects of WBV exposure in quarry workers, *WIT Transactions on The Built Environment*, vol 151, pp 61–72, 2015
- Beard, G F & Griffin, M J , Discomfort caused by low-frequency lateral oscillation, roll oscillation and roll-compensated lateral oscillation *Ergonomics*, 56(1), pp 103–114, 2013
- Blood, R P , Rynell, P W & Johnson, P W , Whole-body vibration in heavy equipment operators of a front-end loader: Role of task exposure and tire configuration with and without traction chains *Journal of Safety Research*, 43, pp 357–364, 2012
- Boileau, P -É & Rakheja, S , Whole-body vertical biodynamic response characteristics of the seated vehicle driver: Measurement and model development, *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol 22, no 6, pp 449–472, 1998
- Bongers P M , and Boshuizen, H C *Academisch Proefschrift, Universiteit van Amsterdam Back Disorders and Whole-body Vibration at Work*, 1990
- Bovenzia, M , Ruia, F , Negroa, C , D'Agostina, F , Angotzi, G , Ianchi, S , Bramanti, L , Festa, G , Gatti, S , Pinto, I , Rondina, L & Stacchini, N , An epidemiological study of low back pain in professional drivers *Journal of Sound and Vibration*, 298, pp 514–539, 2006
- Christ E , European standardization in the framework of the machinery directive: aims and strategies, *Central European Journal of Public Health*, 4 (1), pp 79–82, 1996
- Cutini, M , Romano, E & Bisaglia, C , Assessment of the influence of the eccentricity of tires on the whole-body vibration of tractor drivers during transport on asphalt roads *Journal of Terramechanics*, 49, pp 197–206, 2012
- Dentoni, V., Massacci, G.. "Occupational exposure to whole-body vibration: unfavourable effects due to the use of old earth-moving machinery in mine reclamation." *International Journal of Mining, Reclamation and Environment* 27.2 (2013): 127-142.
- Directive 2002/44/EC of the European Parliament and of the Council of 25 June 2002 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (vibration) Sixteenth individual Directive within the meaning of Article 16(1) of Directive 89/391/EEC
- Donnelly, C J , Callaghan, J P & Durkin, J L , The Effect of an Active Lumbar System on the Seating Comfort of Officers in Police Fleet Vehicles, *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, vol 15, no 3, pp 295–307, 2009
- Durkin, J L , Harvey, A , Hughson, R L & Callaghan, J P , The effects of lumbar massage on muscle fatigue, muscle oxygenation, low back discomfort, and driver performance during prolonged driving, *Ergonomics*, vol 49, no 1, pp 28–44, 2006

- Eger, T , et al "Predictions of health risks associated with the operation of load-haul-dump mining vehicles: Part 1—Analysis of whole-body vibration exposure using ISO 2631-1 and ISO-2631-5 standards " *International journal of industrial ergonomics* 38 9: pp 726-738, 2008
- Eger, T , et al "Predictions of health risks associated with the operation of load-haul-dump mining vehicles: Part 2—Evaluation of operator driving postures and associated postural loading " *International journal of industrial ergonomics* 38 9: pp 801-815, 2008
- Fairley, T E & Griffin, M J , The apparent mass of the seated human body: vertical vibration *Journal of Biomechanics*, 22, pp 81–94, 1989
- Gallais, L & Griffin, M J , Low back pain in car drivers: a review of studies published 1975 to 2005 *Journal of Sound and Vibration*, 298, pp 499–513, 2006
- Griffin M J , *Handbook of Human Vibration*, Academic Press Limited, London, 1990
- Griffin, M J , A comparison of standardized methods for predicting the hazards of whole-body vibration and repeated shocks *Journal of Sound and Vibration*, 215(4), pp 883–914, 1998
- Hinz, B , Seidel, H , Hofmann, J , & Menzel, G , The significance of using anthropometric parameters and postures of European drivers as a database for finite-element models when calculating spinal forces during whole-body vibration exposure, *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol 38, no 9–10, pp 816–843, 2008
- Hohl, G H , Military terrain vehicles, *Journal of Terramechanics*, vol 44, no 1, pp 23–34, 2007
- International Organization for Standardization, ISO 2631-1, *Mechanical Vibration and shock—Evaluation of human exposure to whole-body vibration, Part 1: General requirements*, 1997
- Ishitake, T , Miyazaki, Y , Noguchi, R , Ando, H & Matoba, T , Evaluation of frequency weighting (iso 2631-1) for acute effects of whole-body vibration on gastric motility *Journal of Sound and Vibration*, 253(1), pp 31–36, 2002
- Khorshid, E , Alkalby, F & Kamal, H , Measurement of whole-body vibration exposure from speed control humps *Journal of Sound and Vibration*, 304, pp 640–659, 2007
- Langer, T H , Ebbesen, M K & Kordestani, A , Experimental analysis of occupational whole-body vibration exposure of agricultural tractor with large square baler *International Journal of Industrial Ergonomics*, 47, pp 79–83, 2015
- Lewis, C H & Griffin, M J , Evaluating the vibration isolation of soft seat cushions using an active anthropodynamic dummy *Journal of Sound and Vibration*, 253(1), pp 295–311, 2002
- Lings S , Leboeuf-Yde C , Whole-body vibration and low back pain: a systematic, critical review of the epidemiological literature 1992- 1999 *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 73(5) pp 290-297, 2000

- Mansfield, N J & Griffin, M J , Effects of posture and vibration magnitude on apparent mass and pelvis rotation during exposure to whole-body vertical vibration *Journal of Sound and Vibration*, 253(1), pp 93–107, 2002
- Matsumoto Y and Griffin M J , Dynamic response of the standing human body exposed to vertical vibration: influence of posture and vibration magnitude, *Journal of Sound and Vibration*, 212, pp 85-107, 1998
- McKinnon, C D , Callaghan, J P & Dickerson, C R , Field Quantification of Physical Exposures of Police Officers in Vehicle Operation, *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, vol 17, no 1, pp 61–68, 2011
- Mechanical Vibration & Shock: Evaluation of Human Exposure to Whole-body Vibration Part 1, General Requirements: International Standard ISO 2631-1: 1997 (E) ISO ” ISO, 1997
- Micozzi, M. S., & Albanes, D., Three limitations of the body mass index. *The American journal of clinical nutrition*, Vol.46(2), pp.376-377, 1987
- Milosavljevic S , Mani R , Cury Ribeiro D , Vasiljev R , Rehn B , Exploring how anthropometric, vehicle and workplace factors influence whole-body vibration exposures during on-farm use of a quad bike, *International Journal of Industrial Ergonomics* 42, pp 392-396, 2012
- Nawayseh N , Griffin M J , Tri-axial forces at the seat and backrest during whole-body vertical vibration, *Journal of Sound and Vibration*, 277, pp309-326, 2004
- Ogden, C. L., Carroll, M. D., Kit, B. K., & Flegal, K. M., Prevalence of obesity and trends in body mass index among US children and adolescents, 1999-2010. *Jama*, Vol. 307(5), pp. 483-490, 2012
- Okunribido, O O , Shimbles, S J , Magnusson, M & Pope, M , City bus driving and low back pain: A study of the exposures to posture demands, manual materials handling and whole-body vibration, *Applied Ergonomics*, vol 38, no 1, pp 29–38, 2007
- Okunribido, O O , Shimbles, S J & Magnusson, M , City bus driving and low back pain: a study of the exposures to posture demands, manual materials handling and whole-body vibration *Applied Ergonomics*, 38, pp 29–38, 2007
- Paddan G S and Griffin M J , Evaluation of whole-body vibration in vehicles, *Journal of Sound and Vibration*, 253(1), pp 195-213, 2002
- Paddan, G S & Griffin, M J , A review of the transmission of translational seat vibration to the head *Journal of Sound and Vibration*, 215, pp 863–882, 1998
- Paddan, G S & Griffin, M J , Effect of seating on exposures to whole-body vibration in vehicles *Journal of Sound and Vibration*, 253(1), pp 215–241, 2002

- Paddan, G S , Mansfield, N J , Arrowsmith, C I , Rimell, A N , King, S K & Holmes, S R , The influence of seat backrest angle on perceived discomfort during exposure to vertical whole-body vibration *Ergonomics*, 55(8), pp 923–936, 2012
- Palmer, K T , Griffin, M J , Bendall, H , Pannett, B & Coggon, D , Prevalence and pattern of occupational exposure to whole body vibration in Great Britain: findings from a national survey, *Occupational and Environmental Medicine*, vol 57, no 4, pp 229–236, 2000
- Pinto I , Stacchini N , Uncertainty in the evaluation of occupational exposure to whole-body vibration, *Journal of Sound and Vibration*, pp 298 556–562, 2006
- Pope, M , Magnusson, M , Lundström, R , Hulshof, C , Verbeek, J & Bovenzi, M , Guidelines for whole-body vibration health surveillance, *Journal of Sound and Vibration*, vol 253, no 1, pp 131–167, 2002
- Porter, J M & Gyi, D E , The prevalence of musculoskeletal troubles among car drivers, *Occupational Medicine*, vol 52, no 1, pp 4, 2002
- Rakheja, S , Dong, R G , Patra, S , Boileau, P É , Marcotte, P & Warren, C , Biodynamics of the human body under whole-body vibration: Synthesis of the reported data *International Journal of Industrial Ergonomics*, 40, pp 710–732, 2010
- Rehna, B , Lundstrom, R , Nilsson, L , Liljelind, I & Jarvholm, B , Variation in exposure to whole-body vibration for operators of forwarder vehicles-aspects on measurement strategies and prevention *International Journal of Industrial Ergonomics*, 35, pp 831–842, 2005
- Renehan, AG, Tyson, M, Egger, M, Heller, RF, Zwahlen M, Body-mass index and incidence of cancer: a systematic review and meta-analysis of prospective observational studies, *Vol. 371, Issue 9612*, , pp 569-578, 2008
- Rossi, A., Orsini, F., Scorza, A., Botta, F., Sciuto, S. A., & Di Giminiani, R., A preliminary characterization of a whole body vibration platform prototype for medical and rehabilitation application. In *Medical Measurements and Applications (MeMeA)*, IEEE International Symposium on (pp. 1-6). IEEE, 2016.
- Ryan P Blood, Patrik W Rynell, Peter W Johnson, Whole-body vibration in heavy equipment operators of a front-end loader: Role of task exposure and tire configuration with and without traction chains, *Journal of Safety Research* 43 pp 357–364, 2012
- Scarlett, A J , Price, J S & Stayner, R M , Whole-body vibration: Evaluation of emission and exposure levels arising from agricultural tractors *Journal of Terramechanics*, 44, pp 65–73, 2007
- Seidel, H , Bluthner, R , Hinz, B & Schust, M , On the health risk of the lumbar spine due to whole-body vibration theoretical approach, experimental data and evaluation of whole-body vibration *Journal of Sound and Vibration*, 215(4), pp 723–741, 1998

- Taheri, S., Lin, L., Austin, D., Young, T., & Mignot, E., Short sleep duration is associated with reduced leptin, elevated ghrelin, and increased body mass index, *PLoS medicine*, 1(3), Vol.62, 2004
- Thomas H Langer, Thorkil K Iversen, Niels K Andersen, Ole Ø Mouritsen, Michael R Hansen, Reducing whole-body vibration exposure in backhoe loaders by education of operators, *International Journal of Industrial Ergonomics* 42, pp 304-311, 2012
- Tiemessen, I J , Hulshof, C T J & Frings-Dresen, M H W , An overview of strategies to reduce whole-body vibration exposure on drivers: a systematic review *International Journal of Industrial Ergonomics*, 37, pp 245–256, 2007
- Tsujimura, H , Taoda, K & Kitahara, T , A field study of exposure to whole-body vibration due to agricultural machines in a full-time rice farmer over one year *Journal of Occupational Health*, 57, pp 378–387, 2015
- Velmurugan, P , Kumaraswamidhas, L A & Sankaranarayananasamy, K , Whole Body Vibration Analysis for Drivers of Suspended Cabin Tractor Semitrailer, *Experimental Techniques*, vol 38, no 2, pp 47–53, 2014
- Y Matsumoto & M J Griffin, Mathematical models for the apparent masses of standing subjects exposed to vertical whole-body vibration, *Journal of Sound and Vibration*, vol 260, no 3, pp 431–451, 2003
- Wang, J., Thornton, J. C., Russell, M., Burastero, S., Heymsfield, S., & Pierson Jr, R. N., Asians have lower body mass index (BMI) but higher percent body fat than do whites: comparisons of anthropometric measurements. *The American journal of clinical nutrition*, 60(1), pp. 23-28, 1994
- Zhao, X , & Schindler, C , Evaluation of whole-body vibration exposure experienced by operators of a compact wheel loader according to {ISO} 2631-1:1997 and {ISO} 2631-5:2004, *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol 44, no 6, pp 840–850, 2014
- 

## 5.2 BIBLIOGRAFIA ACCOPPIAMENTO TERRENO TRASDUTTORE

- Segarra, P , Sanchidrián, J A , Castedo, R , López, L M , I del Castillo, Performance of some coupling methods for blast vibration monitoring, *Journal of Applied Geophysics*, Vol 112, pp 129–135, 2015
- Adam, M , Von Estorff, O , Reduction of train-induced building vibrations by using open and filled trenches, *Computers & structures*, Vol 83 1, pp 11-24, 2005



- AENOR, Control de vibraciones producidas por voladuras, UNE 22-381-93 Madrid: Asociación Española de Normalización y Certificación, 1993
- Alberto Castellani, Marco Valente, Vibrazioni trasmesse da veicoli su rotaia all'ambiente circostante, rivista ingegneria sismica, XVII, 2000, n 1
- Aldo Zollo, André Herrero, Antonio Emolo, Terremoti ed onde: Introduzione alla sismologia sperimentale, 2003
- Alfaro Degan G , Lippiello D , Pinzari M “Monitoring airborne dust in a Italian basalt quarry: comparison between sampling methods” WIT Transactions on Ecology and the Environment, Vol 174, WIT Press, 2013, ISSN 1743-3541, pp 75-84, doi 10 2495/AIR130071
- Alfaro Degan, G , Coltrinari, G , Lippiello, D Urban tram induced vibrations: Real time monitoring of historical buildings in the centre of Rome Proceedings of the 15th International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 2015, Albena, Bulgaria, Vol 1, issue 5, pp 1031-1038, 2015 DOI: 10 5593/SGEM2015/B51/S20 137
- Alfaro Degan, G , Lippiello, D , Lorenzetti, S , Pinzari, M , 2013 Vibration assessing models: comparison between methods WIT Transactions on Biomedicine and Health, Vol 16, WIT Press, 2013, ISSN: 1743-3525, pp 59-69, doi: 10 2495/EHR130061
- Alfaro Degan, G , Lippiello, D , Pinzari, M Field evaluation of PM10 detectors in a quarry environment International Journal of Sustainable Development and Planning, 10(3), pp 361-372, 2015 ISSN 1743-7601 (paper format), ISSN: 1743-761X (on line), doi: 10 2495/SDP- V10- N3- 361- 372
- Alfaro Degan, G , Lippiello, D , Pinzari, M Whole Body Vibrations: Experimental assessment of anthropometric differences on the effects of WBV Exposure in Quarry Workers WIT Transactions on the built environment, Vol 151, WIT Press, 2015, pp 61-72, ISSN: 1743- 3509, doi: 10 2495/SAFE150061
- Alonso-Rodríguez, A , Miranda, E , Assessment of building behavior under near-fault pulse-like ground motions through simplified models, Soil Dynamics and Earthquake Engineering 79, Netherlands, pp 47–58, 2015
- Beskou, Niki D , Theodorakopoulos, Dimitrios D , Dynamic effects of moving loads on road pavements: A review, Soil Dynamics and Earthquake Engineering 31, Netherlands, pp 547–567, 2011
- Blair, D P , Blast vibration in soil and on large resonant structure Explo'95, Conference Brisbane, Australia, pp 317-322, September 1995

- Bruno Abrami, *Appunti di acustica pratica*, n 2, s 1, s e , 2011
- BSI, British Standards Institution BS 7385-1: Evaluation and measurement for vibration in buildings, Part 1: Guide for measurement of vibrations and evaluation of their effects on buildings London 1990
- BSI, British Standards Institution BS 7385-1: Evaluation and measurement for vibration in buildings, Part 1: Guide for measurement of vibrations and evaluation of their effects on buildings London 1990
- Capuzzi Q , Pinzari M , Una nuova tecnologia di taglio al monte: il filo diamantato Proceeding of Days on the Quarrying Technologies of Ornamentals Stones Carrara 4-6-Giugno 1981, pp 1-19
- Cardu, M., Seccatore, J., Vaudagna, A., Rezende, A., Galvão, F., Bettencourt, J., & Tomi, G. D., Evidences of the influence of the detonation sequence in rock fragmentation by blasting–Part II. *Rem: Revista Escola de Minas*, 68(4), 455-462, (2015)
- Cardu, M , Giraudi, A , Lovera, E , Michelotti, E , An example of preliminary seismic survey to evaluate the feasibility of blasting works in proximity of a sensitive monument, Vienna Conference Proceedings P Moser et al , European Federation of Explosives Engineers, ISBN 978-0-9550290-1-1, 2007
- Cardu, M., Dipietromaria,S., Oreste,P., "Sub-level stoping in an underground limestone quarry: an analysis of the state of stress in an evolutionary scenario." *Archives of Mining Sciences* 61.1,pp. 199-216,( 2016)
- Cardu, M , Giraudi, A , Michelotti, E , Combined use of explosives and cutting machines in urban demolition, *Geoingegneria Ambientale e Mineraria*, Italy, Vol 130, Issue 2, pp 67-74, August 2010
- Cardu, M , Giraudi, A , Rocca, V , Verga, F , Experimental laboratory tests focused on rock characterisation for mechanical excavation, *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, United Kingdom, Vol 26, Issue 3, , pp 199-216, September 2012
- Cardu, M , Mucci, A , and Uyar, G G Investigating the effects of bench geometry and delay times on the blast induced vibrations in an open-pit quarry, *Geam Geoingegneria Ambientale e Mineraria*, 52(1), 45-56, (2015)
- Cardu, M , Oreste, P , Pettinau, D , Guidarelli, D , Automatic measurement of drilling parameters to evaluate the mechanical properties of soils, *American Journal of Applied Sciences*, Vol 10, Issue7, pp 654-663, 2013

- Cardu, M., Iabichino, G., Oreste, P., & Rispoli, A.. Experimental and analytical studies of the parameters influencing the action of TBM disc tools in tunnelling. *Acta Geotechnica*, 12(2), 293-304, (2017)
- Cardu, M., Oreste, P., "Technical–operational comparison between trench-cutters and clam excavators for concrete diaphragm construction in underground works at shallow depths." *International Journal of Mining, Reclamation and Environment* 26.3 (2012): 217-232.
- Cardu, M., & Oreste, P., Productivity and working costs of modern trench-cutters for the construction of concrete diaphragms in an urban environment. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 28(2), 118-132, (2014)
- Carlo Cestelli Guidi, *Geotecnica e tecnica delle fondazioni*, 6 ed, Milano, Hoepli, 1975
- Carniel, R , Barazza, F , Pascolo, P , 2006, Improvement of Nakamura technique by singular spectrum analysis *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol 26, N 1,pp 55-63
- Cengiz Kuzu, The importance of site-specific characters in prediction models for blast-induced ground vibrations, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Netherlands, Vol 28, Issue 5, pp 405–414, May 2008
- Ciccu R ,Pinzari M , Nuove tecnologie nella coltivazione di rocce ornamentali: il taglio con acqua in pressione *Atti del convegno La cava nel duemila Carrar 29-30maggio 1986* Ed Grafo Print, Sarzana ,1987, pp 17-21, Tavv I-XV
- Coltrinari, G *Detecting Seismic Waves Induced By Blast Operations At A Limestone Quarry By Means Of Different Transducer Mounting*, *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 11 (6), 959-969, (2016)
- Connolly D P , Alves Costa P , Kouroussis G , Galvin P , Woodward P K , Laghrouche O , Large scale international testing of railway ground vibrations across Europe, *International Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, USA, Volume 71, 2015, pp1-4;
- Connolly, D P , et al , Field testing and analysis of high speed rail vibrations, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol 67, pp 102-118, 2014
- Costa, P A , Critical speed of railway tracks Detailed and simplified approaches, *Transportation Geotechnics*, Vol 2, pp 30-46, 2015
- Curcuruto S , Atzori D , Betti R , Marsico G , Mazzocchi E , Monaco E , Limone V , Amoroso F , Loprencipe G , P Zoccali, Propagazione delle vibrazioni ferroviarie: implementazione di modelli previsionali per treni a bassa e alta velocità, 3 Convegno

Nazionale Sicurezza ed Esercizio Ferroviario, Sapienza University of Rome, Italy, 2013, pp 7-15

- Cyril M Harris, Allan G Piersol, Harris' shock and vibration handbook, 5 ed, New York, McGraw-Hill, 2002
- Daniele Sette, Meccanica, vibrazioni ed onde, Roma, Libreria eredi Virgilio Veschi, 1963
- Dentoni, V., Massacci, G., "Assessment of visual impact induced by surface mining with reference to a case study located in Sardinia (Italy)." *Environmental earth sciences* 68.5 (2013): 1485-1493.
- Dentoni, V., Massacci, G., "Visibility of surface mining and impact perception." *International Journal of Mining, Reclamation and Environment* 21.1 (2007): 6-13.
- Dentoni, V., Grosso, B., Massacci, G., Assessment of visual impact due to surface mining with the Lvi method, *Legislation, Technology and Practice of Mine Land Reclamation - Proceedings of the Beijing International Symposium Land Reclamation and Ecological Restoration, LRER 2014, 2015, Pages 527-534*
- DIN, Deutsches Institut für Normung DIN 45669-2:2005-6: Measurement of vibration immission Part 2: Measuring method, Berlin, 2005
- Dowding, C H, Suggested method for blast vibration monitoring, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics*, 29 (2), 145-156, (1992)
- Drijkoningen, G G, Rademakers, F, Slob, E C, Fokkema, J T, A new elastic model for ground coupling of geophones with spikes, *Geophysics*, Vol 71 (2), pp Q9-Q17, 2006
- Ekanayake S D, Liyanapathirana D S, Leo C J, Attenuation of ground vibrations using in-filled wave barriers, *International Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, USA, 2014, Vol 67, pp 290-292
- Emiliano Boniotto, Emissioni di rumore e vibrazioni ambientali prodotte da infrastrutture viarie, Padova, s c, s d
- ESSEBI s r l, Accelerometri, Considerazioni generali, Tipologie, Montaggio, Collegamenti
- F E Richart, J R Hall, R D Woods, *Vibration of Soil and Foundations*, Prentice-Hall International Series in Theoretical and Applied Mechanics, 1970
- Faber, K, Maxwell, P W, Edelmann, H A K Recording Reliability in Seismic Exploration as Influenced by Geophone-Ground Coupling, 56th meeting of the EAEG, Vienna, 1994
- Fiala P, Degrande G, Augusztinovicz F, Numerical modelling of ground-borne noise and vibration in buildings due to surface rail traffic, *Journal of Sound and Vibration*, 2007, Vol 301, pp 718-738

- Garinei A , Risitano G , Scappaticci L , Experimental evaluation of the efficiency of trenches for the mitigation of train-induced vibrations, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, USA, 2014, Vol 32, pp 306-310
- Giraudi, A , Cardu, M, Kecojevic, V , An assessment of blasting vibrations: a case study on quarry operation, *American Journal of Environmental Sciences* 5 4, United States, pp 468-474, 2009
- Giuseppe Artusio, *Elementi di base delle vibrazioni meccaniche*, Torino, Levrotto & bella, 1994
- Giuseppe Loprencipe, Giuseppe Cantisani, *Modelli per la valutazione delle vibrazioni ferroviarie*,
- Gutowski, T G , Dym, C L , Propagation of ground vibration: a review, *Journal of Sound and Vibration*, Vol 49(2), pp 179-193, 1976
- Hamdan, N , Laghrouche, O , Woodward, P K , Mahmood, M S , Ground vibration reduction analysis using a frequency-domain finite element approach, *Construction and Building Materials* 92, United Kingdom, pp 95–103, 2015
- Hoover, G M ; O'Brien, J T , The influence of the planted geophone on seismic land data, *Geophysics*, Vol 45, pp 1239-1253, 1984
- Hunter, J A , Benjumea, B , Harris, J B , Miller, R D , Pullan, S E , Burns, R A , Good, R L, Surface and downhole shear wave seismic methods for thick soil site investigations, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 22, Netherlands, pp 931–941, 2002
- ISEE, *Field Practice Guidelines for Blasting Seismographs*, USA, 2009
- ISTITUTO DI ARTE MINERARIA
- Ju, S H , Ho, Y S, Leong, C C , A finite element method for analysis of vibration induced by maglev trains, *Journal of Sound and Vibration*, Vol 331, pp 3751-3761, 2012
- Kahrman, A , Analysis of parameters of ground vibration produced from bench blasting at a limestone quarry, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol 24, pp 887–892, 2004
- Kima, D S , Lee, J S , Propagation and attenuation characteristics of various ground vibrations, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol 19, pp 115–126, 2000
- Kouroussis G , Pauwels N , Brux P , Conti C , Verlinden O , A numerical analysis of the influence of tram characteristics and rail profile on railway traffic ground-borne noise and vibration in the Brussels Region, *Science of the Total Environment*, 2013, pp 452-453

- Kouroussis G , Van Parys L , Conti C , Verlinden O , Using three-dimensional finite element analysis in time domain to model railway-induced ground vibrations, *Advances in Engineering Software*, 2014, Vol 70, pp 63-66
- Kouroussis, G , Verlinden, O , Prediction of railway ground vibrations: Accuracy of a coupled lumped mass model for representing the track/soil interaction, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 69, Netherlands, pp 220–226, 2015
- Krohn, C E , Geophone ground coupling *Geophysics*, Vol 49 (6), pp 722-731, 1984
- Kurzweil, L G , Ground-borne noise and vibration from underground rail systems, *Journal of Sound and Vibration*, Vol 66 (3), pp 363-370, 1979
- Lak, M A , François, S , Degrande, G , Lombaert, G , Development and experimental validation of a numerical model for the prediction of ground vibration generated by pavement breaking, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 79, Netherlands, pp 199–210, 2015
- Lippiello, D , Alfaro Degan, G , and Pinzari, M Comparison of stochastic and deterministic methods for mapping environmental noise from opencast quarries, *American Journal of environmental sciences*, 12 (2), 68-76, (2016)
- Lombaert, G , Degrande, G , The experimental validation of a numerical model for the prediction of the vibrations in the free field produced by road traffic, *Journal of Sound and Vibration* 262, United States, pp 309–331, 2003
- Lopes Patrícia, Alves Costa P , Ferraz M , Calçada R , Silva Cardoso A , Numerical modeling of vibrations induced by railway traffic in tunnels: From the source to the nearby buildings, *International Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, USA, 2014, Vol 61-62, pp 270-272
- Lui, W K , et al , A comparative study of different numerical models for predicting train noise in high-rise cities, *Applied Acoustics*, Vol 67, pp 432-449, 2006
- Luna, R , Jadi, H , Determination of Dynamic Soil Properties Using Geophysical Methods, *Proceedings of the First International Conference on the Application of Geophysical and NDT Methodologies to Transportation Facilities and Infrastructure*, St Louis, MO, December 2000
- Mancini, R , Cardu, M Scavi in roccia-gli esplosivi, (2001)
- Nejati, H R , Morteza A , Hashemolhosseini, H , Numerical analysis of ground surface vibration induced by underground train movement, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol 29, pp 1-9, 2012

- Omata, S Ground couplings and measurement frequency ranges of Vibration transducers, Jour-nal of the Acoustical Society of America, 73 (6), 2187-2192, (1983)
- Oreste, P., "A numerical approach for evaluating the convergence-confinement curve of a rock tunnel considering Hoek-Brown strength criterion." American Journal of Applied Sciences 11.12 (2014): 2021.
- Oreste, P., "Analysis of the tunnel-support interaction through a probabilistic approach." American Journal of Applied Sciences 12.2,pp. 121-129, (2015)
- Oreste, P., "Evaluation of the tunnel face stability through a ground stress analysis with a hemispherical geometry approximation." American Journal of Applied Sciences 11.12 (2014): 1995.
- Oreste, P. P., Dias, D., "Stabilisation of the excavation face in shallow tunnels using fibreglass dowels." Rock mechanics and rock engineering 45.4 (2012): 499-517.
- Oreste, P. "The stabilization of the excavation face of a shallow tunnel in difficult ground conditions." WIT Transactions on The Built Environment 108 (2009): 481-492.
- Pau A., Vestron Fabrizio, Vibration assessment and structural monitoring of the Basilica of Maxentius in Rome, Mechanical Systems and Signal Processing, Italy, 2013, Vol 41 - Issues 1–2, pp 454-457
- Peila, D , 2014, Soil conditioning for EPB shield tunneling, KSCE Journal of Civil Engineering, Vol 18, Issue 3, pp 831-836
- Phang, M K , Simpson, T R , Brown, R C , Investigation of Blast-induced Underground Vibrations from Surface Mining, University of Alabama, Mineral Resources Institute, 1984
- Picoux, B , El Ayadi, A , Petit, C , Dynamic response of a flexible pavement submitted by impulsive loading, Soil Dynamics and Earthquake Engineering 29, Netherlands, pp 845–854, 2009
- Piga P., Pinzari M, Problematiche dell'attività estrattiva finalizzate al recupero ambientale, L'industria mineraria, marzo-aprile,pp 90-96
- li, V., Massacci, G., & Lowndes, I. S. (2014). Dust dispersion from haul roads in complex terrain: the case of a mineral reclamation site located in Sardinia (Italy). International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 28(5), 323-341.
- Pinzari M 2006, tipologie e metodi di coltivazione delle cave, Quarry and Construction, XLIV, 520:29-44
- Pinzari M, Il dimensionamento di un'unità produttiva di cava Criteri e metodologia progettuale, Marmo macchine ,27, pp 45-54

- Robertson, D A , The Neglected Step to Accurate Blast Monitoring: Proper Coupling, 9th Annual Symp On Explosives and blasting research, ISEE, January -Feb , San Diego, pp 83-98
- Ropars Pierre , Bonnet Guy , Jean Philippe, A stabilization process applied to a hidden variables method for evaluating the uncertainties on foundation impedances and their effect on vibrations induced by railways in a building, Journal of Sound and Vibration, France, 2013, pp 1953-1958
- Ryue, J , et al , Investigations of propagating wave types in railway tracks at high frequencies, Journal of Sound and Vibration, Vol 315 1, pp 157-175, 2008
- Sanayei Masoud, Kayiparambil Anish P , Moore James A , Brett Cory R , Measurement and prediction of train-induced vibrations in a full-scale building, Engineering Structures, United States, 2014, Vol 77, pp 119-122
- Sanchidrián, J A , Segarra, P , and López, M L Energy components in rock blasting, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 44 (1), 130-147, (2007)
- Segarra, P , et al "Coupling of blasting seismographs to rock and its effectiveness for horizontal ground motion, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 92, 81-90, (2017)
- Segarra, P , López, L M , Sanchidrián, J A , Uncertainty in measurements of vibrations from blasting, Rock mechanics and rock engineering, Vol 45 6, pp 1119-1126, 2012
- Segarra, P , Sanchidrián, J A , Castedo, R , López, L M , I del Castillo, Performance of some coupling methods for blast vibration monitoring, Journal of Applied Geophysics, Vol 112, pp 129–135, 2015
- Sica Stefania, Melazzo Alfredo, Santucci de Magistris Filippo, Propagazione e isolamento delle vibrazioni del terreno prodotte da treni ad alta velocità, Rivista Italiana Di Geotecnica, Italy, 2007, pp 30-34
- Singh, P K , Roy, M P , Damage to surface structures due to blasting, Int J Rock Mech & Min Sci , Vol 47(6), pp 949-961, 2010
- Singh, P K , Vogt, W , Ground vibration: prediction for safe and efficient blasting, Zukunft mit Tiefgang, Erzmetal, pp 677-684, 1998
- Siskind, D E , Stagg, J , Kopp, J W , Dowding, C H , Structure Response and Damage Produced by Ground Vibrations from Surface Mine Blasting, USBM Report of Investigation 8507 Twin Cities: U S Bureau of Mines, 1980
- Stagg, M S , Engler, A J , Measurement of Blast-induced Ground Vibrations and Seismograph Calibration, US Bureau of Mines (RI 8506), 1980



- Stefania Sica, Alfredo Melazzo, Filippo Santucci de Magistris, Propagazione e isolamento delle vibrazioni del terreno prodotte da treni ad alta velocità, rivista italiana di geotecnica, 4/2007
- Steven Lawrence Kramer, Geotechnical earthquake engineering, Upper Saddle River (N J ), Prentice Hall, 1996
- Triepaischajonsak, N , Thompson, D J , A hybrid modelling approach for predicting ground vibration from trains, Journal of Sound and Vibration, Vol 335, pp 147-173, 2015
- UNI 9614, Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo, 1990
- UNI 9916, Criteria for the measurement of vibrations and the assessment of their effects on buildings, 2004
- UNI ISO 5348, Vibrazioni meccaniche ed urti Montaggio meccanico degli accelerometri, 1992
- UNI-9916, 2004 "Criteri di misura e valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici ", TESTO 17 91 120: 25
- Verhas H p , Prediction of the propagation of train-induced ground vibration, Journal of Sound and Vibration, Belgium,1976, pp 371-374
- Volberg, G , Propagation of ground vibrations near railway tracks, Journal of Sound and Vibration, Vol 87 2, pp 371-376, 1983
- Washburn, H ; Wiley, H , The effect of the placement of a seismometer on its response characteristics, Geophysics, Vol 6, pp 116-131, 1941
- Xia, H , Cao, Y M , De Roeck, G , Theoretical modeling and characteristic analysis of moving-train induced ground vibrations, Journal of Sound and Vibration 329, United States, pp 819–832, 2010
- Yu Xian Hu, Earthquake engineering, Londra, E & FN Spon, 1996
- Zoccali, P , Cantisani, G , Loprencipe, G , Ground-vibrations induced by trains: Filled trenches mitigation capacity and length influence, Construction and Building Materials, Vol 74, pp 1-8, 2015

## ▪ *Appendice A : Caratteristiche del sito*

Riportiamo parzialmente lo studio completo dell'area, (mettere puntini alla parte mancante)

### Litostratigrafia

Le caratteristiche litostratigrafiche delle diverse formazioni affioranti nell'area di studio sono, dalla più recente alla più antica, elencate qui di seguito,

### Riporti

Riporti e aree di accumulo del materiale di cava, Area di calpestio del piazzale di cava,

### Vulcaniti di Oricola

Vulcaniti costituite da ceneri, da fini a grossolane, di colore rossastro, talora in alternanza con argille palustri, localmente con livelli diatomitici, generalmente alterate e pedogenizzate, Sono presenti livelli e lenti più o meno estesi di conglomerati, Alla base tufi litiodi cineritici grigi; in essi si rinvencono clasti carbonatici a spigoli vivi, di dimensioni da millimetriche a centimetriche, Si osservano nei depositi gradazione e laminazione, sia parallela che incrociata, *Pleistocene medio - superiore*

### Depositi lacustri della Piana di Oricola

Argille e argille sabbiose grigiastre, passanti superiormente e lateralmente a sabbie gialle e ocra in facies lacustre, *Pliocene (?) - Pleistocene inferiore*

### Calcari a briozoi e litotamni

Calcareniti bioclastiche biancastre in strati da medi a spessi, con rare strutture sedimentarie (laminazione incrociata e piano-parallela), riccamente fossiliferi (briozoi, lamellibranchi, echinoidi, cirripedi, rari litotamni e brachiopodi, ecc.); livelli biostromali plurimetrici ad ostreidi, Calcareniti da fini a grossolane di colore da bianco a marroncino con puntature arancioni, in strati sottili e medi, localmente con lenti di selce avana, a luoghi con gradazione diretta e laminazione, con struttura a "losanga" e, a luoghi macchie bluastre; con echinoidi, briozoi, serpulidi e bioturbatori (*Cylindrites* sp.), Miocene superiore (Langhiano p.p. - Serravalliano p.p.)

### Assetto geometrico-strutturale

Per la definizione dell'assetto strutturale della formazione calcarea, lungo tutto il fronte esistente della cava, sono state eseguite 2 stazioni di misura scelte nelle porzioni più significative e accessibili dell'ammasso roccioso,

Da un punto di vista geometrico-strutturale la zona della cava è caratterizzata da una giacitura estremamente variabile e prevalentemente non distinguibile dalle altre famiglie di discontinuità; la giacitura varia dal franapoggio 305 /27 - 350 /30 al reggipoggio nel settore più elevato (Colle Orsini) 150 /25 , L'ammasso roccioso è interamente costituito da calcareniti mioceniche interessate da un fitto reticolo di discontinuità associate ai due elementi tettonici principali: il sovrascorrimento Olevano-Antrodoco a direzione N-S a cui si associa un sistema di faglie a direzione appenninica (NW-SE) ben visibili in più punti sul fronte di scavo. Il sistema di faglie appenniniche presenta una giacitura media pari a 326 /72 , Agli elementi tettonici si associano, nelle singole stazioni strutturali, almeno cinque famiglie di discontinuità non sempre ricorrenti in quanto con valori di inclinazione e direzione dell'immersione piuttosto variabili più alcune discontinuità casuali, Aggregando i risultati delle due stazioni si riconoscono 4 famiglie di discontinuità più almeno tre elementi random, Nelle ***Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.*** e ***Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.*** sono riassunti i valori di tutte le principali discontinuità ricorrenti misurate nelle 2 stazioni strutturali, suddivise per famiglie; in ***Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.***, invece i dati aggregati delle due stazioni. La roccia nel suo insieme si presenta con un grado di fratturazione da medio-alto ad elevato, con settori, in corrispondenza delle faglie, in cui la roccia risulta milonizzata, Al grado naturale di fratturazione si associa anche quello indotto dalle cariche esplosive, Alcune discontinuità si presentano, localmente, aperte con superfici di calcite alabastrina depositata dalle acque di percolazione e localmente con riempimento terroso di colore rosso-bruno scuro,

Tabella 103: Dati strutturali ricavati lungo lo stendimento della stazione strutturale 1 (G stratificazione; F faglia; D discontinuità)

<b>Stazione strutturale 1</b>					
<b>Famiglia</b>	<b>Tipologia Discontinuità</b>	<b>Inclinazione</b>	<b>Direzione Immersione</b>	<b>Latitudine</b>	<b>Longitudine</b>
1	D	40.5403	356.735	42.05779241	13.02072963
2	D	81.8481	247.852	42.05784722	13.02069563
3	D	57.3488	346.373	42.05785245	13.02069961
4	D	63.8934	019.226	42.05781036	13.02070505
3	D	85.2105	346.787	42.05781036	13.02070505
4	D	56.7221	007.788	42.05781036	13.02070505
5	F	61.6339	324.215	42.05782262	13.02070792
6	G	18.6056	261.188	42.05782262	13.02070792
7	D	79.7747	048.847	42.05785249	13.02069764
2	D	67.3579	248.021	42.05784476	13.02073039
8	D	61.6553	102.547	42.05784635	13.02077239
7	D	81.8056	041.742	42.05784635	13.02077239
1	D	38.0734	354.182	42.05786358	13.02076022
5	F	70.7523	320.123	42.05782262	13.02076023

Tabella 104: Dati strutturali ricavati lungo lo stendimento della stazione strutturale 1 (G stratificazione; F faglia; D discontinuità).

<b>Stazione strutturale 2</b>					
<b>Famiglia</b>	<b>Tipologia Discontinuità</b>	<b>Inclinazione</b>	<b>Direzione Immersione</b>	<b>Latitudine</b>	<b>Longitudine</b>
1	F	82.9942	325.958	42.05400062	13.01995984
2	D	31.2239	306.841	42.05400910	13.02001630
1	F	66.0035	333.066	42.05402066	13.02002620
3	D	87.8307	154.100	42.05404348	13.02002842
4	D	85.0113	205.375	42.05401702	13.02001215
5	G	73.3641	227.253	42.05397411	13.02003301
6	D	74.8919	52.2353	42.05393122	13.02000799
5	G	47.3578	221.358	42.05390597	13.01999352

1	F	77.6462	327.807	42.05406373	13.01997668
7	D	83.9236	356.715	42.05406576	13.01993183
5	G	70.4947	217.629	42.05406882	13.01992485

Tabella 105: Dati strutturali aggregati

<i>Tipologia Discontinuità</i>	<i>Inclinazione</i>	<i>Direzione Immersione</i>
D	79	48
D	75	248
D	71	347
D	54	356
F	75	214

## Geologia tecnica

### Considerazioni introduttive sui fronti di scavo in roccia

Lo studio della stabilità di un fronte di scavo in roccia comporta innanzi tutto la definizione di un modello geomeccanico in grado di descrivere compiutamente le modalità e le cause della potenziale instabilità. In altre parole, per ogni potenziale cinematismo occorre definire le azioni e le resistenze in gioco per analizzare, prevedere ed eventualmente prevenire e contrastare la perdita di stabilità del fronte di scavo. A tal fine un *ammasso roccioso* può essere definito come un insieme di blocchi isolati di matrice rocciosa con geometria determinata dalle varie discontinuità che li separano. Per *matrice rocciosa* si intende la porzione di materiale roccia, o roccia intatta, che costituisce i blocchi separati dalle discontinuità. La *discontinuità* è invece un qualunque piano di origine meccanica o sedimentaria che isola o separa i blocchi di matrice rocciosa. Il considerare la matrice rocciosa, oppure le discontinuità, oppure l'ammasso nella sua globalità dipende dalla scala del problema da affrontare. Nel caso specifico, l'analisi dell'intero fronte di scavo della cava deve considerare per forza di cose l'insieme combinato delle discontinuità e della matrice rocciosa. Invece, alla scala di un singolo gradone di cava, ad esempio nella valutazione della sua stabilità, può assumere maggiore significato la presenza di alcuni giunti particolarmente significativi per il problema in esame. Ad una scala ancora più piccola, come può essere quella del piede del gradone, si può ritenere effettivamente significativo lo stesso materiale roccia. Da notare però che la stessa matrice rocciosa è alle volte caratterizzata da discontinuità (ad esempio scistosità, foliazione, clivaggio) presenti già alla scala del campione

roccioso, Da questa premessa si può senz'altro affermare che la resistenza del volume di roccia diminuisce all'aumentare della dimensione del volume medesimo proprio a causa della presenza delle discontinuità, Dunque per analizzare le capacità dell'ammasso roccioso di opporsi alle potenziali instabilità è necessario definire le seguenti grandezze:

- la resistenza puntuale del materiale roccia;
- la resistenza globale dell'ammasso roccioso;
- la resistenza delle discontinuità,

Tali grandezze sono state determinate con l'ausilio di prove di laboratorio, di rilievi geomeccanici sul fronte di scavo e della classificazione geomeccanica di Bieniawski (1989),

### Classificazione geomeccanica di Bieniawski (RMR Rock Mass Rating)

La caratterizzazione dell'ammasso roccioso è stata eseguita mediante 2 stendimenti (stazioni strutturali) dislocati nei settori più significativi del fronte di scavo attuale della cava, La classificazione di Bieniawski (1989) (RMR Rock Mass Rating) si sviluppa mediante la definizione dei seguenti cinque parametri:

- **A1** Resistenza a compressione uniassiale;
- **A2** RQD (Rock Quality Designation);
- **A3** Spaziatura delle discontinuità;
- **A4** Condizioni delle discontinuità (A4a Lunghezza o Persistenza, A4b Apertura, A4c Rugosità, A4d Alterazione, A4e Riempimento)
- **A5** Condizioni idrauliche

A ciascun parametro, secondo quanto riportato nella *Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.*, viene assegnato un indice la cui somma costituisce l'indice **RMR<sub>B</sub>** (detto **indice base**) dato dalla seguente equazione:

$$\mathbf{RMR}_B = A1 + A2 + A3 + (A4a + A4b + A4c + A4d + A4e) + A5 \quad (1)$$

Tabella 106: Classificazione di Bieniawski (1989)

<b>CLASSIFICAZIONE DI BIENIAWSKI</b>	
<b>A1 - RESISTENZA DELLA ROCCIA <math>\sigma_c</math> (MPa)</b>	
$\leq 44.5$	$A1 = 4/44.5 \sigma_c + 1$
44.5 - 93.75	$A1 = 4/49.25 \sigma_c + 1.368$
93.75 - 140	$A1 = 3/46.25 \sigma_c + 2.919$
140 - 180	$A1 = 0.0375 \sigma_c + 6.75$
180 - 240	$A1 = 0.025 \sigma_c + 9$
$> 240$	$A1 = 15$
<b>A2 - RQD (%)</b>	
$\leq 26.5$	$A2 = 3/26.6 RQD + 3$
26.5 - 39	$A2 = 2/12.4 RQD + 1.71$
39 - 76.6	$A2 = 7/37.6 RQD + 0.739$
$> 76.6$	$A2 = 5/23.4 RQD - 1.367$
<b>A3 - SPAZIATURA s (m)</b>	
$\leq 0.2$	$A3 = 15 s + 5$
0.2 - 0.4	$A3 = 10 s + 6$
0.4 - 0.66	$A3 = 7.752 s + 5.9$
0.66 - 0.94	$A3 = 7.067 s + 7.35$
0.94 - 1.60	$A3 = 6.07 s + 8.288$
1,60 - 2,00	$A3 = 5 s + 10$
$> 2,00$	$A3 = 20$
<b>A4 - CONDIZIONI DELLE DISCONTINUITÀ</b>	
<b>A4a - PERSISTENZA O LUNGHEZZA DEL GIUNTO (m)</b>	
$< 1$	$A4a = 6$
1 - 3	$A4a = 4$
3 - 10	$A4a = 2$
10 - 20	$A4a = 1$
$> 20$	$A4a = 0$
<b>A4b - APERTURA DEL GIUNTO (mm)</b>	
Completamente chiuso	$A4b = 6$
$< 0,1$	$A4b = 5$
0,1 - 1	$A4b = 4$
1 - 5	$A4b = 1$
$> 5$	$A4b = 0$
<b>A4c - RUGOSITÀ DEL GIUNTO</b>	
Molto rugosa	$A4c = 6$
Rugosa	$A4c = 5$
Leggermente rugosa	$A4c = 3$

Liscia	A4c = 1
Levigata	A4c = 0
<b>A4d - ALTERAZIONE DELLE PARETI DEL GIUNTO</b>	
Non alterate	A4d = 6
Leggermente alterate	A4d = 5
Mediamente alterate	A4d = 3
Molto alterate	A4d = 1
Decomposte	A4d = 0
<b>A4e - RIEMPIMENTO DELLE DISCONTINUITÀ</b>	
Assente	A4e = 6
Compatto < 5 mm	A4e = 4
Compatto > 5 mm	A4e = 2
Soffice < 5 mm	A4e = 2
Soffice > 5 mm	A4e = 0
<b>A5 - CONDIZIONI IDRAULICHE DELLE DISCONTINUITÀ</b>	
Asciutte	A5 = 15
Umide	A5 = 10
Bagnate	A5 = 7
Deboli venute d'acqua	A5 = 4
Forti venute d'acqua	A5 = 0

Nella pratica della meccanica delle rocce si usa differenziare l'indice RMR secondo tre modalità differenti a seconda dell'utilizzo o meno di alcuni parametri:

$$\text{Indice asciutto} \quad \mathbf{RMR}_A = A1 + A2 + A3 + A4 \quad (2)$$

$$\text{Indice di base} \quad \mathbf{RMR}_B = A1 + A2 + A3 + A4 + A5 \quad (3)$$

$$\text{Indice corretto} \quad \mathbf{RMR}_C = A1 + A2 + A3 + A4 + A5 + A6 \quad (4)$$

L'indice  $\mathbf{RMR}_B$  attribuisce l'ammasso roccioso ad una determinata classe di appartenenza (*Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.*), e suggerisce un riscontro quantitativo dei parametri angolo di attrito di picco ( $\phi_p$ ), coesione ( $c'$ ) e Modulo di deformazione ( $E$ ) ricavati, secondo Bieniawski, dalle seguenti espressioni:



$$\text{Coesione } c' \text{ (kPa)} = 5 \times \text{RMR}_B \quad (5)$$

$$\text{Angolo di attrito di picco } \varphi_p \text{ ( )} = 0,5 \times \text{RMR}_B + 5 \quad (6)$$

$$\text{Modulo di deformazione } E \text{ (GPa)} = 2 \times \text{RMR}_B - 100 \quad (7)$$

Tabella 107: Classificazione di Bieniawski (1989) – Classi dell'ammasso roccioso

<b>CLASSI AMMASSO ROCCIOSO</b>					
<b>RMR<sub>B</sub></b>	<b>100 - 81</b>	<b>80 - 61</b>	<b>60 - 41</b>	<b>40 - 21</b>	<b>&lt; 20</b>
<i>Classe</i>	I	II	III	IV	V
<i>Descrizione</i>	Ottima	Buona	Discreta	Scadente	Molto scadente
<i>Coesione (kPa)</i>	> 400	400 - 300	300 - 200	200 - 100	< 100
<i>Angolo di attrito ( )</i>	>45	35 - 45	25 - 35	15 - 25	< 15

## Resistenza a compressione uniassiale (A1)

Tale parametro è stato ricavato per mezzo di una serie di prove eseguite con il “Martello di Schmidt”, nelle diverse condizioni di fratturazione della roccia, Si calcola il valore medio del rimbalzo dai dati di campagna, A tale scopo, come suggerito dall'ISRM, su 10 valori si scartano i 5 minori e si ricava il valore medio dai 5 rimanenti, Gli indici letti sono stati tradotti, per mezzo di un apposito diagramma, nel valore corrispettivo in MPa (angolo di inclinazione del martello: 90 ), Il valore dell'indice A1 è stato quindi ricavato dalla *Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.*

Tabella 108; Misure di rimbalzo del Martello di Schmidt nelle singole stazioni strutturali e calcolo del valore medio dell'ammasso roccioso

<b>Stazione</b>	<b>Media dei valori di Rimbalzo maggiori</b>	<b>σ<sub>c</sub></b>
<b>S1</b>	45	89
<b>S2</b>	51	120
Densità della roccia [kN/m <sup>3</sup> ]		25
σ <sub>c</sub> valore medio [MPa]		105
<b>INDICE A1</b>		<b>10</b>

## **RQD (Rock Quality Designation) (A2)**

L'RQD esprime un indice di qualità della roccia, Si calcola sommando, relativamente ad una carota estratta da un sondaggio, gli elementi di roccia di dimensione superiore a 10 cm, diviso la lunghezza complessiva della carota (il valore è espresso in %), In mancanza di carote di sondaggio, l'RQD si ricava dal numero volumetrico delle discontinuità  $J_v$ :

$$RQD = 115 - 3,3J_v \quad (8)$$

Nel caso specifico da un valore medio di  $J_v = 20$  (che indica una roccia con blocchi piccoli) si ricava un  $RQD = 49$  ovvero un indice  $A2 = 10$ ,

## **Spaziatura (A3)**

È la distanza che intercorre tra discontinuità adiacenti della medesima famiglia, A ciascun intervallo corrisponde un indice, I valori riportati sono medi in quanto, lo stato di fratturazione è variabile, Per una descrizione qualitativa del parametro spaziatura è di aiuto la *Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.*,

Tabella 109: Descrizione degli intervalli in mm della spaziatura in un ammasso roccioso

Spaziatura	Descrizione
< 20 mm	Estremamente stretta
20 mm – 60 mm	Molto stretta
60 mm – 20 cm	Stretta
20 cm – 60 cm	Moderata
60 cm – 2 m	Larga
2 m – 6 m	Molto larga
> 6 m	Estremamente larga

Dai rilievi geomeccanici, l'ammasso roccioso presenta una spaziatura media in prevalenza larga e localmente moderata; il valore medio è pari ad 0,5 m, L'indice corrispondente per tal classe risulta uguale a **10**

## **Condizioni delle discontinuità (A4)**

Per determinare le condizioni delle discontinuità e valutare l'indice corrispettivo il metodo RMR prevede la suddivisione in cinque sottoparametri caratteristici di seguito esposti,

### **Lunghezza o Persistenza (A4a)**

Con questo parametro viene indicata l'estensione delle linee di fratturazione rispetto al fronte della cava, Per ciascuna classe di lunghezza viene assegnato un punteggio relativo, L'ammasso roccioso presenta una persistenza media dell'ordine dei 3 – 10 m che corrisponde ad un indice pari a **2**,

### **Apertura (A4b)**

Questo parametro indica l'apertura dei giunti di fratturazione dell'ammasso roccioso, Nel caso in esame le fratture risultano mediamente aperte con valori compresi tra 1 e 5 mm, L'indice corrispondente è pari a **1**,

### **Scabrezza (A4c)**

Si calcola intercettando il profilo della discontinuità per mezzo di un apposito strumento (pettine di Burton) e si confronta con un determinato abaco, quindi si assegna il relativo punteggio, Nel caso in esame le superfici di discontinuità presentano mediamente superfici rugose, L'indice corrispondente è pari a **5**,

### **Alterazione (A4d)**

In base all'alterazione dei giunti, relativamente alla presenza di cataclasizzazione delle rocce e/o residualizzazione, viene assegnato un indice, Nell'insieme le superfici di discontinuità si presentano non alterate, L'indice corrispondente è pari a **6**,

### **Riempimento delle discontinuità (A4e)**

Indica il materiale interposto tra le pareti di una discontinuità dovuto a ricristallizzazione secondaria, a intensa fratturazione, ad alterazione, ecc, La presenza del materiale di riempimento in una discontinuità ne influenza il comportamento meccanico a breve o a lungo termine, determinando notevoli variazioni nel tempo della resistenza al taglio, della deformabilità e della permeabilità, Nel caso in esame il riempimento è generalmente assente, L'indice corrispondente è pari a **6**

### **Condizioni idrauliche (A5)**

Le condizioni idrauliche esprimono la presenza d'acqua in corrispondenza del fronte roccioso, Con riferimento all'ammasso roccioso in esame tutte le superfici di discontinuità risultano asciutte. L'indice corrispondente è pari a **15**,

### **Calcolo dell'indice RMR**

Il risultato del calcolo dell'indice RMR è riportato nella tabella sottostante (*Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.*)

Tabella 110: Calcolo Indice RMRA e RMRB

Parametri della Classificazione di Bieniawski		INDICI
A1	Resistenza della roccia	10
A2	RQD	10
A3	Spaziatura	10
A4a	Lunghezza o Persitenza	2
A4b	Apertura del giunto	1
A4c	Rugosità del giunto	5
A4d	Alterazione	6
A4e	Riempimento	6
A5	Condizioni Idrauliche	15
Totale INDICE RMR <sub>A</sub>		50
Totale INDICE RMR <sub>B</sub>		65

Dunque, secondo l'indice RMR<sub>B</sub>, l'ammasso roccioso si colloca verso il limite inferiore della classe II (Roccia Buona)

### **Calcolo dell'indice corretto RMRC con il metodo di Romana (SMR Slope Mass Rating)**

La metodologia SMR (*Slope Mass Rating* - Romana, 1985) prendendo spunto dalla classificazione RMR (Bieniawski, 1989), fornisce una opportuna correzione per i versanti in roccia, Questo metodo esprime, in termini qualitativi, le condizioni di stabilità per mezzo di un indice numerico ricavato dalla seguente equazione:

$$SMR = RMR_B + (\varphi_1 \times \varphi_2 \times \varphi_3) + \varphi_4 \quad (9)$$

I parametri  $\varphi_1$   $\varphi_2$   $\varphi_3$  sono fattori correttivi delle discontinuità in rapporto all'orientamento e all'inclinazione della scarpata, mentre  $\varphi_4$  rappresenta un fattore correttivo che tiene conto delle modalità di scavo (*Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.* e *Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.*)

Tabella 111: Classificazione di Romana

Rottura e cinematisimo		Molto Favorevole	Favorevole	Discreto	Sfavorevole	Molto Sfavorevole
P	$I_G - I_S$	> 30	30 - 20	20 - 10	10 - 5	< 5
T	$I_G - I_S - 180$					
W	$I_G - I_S$					
$\varphi_1$		<b>0,15</b>	<b>0.40</b>	<b>0.70</b>	<b>0.85</b>	<b>1.00</b>
P	$\beta_G$	> 20	20 - 30	30 - 35	35 - 45	> 45
W	$\beta_{RI}$					
$\varphi_2$		<b>0,15</b>	<b>0.40</b>	<b>0.70</b>	<b>0.85</b>	<b>1.00</b>
T	$\varphi_2$	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>
P	$\square_G - \square_S$	> 10	0 - 10	0	0 - (-10)	< -10
W	$\square_{RI} - \square_S$					
T	$\square_G - \square_S$	< 110	110 - 120	> 120	-	-
$\Phi_3$		<b>0</b>	<b>-6</b>	<b>-25</b>	<b>-50</b>	<b>-60</b>

$I_G$  = direzione immersione del giunto

$\square_G$  = inclinazione del giunto

$I_S$  = direzione immersione della scarpata

$\square_S$  = inclinazione della scarpata

$I_{RI}$  = direzione immersione della retta d'intersezione dei due piani del cuneo

$\square_{RI}$  = inclinazione della retta d'intersezione dei due piani del cuneo

P = rottura planare T = toppling W = cuneo

$\Phi_4$	Scarpata naturale	Abbattimento con pretaglio	Abbattimento controllato (volate leggere)	Abbattimento normale (volate o escavazione meccanica)	Abbattimento con esplosivo
	15	10	8	0	- 8 (*)
<p>(*) Si intende con quest'espressione tutte quelle operazioni condotte con un quantitativo di esplosivo superiore alla norma sia per scelta (per esempio allo scopo di ottenere una pezzatura più minuta), sia per deficienza di progettazione o per mancanza di una precisa sequenza di brillamento oppure ancora a causa di fori caratterizzati da cattivo parallelismo,</p>					

Tabella 112: Classificazione di Romana

<b>CLASSE</b>	<b>SMR</b>	<b>DESCRIZIONE</b>	<b>STABILITÀ</b>	<b>TIPOLOGIA INSTABILITÀ</b>	<b>SOSTEGNO</b>
<b>I</b>	81 – 100	Molto buona	Completamente stabile	Nessuna	Nessuno
<b>II</b>	61 – 80	Buona	Stabile	Possibili blocchi	Occasionale
<b>III</b>	41 – 60	Mediocre	Parzialmente stabile	Lungo piani o per cunei	Sistematico
<b>IV</b>	21 – 40	Scadente	Instabile	Lungo piani o per grandi cunei	Esteso
<b>V</b>	0 - 20	Molto scadente	Completamente instabile	Planare estesa Circolare tipo terre	Riprofilare la scarpata

Il significato dei coefficienti  $\phi_1$   $\phi_2$   $\phi_3$  e  $\phi_4$  è il seguente:

$\phi_1$ : dipende dall'angolo compreso tra l'orientazione dei giunti e l'orientazione del versante; il range di valori è compreso tra 0,15 e 1: la condizione più sfavorevole (pari all'indice 1) si verifica nel caso di azimuth parallelo,

$\Phi_2$ : dipende dalla pendenza dei giunti rispetto all'orizzontale; il range di valori è compreso tra 0,15 e 1; il valore è massimo si ha per angoli > di 45,

$\Phi_3$ : riflette la possibilità di venuta a giorno delle discontinuità e valuta l'eventualità che queste intersechino la superficie del versante, Se l'inclinazione delle discontinuità è concordante con il pendio, aumenta il fattore di instabilità, Le condizioni più sfavorevoli sono per valori < -10 dove l'indice ha valore - 60,

$\Phi_4$ : è legato al disturbo causato alla roccia dal metodo di scavo, Il valore oscilla da un massimo di +15, in condizioni di pendio naturale, cioè quando questo è integro, fino ad un valore di - 8 nelle condizioni di scavo con esplosivo superiore alla norma,

Per ricavare il valore dell'indice SMR, si inseriscono nell'equazione (9) i valori calcolati di  $RMR_B$  e di  $\varphi_1$   $\varphi_2$   $\varphi_3$  e  $\varphi_4$ , Si ricava, in conclusione, un numero che fornisce una valutazione qualitativa della stabilità del pendio (*Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.*)

Nel caso in esame tenendo conto la direzione del fronte in relazione alla direzione di immersione delle principali famiglie di discontinuità nonostante una generale condizione favorevole dei coefficienti  $\varphi_1$   $\varphi_2$   $\varphi_3$  a vantaggio della sicurezza (visto la non sempre prevedibilità di eventuali discontinuità con direzione dell'immersione sfavorevole a quella del fronte di scavo) si è scelta la condizione discreta dei 3 coefficienti, Tale scelta produce ovviamente un abbassamento dei valori di coesione e dell'angolo di attrito (da ricordare che i due valori della coesione e dell'angolo di attrito sono ulteriormente abbassati dai coefficienti parziali della nuova normativa NTC 2008),

Tabella 113: Calcolo dell'indice SRM di Romana e delle caratteristiche geomeccaniche dell'ammasso roccioso

<i>Parametro</i>	<i>Valore</i>	<i>Indice</i>
$\Phi_1$	Discreto	0,7
$\Phi_2$	Discreto	0,7
$\Phi_3$	Discreto	-25
$\Phi_4$	Abbattimento con esplosivo	0
Totale ( $\varphi_1 \times \varphi_2 \times \varphi_3$ ) + $\varphi_4$		-12
Indice $RMR_B$		61
<b>Indice corretto <math>RMR_C</math></b>		<b>49</b>
<i>Classificazione di Romana</i>	<i>Classe</i>	<i>III</i>
	<i>Descrizione</i>	<i>Mediocre</i>

	Stabilità	Parzialmente Stabile
	Tipologia rottura	Lungo piani o per cunei
<b>Coesione di picco = <math>5 \times RMR_C</math></b>		<b>245 kPa</b>
<b>Angolo di attrito di picco = <math>0.5 \times RMR_C + 5</math></b>		<b>30</b>

Nei problemi di geotecnica, e soprattutto nei casi degli stati limite che coinvolgono elevati volumi di terreno e/o rocce (quale può essere uno stato limite ultimo per la stabilità di un pendio o un fronte di scavo), risulta lecito fare riferimento ai valori prossimi a quelli medi della grandezza ovvero ai valori di resistenza globali dell'ammasso roccioso. Secondo gli Autori (BRUSCHI, 2004) L'utilizzo del valore di  $RMR_C$ , come parametro base per il calcolo delle grandezze geotecniche dell'ammasso è fortemente criticabile per applicazioni pratiche legate alla stabilità dei versanti in roccia, in quanto comprende sia le condizioni idrauliche che l'orientamento delle discontinuità; l'influenza di questi due parametri verrebbe infatti conteggiata due volte, poiché nelle analisi di stabilità l'orientamento delle discontinuità viene inserita nella geometria del calcolo mentre le sottospinte idrauliche sono considerate come una forza a parte, Per tale applicazione risulta quindi più corretto impiegare il valore di  $RMR_A$  che meglio rappresenta le proprietà intrinseche dell'ammasso, in quanto dipende solo dalla resistenza della roccia intatta e dalle caratteristiche delle discontinuità. Ovviamente i parametri geotecnici ricavati con l'indice  $RMR_C$  aumentano il grado di sicurezza del sistema, come è del resto evidente dal confronto con l'indice  $RMR_A$ , Nel caso in esame peraltro i due indici, 49 il primo e 50 il secondo, sono pressoché uguali,

### **Classificazione sismica del sito**

Il territorio nazionale, secondo l'O.P.C.M. 3274, viene suddiviso in 4 zone sismiche, Ciascuna zona sismica è, contrassegnata da un diverso valore dell'accelerazione orizzontale massima  $a_g$  in condizioni di campo libero su sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale di categoria A (definita al § 3,2,2), Gli intervalli di accelerazione  $a_g$  con probabilità di superamento pari al 10% in 50 anni, rapportati alle 4 zone sismiche indicate dall'OPCM 3519/06, sono riportate nella **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**



Tabella 114: Zone sismiche in relazione all'accelerazione di picco su terreno rigido

Zona	Intervalli di accelerazione $a_g$ con probabilità di superamento pari al 10% in 50 anni
1	$a_g > 0.25$
2	$0.15 < a_g \leq 0.25$
3	$0.05 < a_g \leq 0.15$
4	$a_g \leq 0.05$

La nuova riclassificazione sismica della regione Lazio (DGR 387 del 22 Maggio 2009) si basa soltanto su 3 zone sismiche a differenza delle quattro della precedente classificazione del 2003, con la scomparsa della zona sismica 4 e la suddivisione per le zone 2 e 3 di sottozone. In particolare la Zona Sismica 1, quella più gravosa in termini di pericolosità sismica, non presenta sottozone in quanto il massimo valore di  $a_g$  previsto per il Lazio non giustifica ulteriori suddivisioni. Le zone sismiche 2 e 3, sono state suddivise in 4 sottozone sismiche (dalla 2A, ovvero la maggiore sottozona della zona sismica 2, fino alla sottozona sismica 3B, corrispondente alla sottozona meno pericolosa della zona sismica 3) (*Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.*)

Tabella 115: Zone sismiche in relazione all'accelerazione di picco su terreno rigido della Regione Lazio

Zona	Sottozona	Intervalli di accelerazione $a_g$ con probabilità di superamento pari al 10% in 50 anni
1		$0.25 \leq a_g < 0.278$ (valore max. per il Lazio)
2	2A	$0.20 \leq a_g < 0.25$
	2B	$0.15 \leq a_g < 0.20$
3	3A	$0.10 \leq a_g < 0.15$
	3B	(valore min. per il Lazio) $0.062 \leq a_g < 0.10$

Tabella 116: Categorie di sottosuolo di riferimento

<b>Tipo di terreno</b>	<b>Descrizione del profilo stratigrafico</b>	<b><math>V_{s,30}</math> (m/s)</b>	<b><math>N_{SPT,30}</math></b>	<b><math>c_{u,30}</math></b>
<b>A</b>	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi eventualmente comprendenti in superficie uno strato di alterazione con spessore massimo pari a 3 m,</i>	> 800	-	-
<b>B</b>	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità,</i>	360 - 800	> 50	> 250
<b>C</b>	<i>Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità,</i>	180 - 360	15 - 50	70 - 250
<b>D</b>	<i>Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o terreni a grana fina scarsamente consistenti con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità,</i>	< 180	< 15	< 70
<b>E</b>	<i>Terreni dei sottosuoli di tipo C o D per spessore non superiore ai 20 m, giacenti su un substrato di materiale più rigido (con <math>V_{s,30}</math> &gt; 800 m/s),</i>	Valori simili ai terreni di tipo C o D	Vedi C e/o D	Vedi C e/o D
<b>S1</b>	<i>Depositi di terreni caratterizzati da valori di <math>V_{s,30}</math> &gt; 100 m/s) che includono uno strato di almeno 8 m di terreni a grana fina di bassa consistenza, oppure che includono almeno 3 m di torba o di argille altamente organiche,</i>	< 100	-	10 - 20
<b>S2</b>	<i>Depositi di terreni suscettibili di liquefazione, di argille sensitive o qualsiasi altra categoria di sottosuolo non classificabile nei tipi precedenti (sono richiesti studi speciali per la definizione dell'azione sismica)</i>	-	-	-

Nella **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**  $V_{s,30}$  rappresenta la velocità media di propagazione delle onde di taglio nei primi 30 m di sottosuolo ed è data dalla seguente espressione:

$$V_{s,30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_i}} \quad (10)$$

In cui  $h_i$  è lo spessore in metri e  $V_i$  la velocità delle onde di taglio (m/s) dell' $i$ -esimo degli  $N$  strati del sottosuolo compresi nei primi 30 m di profondità, Il sito verrà classificato sulla base del valore di  $V_{s,30}$ , se disponibile, altrimenti sulla base del valore del numero di colpi  $N_{SPT,30}$ , determinato dalle prove penetrometriche dinamiche (SPT), nel caso di terreni grossolani, e della coesione non drenata  $c_{u,30}$ , per i terreni coesivi. Nel paragrafo § 7,11 Opere e sistemi geotecnici del DM 14/01/2008 sono presentate le norme che “... disciplinano la progettazione e la verifica delle opere e dei sistemi geotecnici di cui al § 6,1,1 soggetti ad azioni sismiche, nonché i requisiti cui devono soddisfare i siti di costruzione e i terreni interagenti con le opere in presenza di tali azioni. La Risposta sismica locale di un sito (§ 7,11,3,1 del DM 14/01/2008) dipende “... dalle particolari condizioni locali, cioè dalle caratteristiche topografiche e stratigrafiche dei depositi di terreno e degli ammassi rocciosi e dalle proprietà fisiche e meccaniche dei materiali che li costituiscono, Alla scala della singola opera o del singolo sistema geotecnico, la risposta sismica locale consente di definire le modifiche che un segnale sismico subisce, a causa dei fattori anzidetti, rispetto a quello di un sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale (sottosuolo di categoria A, definito al § 3,2,2). Il moto sismico alla superficie di un sito (§ 7,11,3,2 DM 14/01/2008), associato a ciascuna categoria di sottosuolo, è definito mediante l’accelerazione massima ( $a_{max}$ ) attesa in superficie ed una forma spettrale ancorata ad essa. Per l’analisi delle condizioni di stabilità dei pendii, la valutazione dell’amplificazione topografica può essere effettuata mediante analisi di risposta sismica locale o utilizzando il coefficiente di amplificazione topografica  $S_T$  (§ 7,11,3,3 Amplificazione topografica DM 14/01/2008), Il parametro  $S_T$  deve essere applicato nel caso di configurazioni geometriche prevalentemente bidimensionali, creste o dorsali allungate, di altezza superiore a 30 m, Gli effetti topografici possono essere trascurati per pendii con inclinazione media inferiore a 15°, altrimenti si applicano i criteri indicati nel § 3,2,2 e riassunti nella ***Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.***

Tabella 117: Coefficiente di amplificazione topografica ST

<b>Categoria</b>	<b>Caratteristiche della superficie topografica</b>	<b>Ubicazione dell'opera o dell'intervento</b>	<b>ST</b>
<b>T1</b>	Superficie pianeggiante. pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15$	Nessuna struttura	1
<b>T2</b>	Pendii con inclinazione media $i > 15$	In corrispondenza della sommità del pendio	1.2
<b>T3</b>	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $15 \leq i \leq 30$	In corrispondenza della cresta del rilievo	1.4
<b>T4</b>	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $i > 30$	In corrispondenza della cresta del rilievo	1.2

La stabilità dei pendii, nei confronti dell'azione sismica di progetto, può essere verificata con metodi semplificati di tipo pseudostatico, Tale metodo consiste nel verificare la stabilità di una massa di terreno delimitata dalla superficie libera e dalla più sfavorevole delle superfici di potenziale scorrimento (§ 7,11,3,5,2 Metodi di analisi DM 14/01/2008), Nei metodi pseudo statici l'azione sismica è rappresentata da un'azione statica equivalente, costante nello spazio e nel tempo, proporzionale al peso W del volume di terreno potenzialmente instabile, Tale forza dipende dalle caratteristiche del moto sismico atteso nel volume di terreno potenzialmente instabile e dalla capacità di tale volume di subire spostamenti senza significative riduzioni di resistenza, Nelle verifiche allo SLU, in mancanza di studi specifici, le componenti orizzontale e verticale di tale forza possono esprimersi come:

$$F_h = k_h \cdot W \quad F_v = k_v \cdot W \quad (11)$$

dove  $k_h$  e  $k_v$  sono rispettivamente i coefficienti sismici orizzontale e verticale e risultano pari a:

$$k_h = \beta_s \cdot (a_{\max}/g) \quad k_v = \pm 0,5 \cdot k_h \quad (12)$$

dove

$\beta_s$  = coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito;

$a_{\max}$  = accelerazione orizzontale massima attesa al sito;

$g$  = accelerazione di gravità,

In assenza di analisi specifiche della risposta sismica locale, l'accelerazione massima attesa al sito può essere valutata con la relazione:

$$a_{\max} = S_S \cdot S_T \cdot a_g \quad (13)$$

dove  $S_S$  è il coefficiente di amplificazione stratigrafica e  $S_T$  è il coefficiente di amplificazione topografica,

I valori di  $\beta_s$  sono riportati nella tabella sottostante (Tab. 7.11.I, § 7,11,3,5,2 Metodi di analisi DM 14/01/2008):

Tabella 118: Coefficienti di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito

$a_g(g)$	<b>CATEGORIE DI SOTTOSUOLO</b>	
	<b>A</b>	<b>B.C.D.E</b>
	$\beta_s$	$\beta_s$
$0.2 < a_g(g) \leq 0.4$	0.30	0.28
$0.1 < a_g(g) \leq 0.2$	0.27	0.24
$a_g(g) \leq 0.1$	0.20	0.20

## **Pericolosità sismica di base**

La pericolosità sismica di un sito è descritta dalla probabilità che, in un fissato lasso di tempo, in detto sito si verifichi un evento sismico di entità almeno pari ad un valore prefissato, Nelle NTC, tale lasso di tempo, espresso in anni, è denominato “periodo di riferimento”  $V_R$  e la probabilità è denominata “probabilità di eccedenza o di superamento nel periodo di riferimento”  $P_{VR}$ . Ai fini della determinazione delle azioni sismiche di progetto nei modi previsti dalle NTC, la pericolosità sismica del territorio nazionale è definita convenzionalmente facendo riferimento ad un sito rigido (di categoria A) con superficie topografica orizzontale (di categoria T1), in condizioni di campo libero, cioè in assenza di manufatti. Le condizioni del sito di riferimento rigido in generale non corrispondono a quelle effettive. È necessario, pertanto, tenere conto delle condizioni stratigrafiche del volume di terreno interessato dall'opera ed anche delle condizioni topografiche, poiché entrambi

questi fattori concorrono a modificare l'azione sismica in superficie rispetto a quella attesa su un sito rigido con superficie orizzontale, Tali modifiche, in ampiezza, durata e contenuto in frequenza, sono il risultato della risposta sismica locale, Nei metodi semplificati è possibile valutare gli effetti stratigrafici e topografici, In tali metodi si attribuisce il sito ad una delle categorie di sottosuolo definite nella Tabella 4,10 delle NTC (A, B, C, D, E) e ad una delle categorie topografiche definite nella Tabella 4,11 delle NTC (T1, T2, T3, T4), In questo caso, la valutazione della risposta sismica locale consiste nella modifica dello spettro di risposta in accelerazione del moto sismico di riferimento, relativo all'affioramento della formazione rocciosa (categoria di sottosuolo A) su superficie orizzontale (categoria topografica T1) (C,S,L,P, Istruzioni per l'applicazione delle "Norme tecniche per le costruzioni" di cui al D.M, 14 gennaio 2008). La pericolosità sismica di base di un sito, inoltre, deve essere descritta sia in termini geografici che in termini temporali, nonché nei modi previsti dalle NTC 2008, ovvero:

- in corrispondenza dei punti di un reticolo (reticolo di riferimento) i cui nodi, individuati in termini di latitudine e longitudine, debbono distare di un passo  $\leq 0.05$  ;
- per diverse probabilità di superamento in 50 anni e/o diversi periodi di ritorno TR ricadenti in un intervallo di riferimento compreso almeno tra 30 e 2475 anni, estremi inclusi (all'aumentare del TR aumenta l'accelerazione orizzontale massima  $a_g$  attesa su sito di riferimento rigido orizzontale);
- in termini di valori di accelerazione orizzontale massima  $a_g$  e dei parametri che permettono di definire gli spettri di risposta ai sensi delle NTC, nelle condizioni di sito di riferimento rigido orizzontale sopra definite,

Come già accennato, lo scuotimento del suolo così individuato viene successivamente corretto per tener conto delle modifiche prodotte dalle condizioni locali stratigrafiche del sottosuolo effettivamente presente nel sito e dalla morfologia della superficie, Tali modifiche caratterizzano la risposta sismica locale in termini di scuotimento del suolo, Le forme spettrali previste dalle NTC sono definite su sito di riferimento rigido orizzontale in funzione di tre parametri:

- $a_g$  accelerazione orizzontale massima del terreno;
- $F_0$  valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale;
- $T_c^*$  periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale,

Le forme spettrali previste dalle NTC sono caratterizzate da prescelte probabilità di superamento e vite nominali delle costruzioni e dei sistemi geotecnici, A tal fine occorre fissare la vita nominale VN della costruzione o del sistema geotecnica, in base alla classificazione delle opere (provvisorie,

ordinarie e grandi opere) e le probabilità di superamento nella vita di riferimento P<sub>VR</sub> associate a ciascuno degli stati limite considerati, per individuare infine, a partire dai dati di pericolosità sismica disponibili, le corrispondenti azioni sismiche, Dunque è conveniente utilizzare, come parametro caratterizzante la pericolosità sismica, il periodo di ritorno dell'azione sismica T<sub>R</sub>, espresso in anni, Fissata la vita nominale V<sub>N</sub>, i due parametri T<sub>R</sub> e P<sub>VR</sub> sono immediatamente esprimibili, l'uno in funzione dell'altro, mediante l'espressione:

$$T_R = - V_N / \ln(1 - P_{VR}) \quad (14)$$

Tabella 119: Classi e coefficienti d'uso

<b>CLASSE</b>	<b>DESCRIZIONE COSTRUZIONI</b>	<b>COEFFICIENTE C<sub>u</sub></b>
<b>I</b>	Costruzioni con presenza solo occasionale di persone, edifici agricoli,	<b>0.7</b>
<b>II</b>	Costruzioni il cui uso preveda normali affollamenti, senza contenuti pericolosi per l'ambiente e senza funzioni pubbliche e sociali essenziali, Industrie con attività non pericolose per l'ambiente, Ponti, opere infrastrutturali, reti viarie non ricadenti in Classe d'uso III o in Classe d'uso IV, reti ferroviarie la cui interruzione non provochi situazioni di emergenza, Dighe il cui collasso non provochi conseguenze rilevanti,	<b>1.0</b>
<b>III</b>	Costruzioni il cui uso preveda affollamenti significativi, Industrie con attività pericolose per l'ambiente, Reti viarie extraurbane non ricadenti in Classe d'uso IV, Ponti e reti ferroviarie la cui interruzione provochi situazioni di emergenza, Dighe rilevanti per le conseguenze di un loro eventuale collasso,	<b>1.5</b>
<b>IV</b>	Costruzioni con funzioni pubbliche o strategiche importanti, anche con riferimento alla gestione della protezione civile in caso di calamità, Industrie con attività particolarmente pericolose per l'ambiente, Reti viarie di tipo A o B, di cui al D.M. 5 novembre 2001, n. 6792, "Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade", e di tipo C quando appartenenti ad itinerari di collegamento tra capoluoghi di provincia non altresì serviti da strade di tipo A o B, Ponti e reti ferroviarie di importanza critica per il mantenimento delle vie di comunicazione, particolarmente dopo un evento sismico, Dighe connesse al funzionamento di acquedotti e a impianti di produzione di energia elettrica,	<b>2.0</b>

## Vita nominale, classi d'uso e periodo di riferimento

La vita nominale di un'opera strutturale e/o di un sistema geotecnico  $V_N$  è intesa come il numero di anni nel quale la struttura (soggetta alla manutenzione ordinaria) e/o il sistema, devono potere essere usati per lo scopo al quale sono destinati, La vita nominale dei diversi tipi di opere è quella riportata nella *Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.* e deve essere precisata nei documenti di progetto,

Tabella 120: Vita nominale  $V_N$  per diversi tipi di opere

<i>TIPI DI COSTRUZIONE</i>	<i>VITA NOMINALE <math>V_N</math> (in anni)</i>	
1	Opere provvisorie, Opere provvisionali, Strutture in fase costruttiva	$\leq 10$
2	Opere ordinarie, ponti, opere infrastrutturali e dighe di dimensioni contenute o di importanza normale	$\geq 50$
3	Grandi opere, ponti, opere infrastrutturali e dighe di grandi dimensioni o di importanza strategica	$\geq 100$

In presenza di azioni sismiche, con riferimento alle conseguenze di una interruzione di operatività o di un eventuale collasso, le costruzioni sono suddivise in classi d'uso così definite (§2,4,2 Classi d'uso NTC 2008) a cui corrispondono determinati valori del coefficiente d'uso  $C_U$  come riportato nella tabella sottostante,

Le azioni sismiche su ciascuna costruzione e/o sistema geotecnico vengono valutate in relazione ad un periodo di riferimento  $V_R$  che si ricava, per ciascun tipo, moltiplicando la vita nominale  $V_N$  per il coefficiente d'uso  $C_U$  :

$$V_R = V_N \times C_U \quad (15)$$

I valori dei parametri  $a_g$ ,  $F_0$  e  $T_c^*$  relativi alla pericolosità sismica su reticolo di riferimento nell'intervallo di riferimento sono forniti nelle tabelle riportate nell'Allegato 1 delle NTC o si possono calcolare con software dedicati



## Calcolo dei parametri sismici del sito

Con l'ausilio del software Parametri Sismici della Geostru (<http://www.geostru.com/geoapp/parametri-sismici.aspx>) per il sito in esame si hanno i seguenti parametri sismici:

Tabella 121: Caratteristiche sismiche del sito

<b>Caratteristiche del sito in esame</b>	
<i>Comune:</i>	Riofreddo
<i>Zona Sismica</i>	<b>2B</b>
<i>Profilo stratigrafico:</i>	A
<i>Categoria topografica:</i>	T2
<i>Latitudine (ED50):</i>	42,057728
<i>Longitudine (ED50):</i>	13,020577
<i>Classe d'uso:</i>	II
<i>Vita nominale:</i>	50
<i>Coefficiente cu:</i>	1,0
<i>Periodo di riferimento:</i>	50 anni

Tabella 122: Coordinate geografiche dei siti di riferimento del reticolo

<b>Siti di riferimento del reticolo</b>				
<i>Sito 1</i>	ID: 27854	Lat: 42.0340	Lon: 13.0190	Distanza: 2647.239
<i>Sito 2</i>	ID: 27855	Lat: 42.0342	Lon: 13.0863	Distanza: 6025.710
<i>Sito 3</i>	ID: 27633	Lat: 42.0842	Lon: 13.0860	Distanza: 6149.356
<i>Sito 4</i>	ID: 27632	Lat: 42.0840	Lon: 13.0186	Distanza: 2920.409

Tabella 123: Parametri sismici per i diversi SLU

<b>Parametri sismici per i diversi SLU</b>	
<b>Operatività (SLO)</b>	
Probabilità di superamento	81 %
Tr:	30 [anni]
a <sub>g</sub> :	0.057 g
Fo:	2.5086
T <sub>c</sub> *:	0.270 [s]
<b>Danno (SLD)</b>	
Probabilità di superamento	63 %
Tr:	50 [anni]
a <sub>g</sub> :	0.070 g
Fo:	2.493
T <sub>c</sub> *:	0.283 [s]
<b>Salvaguardia della vita (SLV)</b>	
Probabilità di superamento	10 %
Tr:	475 [anni]
a <sub>g</sub> :	0.163 g
Fo:	2.466
T <sub>c</sub> *:	0.328 [s]
<b>Prevenzione dal collasso (SLC)</b>	
Probabilità di superamento	5 %
Tr:	975 [anni]
a <sub>g</sub> :	0.204 g
Fo:	2.490
T <sub>c</sub> *:	0.340 [s]

I Coefficienti Sismici, relativi ai diversi SLU, sono riportati nella tabella sottostante:

Tabella 124: Coefficienti Sismici relativi ai diversi SLU per le lave

<i>Parametri</i>	<i>SLO</i>	<i>SLD</i>	<i>SLV</i>	<i>SLC</i>
$S_S$	1.000	1.000	<b>1.000</b>	1.000
$C_C$	1.000	1.000	<b>1.000</b>	1.000
$S_T$	1.200	1.200	<b>1.200</b>	1.200
$K_o$	0.014	0.017	<b>0.053</b>	0.073
$K_v$	0.007	0.008	<b>0.026</b>	0.037
$a_{max}$	0.665	0.820	<b>1.921</b>	2.400
$\beta_S$	0.200	0.200	<b>0.270</b>	0.300

Per la stabilità dei pendii e dei fronti di scavo, come indicato nel §7 - *Progettazione per azioni sismiche - § 7,1 Requisiti nei confronti degli stati limite* (DM 14/01/2008) ... *In mancanza di espresse indicazioni in merito, il rispetto dei vari stati limite si considera conseguito: nei confronti di tutti gli stati limite di esercizio, qualora siano rispettate le verifiche relative al solo SLD; nei confronti di tutti gli stati limite ultimi, qualora siano rispettate le indicazioni progettuali e costruttive riportate nel seguito e siano soddisfatte le verifiche relative al solo SLV*, Dunque lo SLU da considerare nelle verifiche di stabilità è quello relativo alla Salvaguardia della vita (SLV),

## Analisi di stabilità

### Considerazioni generali

I diversi metodi di calcolo per le analisi di stabilità presenti in letteratura si basano sul concetto dell'equilibrio limite globale, La superficie di rottura, supposta nota, è suddivisa in un determinato numero di strisce (conci) che consentono di calcolare in modo agevole le grandezze che entrano in gioco nelle equazioni risolutive, Tutti i metodi adottano come criterio di rottura il criterio di Mohr-Coulomb assieme al criterio delle tensioni efficaci di Terzaghi, La resistenza a taglio disponibile  $T_{DISP}$  è valutata secondo l'espressione:

$$T_{DISP} = c' + (\sigma - u)\tan\phi' = c' + \sigma'\tan\phi' \quad (16)$$

dove  $c'$  e  $\phi'$  sono la coesione e l'angolo di attrito efficaci,  $\sigma$  è la tensione normale totale ed  $u$  la pressione neutra,

Da un punto di vista generale la verifica di stabilità si effettua applicando un modello matematico che permette di calcolare, in numerose scenari, il rapporto tra le forze agenti mobilitate  $T_{MOB}$  e le forze resistenti disponibili  $T_{DISP}$  che agiscono in una determinata situazione arbitrariamente imposta,

Tale rapporto si esprime per mezzo di un Coefficiente di Sicurezza  $R$ ,

$$R = T_{DISP} / T_{MOB} \quad (17)$$

Quando questo numero è inferiore ad 1 prevalgono le forze agenti e quindi si produce il movimento della massa oggetto di analisi, Si dice, in questo caso, che il pendio è instabile, nel caso in cui è maggiore di 1 prevalgono le forze resistenti, la massa oggetto di analisi è ferma e si dice quindi che il pendio è stabile, Quando il Fattore di sicurezza è uguale ad 1 il pendio è in condizione di equilibrio limite. Il modello matematico è applicabile validamente quando sono verificate certe condizioni al contorno quali l'omogeneità, l'isotropia e la continuità, fattori tutt'altro che presenti nel materiale analizzato. Nella pratica della geologia, dell'ingegneria e delle scienze applicate in generale, pertanto, si procede per approssimazione, Le approssimazioni che si introducono nel calcolo numerico sono, ad esempio, l'assunzione di una stratigrafia composta da terreni omogenei, condizioni di umidità costante e, soprattutto, la scelta di parametri geotecnici riferiti a dati puntuali ed estrapolati all'intero ammasso. Data la potenziale ed inevitabile variabilità delle caratteristiche geotecniche del materiale, a fronte di una modellizzazione il più possibile precisa e dettagliata, come è prassi nelle scienze applicate si introduce il parametro della sicurezza, Questo consiste nel considerare scenari talvolta più critici di quelli reali, fermo restando che anomalie locali, possono variare, nello spazio e nel tempo, la situazione. L'analisi di stabilità dei fronti rocciosi è fondamentalmente un processo articolato in due fasi, La prima consiste nell'analisi dell'assetto strutturale dell'ammasso roccioso al fine di determinare se la giacitura delle discontinuità rispetto all'orientamento del fronte della scarpata può produrre condizioni di instabilità, Tale analisi viene eseguita mediante l'interpretazione delle proiezioni stereografiche ed è nota come *analisi cinematica (Test di Markland)*, utile per avere indicazioni sulle potenziali condizioni di instabilità di una scarpata artificiale e quindi sulla relativa geometria di rottura (inclinazioni e direzioni del fronte di scavo e della discontinuità), Se esiste una condizione cinematicamente possibile si ricorre alla seconda fase ovvero all'analisi di stabilità vera e propria condotta con i metodi dell'equilibrio limite

## Test di Markland

Il Test di Markland individua tutte quelle discontinuità che rappresentano potenziali piani di scivolamento in un pendio roccioso, Il procedimento fornisce un'indicazione qualitativa della stabilità del cuneo in funzione del suo orientamento nello spazio e della stima della resistenza al taglio mobilitabile lungo i piani di possibile scorrimento, Quest'ultima grandezza viene quantificata attraverso il parametro angolo d'attrito medio delle discontinuità meccaniche, Il test prevede quattro situazioni possibili:

1. Cuneo stabile, Questa situazione si verifica per un cuneo roccioso a franapoggio meno inclinato del pendio, in cui l'angolo d'attrito medio mobilitabile lungo le superfici potenziali di scorrimento sia superiore all'inclinazione della linea d'intersezione dei piani di scorrimento, Si verifica ovviamente anche per cunei a reggipoggio,
2. Blocco potenzialmente instabile, Questa situazione si verifica per un blocco roccioso a franapoggio meno inclinato del pendio, in cui l'angolo d'attrito medio mobilitabile lungo le superfici potenziali di scorrimento sia inferiore all'inclinazione della linea d'intersezione dei piani di scorrimento,
3. Cuneo potenzialmente instabile, Questa situazione si verifica nelle stesse condizioni della precedente per cuneo roccioso a franapoggio meno inclinato del pendio, in cui l'angolo d'attrito medio mobilitabile lungo le superfici potenziali di scorrimento sia inferiore all'inclinazione della linea d'intersezione dei piani di scorrimento,
4. Cuneo potenzialmente instabile per ribaltamento, Questa situazione si verifica quando il pendio ed una delle discontinuità sono subverticali con immersione circa uguale, In questo caso il valore dell'angolo di resistenza al taglio non influisce sulla stabilità, in quanto si può supporre che le due facce della superficie di ribaltamento non siano in contatto e quindi non sviluppi un'apprezzabile resistenza al taglio,

Sono stati eseguiti per le 2 stazioni strutturali i test di Markland ciascuno relativi al criterio di rottura di tipo planare (*Plane failure analysis*) e per cuneo (*Wedge failure analysis*), Inserendo i dati medi del pendio con geometria finale (Dip direction of slope: 315 e Dip of slope: 30 che rappresenta la direzione media del fronte e l'inclinazione finale di ogni lotto), non si verificano le condizioni geometriche per i due criteri, Ripetendo il test con i dati aggregati e con un pendio avente stessa direzione di immersione ma con inclinazione pari a 80 (caso di un singolo gradone in coltivazione) sia per la rottura planare che per il cuneo si verificano le condizioni geometrico-cinematiche di rottura,

I risultati dei test di Markland sono riportati in allegato. Queste osservazioni sono state opportunamente inserite sia nella classificazione dell'ammasso roccioso (Romana) che nell'analisi di stabilità condotta con il metodo di Hoek & Bray per costruire lo scenario più critico per il calcolo del fattore di sicurezza, Infatti è prassi inserire come dato di ingresso nei calcoli di stabilità degli ammassi rocciosi l'indice base  $RMR_B$  che identifica le caratteristiche intrinseche del materiale, A vantaggio della sicurezza si è scelto, invece, di decrementare tali proprietà calcolandole con l'indice  $RMR_C$  e ricavando, dunque dei valori di coesione e angolo d'attrito più bassi, Da notare poi che le verifiche agli stati limite ultimi decrementano ulteriormente tali valori introducendo i coefficienti parziali

### **Verifiche di stabilità allo Stato Limite Ultimo (SLU)**

Per le verifiche di stabilità dei fronti di scavo in condizioni sismiche in conformità con i criteri di progetto allo stato limite ultimo (SLU/GEO), secondo quanto indicato dagli Eurocodici 7 e 8 e dal Testo Unitario delle Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni (*Progettazione Geotecnica*; cap. 6 - D.M. 14 gennaio 2008), deve essere rispettata la condizione (§ 6.2.3.1):

$$R_d \geq E_d \quad (18)$$

dove:

$R_d$  = valore di progetto della resistenza del terreno

$E_d$  = valore di progetto dell'azione o degli effetti delle azioni,

Per SLU/GEO si intende una ipotetica situazione di rottura o di altre forme di collasso strutturale nelle quali, tramite i coefficienti parziali di sicurezza, si attribuiscono alle azioni ed ai parametri di resistenza dei terreni e/o delle rocce dei valori cautelativi rispetto a quelli che possono essere considerati rappresentativi,

La resistenza di progetto  $R_d$  è determinata adottando il valore dei parametri geotecnici opportunamente divisi per uno specifico coefficiente parziale riportato nella tabella sottostante (*Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.*) (Tab. 6.2.II; § 6,2,3,1,2 - D,M, 14/01/2008),

Tabella 125: Coefficienti parziali per i parametri dei terreni

Parametro	Parametro al quale applicare il coefficiente parziale	Coefficienti parziali $\gamma_m$	
		M1	M2
Tangente dell'angolo di resistenza al taglio	$\tan \varphi'_k$	1.0	1,25
Coazione efficace	$c'_k$	1.0	1,25
Resistenza non drenata	$c_{uk}$	1.0	1,4
Peso dell'unità di volume	$\gamma$	1.0	1,0
Resistenza a compressione uniassiale	$q_u$	1.6	

Le azioni ed i relativi coefficienti parziali sono indicati nella tabella sottostante (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**) (Tab. 6.2.I; § 6,2,3,1 - D.M. 14/01/2008),

Tabella 126: Coefficienti parziali relativi alle azioni per le verifiche agli SLU

Azione	Simbolo	Coefficienti parziali $\gamma_m$	
		A1	A2
Permanente sfavorevole	$\gamma_G$	1.3	1.0
Permanente favorevole		1.0	1.0
Variabile sfavorevole	$\gamma_Q$	1.5	1.3
Variabile favorevole		0.0	0.0

A seconda del problema geotecnico sono contemplati dalla Normativa diversi Approcci progettuali (*Design Approach DA*), Solitamente, ma non necessariamente, i coefficienti della colonna A1, combinati con quelli della colonna M1, sono rilevanti per stabilire la capacità strutturale delle opere che interagiscono con il terreno, mentre i coefficienti della colonna A2, combinati con quelli della colonna M2, sono rilevanti per il dimensionamento geotecnico, Le verifiche degli SLU devono essere condotte con entrambe le combinazioni (A1+M1 e A2+M2) tranne nei casi in cui una delle due combinazioni sia manifestamente più restrittiva, ovvero governi palesemente il progetto,

Nella tabella sottostante (*Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.*) sono indicati i diversi approcci progettuali,

Tabella 127: Approcci progettuali (da Eurocodice 7 – 2003)

<b>APPROCCI PROGETTUALI</b>				
		$\gamma_f$	$\gamma_m$	$\gamma_R$
<i>DA1</i>	1	A1	M1	R1
	2	A2	M2	R2
<i>DA2</i>	unico caso	A1	M1	R2
<i>DA3</i>	unico caso	A1 o A2	M2	R3

Nel caso specifico dell'analisi di stabilità dei fronti di scavo (§ 6,8,6) il “... progetto deve definire un profilo di scavo tale che risulti rispettata la condizione di cui al paragrafo 6,2,3,1, e la verifica deve essere condotta con modalità analoga a quella indicata per i manufatti di materiali sciolti (§6,8,2)” ovvero per le verifiche di sicurezza agli SLU l'approccio da seguire è:

$$DA_{1,2} = A_2 + M_2 + R_2 \quad (19)$$

dove  $A_i$  = Fattori di amplificazione dei carichi

$M_i$  – Coefficienti di riduzione dei parametri geotecnici

$R_i$  = Fattori di riduzione delle resistenze



I valori della resistenza del terreno, espressi per mezzo del Coefficiente di Sicurezza R ( $R = T_{DISP} / T_{MOB}$ ; dove  $T_{DISP}$  è la resistenza disponibile valutata con i parametri ridotti M2, mentre  $T_{MOB}$  è lo sforzo di taglio mobilitato sotto l'azione dei carichi A2) per la stabilità globale del pendio sono riportati nella tabella seguente (*Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.*)

Tabella 128: valori di resistenza

Resistenza	R1	R2	R3
Terreno	1.0	1.1	1.0

Da quest'ultima tabella si evince che per l'approccio scelto (DA1,2), il coefficiente di sicurezza R deve risultare non inferiore ad 1,1. Infine le verifiche di stabilità vengono effettuate in condizioni sismiche adottando il metodo pseudostatico come indicato dall'Eurocodice 8, dall'OPCM 3274/2003 e successive modifiche e dalle NTC 2008,

### **Calcolo di stabilità dei fronti di scavo: metodo di Hoek & Bray**

Il metodo di Hoek & Bray (1981) analizza la stabilità di un cuneo di roccia attraverso il rapporto tra le forze resistenti e quelle destabilizzanti, lungo un'ipotetica direzione di scivolamento. Nel calcolo si assume, per il comportamento meccanico delle discontinuità, un modello rigido perfettamente plastico. La formulazione proposta presenta delle differenze a seconda che si ipotizza la presenza o meno di un giunto di trazione sul piano superiore del pendio. In entrambi i casi si assume valido il criterio di resistenza di Mohr-Coulomb. Per quanto riguarda la presenza di carichi dinamici dovuti ad eventi sismici, questi sono schematizzati con due forze pseudostatiche ( $F_h$  e  $F_v$ ), costanti nel tempo e proporzionali alla massa del volume potenzialmente instabile, combinate secondo le indicazioni dell'Ordinanza 20 marzo 2003 n. 3274 del PCM, che si aggiungono alle forze esterne nella valutazione dell'equilibrio. Facendo riferimento ai Grafici, il Fattore di Sicurezza ( $F_s$ ) viene calcolato (MANCINA *et alii*, 2004), nel caso di un pendio in roccia con frattura di trazione (*tension crack*) ed allo Stato Limite Ultimo, mediante l'equazione:

$$F_s = \frac{c' \cdot A + [(W + qL \pm F_v) \cdot \cos \beta_2 \pm F_h \cdot \sin \beta_2 - U - V \cdot \sin \beta_2 + T \cdot \cos \beta_5] \cdot \tan \phi'}{(W + qL \pm F_v) \cdot \sin \beta_2 \pm F_h \cdot \cos \beta_2 + V \cdot \cos \beta_2 - T \cdot \sin \beta_5} \quad (20)$$

dove:

$\phi$  = angolo di attrito del materiale

$c'$  = coesione del materiale

$\beta_1$  = inclinazione media dello scavo

$\beta_2$  = inclinazione del presunto piano di scivolamento

$\beta_3$  = inclinazione media del versante

$\beta_4$  = inclinazione dell'eventuale tirante T

T = Tirante

q = sovraccarico

H = altezza del fronte di coltivazione

ht = profondità della frattura di trazione

$z_w$  = altezza dell'acqua all'interno della frattura di trazione

L = distanza della frattura di trazione dal ciglio scarpata

A = area della superficie di scivolamento di larghezza unitaria

W = peso del cuneo di roccia di spessore unitario interessato da potenziale scivolamento

$F_h$  = Componente sismica orizzontale

$F_v$  = Componente sismica verticale

V = Pressione dell'acqua sulla frattura di trazione

U = pressione dell'acqua sul piano di scivolamento

Il simbolo  $\pm$  davanti alle componenti sismiche indica le possibili combinazioni di tali forze per la ricerca del coefficiente di sicurezza minimo,

La normativa vigente (Testo Unitario Norme Tecniche per le Costruzioni (G.U. 04/02/2008 n. 29) "Progettazione Geotecnica") impone, nei calcoli di stabilità, l'adozione di un coefficiente di sicurezza  $\geq 1,1$  e l'azione sismica in base ai dati ricavati dalla classificazione sismica del sito,

## **Calcolo del coefficiente di sicurezza allo SLU del fronte di scavo (scenario più critico)**

Allo stato attuale il settore geomorfologicamente più critico del fronte di scavo è rappresentato dalla sua porzione inferiore, rimanenza della vecchia metodologia di coltivazione della cava, già abbandonata dall'attuale Piano di Coltivazione, che ha adottato una escavazione dall'alto con fronte di scavo avente la stessa geometria finale di recupero morfologico, Tale situazione, localizzata a ridosso degli impianti di lavorazione, in piedi da decine di anni, è in ogni modo destinata ad essere progressivamente rimossa dalla futura coltivazione, Attualmente tale settore presenta un'altezza di

circa 70 m con inclinazione media di 60. Il metodo di calcolo adottato è quello di Hoek & Bray allo Stato Limite Ultimo (SLV). La verifica di stabilità è stata eseguita sulla sezione di scavo più critica, ovvero quella con il massimo sviluppo verticale considerando l'ipotesi di una frattura di trazione a tergo del fronte di scavo. A favore della sicurezza, come è nella prassi dell'applicazione del metodo, è stata calcolata una lama d'acqua ( $z_w$ ), pari a 1/3 dell'altezza della frattura di trazione  $h_t$ , valore che potrebbe essere riscontrato in seguito a precipitazioni molto intense. Per il valore dell'inclinazione del presunto piano di scivolamento  $\alpha_2$ , la profondità  $h_t$  e la distanza  $L$  della *Tension crack*, a vantaggio della sicurezza, sono stati calcolati i parametri critici, calcolati con apposite formule suggerite dallo stesso autore, che producono il coefficiente di sicurezza minimo (vedi Figura sottostante),

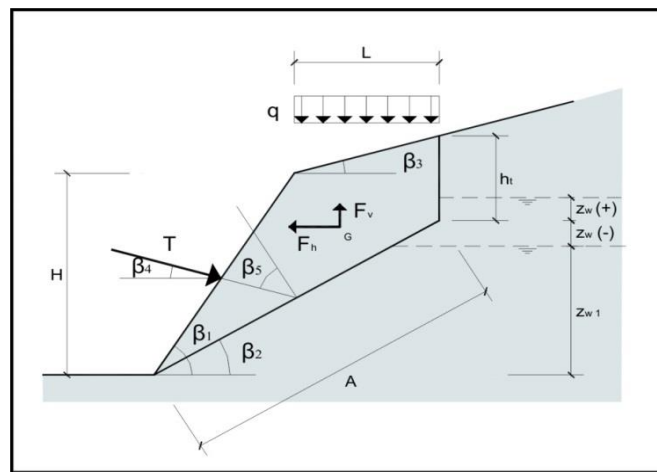


Fig. 290: schema parametri per calcolo coefficiente di sicurezza

MODELLO DI CALCOLO HOEK & BRAY - SCIVOLAMENTO PIANO - PARAMETRI CRITICI			
<b>Parametri di ingresso</b>			
Angolo di inclinazione del pendio $\beta_1$ (°)		60	
Angolo di inclinazione del giunto $\beta_2$ (°)			
Altezza pendio H (m)		70	
Angolo di attrito ammasso roccioso (°)		30	
<b>Distanza critica della Tension crack Lc (m)</b>		12,77	
$L_c = (\sqrt{\cotan\beta_1 * \cotan\beta_2} - \cotan\beta_1) * H$			Eq (59)
<b>Angolo critico del piano di scivolamento <math>\beta_2</math> (°)</b>		45,00	
$\beta_{2c} = \frac{1}{2} * (\beta_1 + \varphi')$			
<b>Profondità critica della Tension crack htc (m)</b>		16,81	
(Caso del pendio completamente asciutto)			
$h_{tc} = 1 - (\sqrt{\cotan\beta_1 * \tan\beta_2}) * H$			Eq (58)

I dati di ingresso del calcolo relativi alla sezione totale del fronte di scavo sono riassunti nella **Errore**.  
*L'origine riferimento non è stata trovata.*

Tabella 129: Caratteristiche geometriche, geotecniche e sismiche per la definizione del Coefficiente di sicurezza minimo (metodo di Hoek & Bray) del fronte di scavo – porzione inferiore

<i>Parametri</i>	<i>Descrizione (Unità di Misura)</i>	<i>Valori</i>	<i>Valori di progetto (SLU)</i>
$c'$	Coesione (kPa)	245	196
$\gamma$	Peso Unità di Volume (kN/m <sup>3</sup> )	25	25
$\phi'$	Angolo d'attrito (°)	30	25
$H$	Altezza massima del fronte (m)	70	
$h_{tc}$	Altezza critica frattura di trazione (m)	16.81	
$L_c$	Distanza critica dal ciglio della frattura di trazione (m)	12.77	
$z_w$	Spessore acqua nella frattura di trazione ( $h/3$ ) (m)	6	
$\beta_1$	Inclinazione media del fronte (°)	60	
$\beta_{2c}$	Inclinazione piano di scivolamento critico (°)	45	
$\beta_3$	Inclinazione versante naturale (°)	0	
$\beta_6$	Inclinazione frattura di trazione (°)	90	
$q$	Sovraccarico (kN/m <sup>2</sup> )	0	
$\beta_s$	Fattore riduttivo	0.27	
$a_g/g$	Accelerazione orizzontale massima	0.163	
<b>Coefficiente di sicurezza minimo</b>		<b>1.22</b>	

Il valore del Coefficiente di sicurezza minimo calcolato, pari a **1.22**, verifica la normativa vigente poiché  $\geq 1.1$ . Da sottolineare che lo scenario scelto per l'analisi di stabilità è decisamente molto più critico rispetto a quello di rottura ipotizzabile per tali tipi di materiali, proprio per la semplificazione insita nel modello di Hoek & Bray

### **Calcolo del coefficiente di sicurezza allo SLU dei singoli gradoni**

Ai fini della sicurezza del fronte di scavo durante la fase di coltivazione è necessario verificare la stabilità del singolo gradone considerando l'eventualità di un sovraccarico rappresentato dal peso dei macchinari adibiti alla lavorazione del fronte stesso, A vantaggio della sicurezza è stato considerato un sovraccarico di 40 kPa assimilabile a quello di una pala gommata di grandi dimensioni. Anche in questo caso il metodo di calcolo adottato è quello di Hoek & Bray allo Stato Limite Ultimo (SLV), La verifica di stabilità è stata eseguita su una ipotetica porzione del fronte di scavo provvisoria ipotizzando una geometria critica, ovvero, con uno sviluppo verticale massimo di 10 m subverticale

e con i parametri critici, Nel calcolo è stato inserito, oltre al sisma, il sovraccarico agente sulla pedata del gradone ed una frattura di trazione con parametri geometrici critici,

I dati di ingresso del calcolo relativi a questo scenario sono riassunti nella **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata..**

MODELLO DI CALCOLO HOEK & BRAY - SCIVOLAMENTO PIANO - PARAMETRI CRITICI		
<b>Parametri di ingresso</b>		
Angolo di inclinazione del pendio $\beta_1$ (°)	89	
Angolo di inclinazione del giunto $\beta_2$ (°)		
Altezza pendio H (m)	10	
Angolo di attrito ammasso roccioso (°)	30	
<b>Distanza critica della Tension crack <math>L_c</math> (m)</b>	0,84	
$L_c = (\sqrt{\cotan\beta_1 * \cotan\beta_2} - \cotan\beta_1) * H$		Eq (59)
<b>Angolo critico del piano di scivolamento <math>\beta_{2c}</math> (°)</b>	59,50	
$\beta_{2c} = \frac{1}{2} * (\beta_1 + \varphi')$		
<b>Profondità critica della Tension crack <math>h_{tc}</math> (m)</b>	8,28	
(Caso del pendio completamente asciutto)		
$h_{tc} = 1 - (\sqrt{\cotan\beta_1 * \tan\beta_2}) * H$		Eq (58)

Tabella 130: Caratteristiche geometriche, geotecniche e sismiche per la definizione del Coefficiente di sicurezza minimo (metodo di Hoek & Bray) – singolo gradone,

<i>Parametri</i>	<i>Descrizione (Unità di Misura)</i>	<i>Valori</i>	<i>Valori di progetto (SLU)</i>
c'	Coesione (kPa)	245	196
$\gamma$	Peso Unità di Volume (kN/m <sup>3</sup> )	25	25
$\phi'$	Angolo d'attrito (°)	30	25
H	Altezza massima del fronte (m)	10	
h <sub>tc</sub>	Altezza critica frattura di trazione (m)	8.28	
L <sub>c</sub>	Distanza critica dal ciglio della frattura di trazione (m)	0.84	
z <sub>w</sub>	Spessore acqua nella frattura di trazione (h <sub>t</sub> /3) (m)	3	
$\phi_1$	Inclinazione media del fronte (°)	89	
$\phi_{2c}$	Inclinazione critica piano di scivolamento (°)	60	
$\phi_3$	Inclinazione versante naturale (°)	0	
$\phi_6$	Inclinazione frattura di trazione (°)	90	
q	Sovraccarico (kN/m <sup>2</sup> )	40	
$\phi_s$	Fattore riduttivo	0.27	
a <sub>g</sub> /g	Accelerazione orizzontale massima	0.163	
<b>Coefficiente di sicurezza minimo</b>		<b>1.73</b>	

Il valore del Coefficiente di sicurezza minimo calcolato, pari a **1,73**, verifica la normativa vigente poiché  $\geq 1,1$

### **Calcolo del coefficiente di sicurezza allo SLU delle scarpate di rimodellamento morfologico**

Le scarpate finali presentano angoli di inclinazione decisamente bassi (circa 30 l'angolo medio della cava) che, vista la tipologia del materiale, non necessitano di verifiche di stabilità ampiamente incluse negli scenari critici della coltivazione

### **Alcune considerazioni sull'analisi di stabilità del fronte di scavo**

Le sezioni scelte presentano il massimo sviluppo verticale e le inclinazioni più gravose dello scenario di coltivazione attuale dunque il più critico, Le altre sezioni hanno sviluppi verticali inferiori e di conseguenza risultano verificate, I parametri geomeccanici della roccia di ingresso al calcolo di stabilità sono stati scelti a vantaggio della sicurezza in quanto ricavati dall'indice RMR<sub>C</sub>, Con

l'adozione del calcolo agli SLU tali parametri risultano ulteriormente ridotti. Locali problematiche connesse con l'attività estrattiva (ad esempio porzioni di roccia particolarmente fratturata e quindi con caratteristiche geomeccaniche più scadenti) andranno valutate attentamente durante la fase esecutiva degli scavi ed in tal caso diminuite le pendenze e/o aumentate le pedate dei singoli gradoni, Eventuali piani di discontinuità sfavorevoli alla direzione del fronte di scavo che dovessero emergere durante la fase esecutiva del cantiere, dovranno essere presi attentamente in considerazione per valutare le necessarie contromisure per la sicurezza. Come richiesto dalla normativa vigente i fronti di scavo dovranno essere sottoposti ad una verifica annuale di stabilità (D,L, 25 novembre 1996, n, 624 *“Attuazione della direttiva 92/91/CEE relativa alla sicurezza e salute dei lavoratori nelle industrie estrattive per trivellazione e della direttiva 92/104/CEE relativa alla sicurezza e salute dei lavoratori nelle industrie estrattive a cielo aperto o sotterranee”*) (D,Lgs, 9 Aprile 2008, n, 81 *“Attuazione dell'articolo 1 della legge 3 agosto 2007, n, 123, in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro”*)

Nei calcoli non è stata contemplata la falda che verrà a trovarsi ad una quota inferiore,

## **Prescrizioni sulla geometria del fronte di scavo**

Dalle considerazioni precedenti possiamo assumere le seguenti prescrizioni, riguardo la geometria del fronte di scavo-fronte finale:

- Inclinazione massima di ogni singola scarpata 35 ;
- Altezza massima di ogni singolo gradone 20 m;
- Larghezza minima di ogni singola pedata 5 m,

Locali variazioni negative delle caratteristiche geomeccaniche dell'ammasso roccioso interessato alla coltivazioni devono, durante la fase esecutiva dello scavo, essere prese in considerazione ed eventualmente cambiate le suddette prescrizioni (aumento della larghezza delle pedate, diminuzione dell'inclinazione delle scarpate e/o dell'altezza dei singoli gradoni),

## **Caratteristiche geominerarie**

### **Tipologia della cava e tecnica di coltivazione**

La cava in esame, per le caratteristiche geomorfologiche del sito e le proprietà geomeccaniche della risorsa, secondo una classificazione generalmente riportata nei manuali e nelle documentazione dei P,R,A,E, delle diverse realtà territoriali italiane, può essere identificata come una cava di monte (tipica delle coltivazione dei materiali litoidi carbonatici dell'Appennino centrale), Il metodo di



coltivazione è quello per lotti discendenti dal limite superiore (quota topografica massima) del C,E, fino alla quota dell'attuale piazzale di cava, Ogni singolo lotto verrà coltivato in modo da ridurre al massimo gli impatti visivi ed acustici; a partire dal limite superiore del C,E, il fronte verrà scavato già con la geometria finale prescelta lasciando, al margine del pendio, una quinta protettiva sufficientemente alta da nascondere il piazzale superiore provvisorio del Lotto e attutire i rumori generati dalla lavorazione e dai mezzi di trasporto, Procedendo con la coltivazione per lotti successivi, nella fase susseguente a quella di scavo del Lotto 1, mentre gli scavi procederanno nell'area del Lotto 2, in quello precedente, avente già una geometria di scavo finale, saranno in opera gli interventi di recupero ambientale

### **Caratteristiche dei livelli geominerari**

Il materiale estratto identificato come Risorsa è costituito da calcari e calcareniti organogene di colore biancastro del Miocene superiore, Tali rocce carbonatiche, di origine sedimentaria, sono petrograficamente riferibili ad un calcare con peso dell'unità di volume compreso tra 24 e 26 kN/m<sup>3</sup> e le cui caratteristiche geotecniche, determinate con la classificazione di Bieniawski, sono riassunte nella *Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.*. Da un punto di vista giacimentologico tutta la formazione carbonatica senza esclusione di aree risulta interessante per la lavorazione,

- *Appendice B: Grafici misurazioni su veicoli in ambiente estrattivo*

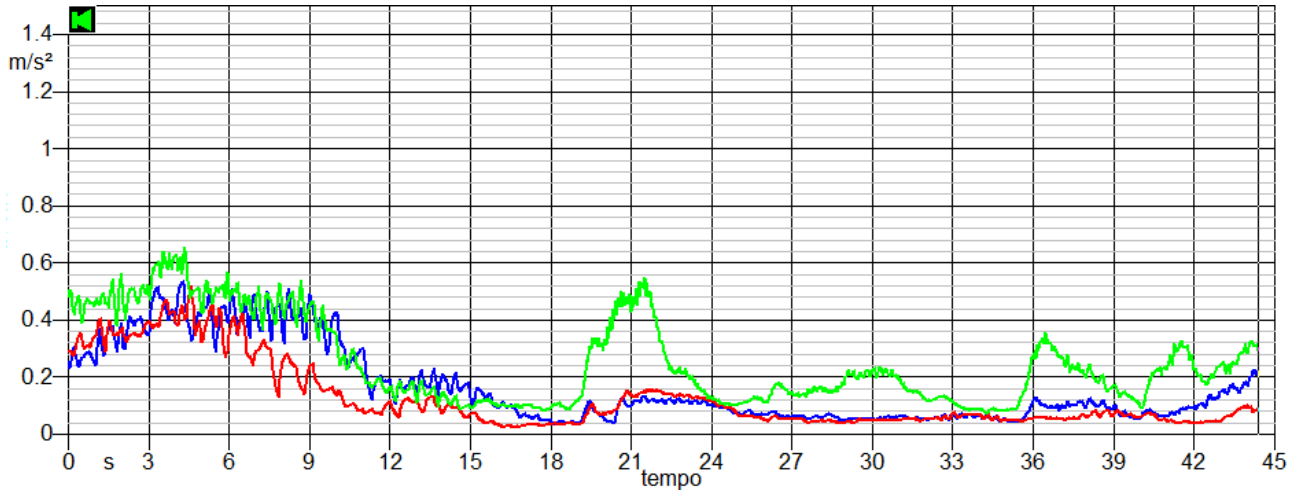


Fig. 291: Time History tratto percorso in configurazione scarico

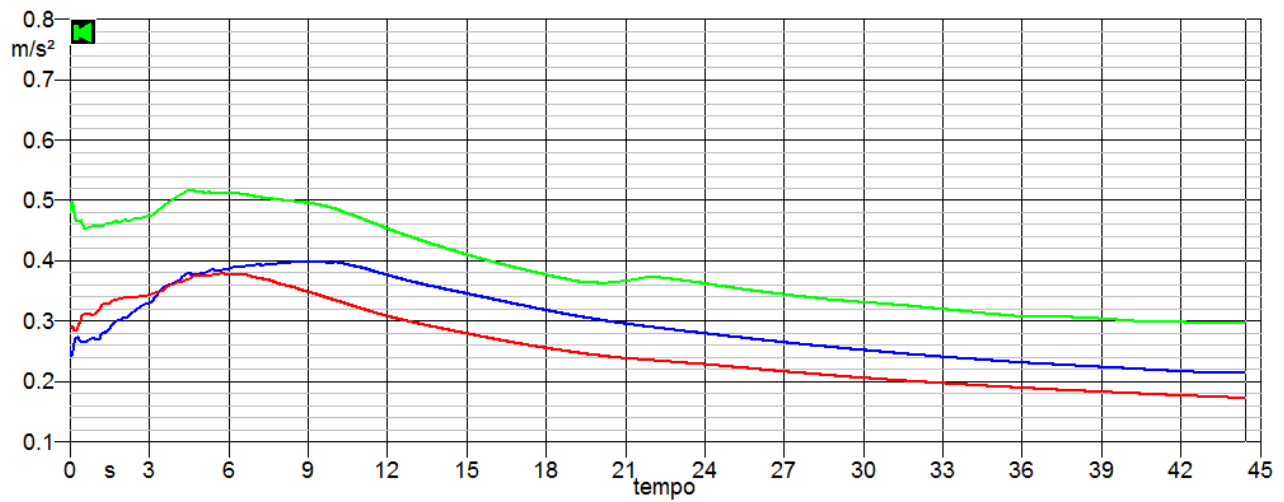
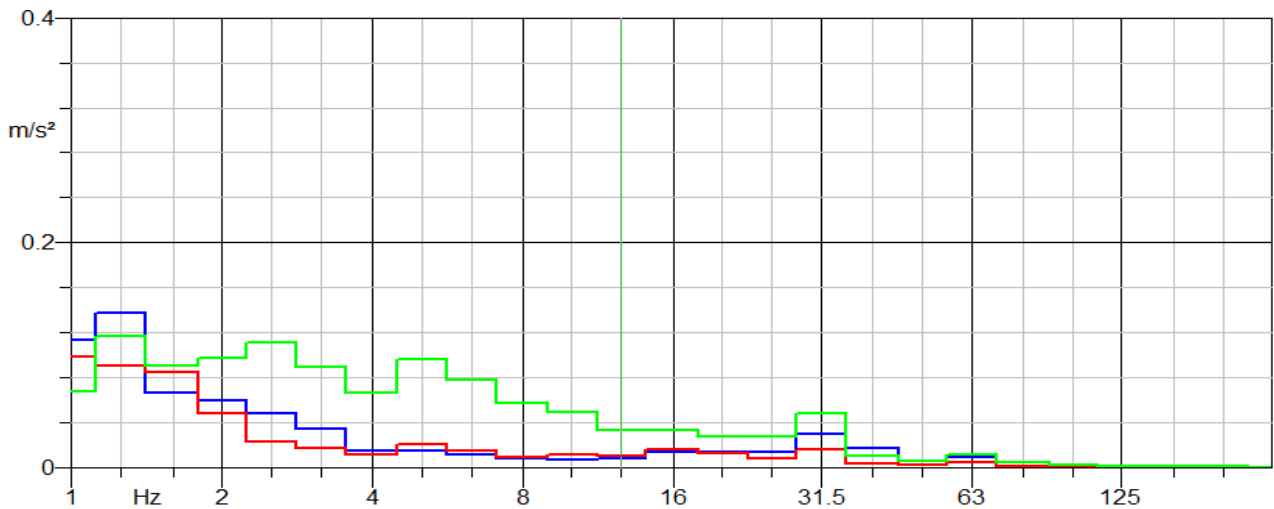
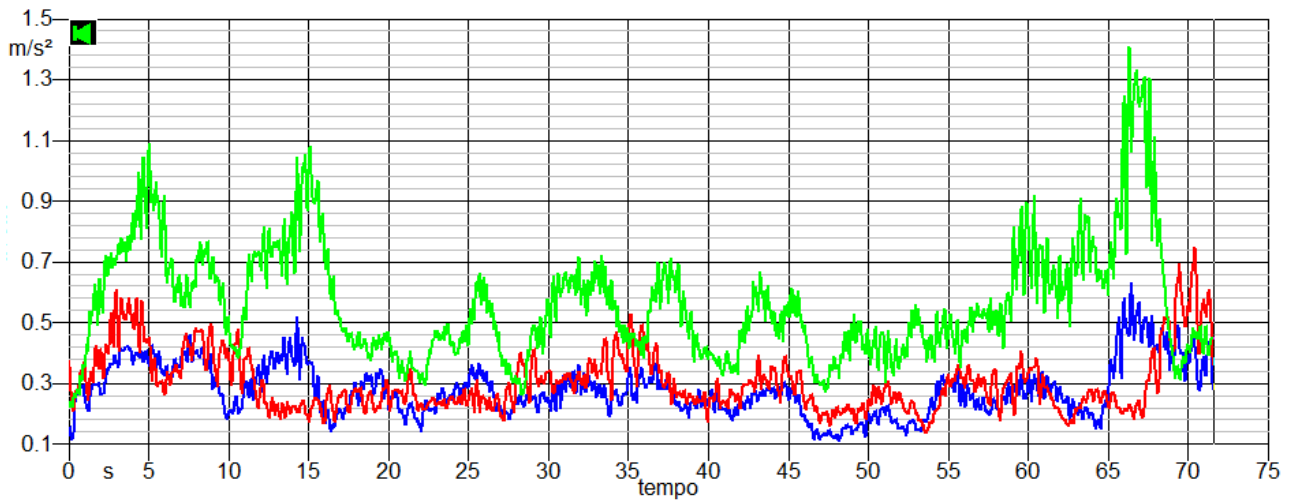


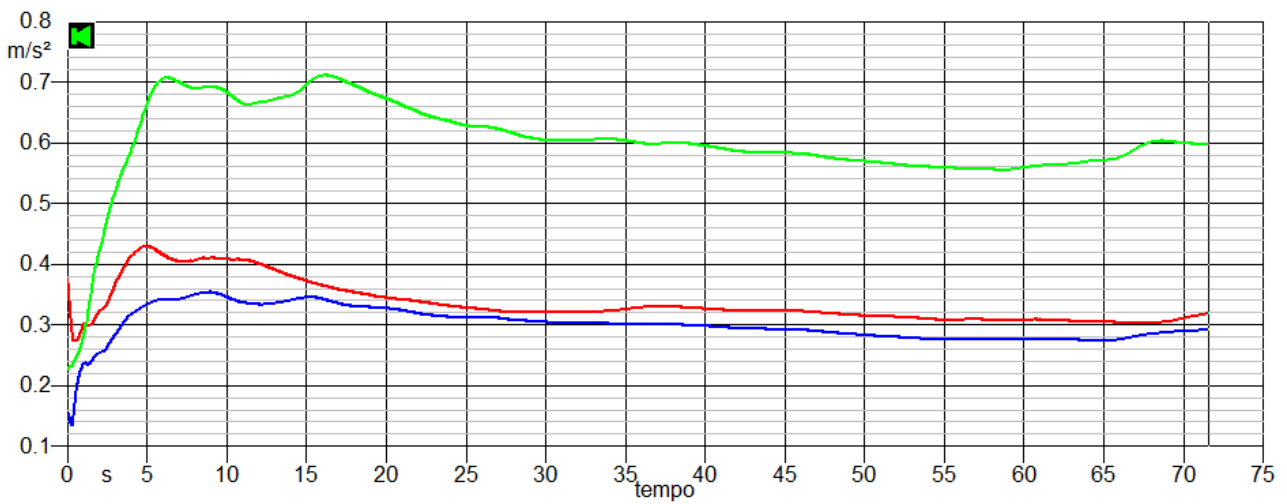
Fig. 292: Livello equivalente ponderato in frequenza per tratto percorso in configurazione scarico



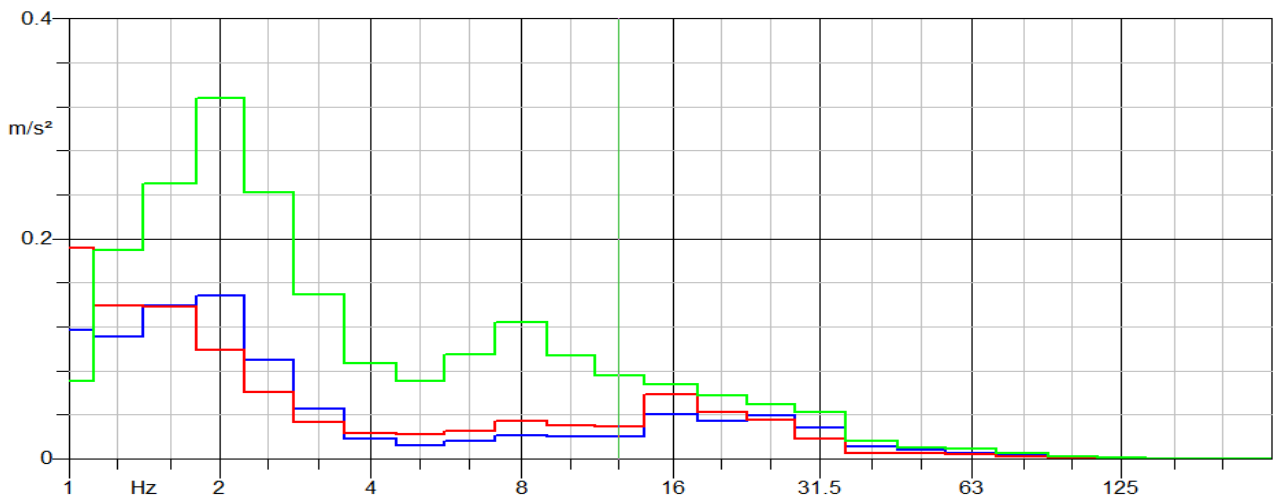
- Fig. 293: spettro frequenze tratto percorso in configurazione scarico



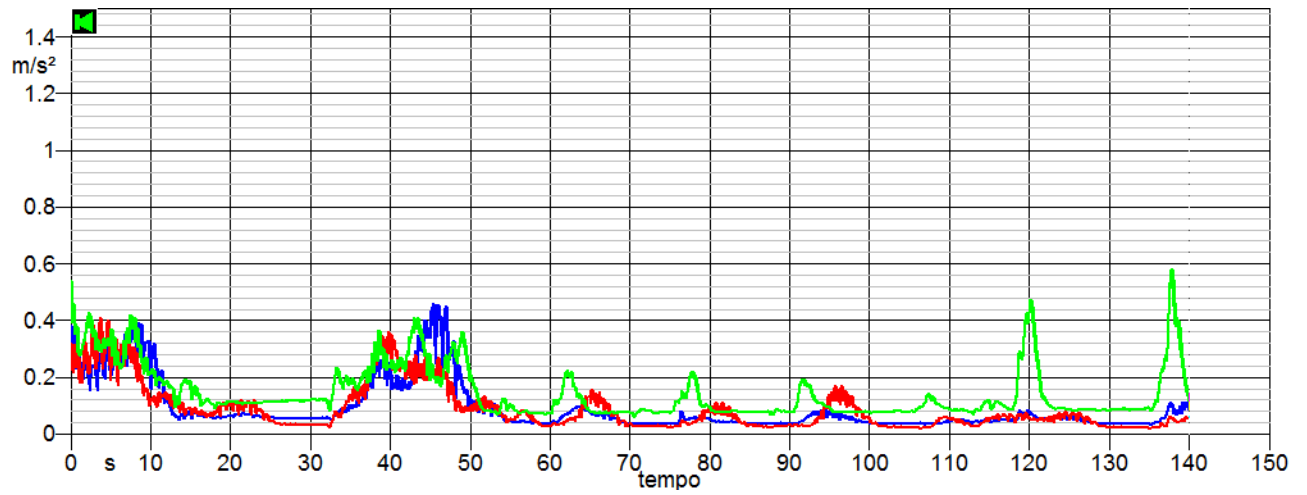
▪ Fig. 294: Time History tratto percorso in configurazione salita



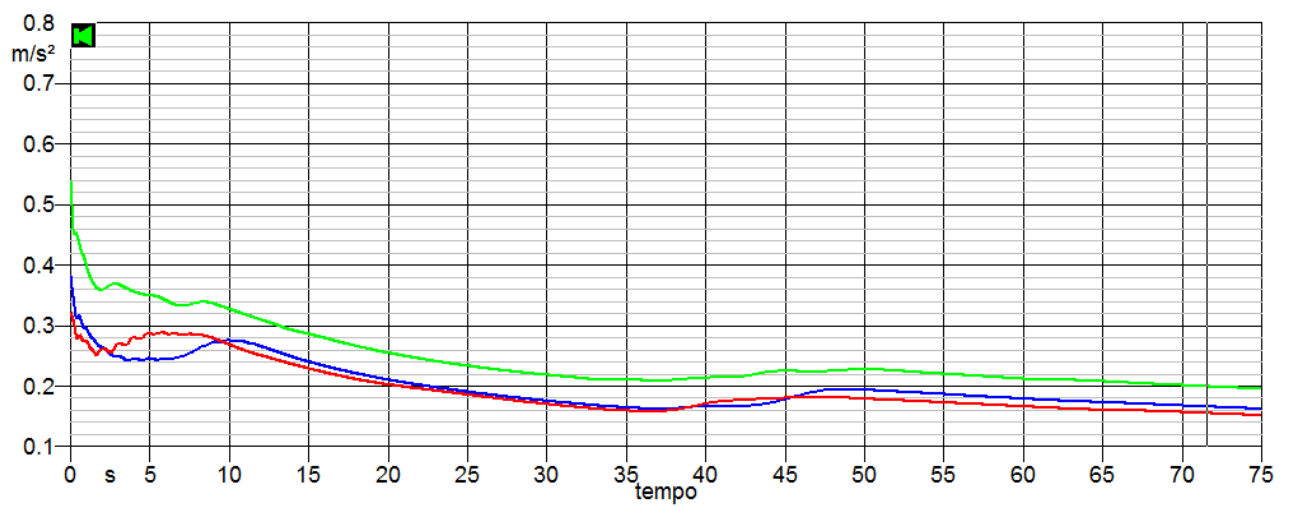
▪ Fig. 295: Livello equivalente ponderato in frequenza per tratto percorso in configurazione salita



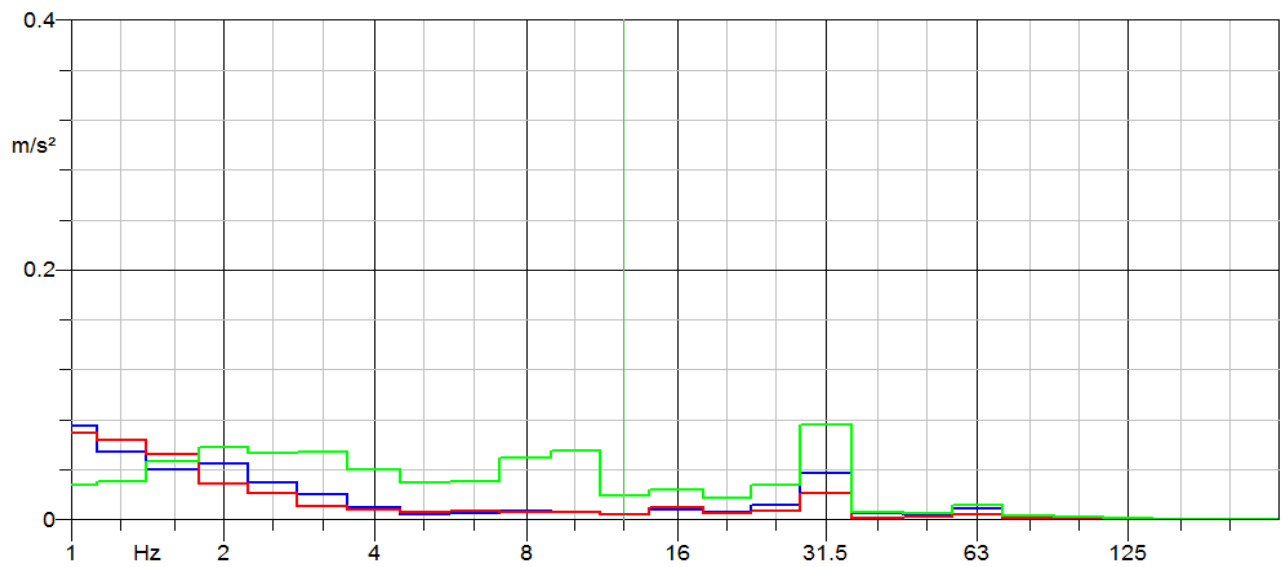
▪ Fig. 296: Spettro frequenze tratto percorso in configurazione salita



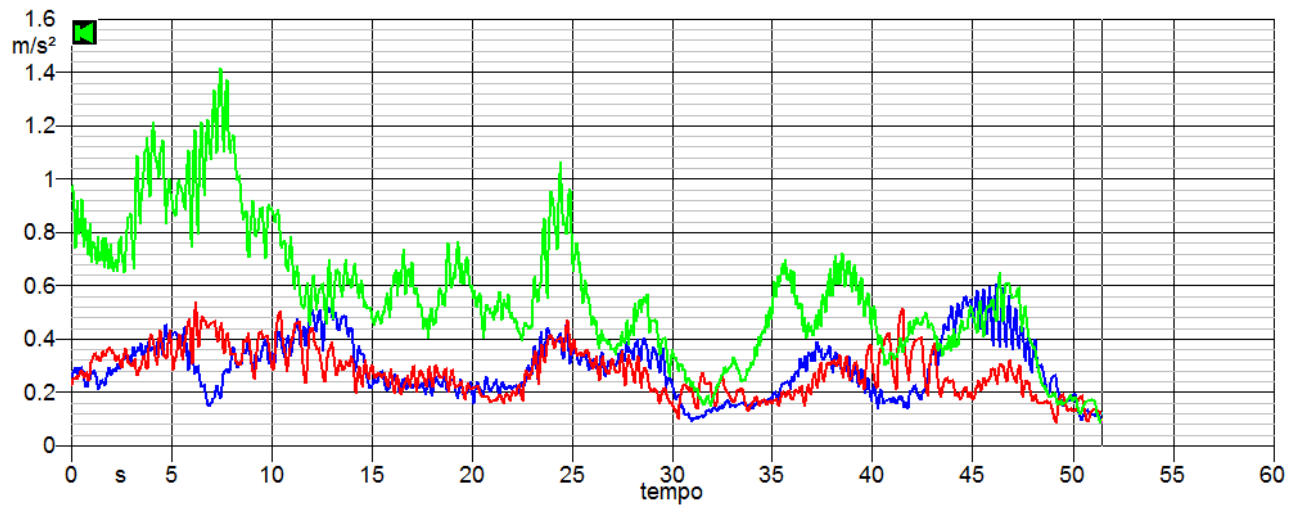
▪ Fig. 297: Time History tratto percorso in configurazione carico



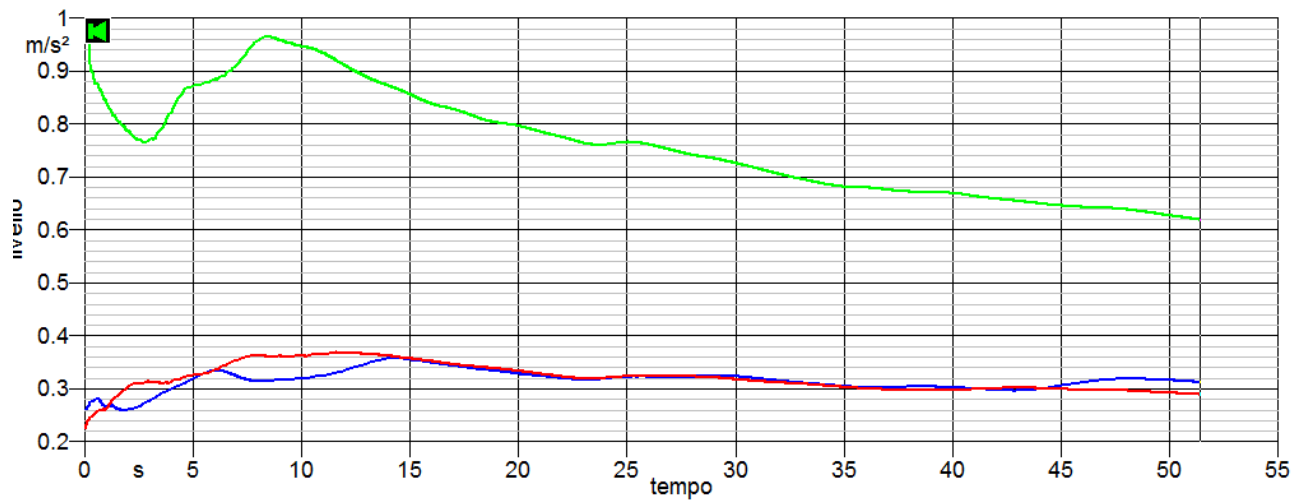
▪ Fig. 298: Livello equivalente ponderato in frequenza per tratto percorso in configurazione carico



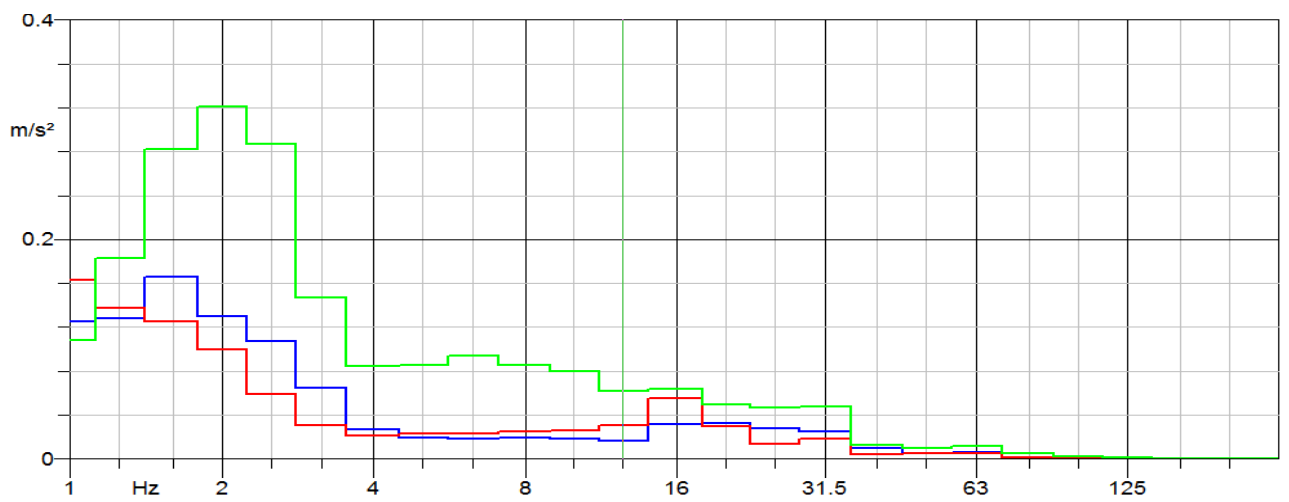
▪ Fig. 299: Spettro frequenze tratto percorso in configurazione carico



▪ Fig. 300: Time History tratto percorso in configurazione discesa



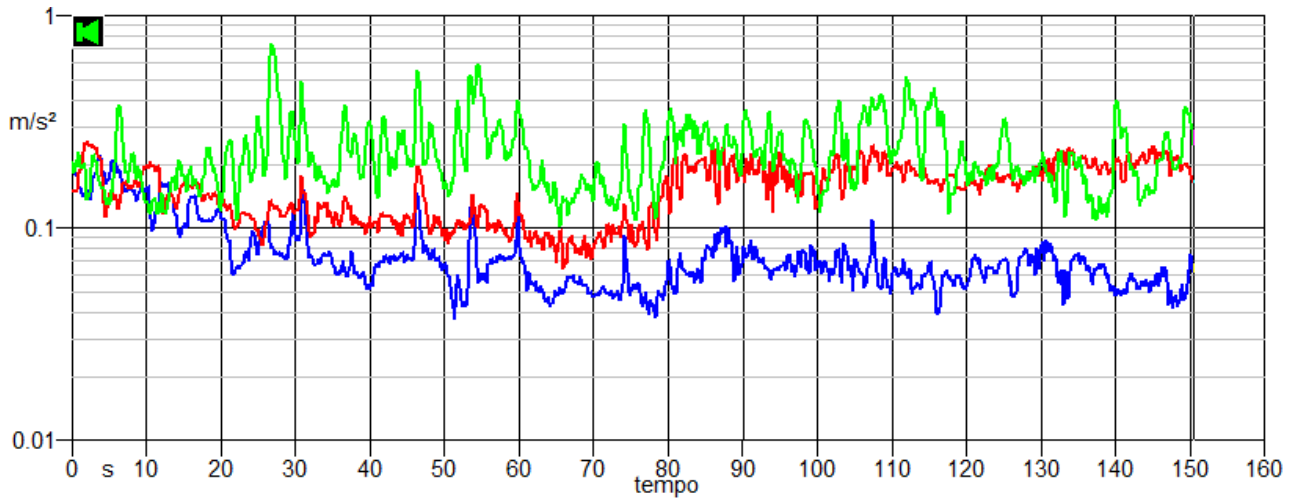
▪ Fig. 301: Livello equivalente ponderato in frequenza per tratto percorso in configurazione discesa



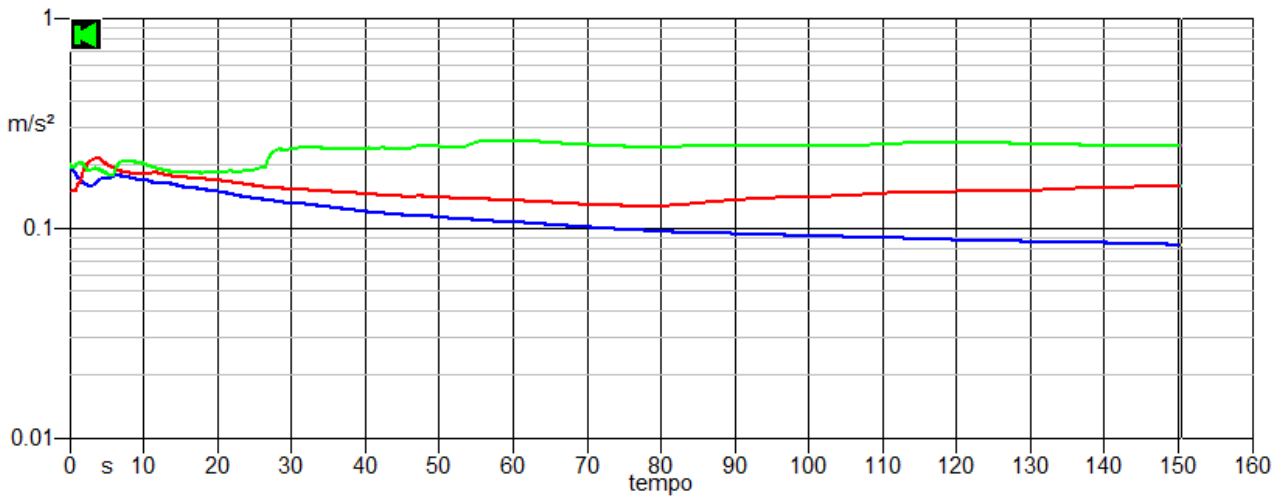
▪ Fig. 302: Spettro frequenze tratto percorso in configurazione discesa

▪ *Appendice C: Grafici misurazioni in ambiente urbano -  
vetture in configurazione standard*

**Operatore 2**



*Fig. 303: Time History della misurazione effettuata*



*Fig. 304: visualizzazione del livello equivalente lungo i tre assi x, y e z*

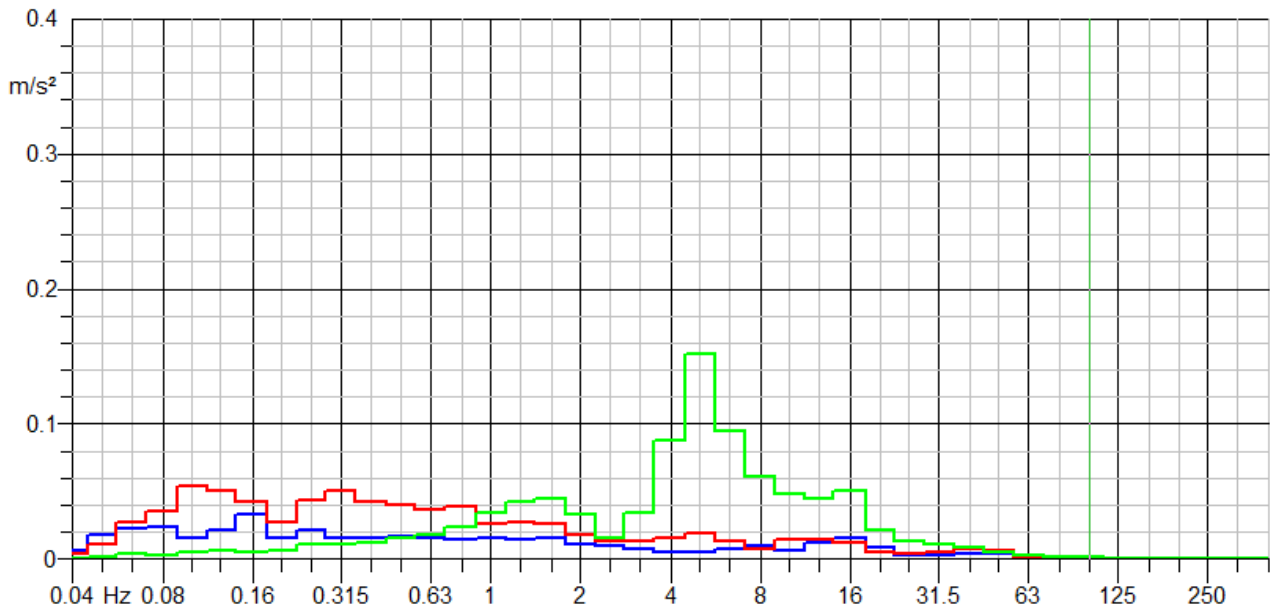


Fig. 305: spettro in frequenza della misura registrata per ciascun asse di sollecitazione

**Operatore 3**

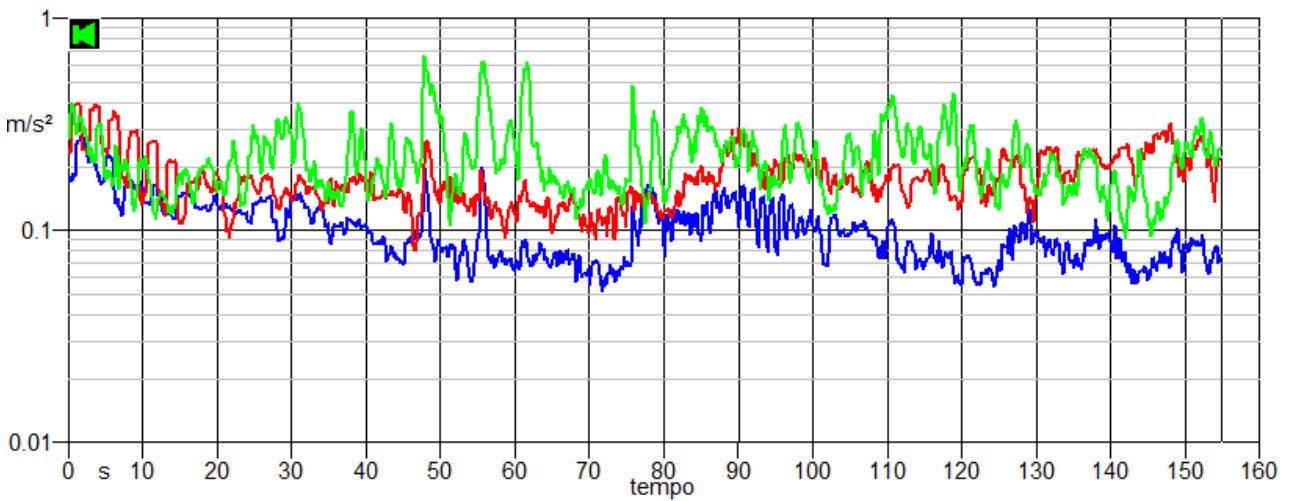


Fig. 306: Time History della misurazione effettuata

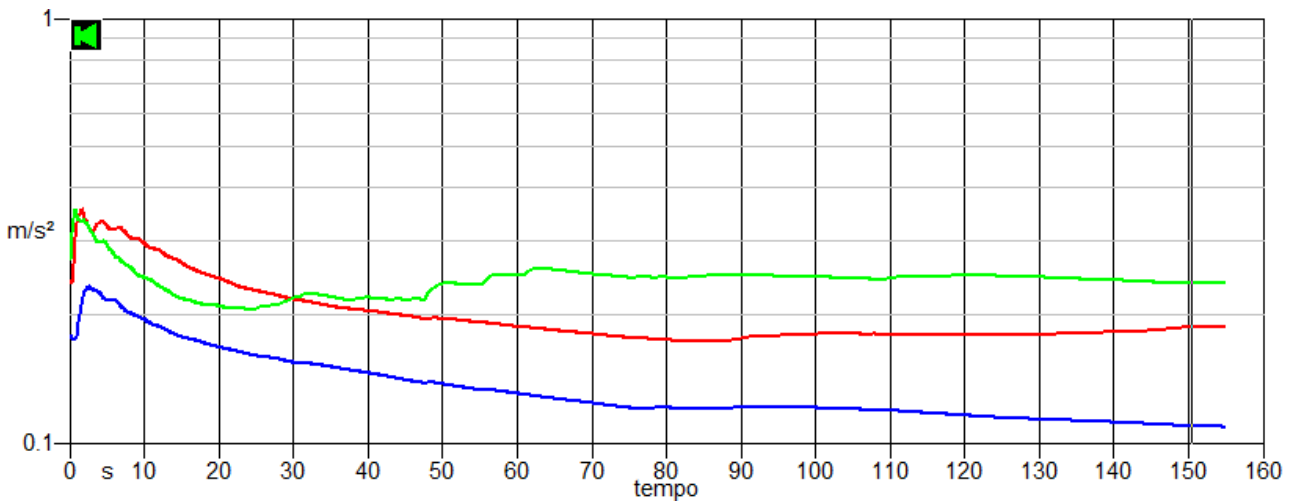


Fig. 307: visualizzazione del livello equivalente lungo i tre assi x, y e z

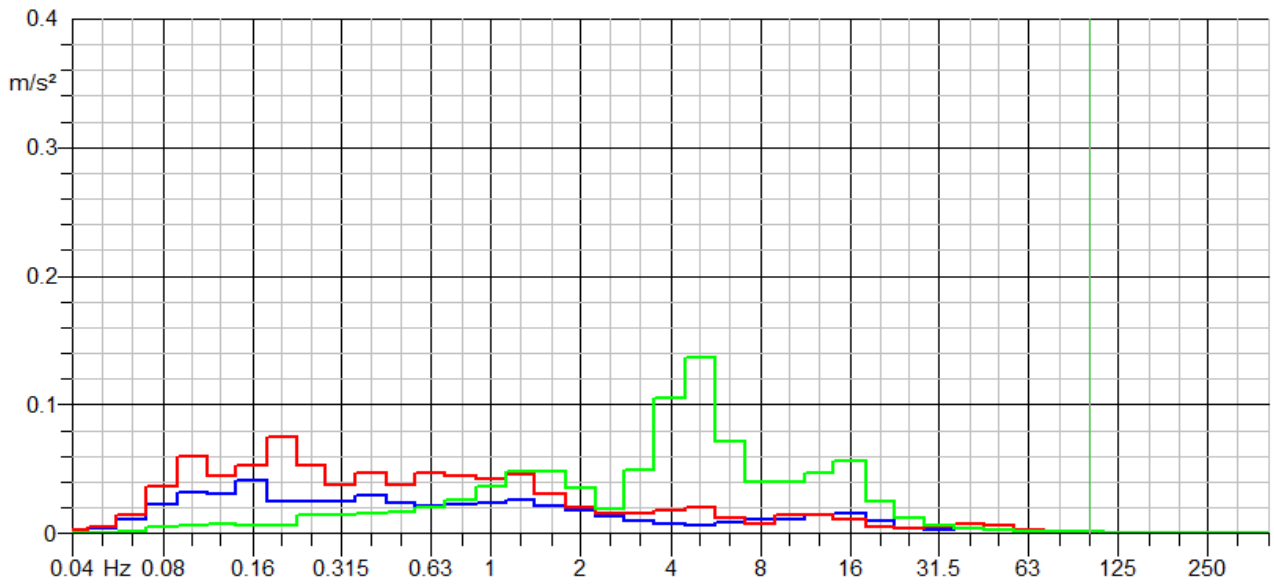


Fig. 308: spetro in frequenza della misura registrata per ciascun asse di sollecitazione

**Operatore 4**

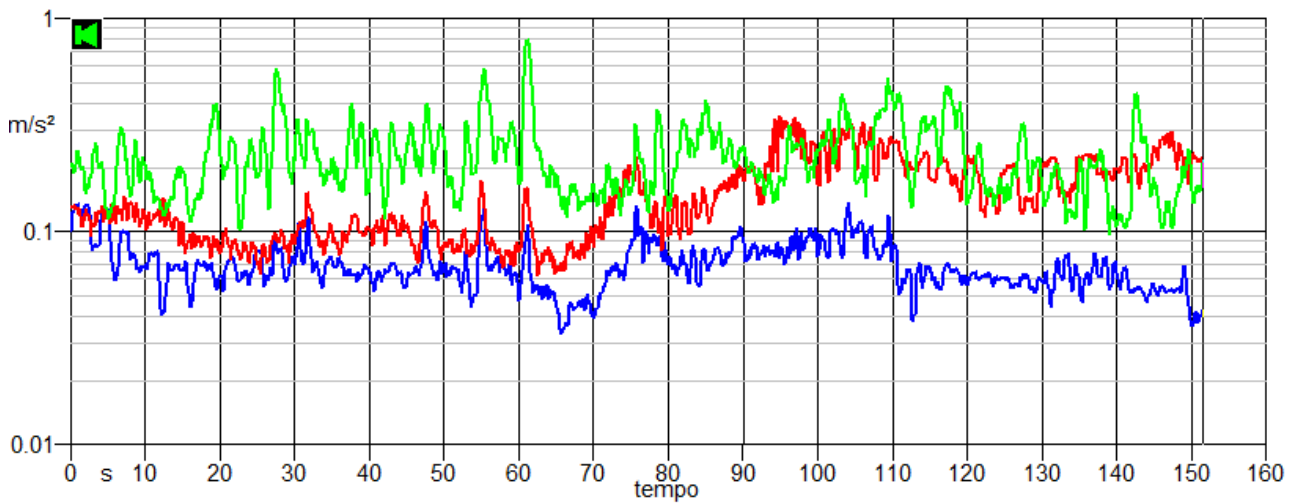


Fig. 309: Time History della misurazione effettuata

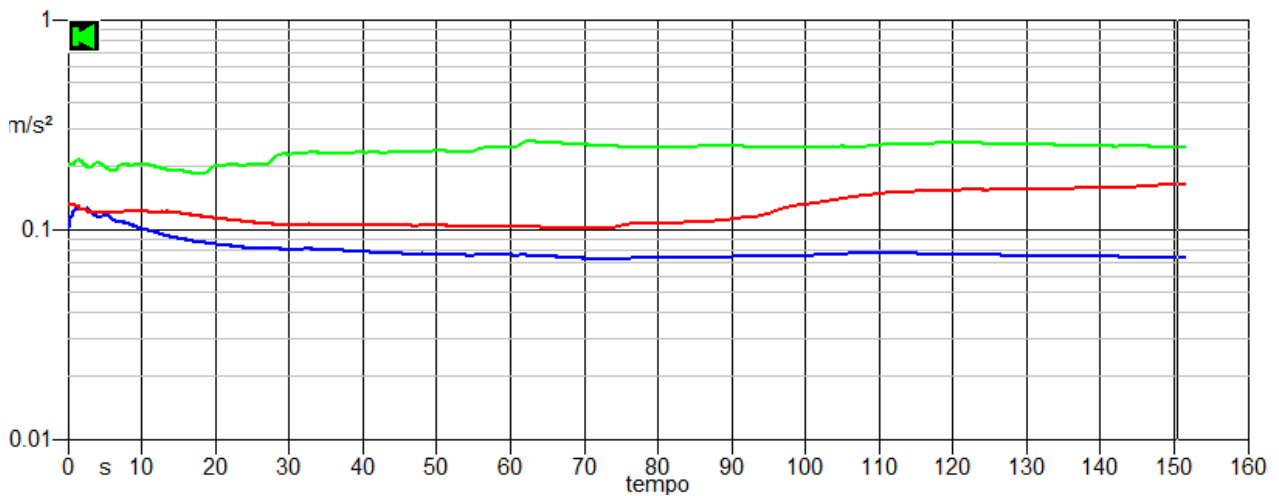


Fig. 310: visualizzazione del livello equivalente lungo i tre assi x, y e z



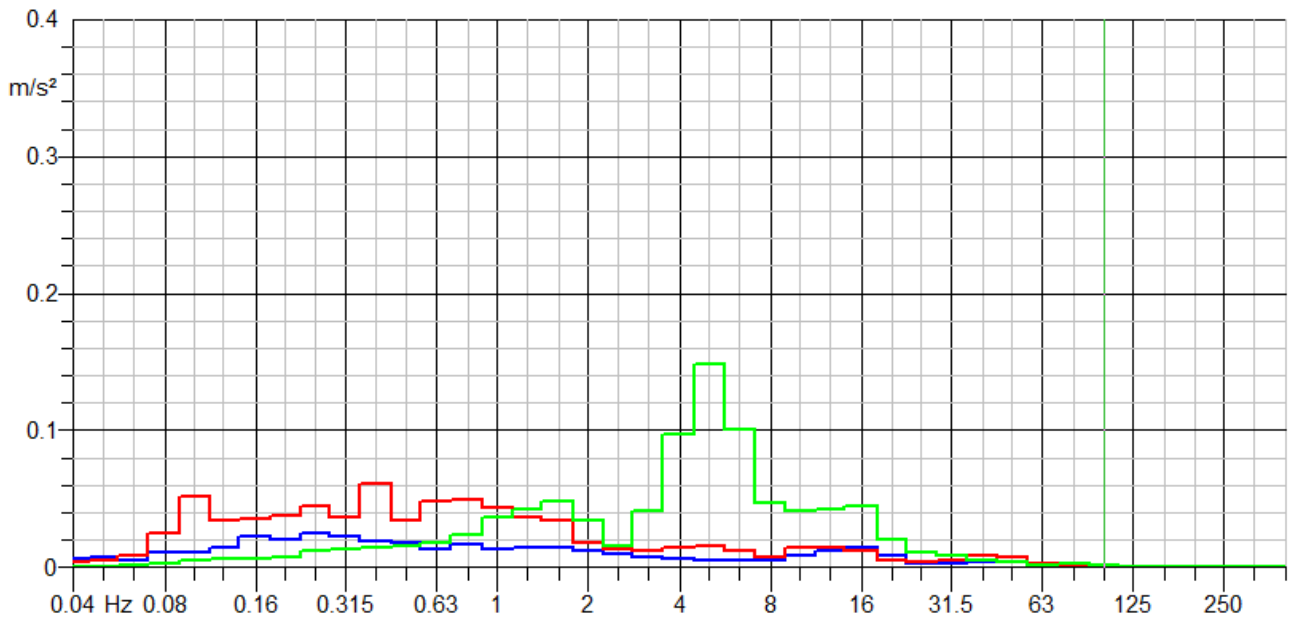


Fig. 311: spettro in frequenza della misura registrata per ciascun asse di sollecitazione

**Operatore 5**

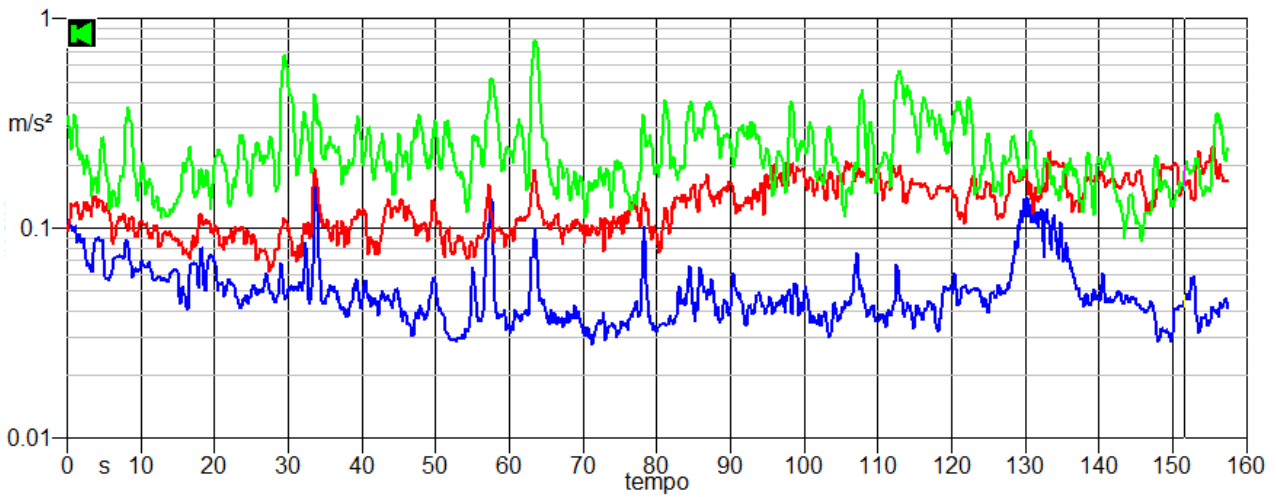


Fig. 312: Time History della misurazione effettuata

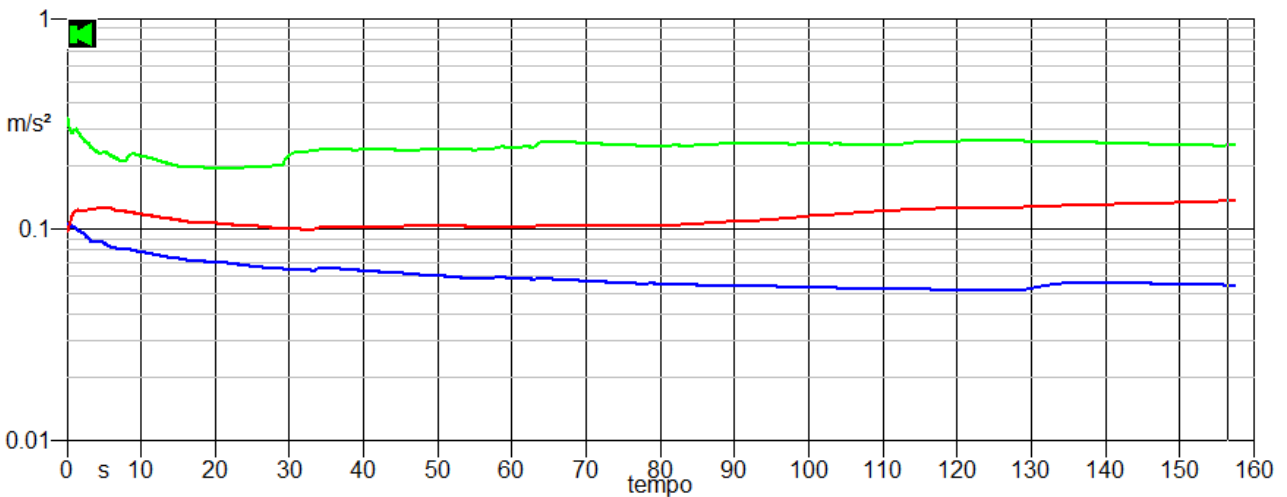


Fig. 313: visualizzazione del livello equivalente lungo i tre assi x, y e z

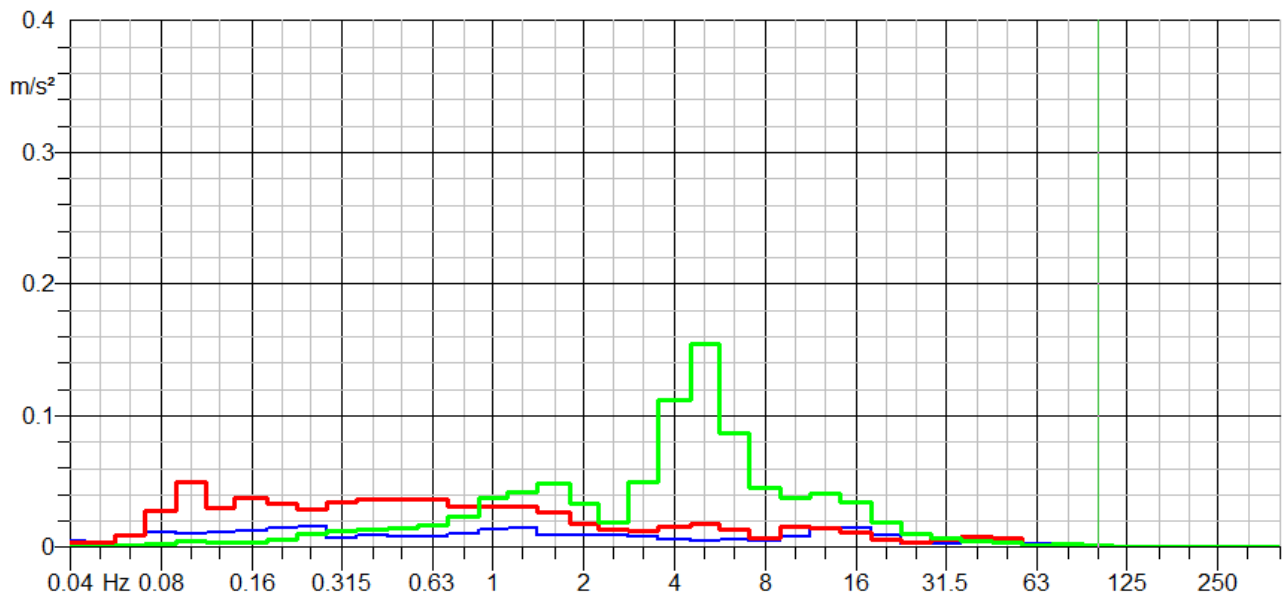


Fig. 314: spettro in frequenza della misura registrata per ciascun asse di sollecitazione

### Operatore 6

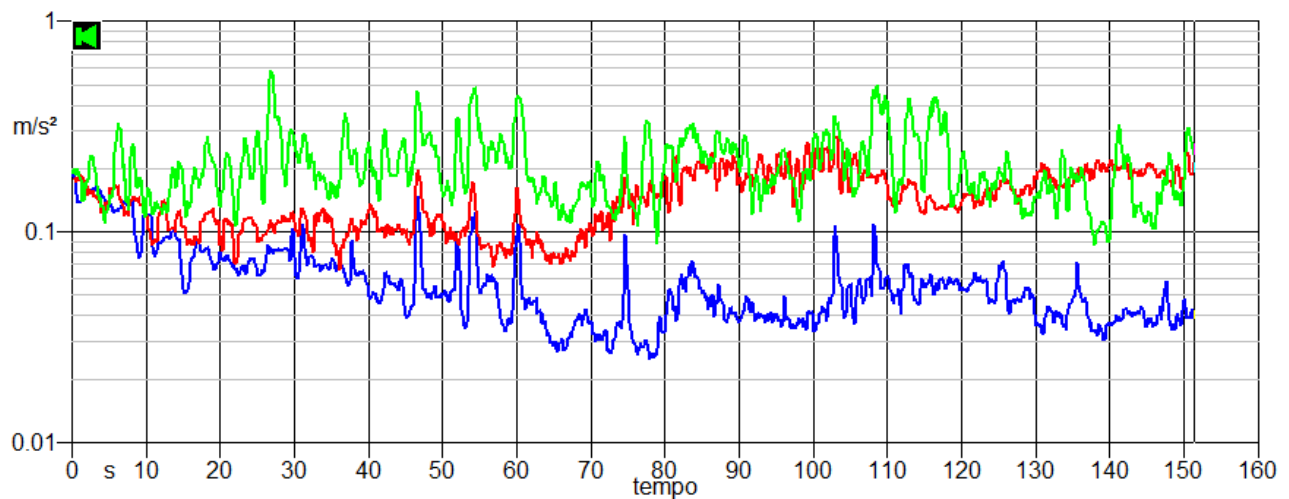


Fig. 315: Time History della misurazione effettuata

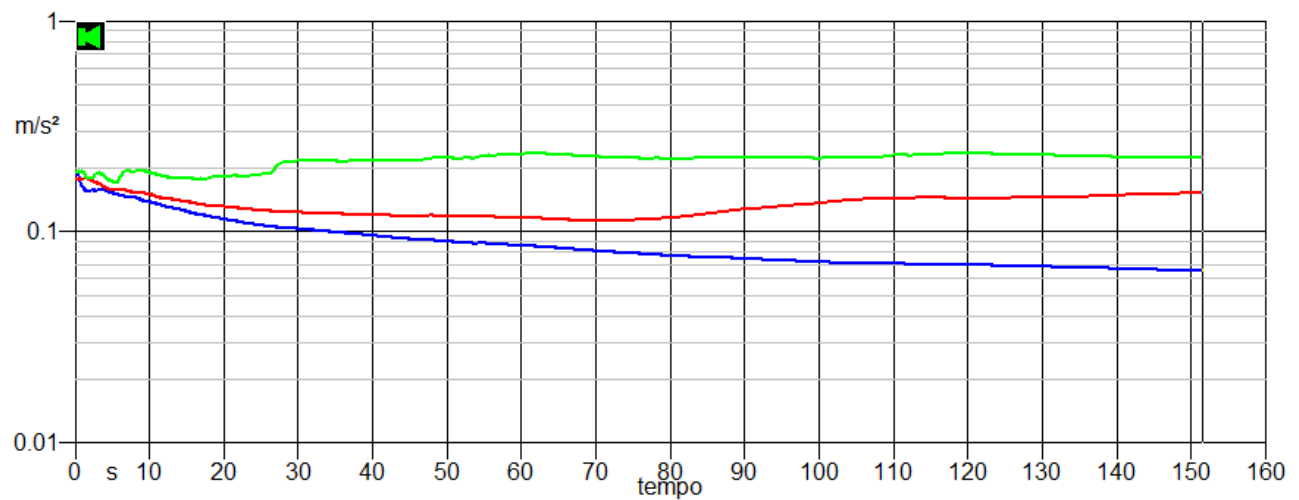


Fig. 316: visualizzazione del livello equivalente lungo i tre assi x, y e z

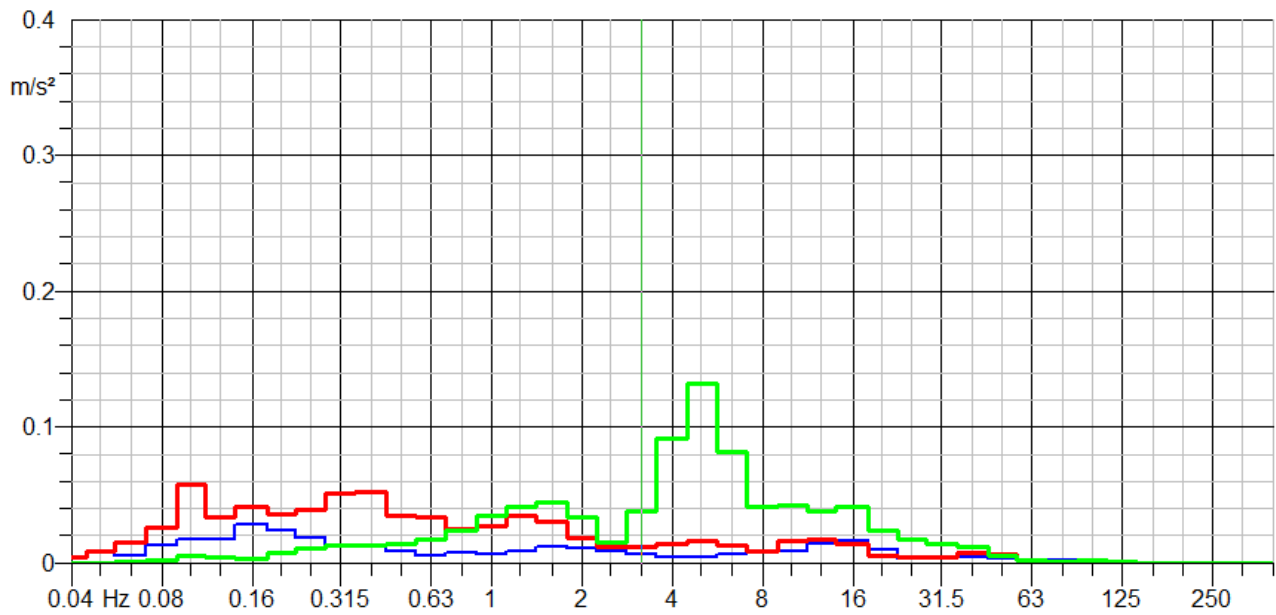


Fig. 317: spetro in frequenza della misura registrata per ciascun asse di sollecitazione

**Operatore 7**

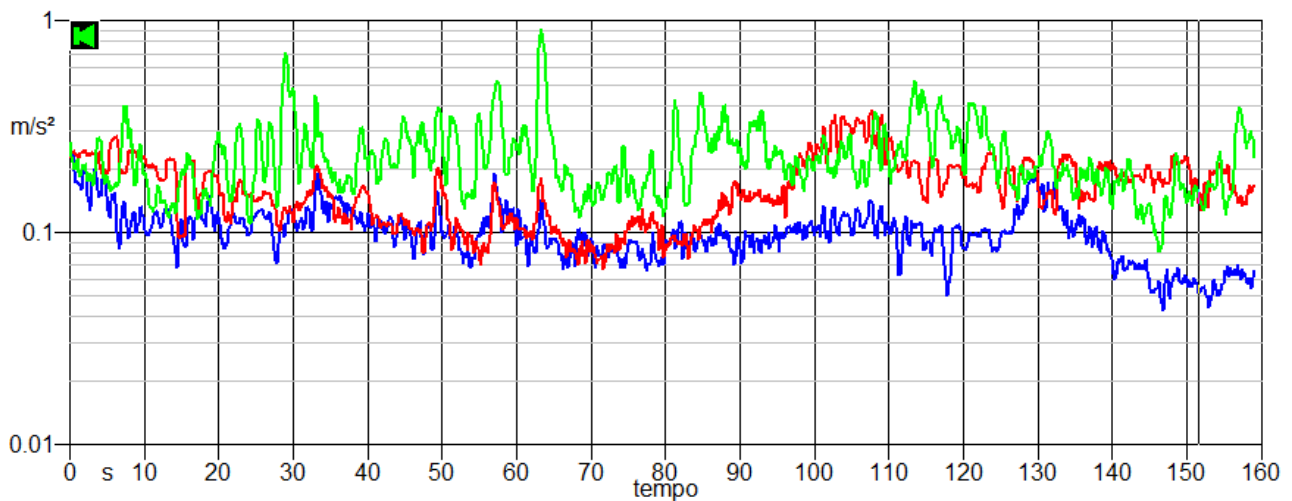


Fig. 318: Time History della misurazione effettuata

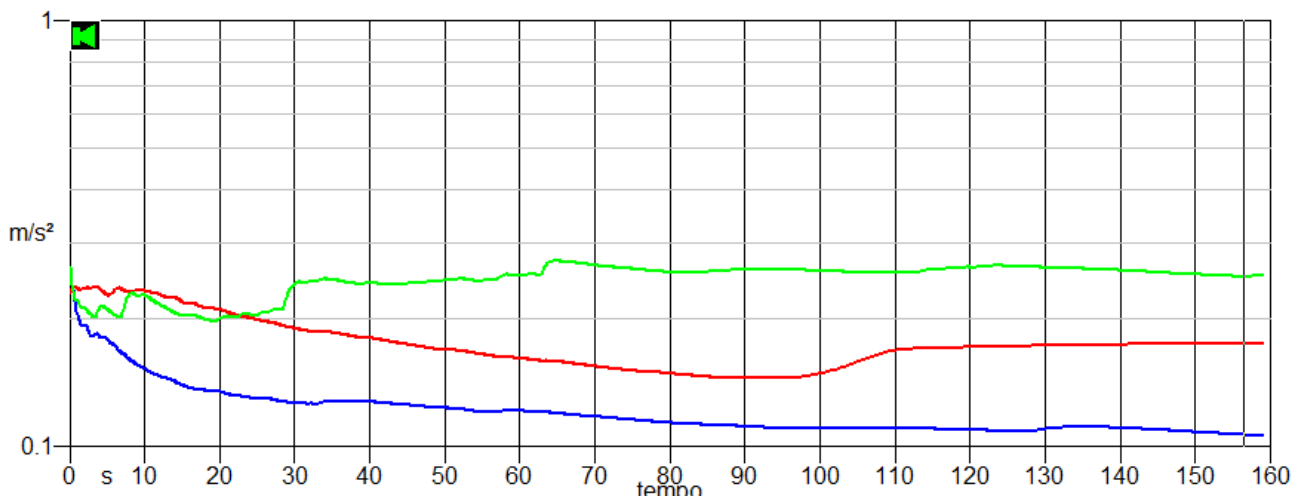


Fig. 319: visualizzazione del livello equivalente lungo i tre assi x, y e z

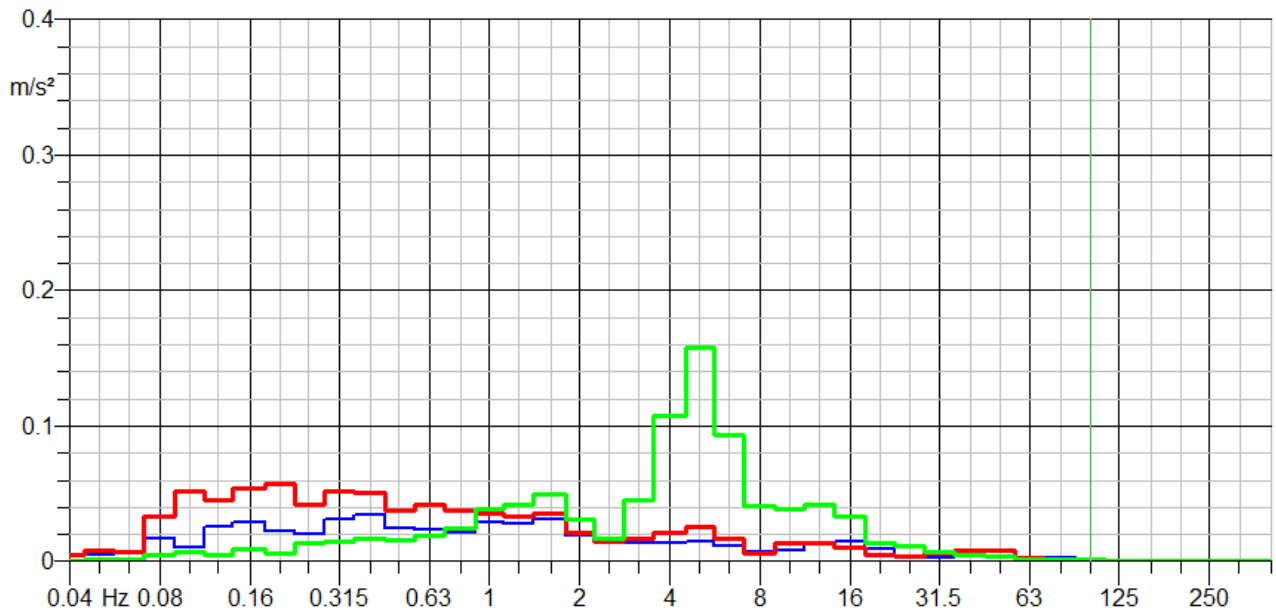


Fig. 320: spetro in frequenza della misura registrata per ciascun asse di sollecitazione

### Operatore 8

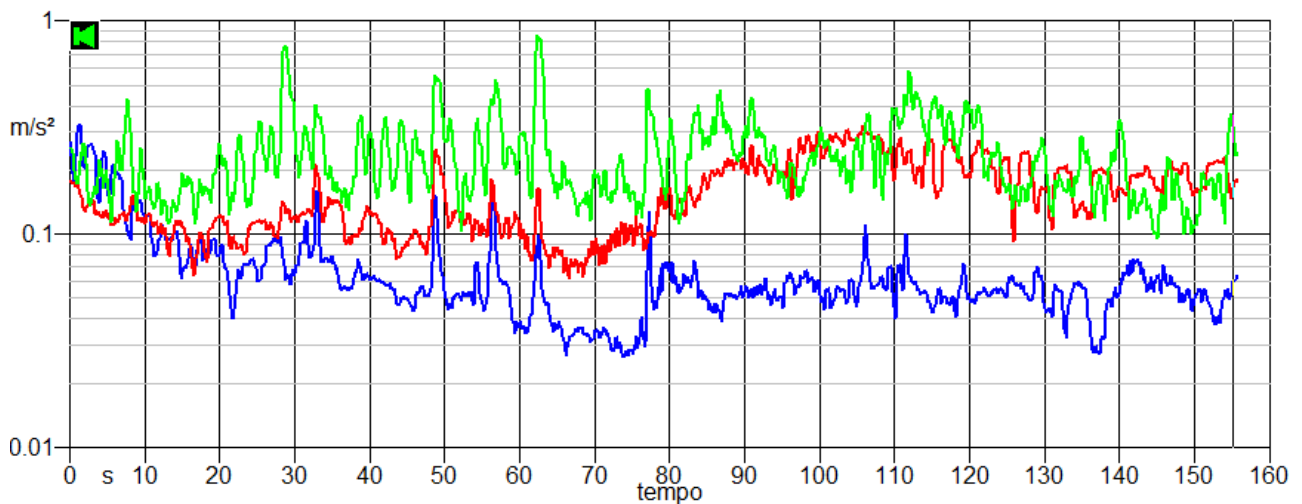


Fig. 321: Time History della misurazione effettuata

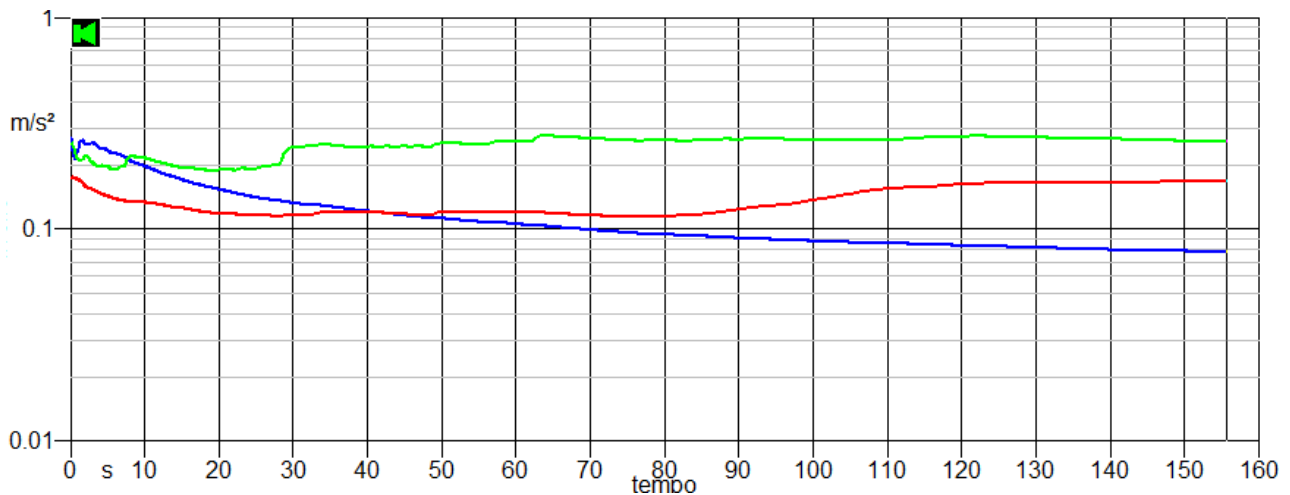


Fig. 322: visualizzazione del livello equivalente lungo i tre assi x, y e z

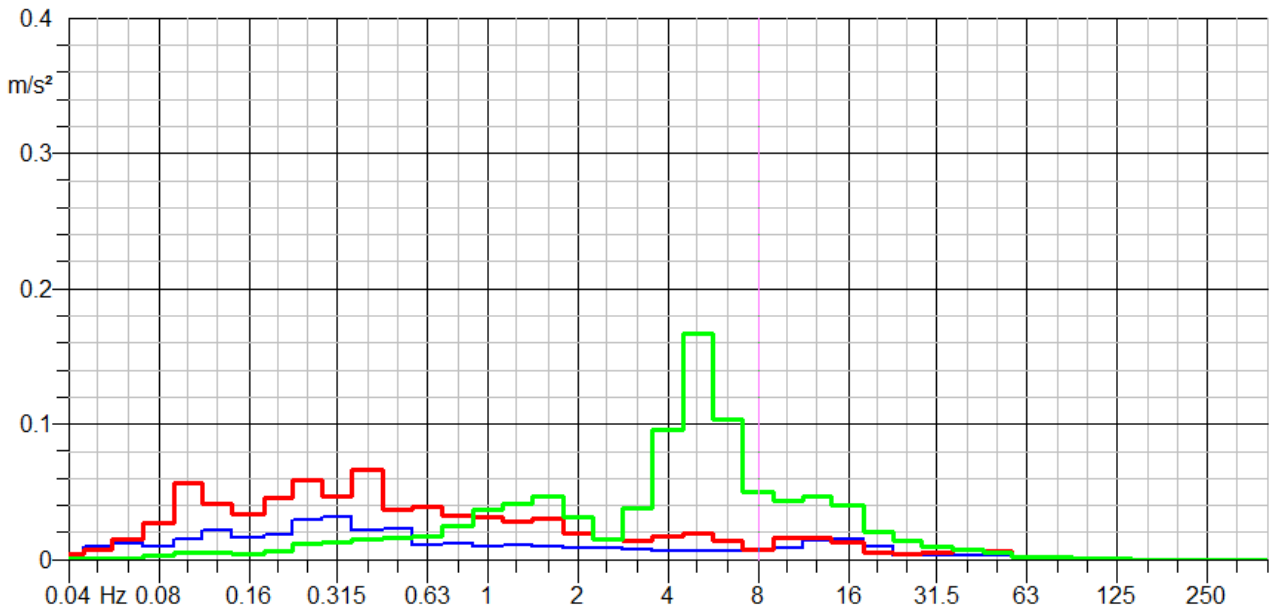


Fig. 323: spettro in frequenza della misura registrata per ciascun asse di sollecitazione

**Operatore 9**

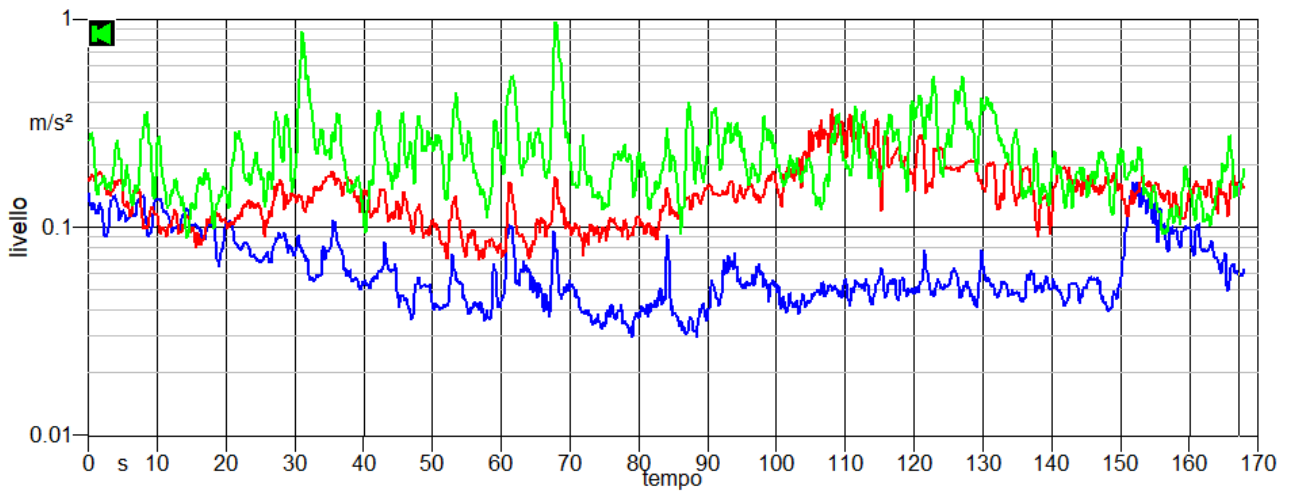


Fig. 324: Time History della misurazione effettuata

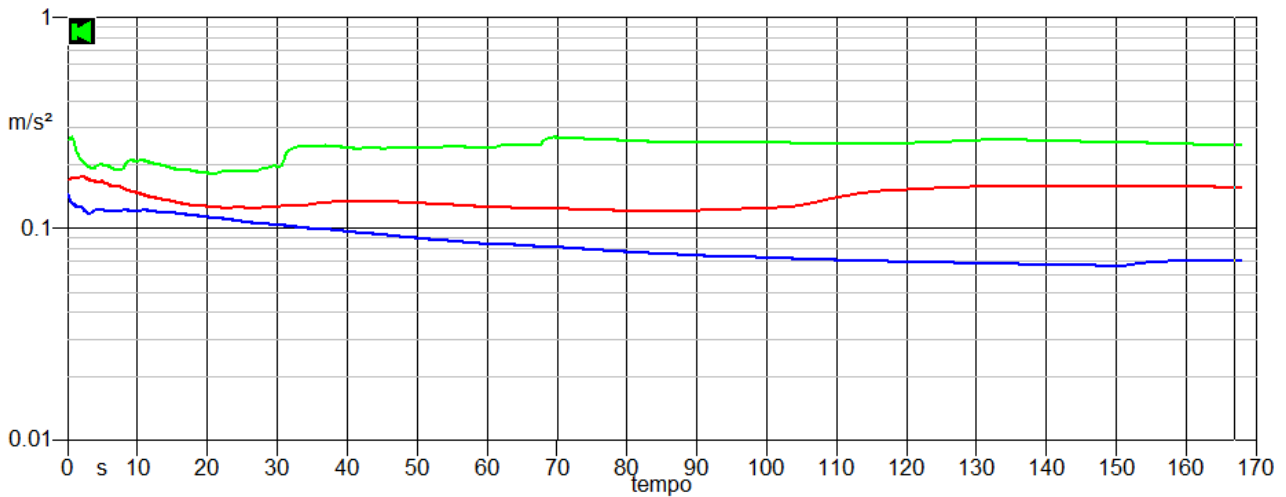


Fig. 325: visualizzazione del livello equivalente lungo i tre assi x, y e z

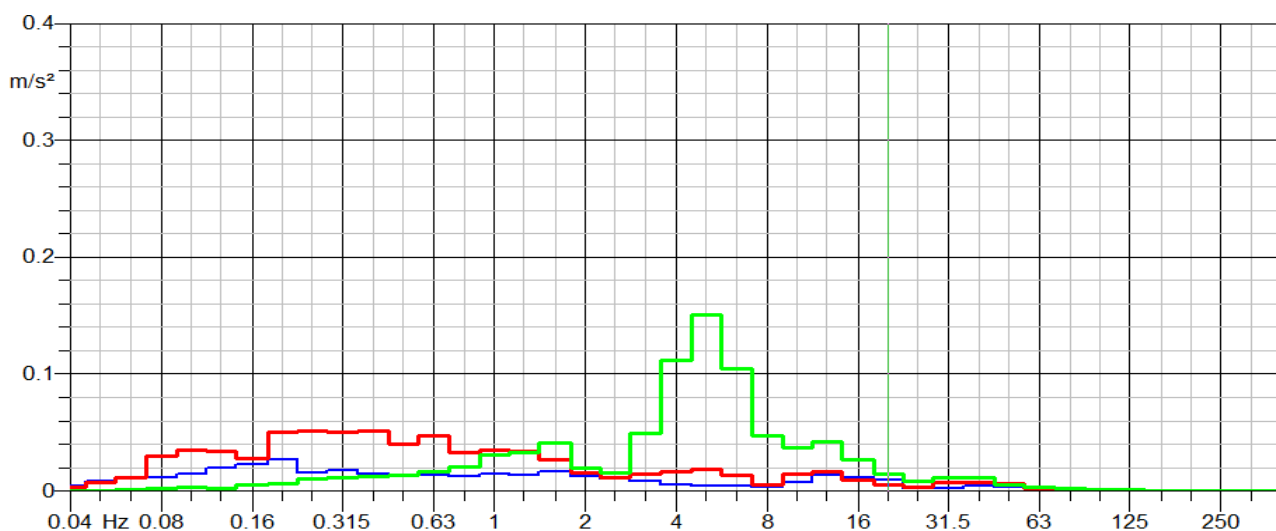


Fig. 326: spetro in frequenza della misura registrata per ciascun asse di sollecitazione

### Operatore 10

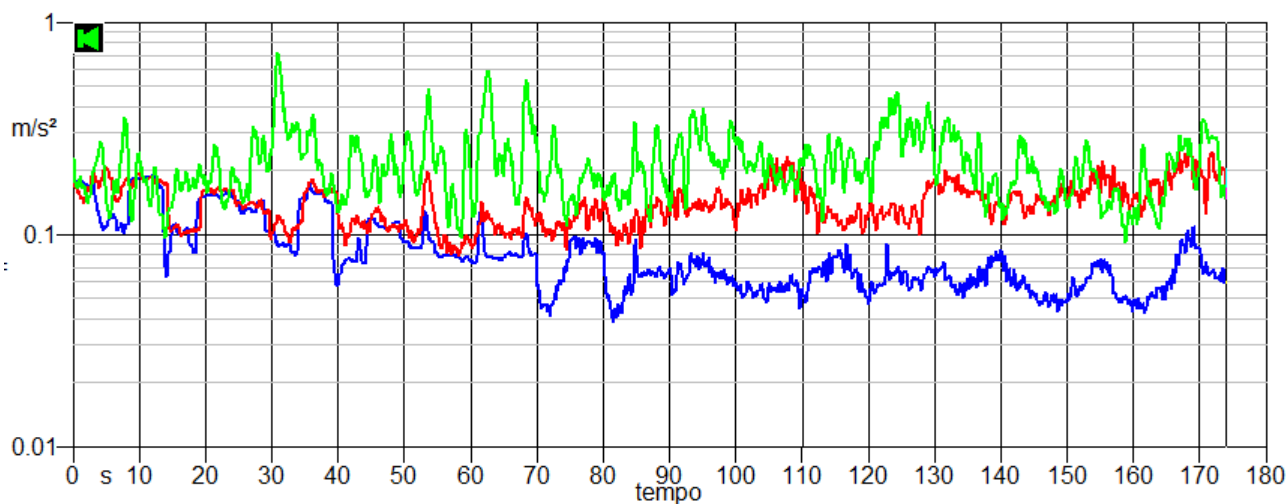


Fig. 327: Time History della misurazione effettuata

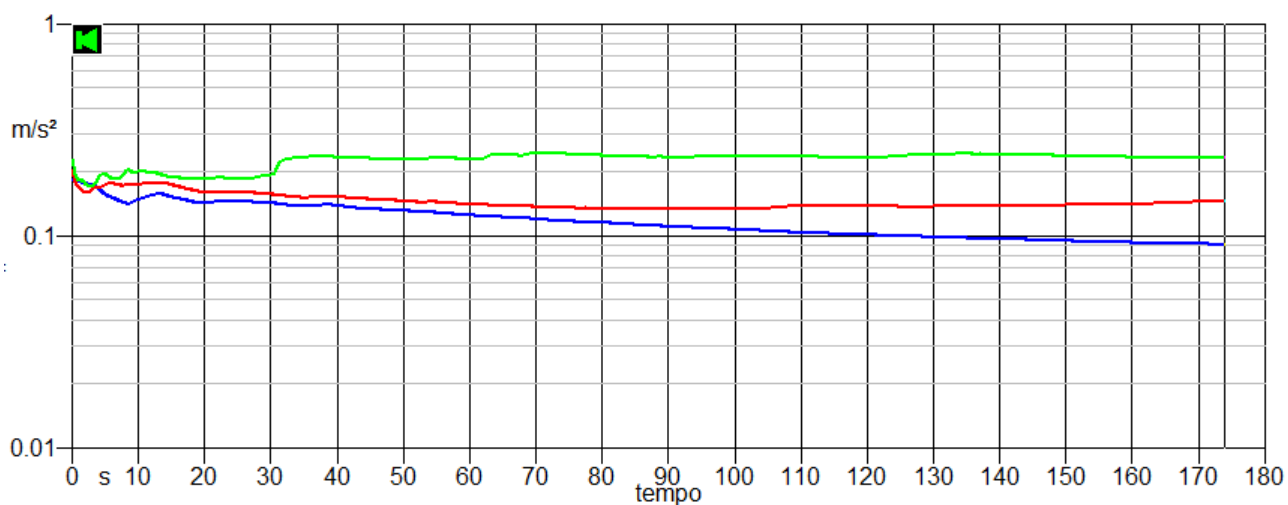


Fig. 328: visualizzazione del livello equivalente lungo i tre assi x, y e z

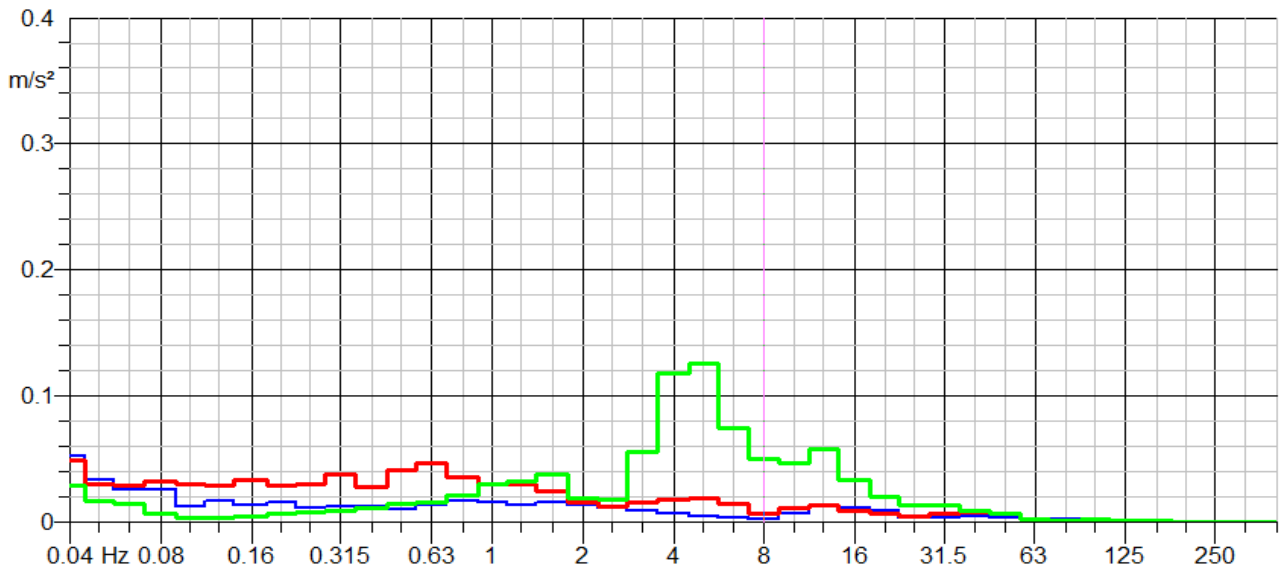


Fig. 329: spetro in frequenza della misura registrata per ciascun asse di sollecitazione

**Operatore 11**

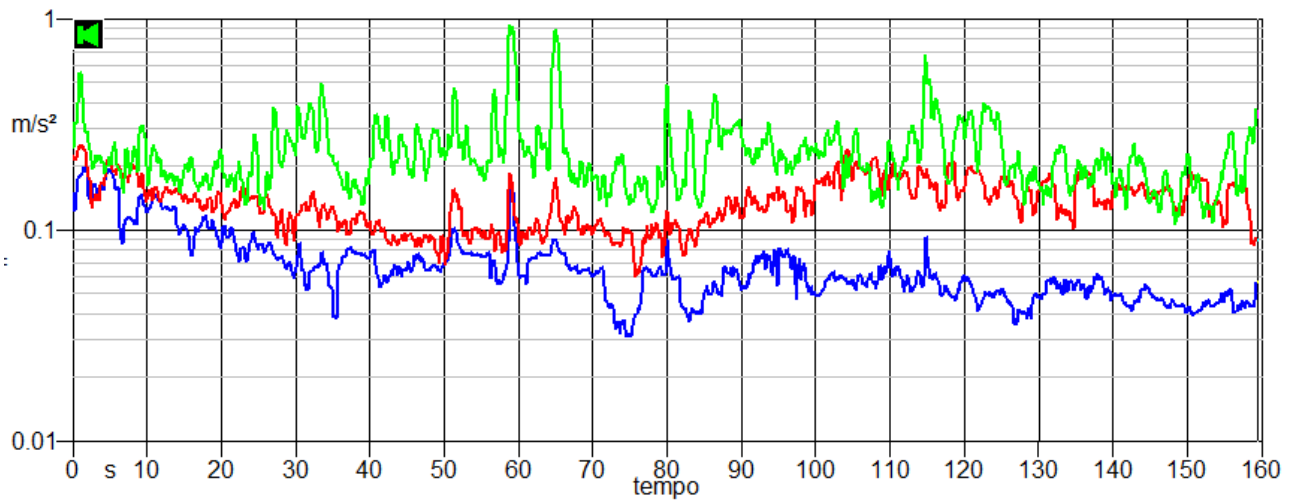


Fig. 330: Time History della misurazione effettuata

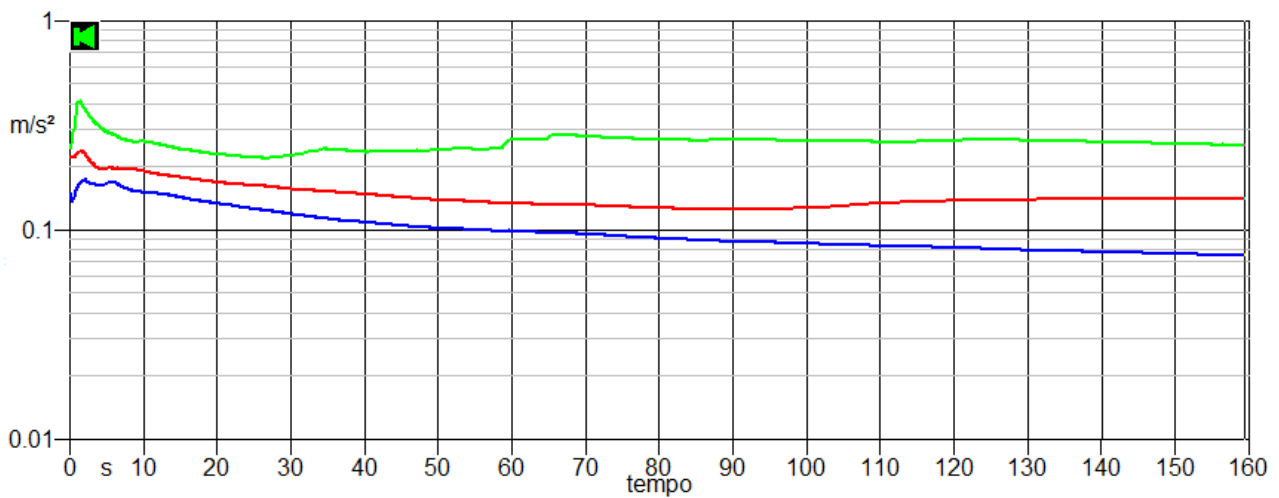


Fig. 331: visualizzazione del livello equivalente lungo i tre assi x, y e z

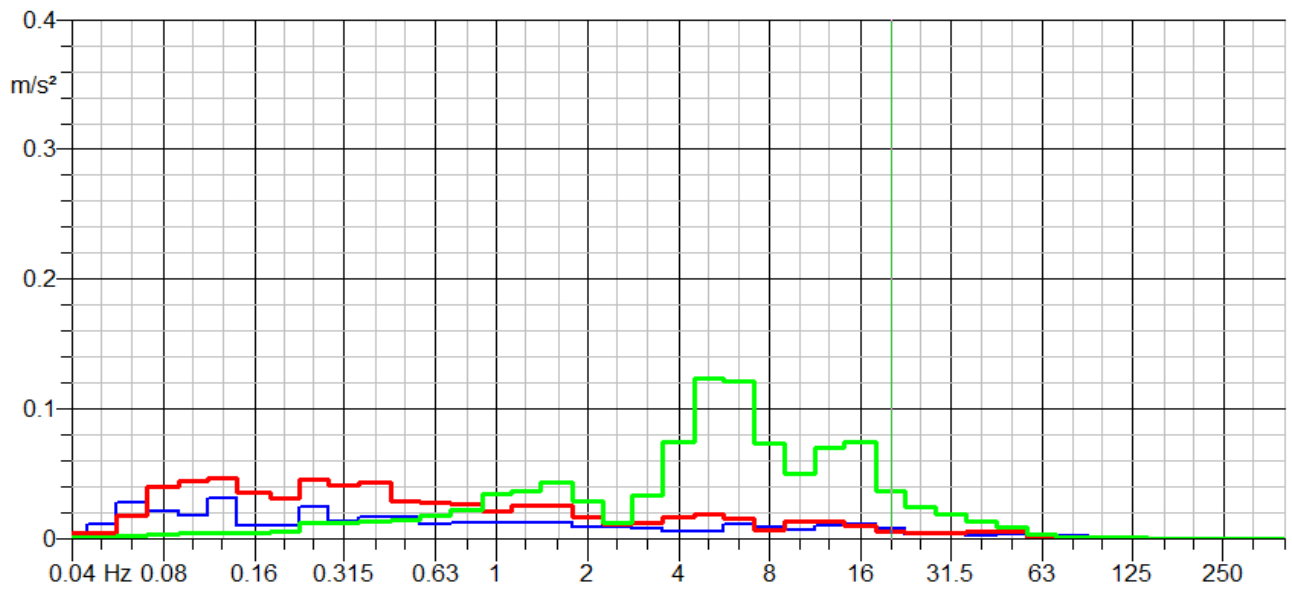


Fig. 332: spettro in frequenza della misura registrata per ciascun asse di sollecitazione

### Operatore 12

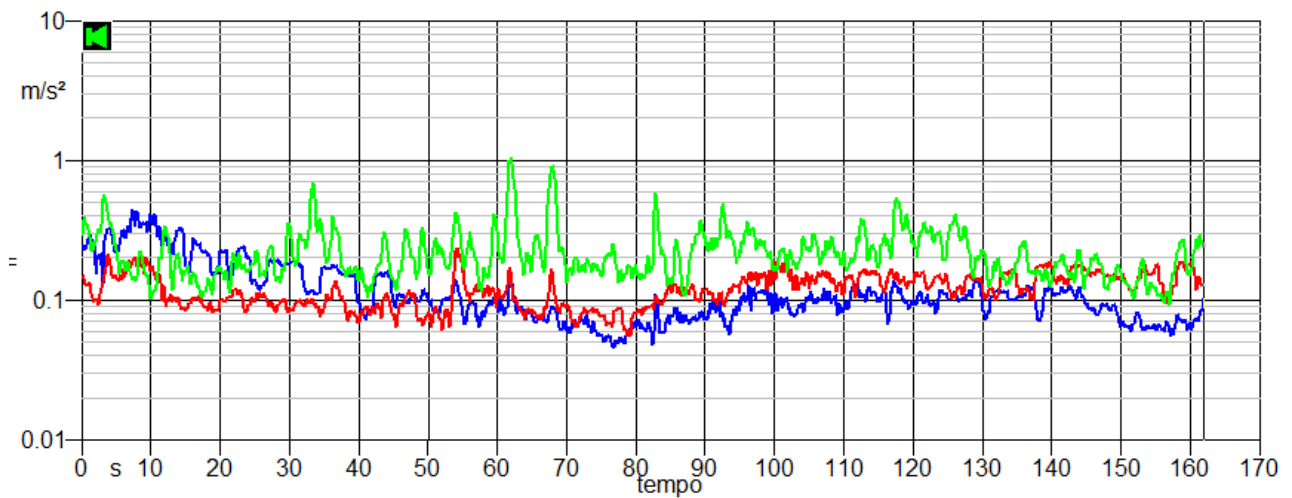


Fig. 333: Time History della misurazione effettuata

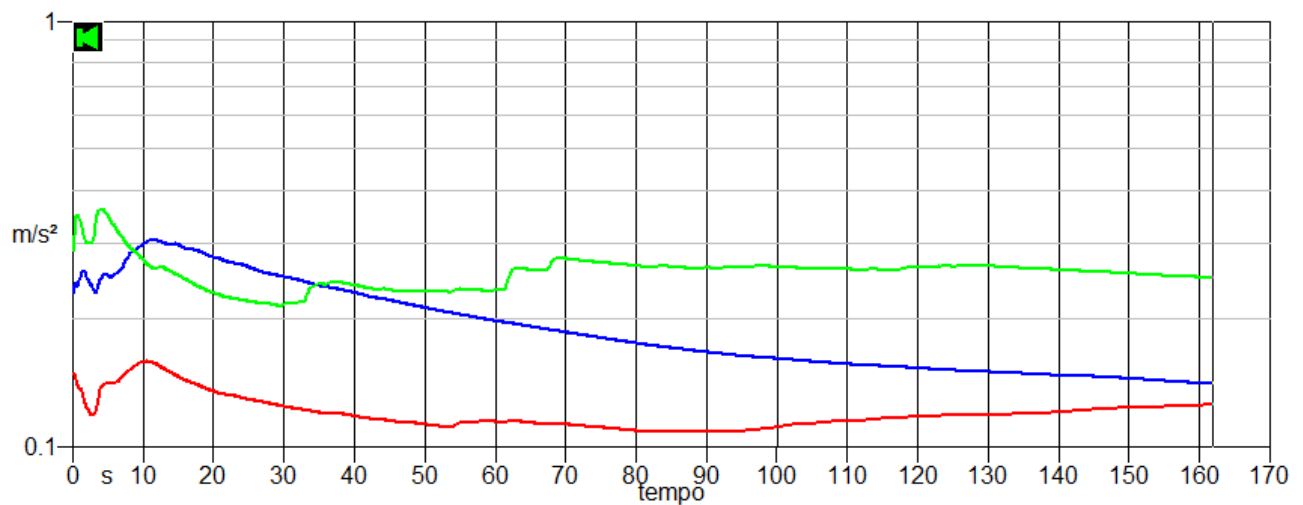


Fig. 334: visualizzazione del livello equivalente lungo i tre assi x, y e z



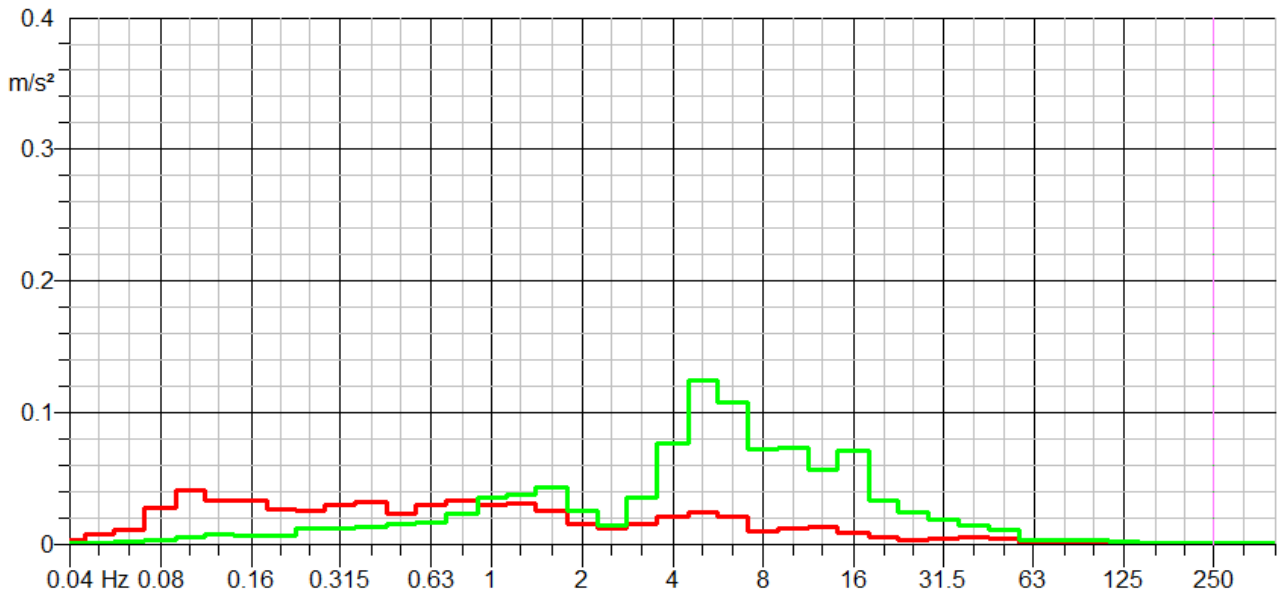


Fig. 335: spetro in frequenza della misura registrata per ciascun asse di sollecitazione

**Operatore 13**

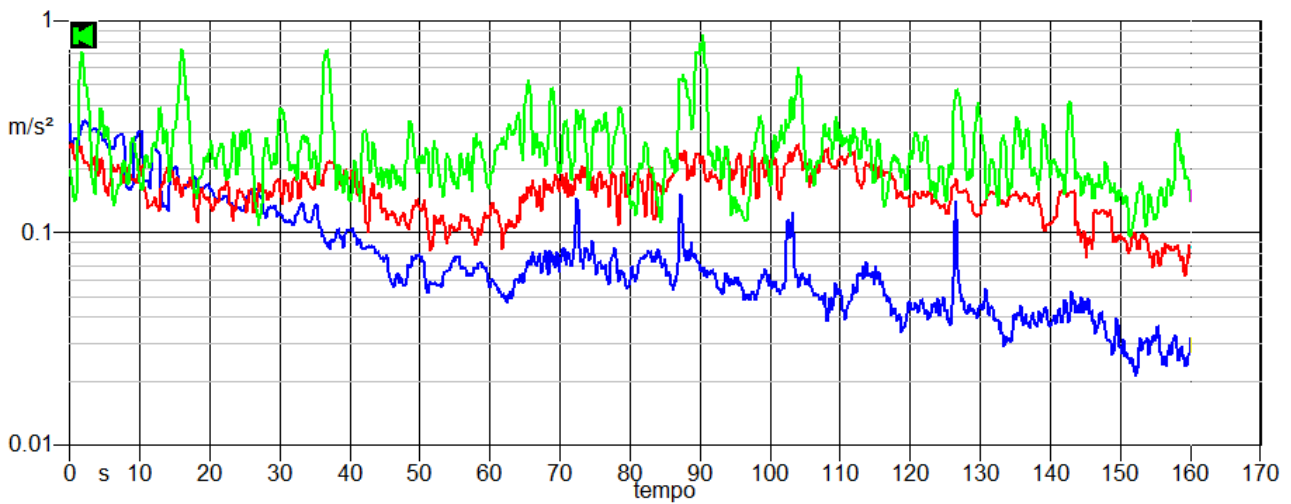


Fig. 336: visualizzazione del livello equivalente lungo i tre assi x, y e z

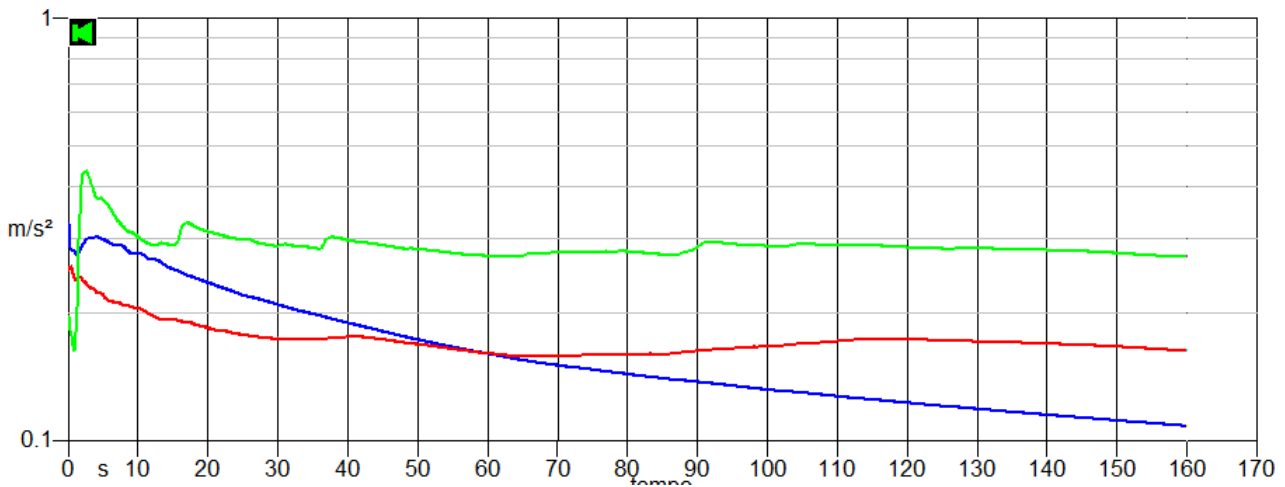


Fig. 337: visualizzazione del livello equivalente lungo i tre assi x, y e z

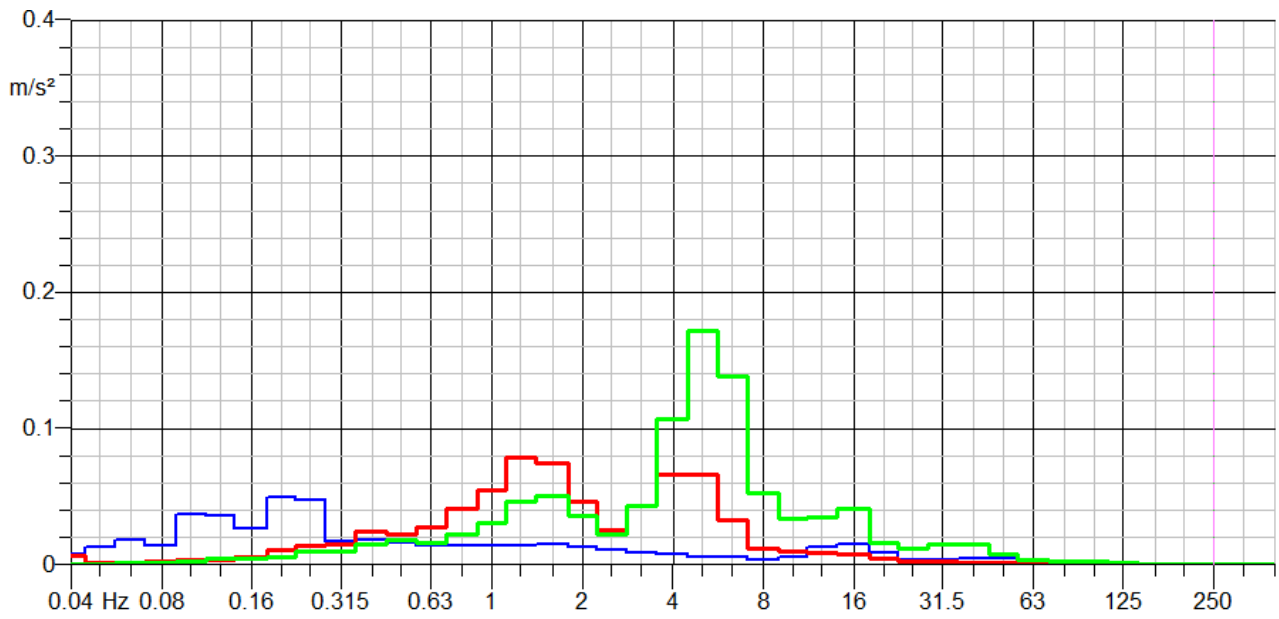


Fig. 338: spettro in frequenza della misura registrata per ciascun asse di sollecitazione

• **Operatore 14**

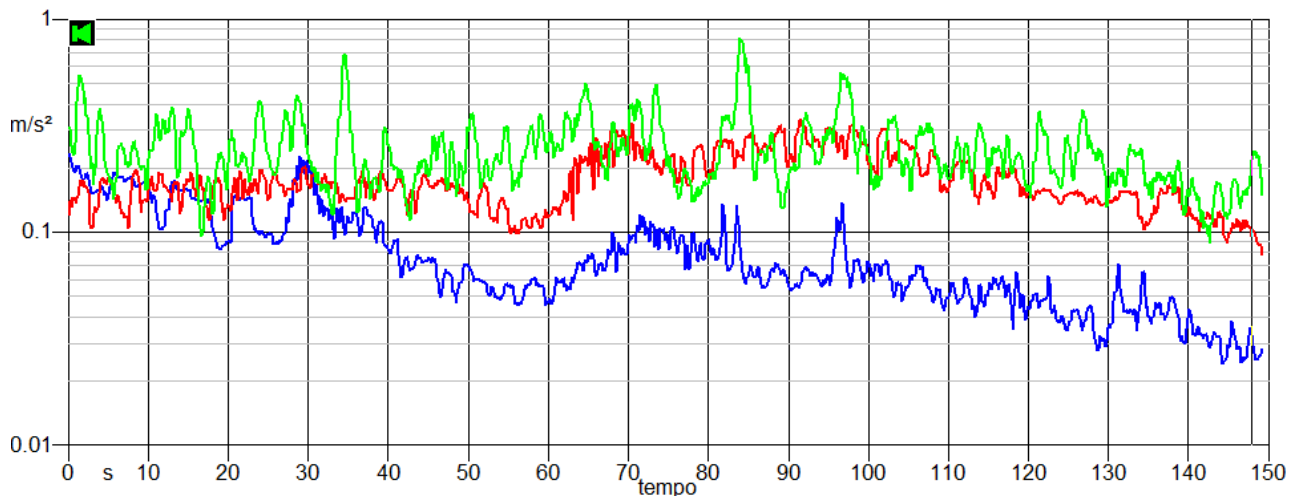


Fig. 339: Time History della misurazione effettuata

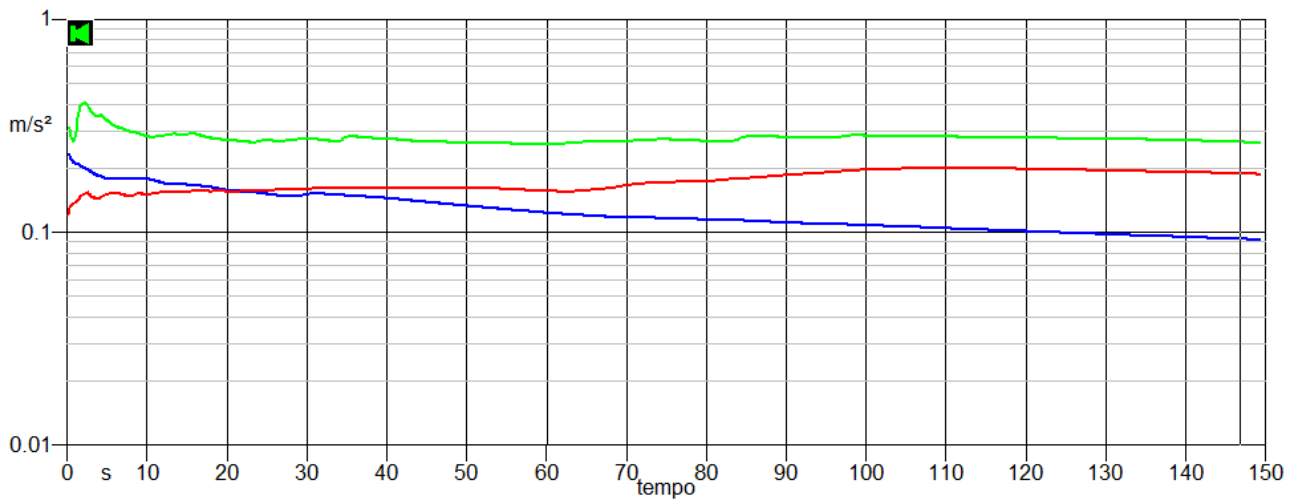


Fig. 340: visualizzazione del livello equivalente lungo i tre assi x, y e z

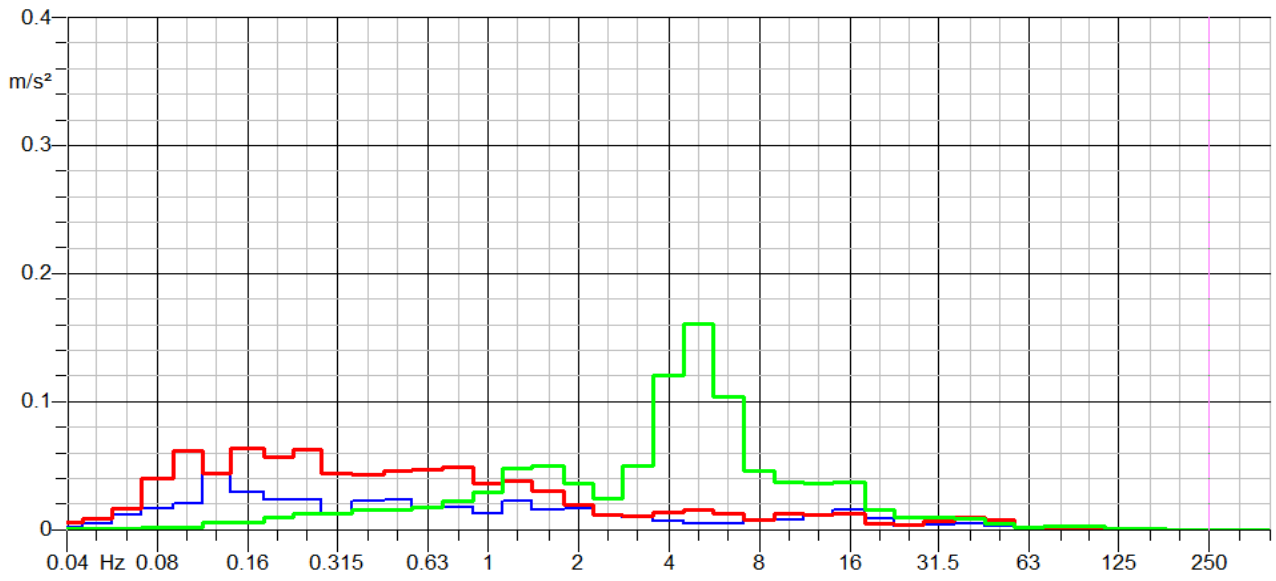


Fig. 341: spettro in frequenza della misura registrata per ciascun asse di sollecitazione

▪ *Appendice D: Grafici misurazioni in ambiente urbano -  
vetture in configurazione blindata*

Operatore 2

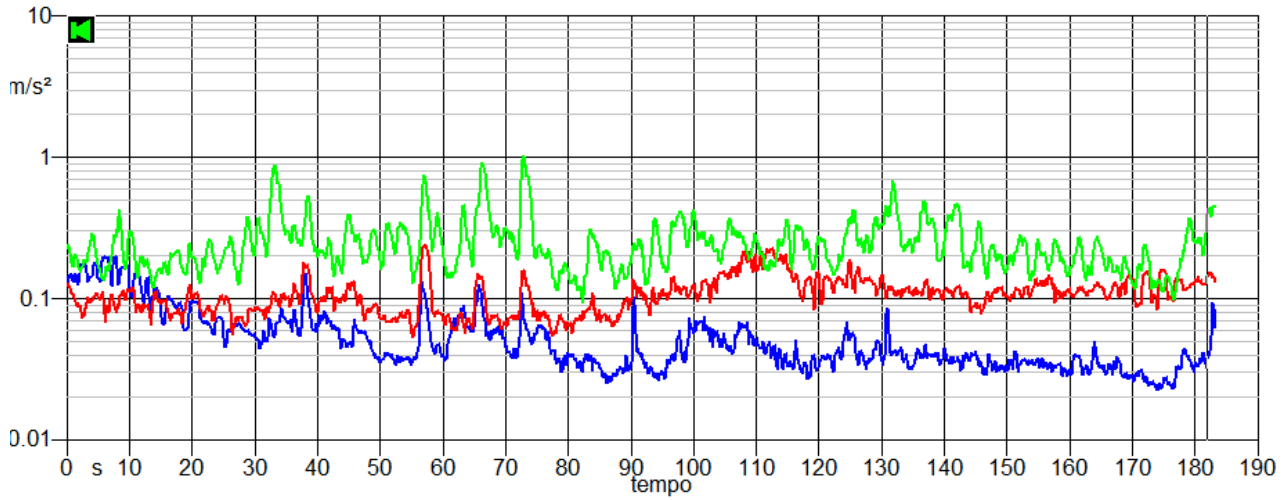


Fig. 342: Time History della misurazione effettuata

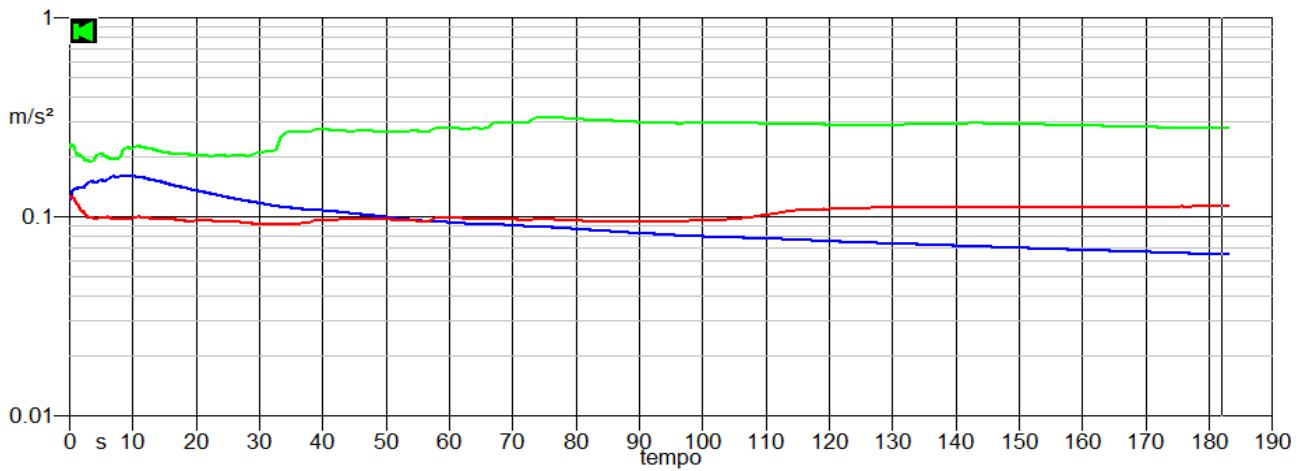


Fig. 343: visualizzazione del livello equivalente lungo i tre assi x, y e z

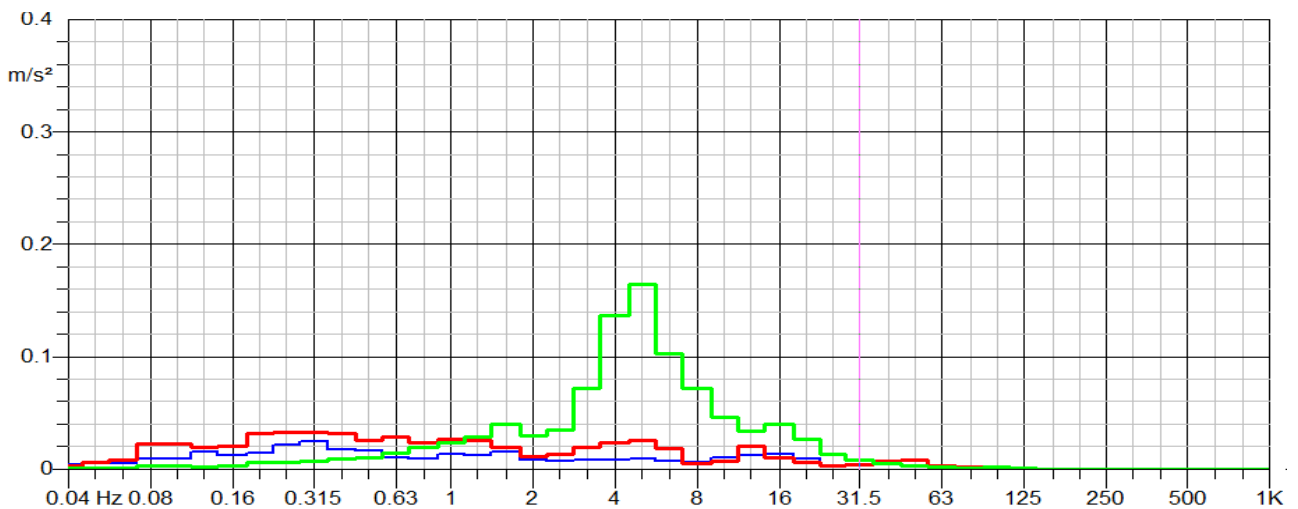


Fig. 344: spettro in frequenza della misura registrata per ciascun asse di sollecitazione

### Operatore 3

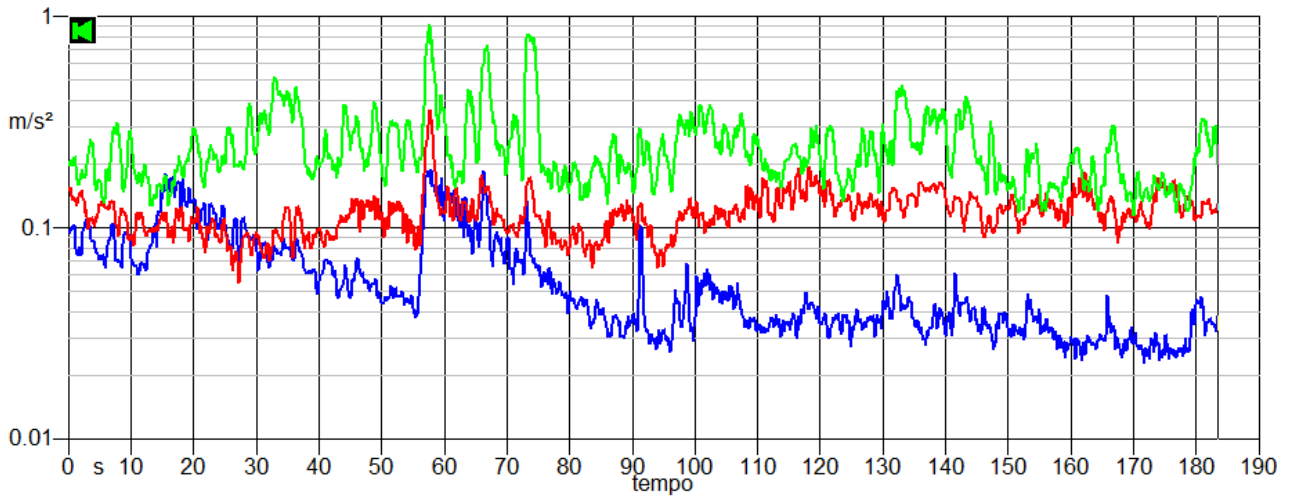


Fig. 345: Time History della misurazione effettuata

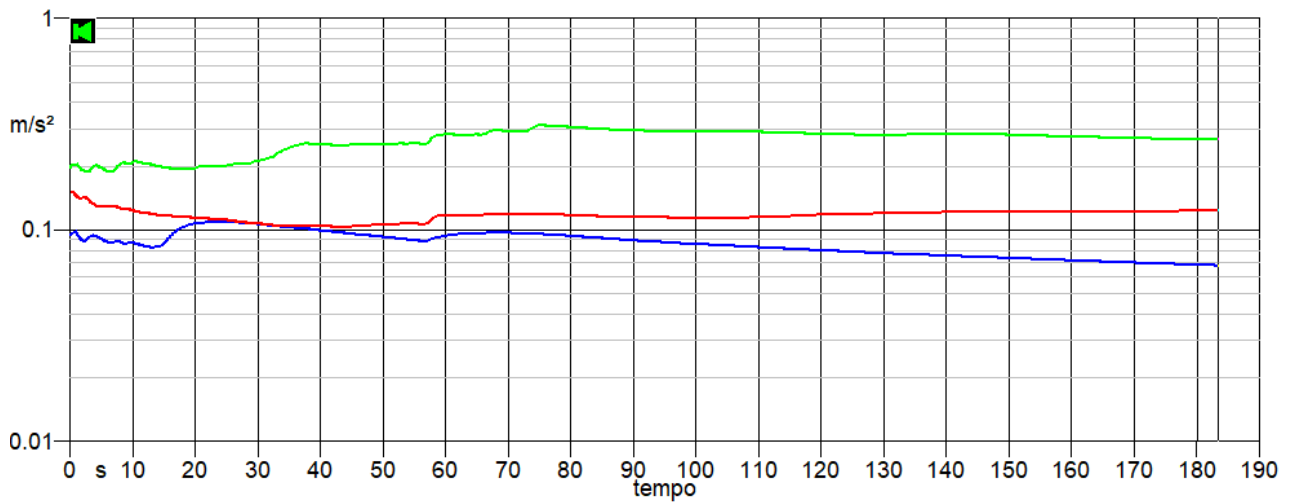


Fig. 346: visualizzazione del livello equivalente lungo i tre assi x, y e z

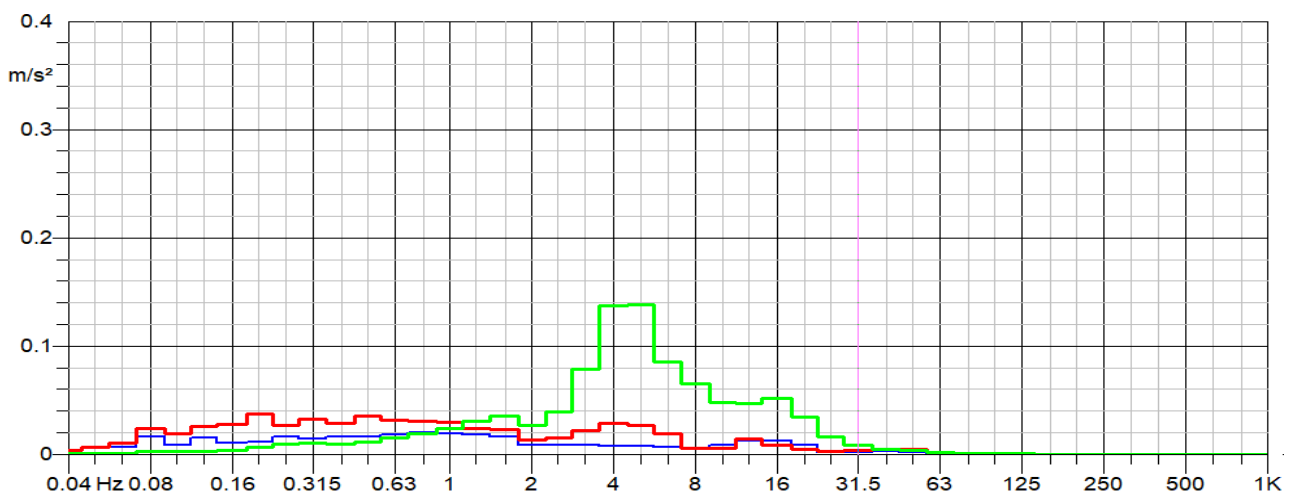


Fig. 347: spettro in frequenza della misura registrata per ciascun asse di sollecitazione

### Operatore 4

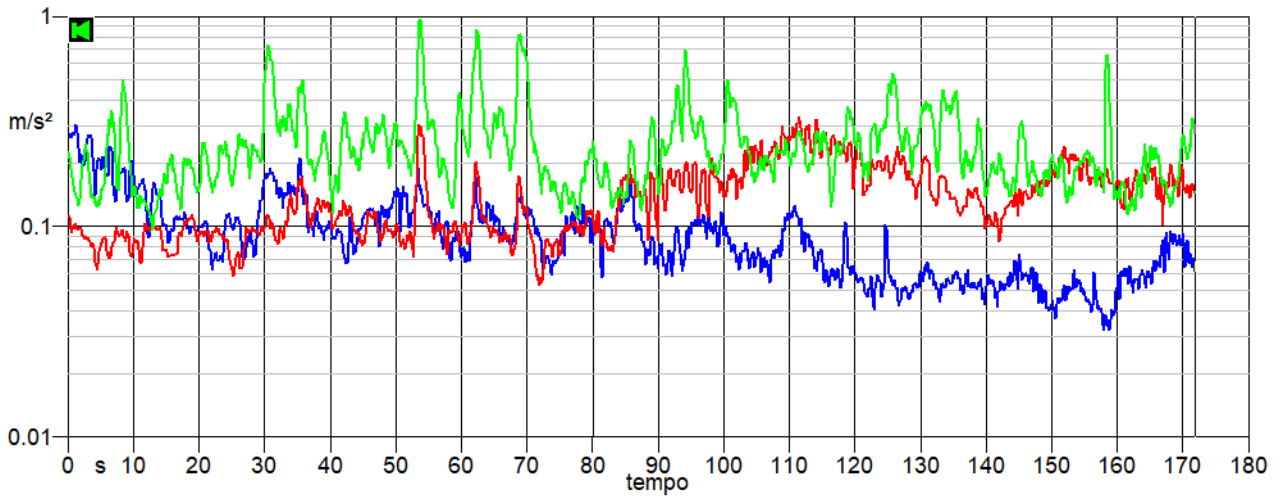


Fig. 348: spettro in frequenza della misura registrata per ciascun asse di sollecitazione

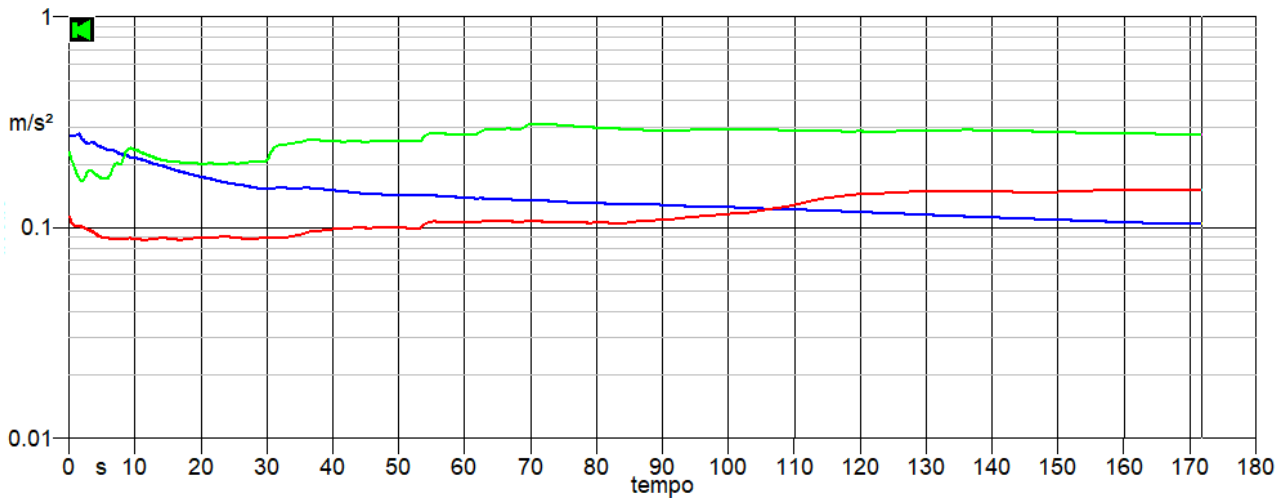


Fig. 349: visualizzazione del livello equivalente lungo i tre assi x, y e z

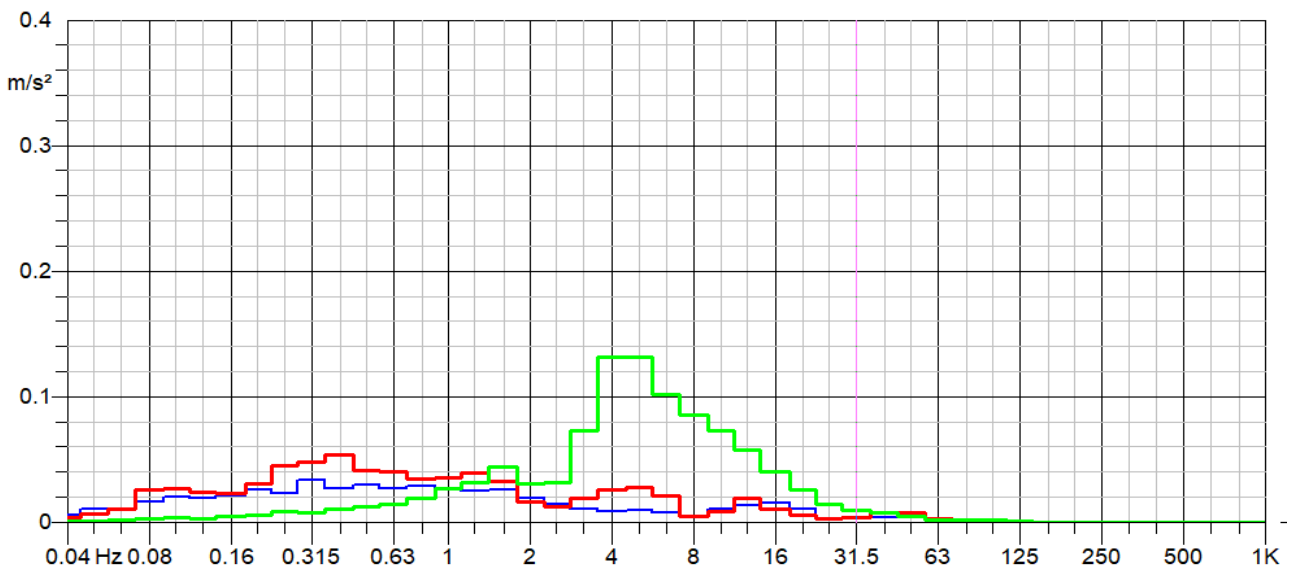


Fig. 350: spettro in frequenza della misura registrata per ciascun asse di sollecitazione

### Operatore 5

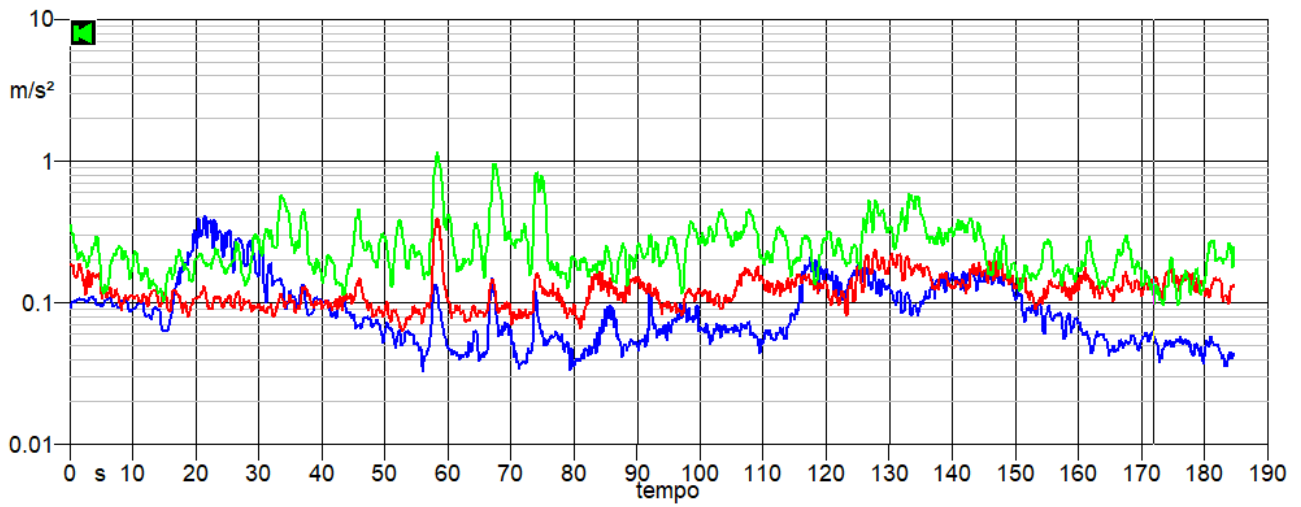


Fig. 351: Time History della misurazione effettuata

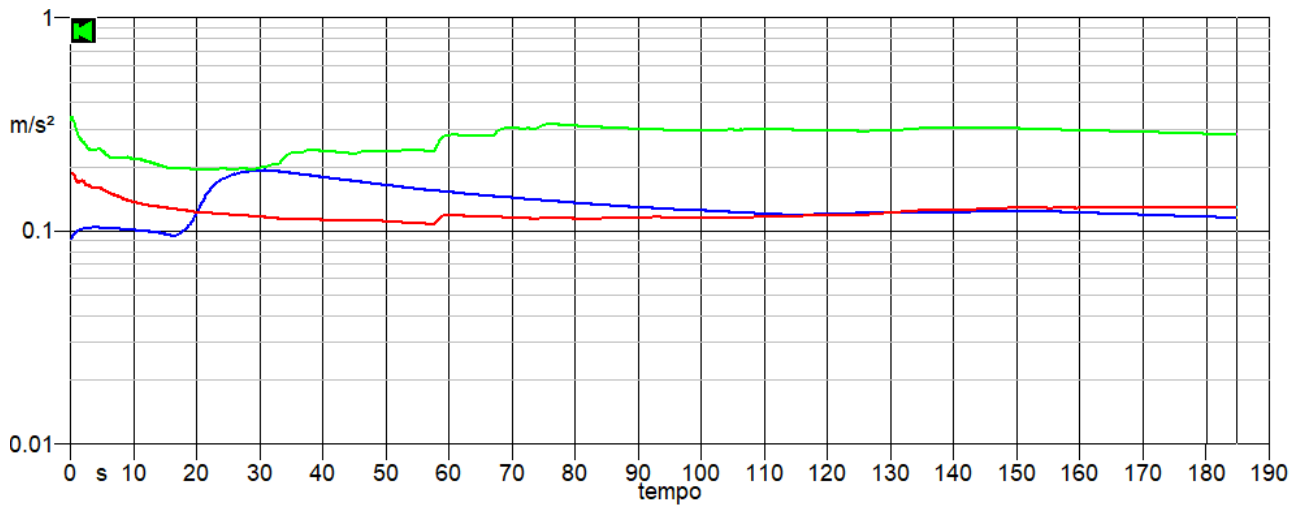


Fig. 352: visualizzazione del livello equivalente lungo i tre assi x,y e z

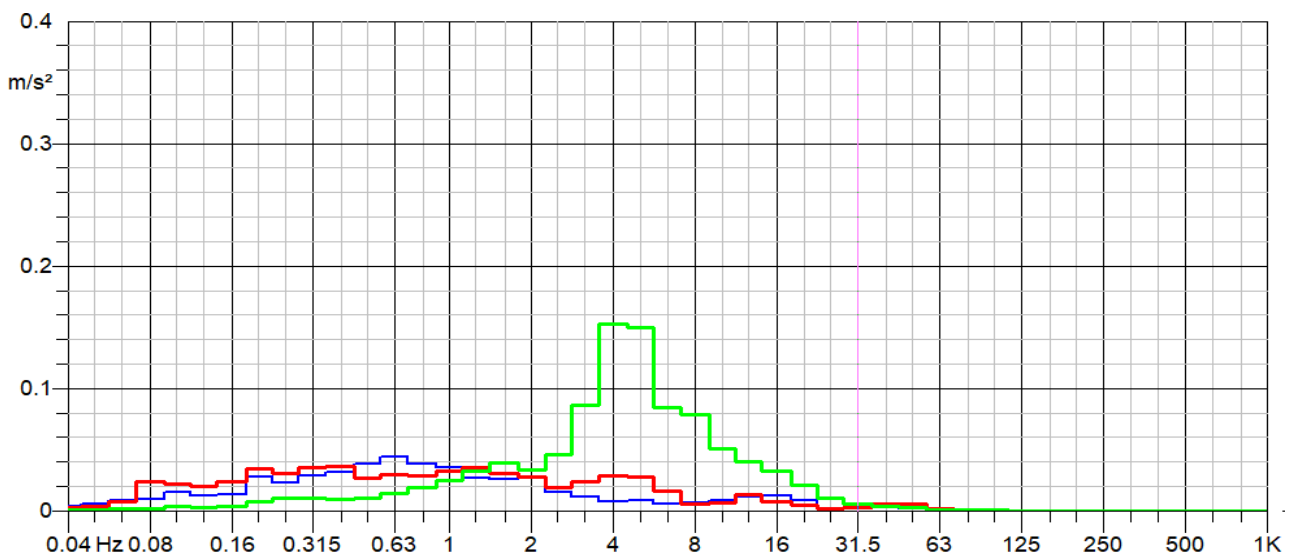


Fig. 353: spettro in frequenza della misura registrata per ciascun asse di sollecitazione

**Operatore 6**

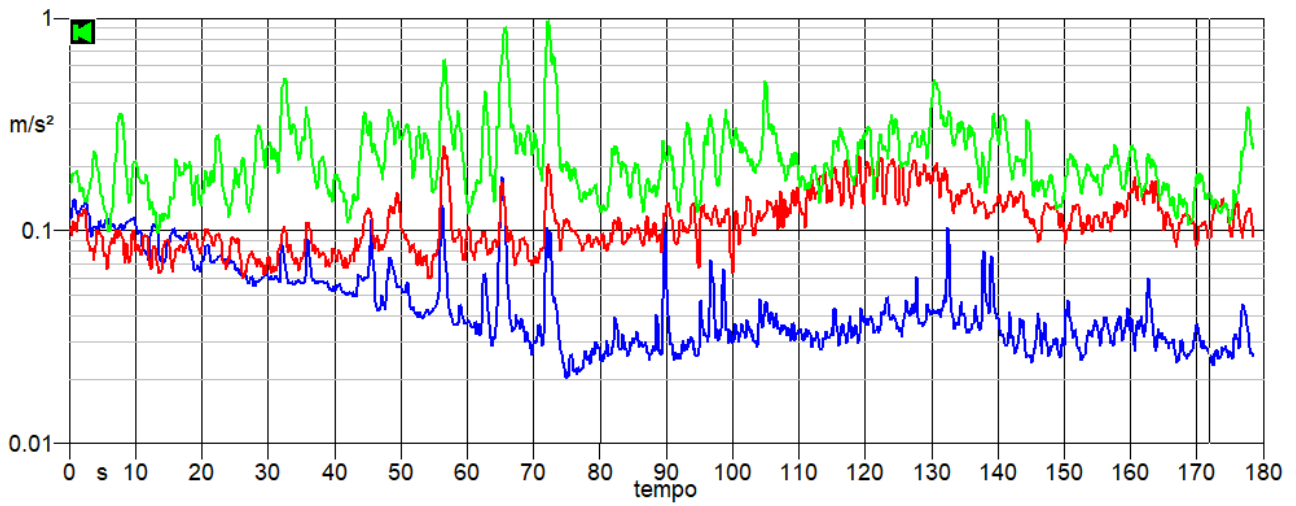


Fig. 354: Time History della misurazione effettuata

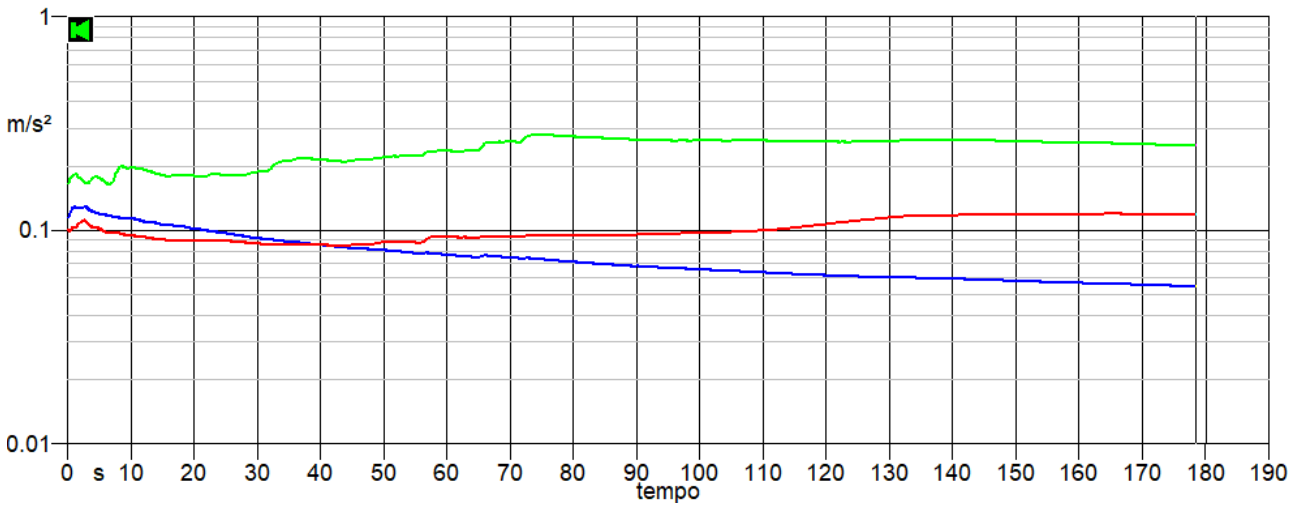


Fig. 355: visualizzazione del livello equivalente lungo i tre assi x, y e z

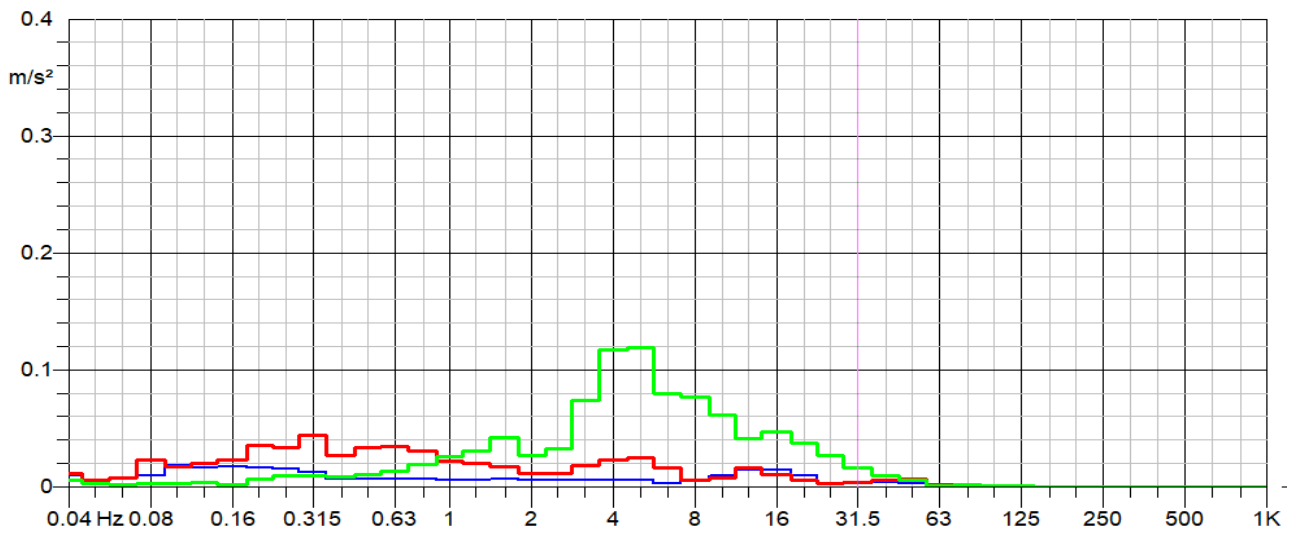


Fig. 356: spettro in frequenza della misura registrata per ciascun asse di sollecitazione



Operatore 7

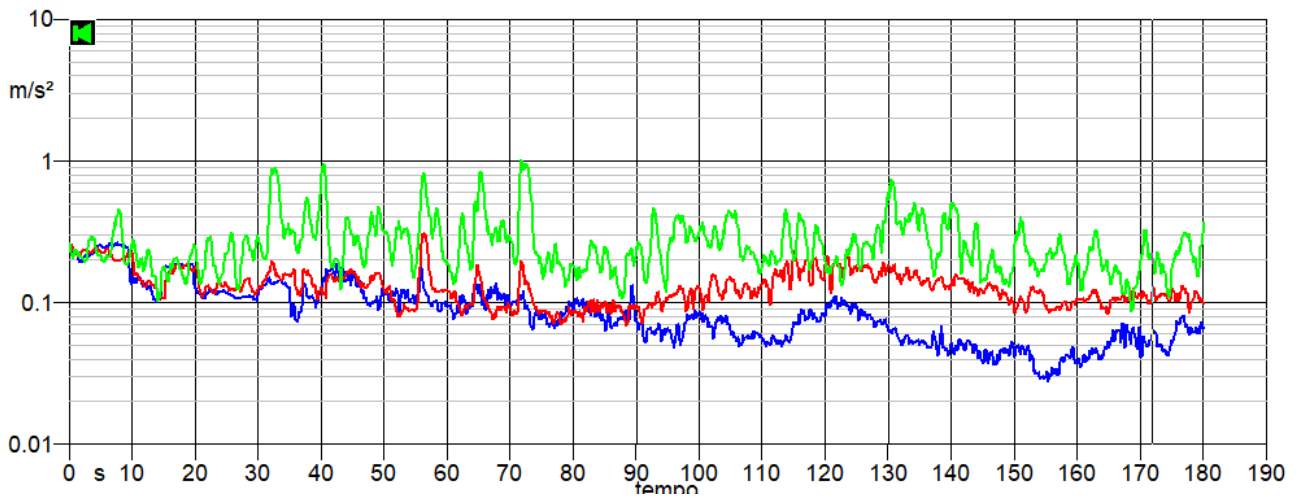


Fig. 357: Time History della misurazione effettuata

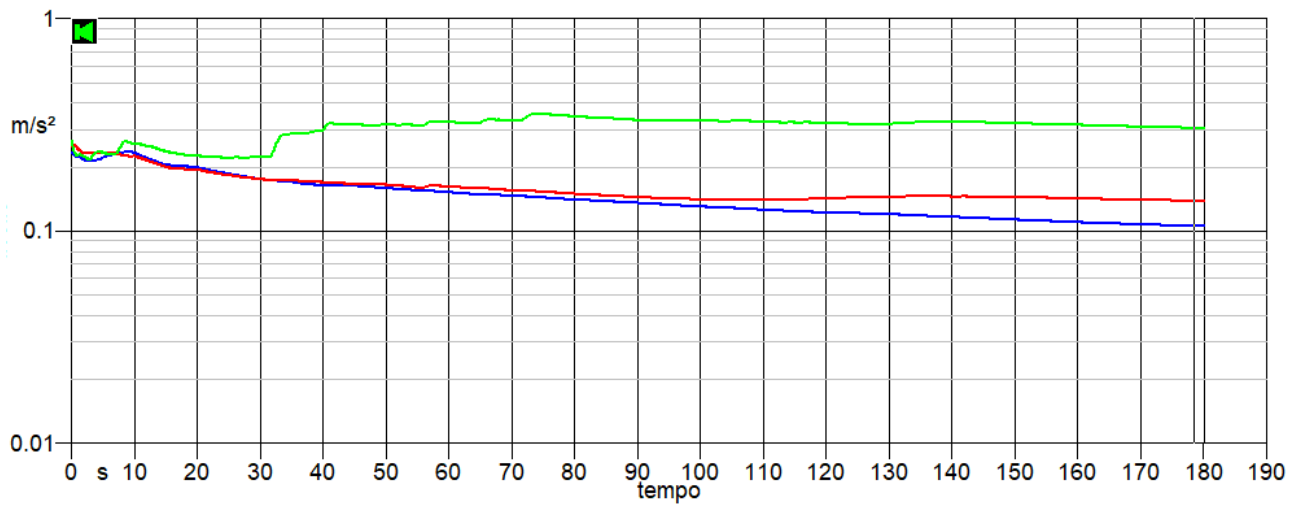


Fig. 358: visualizzazione del livello equivalente lungo i tre assi x, y e z

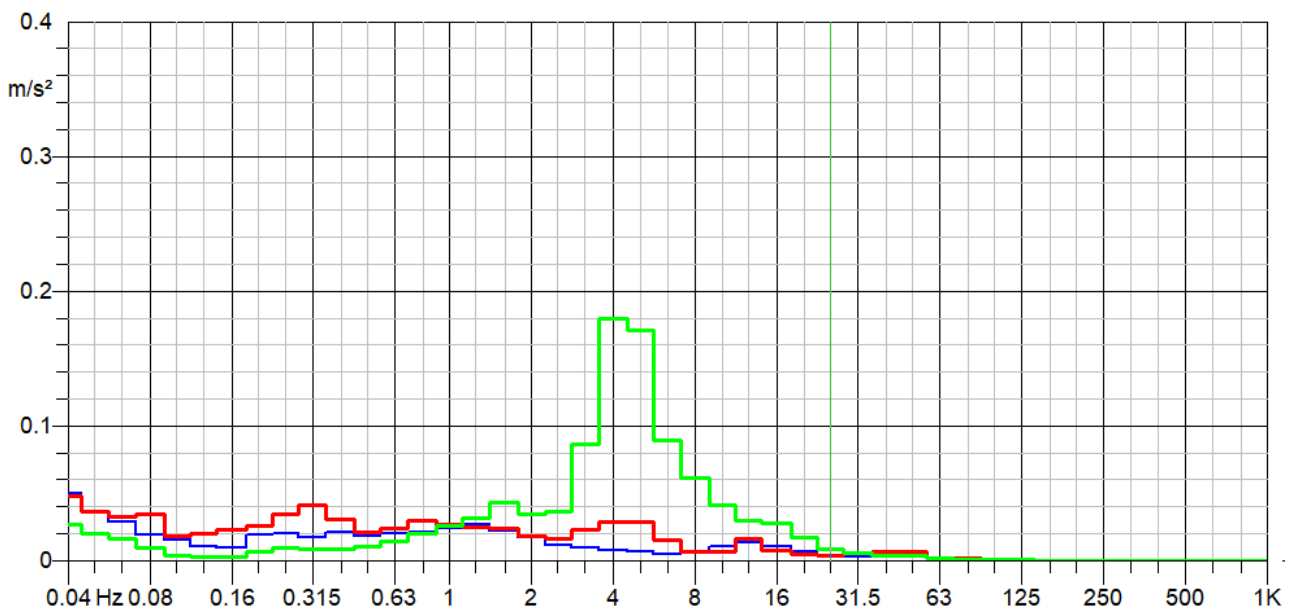


Fig. 359: spettro in frequenza della misura registrata per ciascun asse di sollecitazione

### Operatore 8

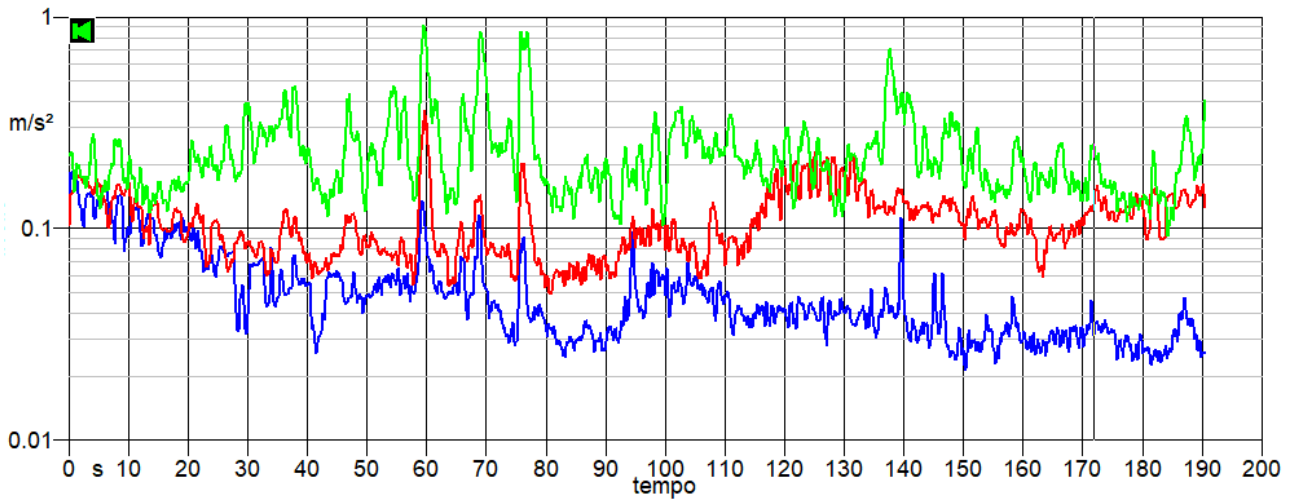


Fig. 360: Time History della misurazione effettuata

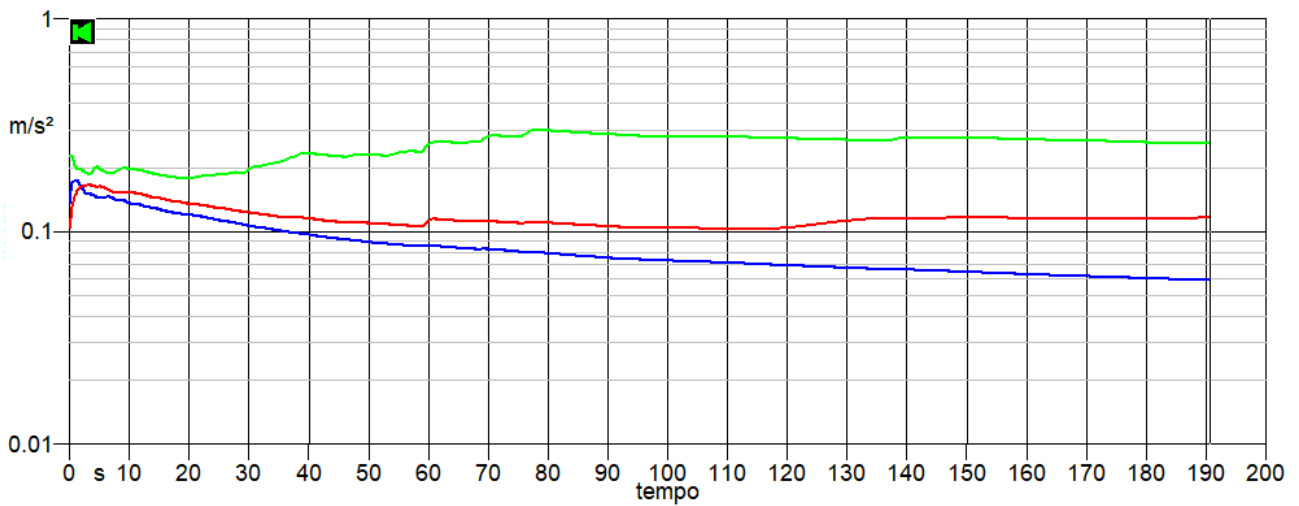


Fig. 361: visualizzazione del livello equivalente lungo i tre assi x, y e z

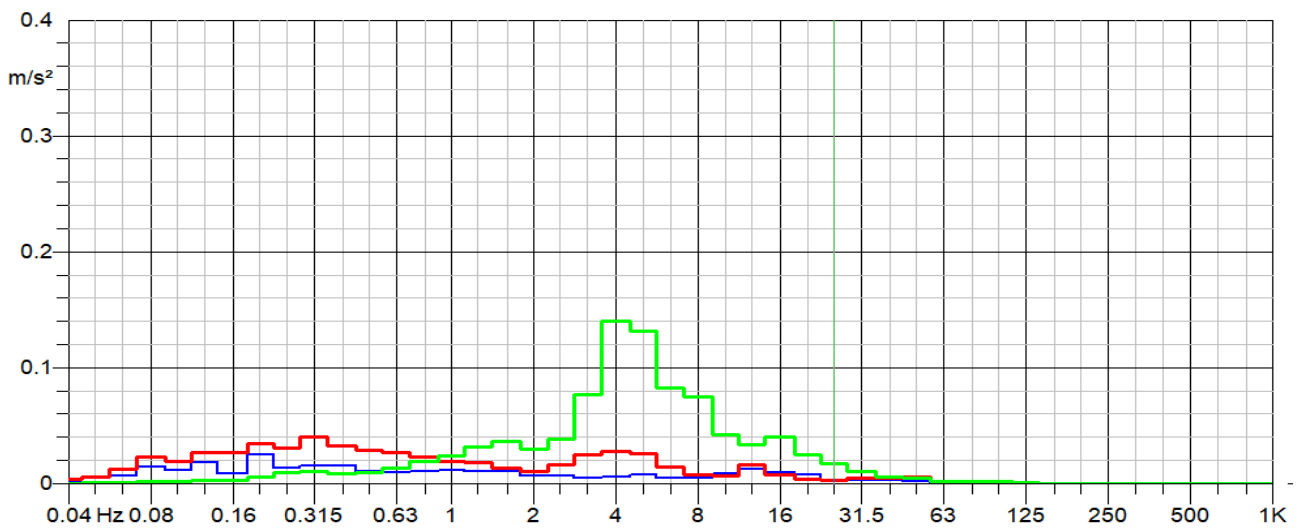


Fig. 362: spettro in frequenza della misura registrata per ciascun asse di sollecitazione

### Operatore 9

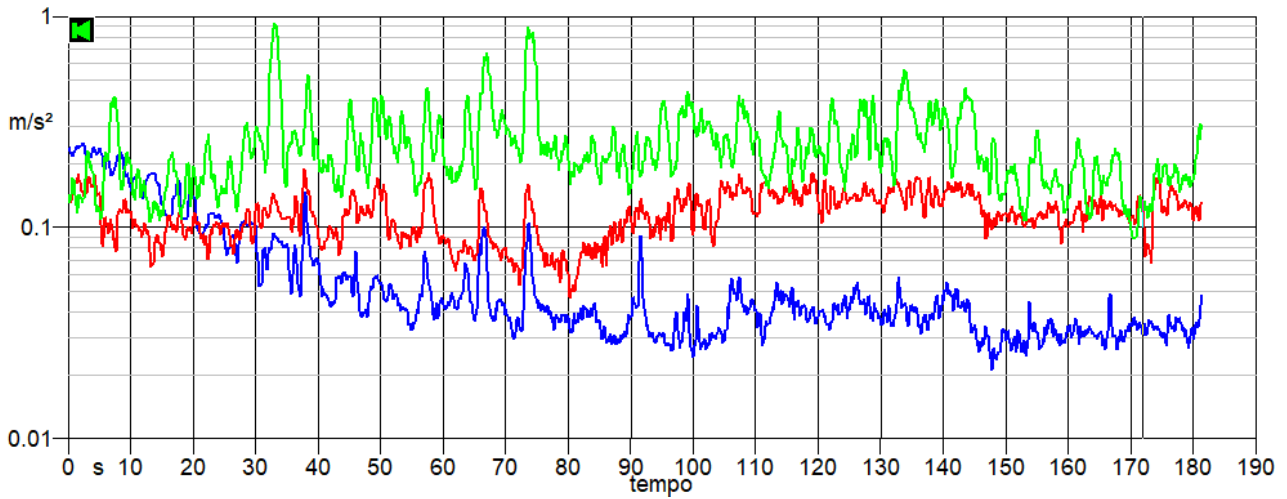


Fig. 363 Time History della misurazione effettuata

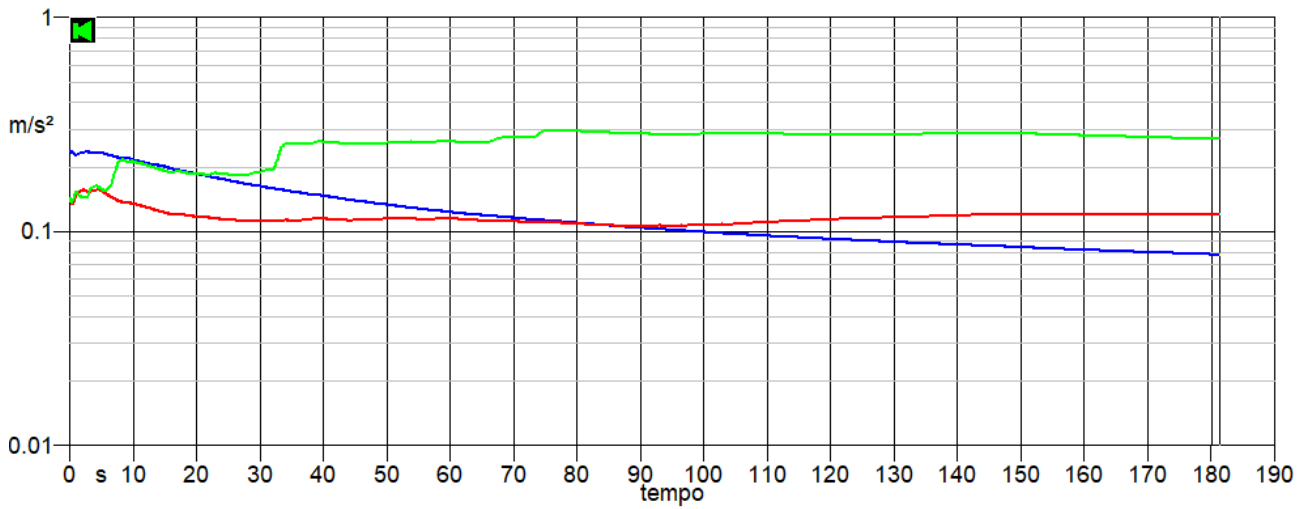


Fig. 364: visualizzazione del livello equivalente lungo i tre assi x, y e z

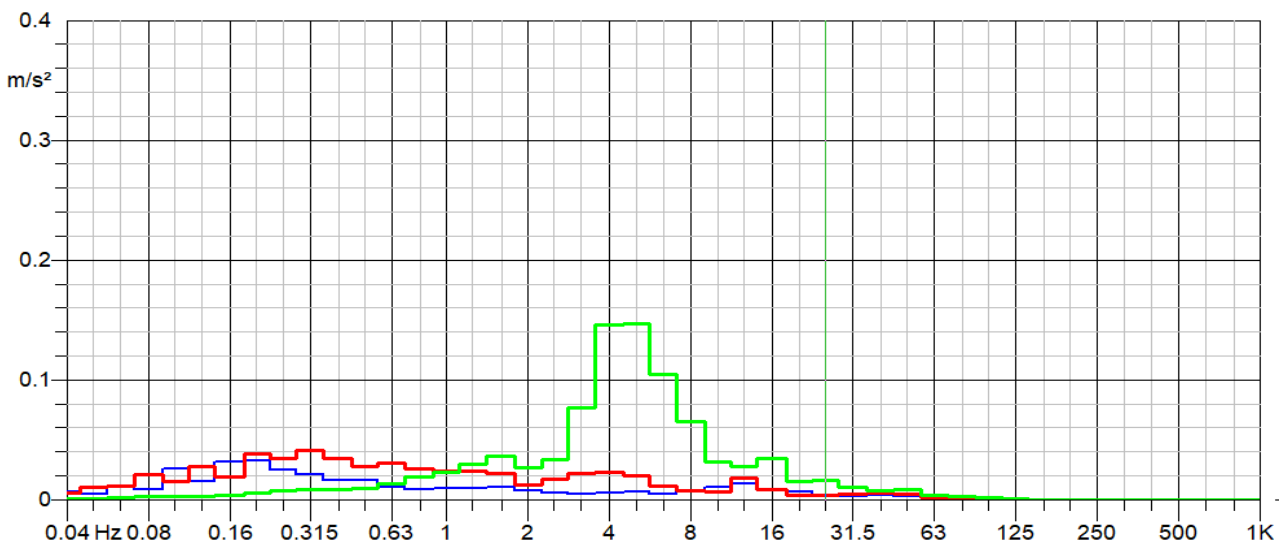


Fig. 365: spettro in frequenza della misura registrata per ciascun asse di sollecitazione

**Operatore 10**

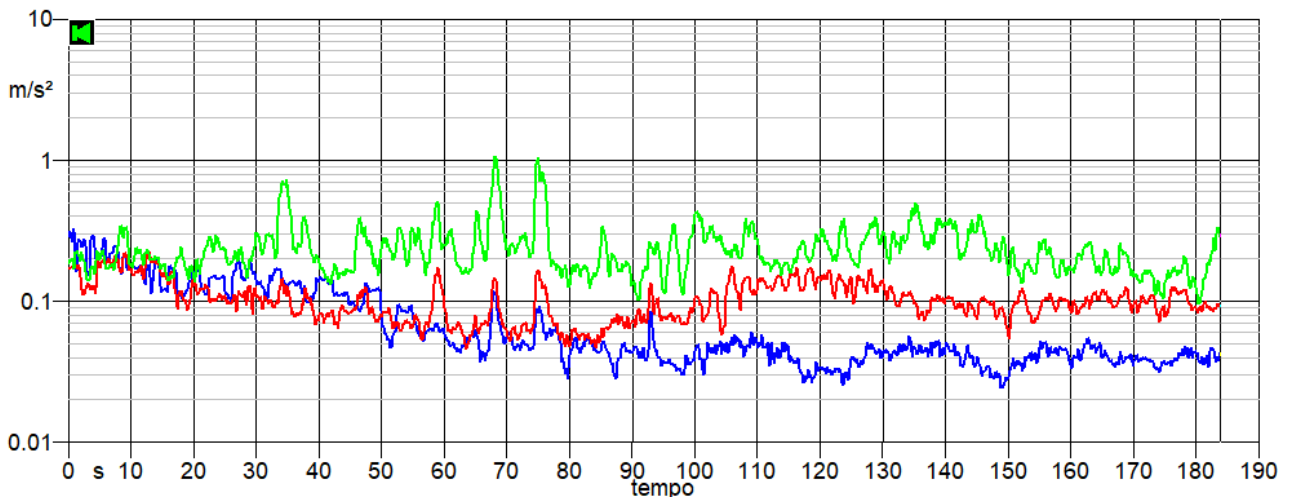


Fig. 366: Time History della misurazione effettuata

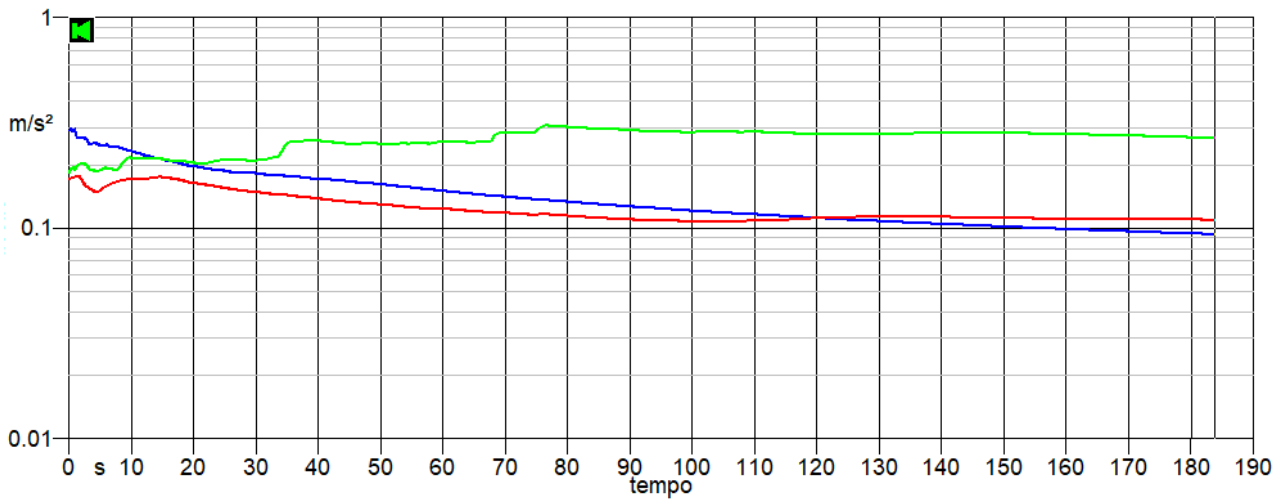


Fig. 367: visualizzazione del livello equivalente lungo i tre assi x, y e z

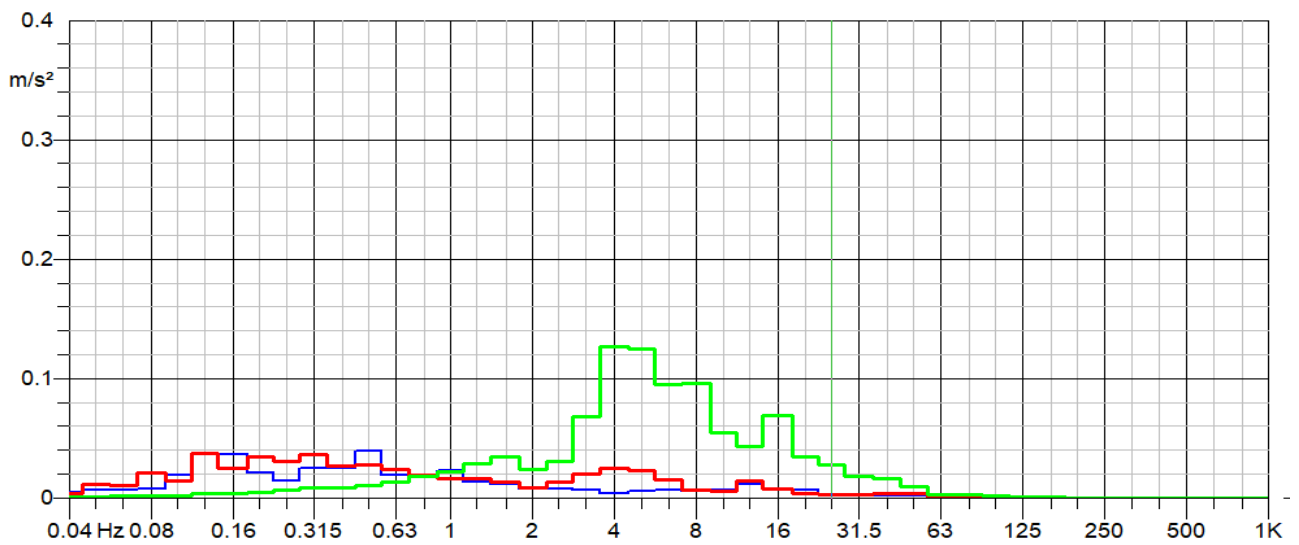


Fig. 368: spettro in frequenza della misura registrata per ciascun asse di sollecitazione

## Operatore 11

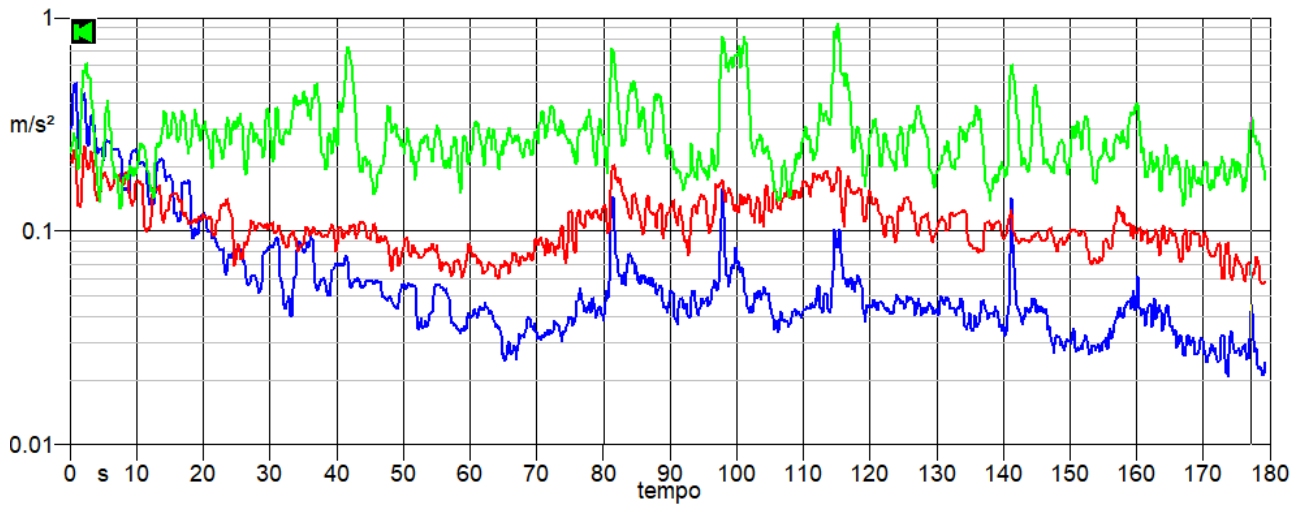


Fig. 369: Time History della misurazione effettuata

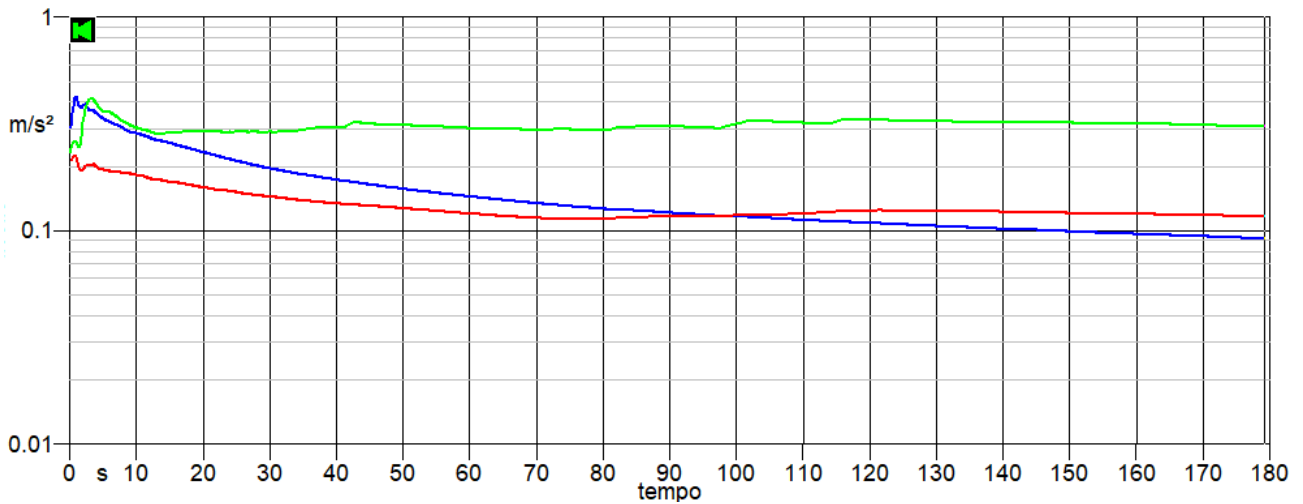


Fig. 370: visualizzazione del livello equivalente lungo i tre assi x, y e z

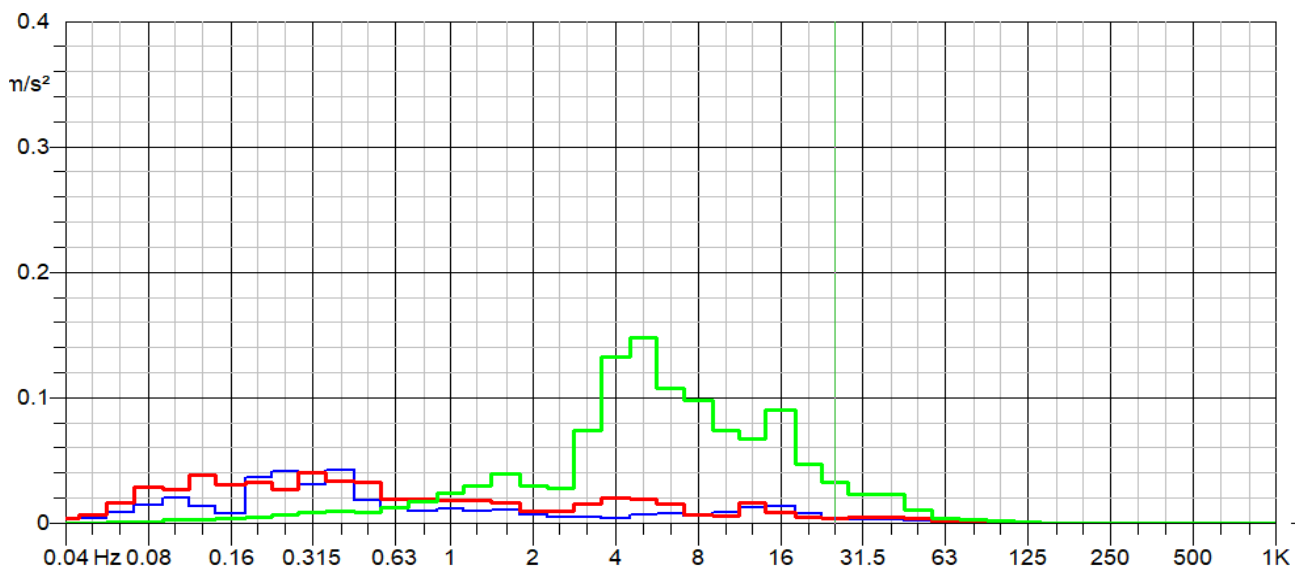


Fig. 371: spettro in frequenza della misura registrata per ciascun asse di sollecitazione

## Operatore 12

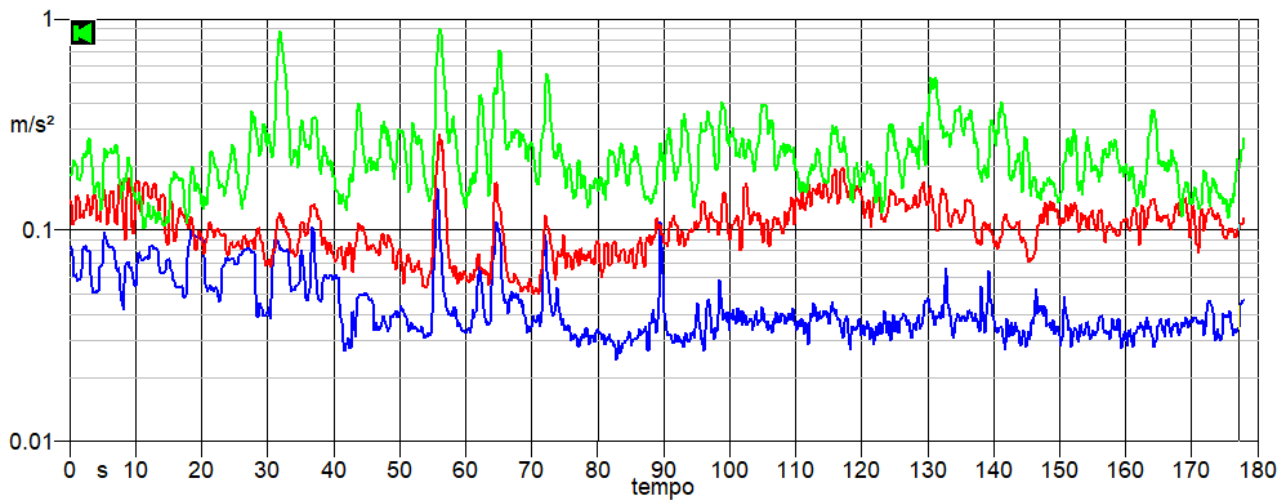


Fig. 372: Time History della misurazione effettuata

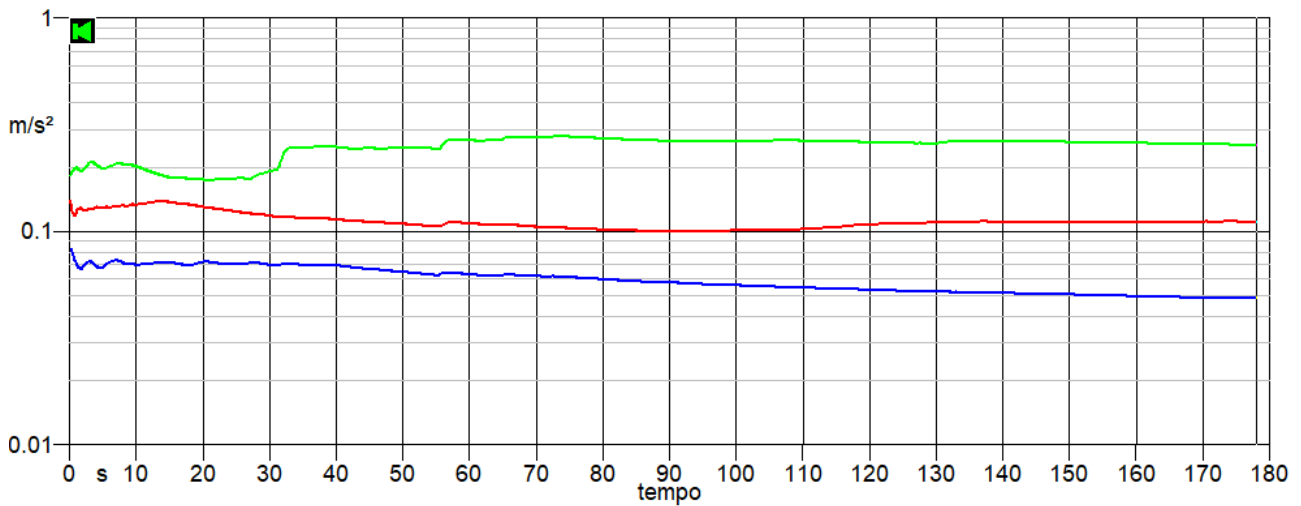


Fig. 373: visualizzazione del livello equivalente lungo i tre assi x, y e z

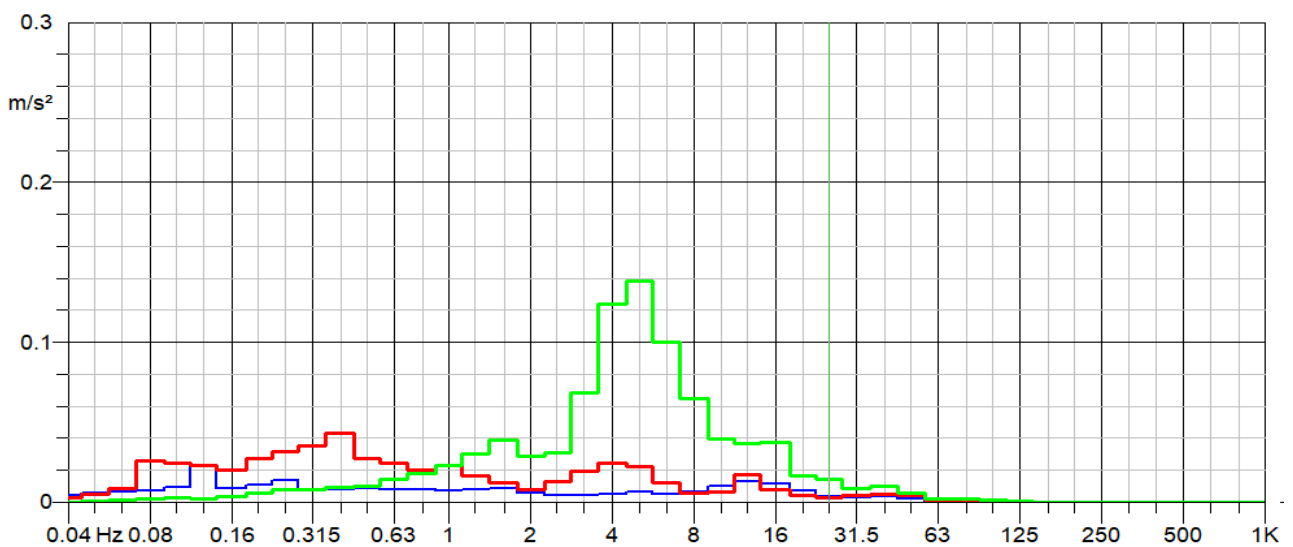


Fig. 374: spettro in frequenza della misura registrata per ciascun asse di sollecitazione

### Operatore 13

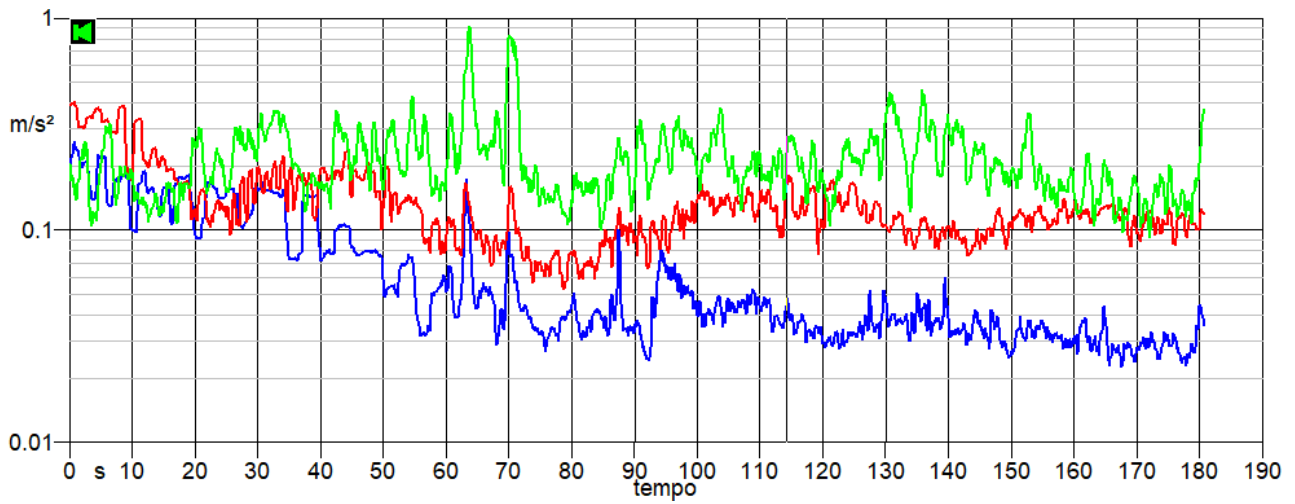


Fig. 375: Time History della misurazione effettuata

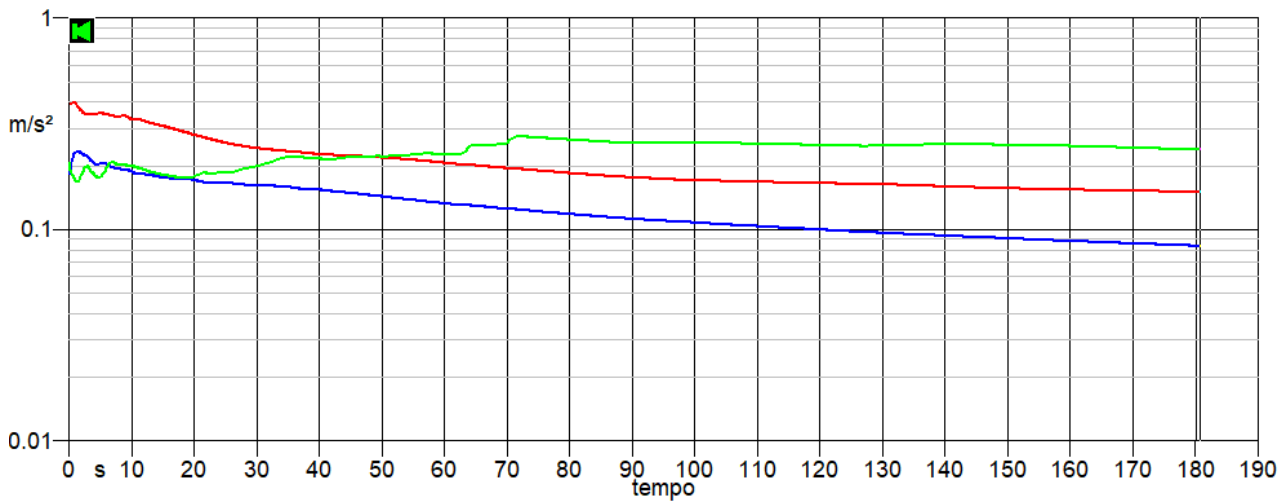


Fig. 376: visualizzazione del livello equivalente lungo i tre assi x, y e z

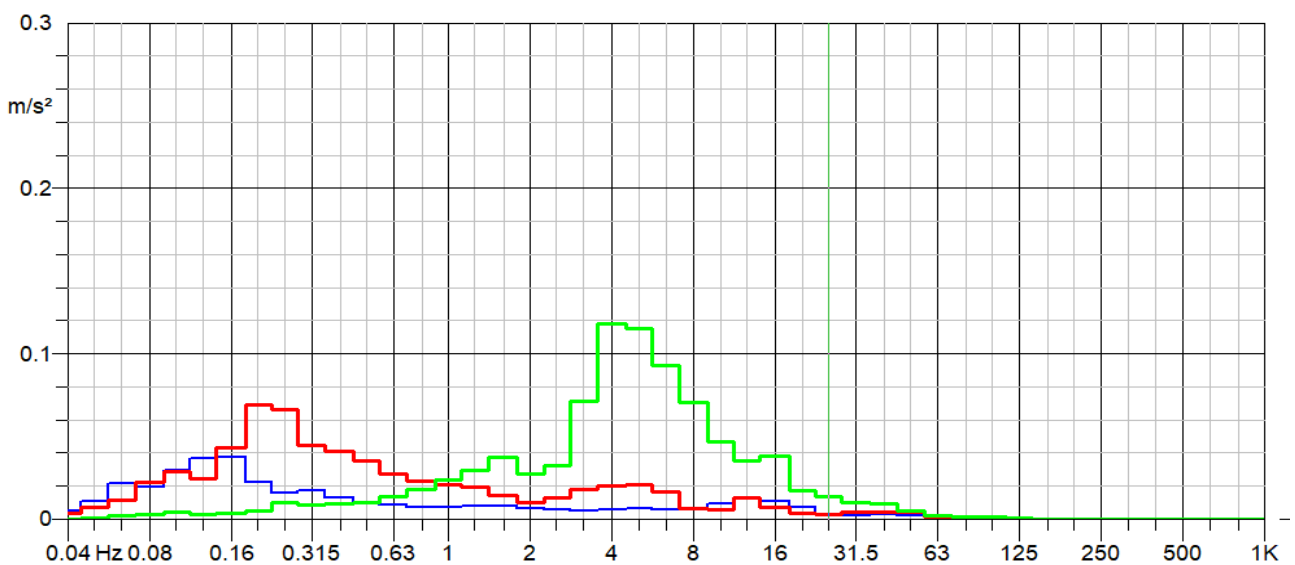


Fig. 377: spettro in frequenza della misura registrata per ciascun asse di sollecitazione

## Operatore 14

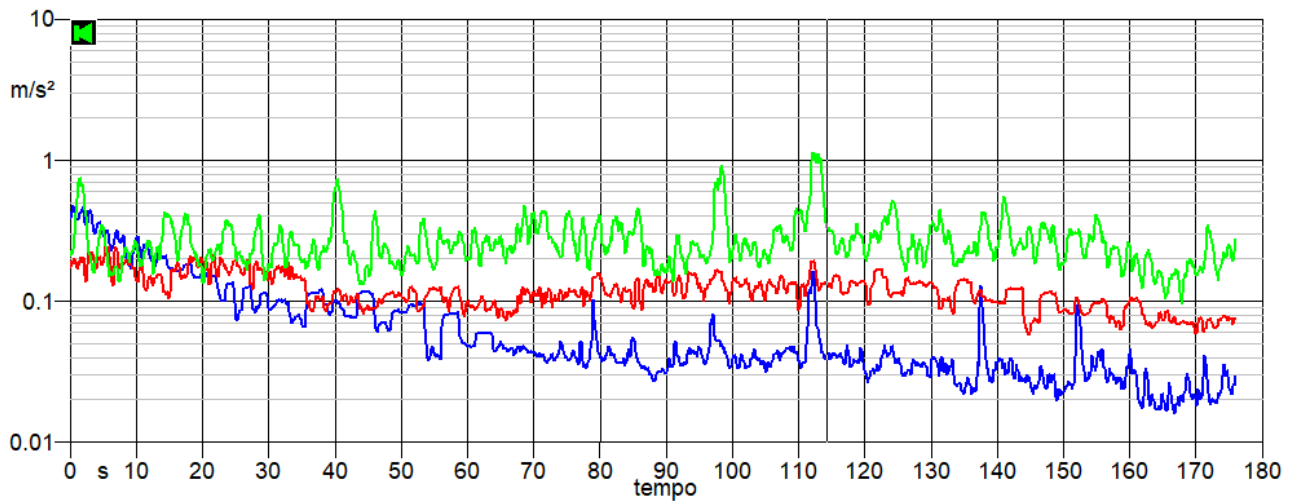


Fig. 378: Time History della misurazione effettuata

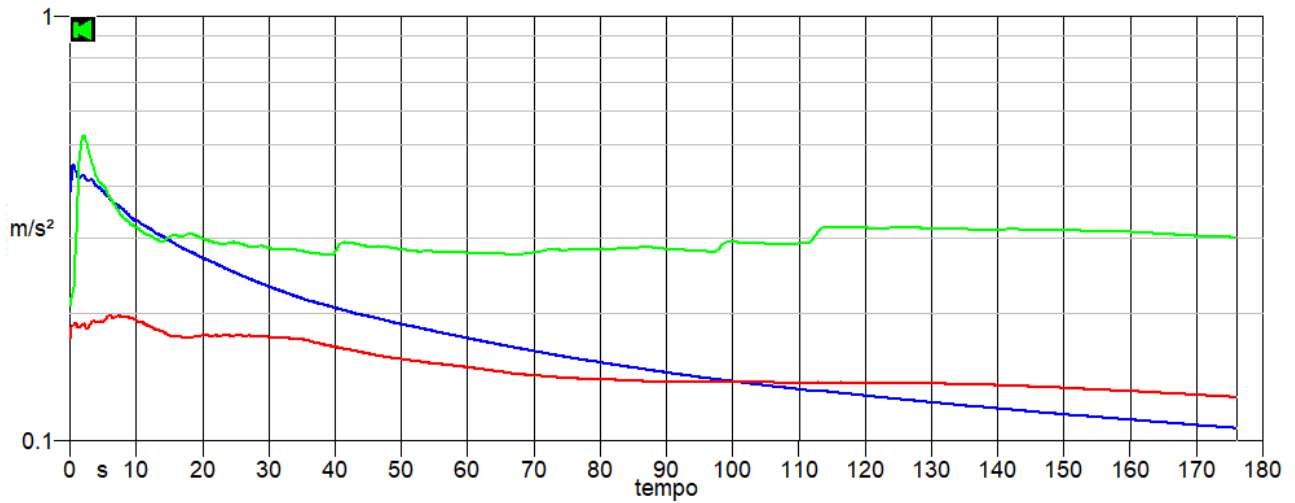


Fig. 379: visualizzazione del livello equivalente lungo i tre assi x, y e z

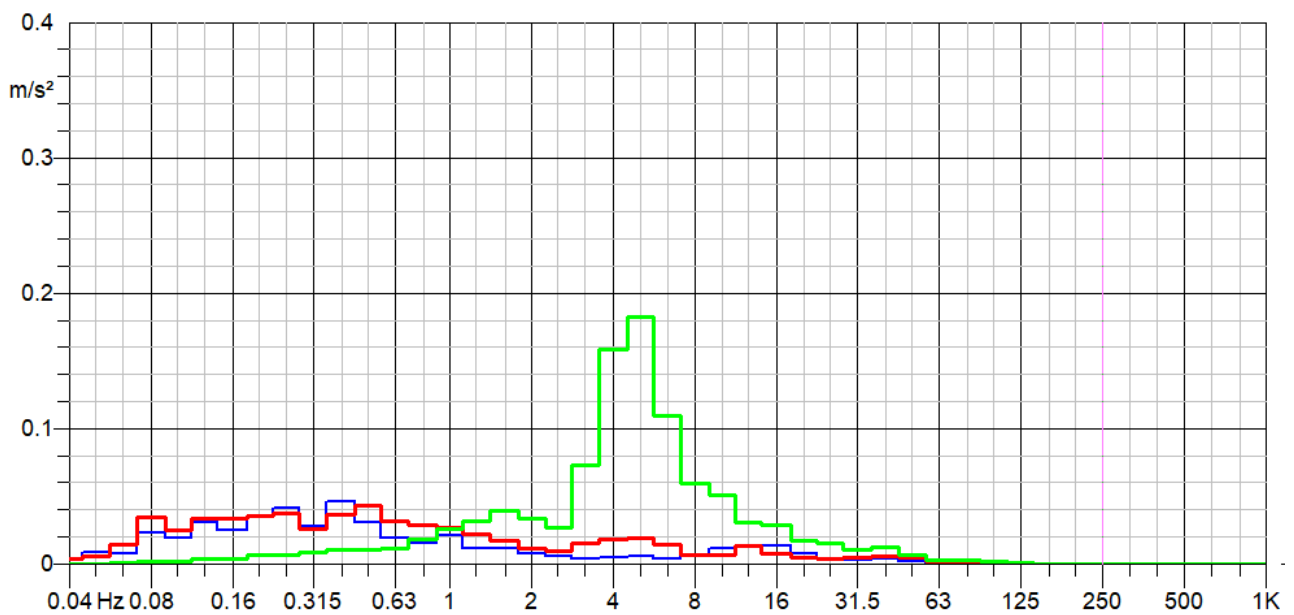


Fig. 380: spettro in frequenza della misura registrata per ciascun asse di sollecitazione



- *Appendice E: Risultati misurazioni in ambiente urbano svolte sui mezzi pubblici*

2 GIORNATA: 06/06/2017 Linea 46 P.za Venezia – Stz FS Monte Mario



Fig. 381: percorso linea 46

Di questa linea è stata effettuata la misura sia con il Modello Citaro sia con l'Urbanway. E' possibile vedere per entrambe le vetture l'andamento delle time-history con relativo running Leq e la determinazione dei vari metodi

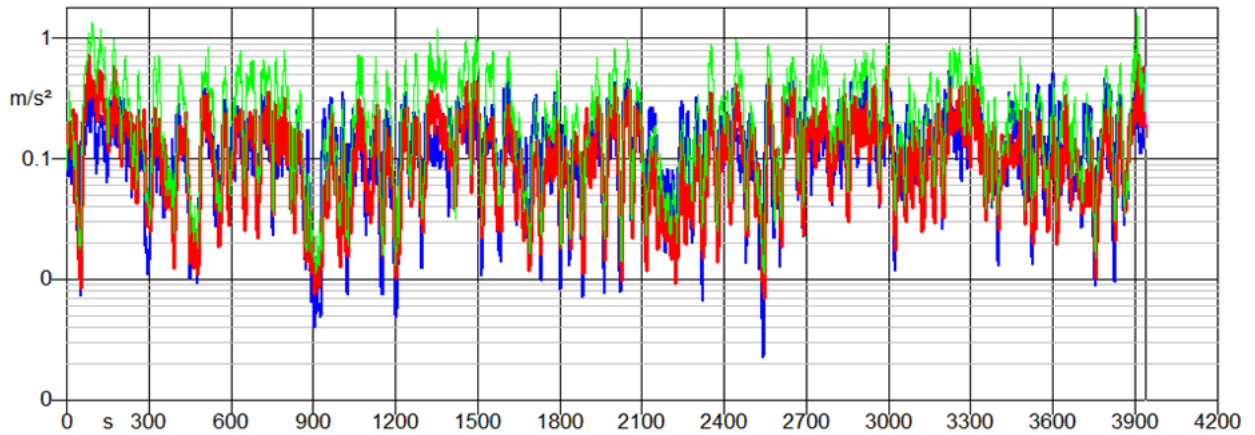


Fig. 382: time -history e running Leq andata linea 46 Citaro

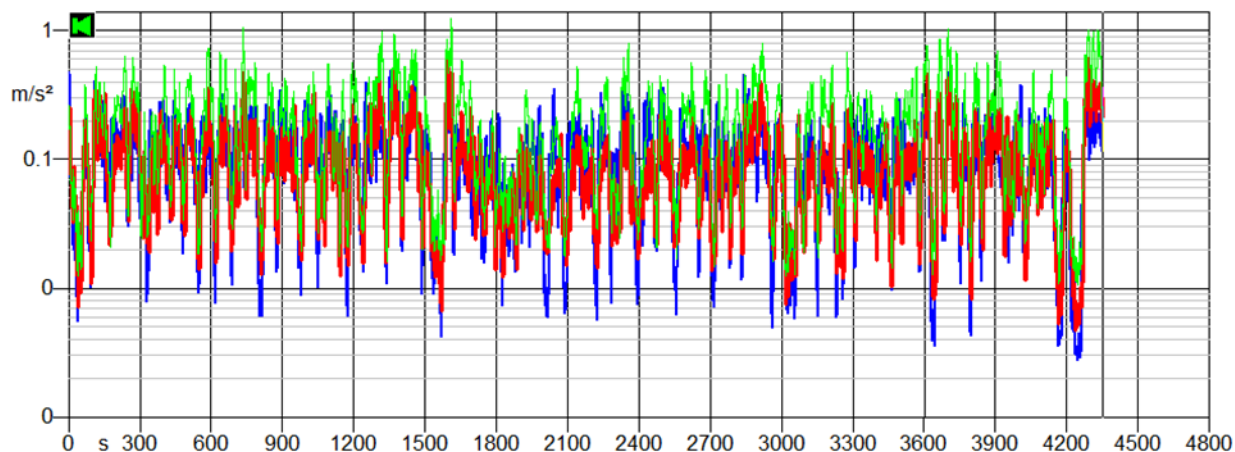


Fig. 383: time -history e running Leq ritorno linea 46 Citaro

Tabella 131: dati ricavati nella misura linea 46 Citaro

<b>DATI LINEA</b>				<b>Leq PONDERATA</b>		
<i>n vettura</i>	<i>modello</i>	<i>tratta</i>	<i>tempo di misura [s]</i>	$A_{wx}$	$A_{wy}$	$A_{wz}$
7527	Mercedes urbano Citaro	P.zza Venezia - St. Monte M.	3644	0.2058	0.1694	0.369
7528	Mercedes urbano Citaro	St. Monte m. - Venezia	3450	0.2058	0.1666	0.347
<b>A(8)</b>						
<b>METODO A: ASSE PIU' SOLLECITATO</b>			<b>METODO B: SOMMA VETTORIALE</b>			
$A(8)$	$A(8)_{TOT}$	$A(8)_{nelle\ 6h}$	$A_{wSUM}$	$A(8)$	$A(8)_{TOT}$	$A(8)_{nelle\ 6h}$
0.13	0.18	0.32	0.46	0.16	0.22	0.40
0.12			0.44	0.15		
<b>VDV</b>						
<i>Max peak</i>	<i>FC A</i>	<i>FC B</i>	<i>VDV A</i>	<i>VDV TOT A</i>	<i>VDV B</i>	<i>VDV TOT B</i>
10.70	29.00	63.70	4.01	6.17	4.01	6.17
9.00	25.94	59.42	3.72		3.72	

Tabella 132: confronto metodi C e C' per la linea 46 Citaro

<b>METODO C</b>			
<i>BMI</i>	<i>Sc</i>	<i>K<sub>i</sub></i>	<i>A(8) BMI</i>
$peso/h^2$	$h^2/peso$	$BMI * Sc$	$A_{w\ sum} * radq(Te/8) * K_i$
0.002188035	318	0.695438	0.27
<b>METODO C'</b>			
<i>BMI</i>	<i>Sc</i>	<i>K<sub>i</sub></i>	<i>A(8) BMI</i>
$peso/h^2$	$h^2/peso$	$BMI * Sc$	$A_{w\ sum} * radq(Te/8) * K_i$
0.002188035	318	0.695438	0.27

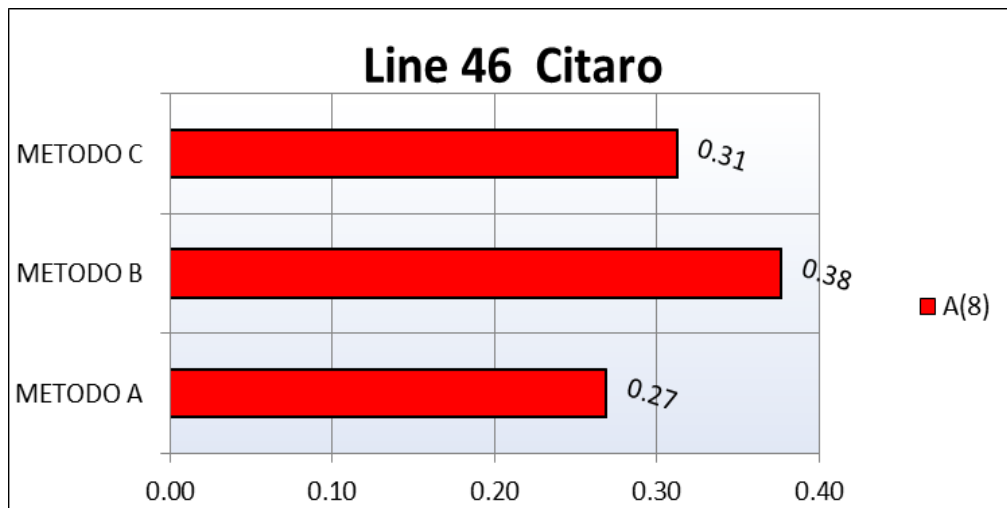


Fig. 384: confronto tra i 3 metodi linea 46 Citaro

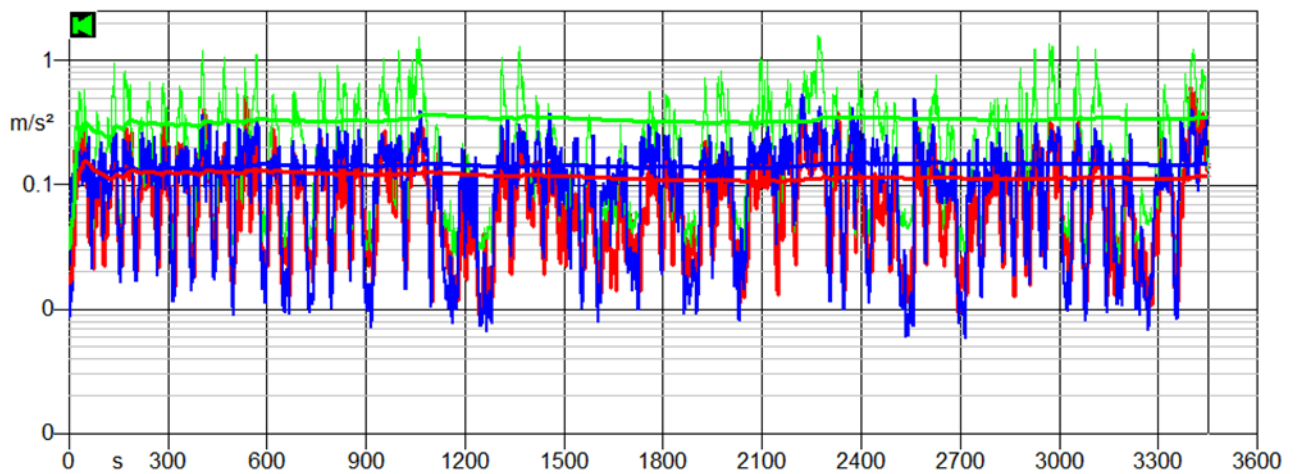


Fig. 385: time -history e Running Leq andata linea 46 Urbanway

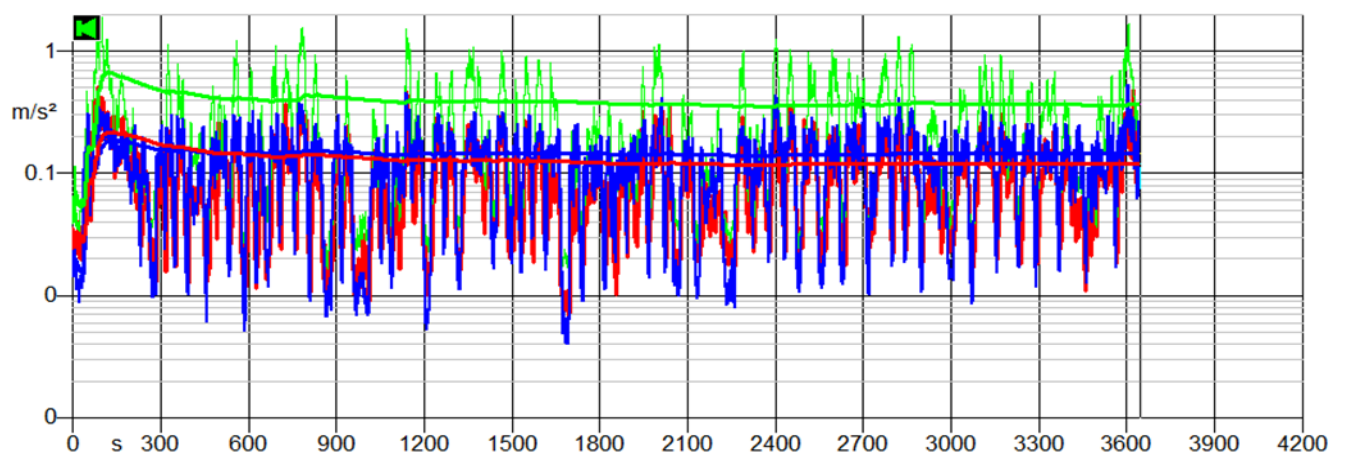


Fig. 386: time -history e Running Leq ritorno linea 46 Urbanway

Tabella 133 : dati ricavati nella misura linea 46 Urbanway

<b>DATI LINEA</b>				<b>Leq PONDERATA</b>		
<i>n vettura</i>	<i>modello</i>	<i>tratta</i>	<i>tempo di misura [s]</i>	$A_{wx}$	$A_{wy}$	$A_{wz}$
3398	Urbanway	P.zza Venezia - St. Monte M.	3939	0.2324	0.2268	0.338
3399	Urbanway	St. Monte m. - Venezia	4354	0.196	0.1834	0.266
<b>A(8)</b>						
<b>METODO A: ASSE PIU' SOLLECITATO</b>			<b>METODO B: SOMMA VETTORIALE</b>			
$A(8)$	$A(8)_{TOT}$	$A(8)_{nelle\ 6h}$	$A_{wSUM}$	$A(8)$	$A(8)_{TOT}$	$A(8)_{nelle\ 6h}$
0.13	0.16	0.27	0.47	0.17	0.23	0.38
0.10			0.38	0.15		
<b>VDV</b>						
<i>Max peak</i>	<i>FC A</i>	<i>FC B</i>	<i>VDV A</i>	<i>VDV TOT A</i>	<i>VDV B</i>	<i>VDV TOT B</i>
12.10	35.80	76.38	3.75	5.27	3.75	5.27
11.10	41.73	110.42	3.03		3.03	

Tabella 134: confronto metodi C e C'per linea 46 Urbanway

<b>METODO C</b>			
<i>BMI</i>	<i>Sc</i>	<i>K<sub>i</sub></i>	<i>A(8) BMI</i>
$peso/h^2$	$h^2/peso$	$BMI * Sc$	$A_{w\ sum} * radq(Te/8) * K_i$
0.002188035	393	0.85908425	0.44
<b>METODO C'</b>			
<i>BMI</i>	<i>Sc</i>	<i>K<sub>i</sub></i>	<i>A(8) BMI</i>
$peso/h^2$	$h^2/peso$	$BMI * Sc$	$A_{w\ sum} * radq(Te/8) * K_i$
0.002188035	393	0.85908425	0.31

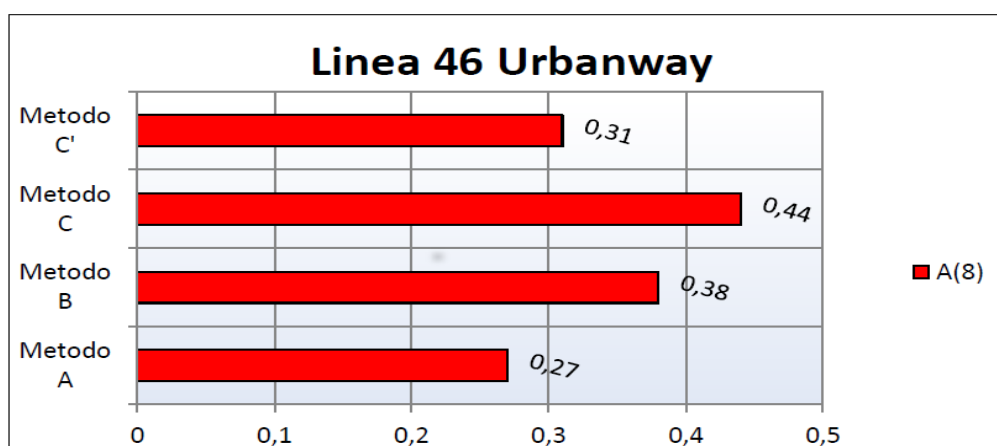


Fig. 387: confronto delle A(8) linea 46 Urbanway

3 GIORNATA : 07/06/2017 Linea 772 Ballarin – Carucci



Fig. 388: percorso linea 772

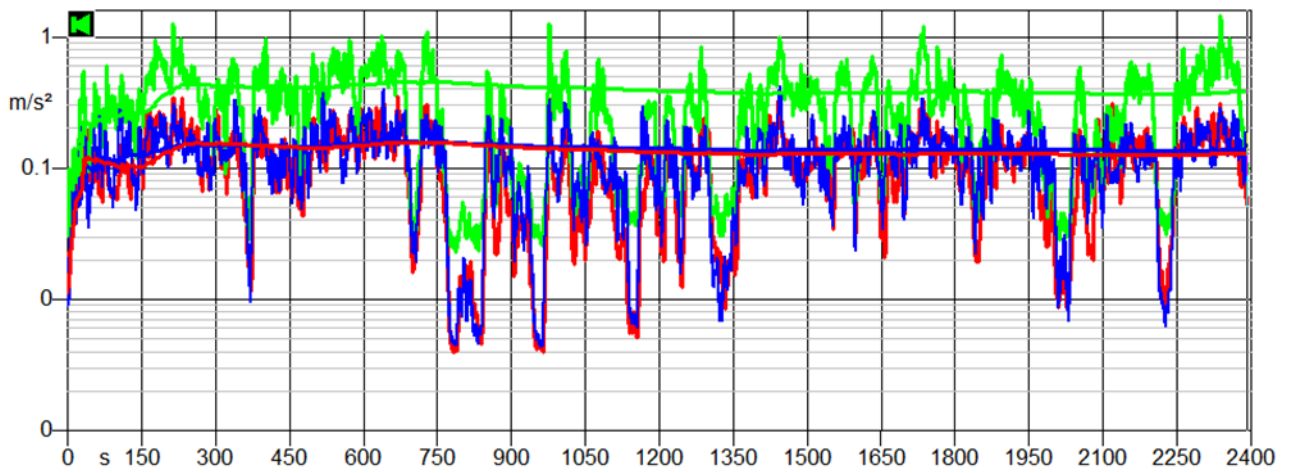


Fig. 389: time -history e Running Leq andata linea 772

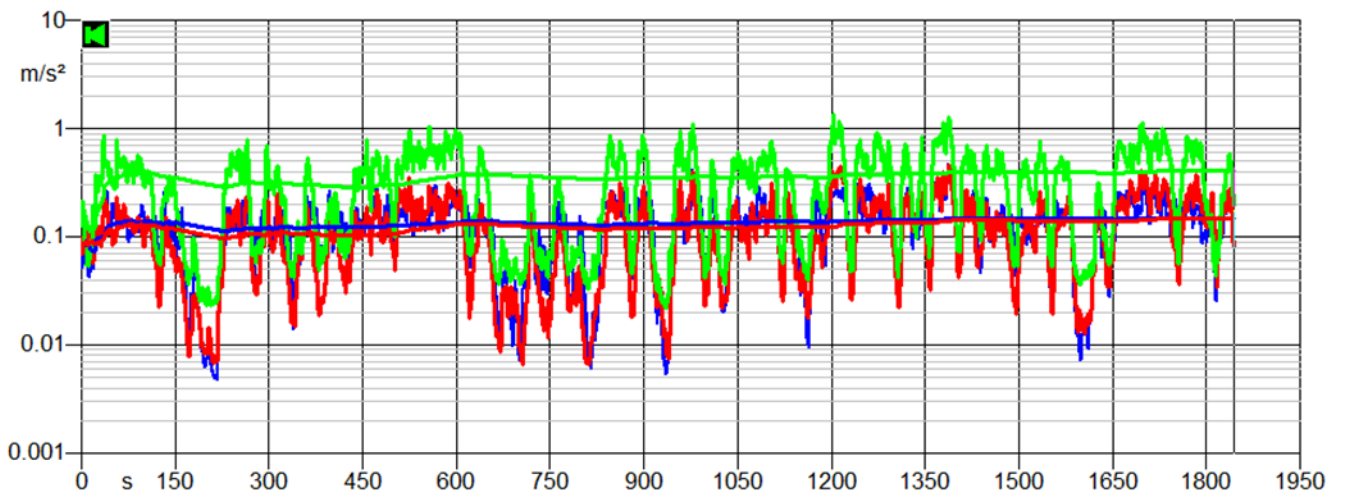


Fig. 390: time -history e Running Leq ritorno linea 772

Tabella 135: risultati ottenuti per la linea 722

<b>DATI LINEA</b>				<b>Leq PONDERATA</b>		
<i>n vettura</i>	<i>modello</i>	<i>tratta</i>	<i>tempo di misura [s]</i>	$A_{wx}$	$A_{wy}$	$A_{wz}$
4320	City Class Cursor	Carucci - Ballarin	2392	0.1932	0.1806	0.38
4321	City Class Cursor	Ballarin - Carucci	1844	0.15	0.149	0.409
<b>A(8)</b>						
<b>METODO A: ASSE PIU' SOLLECITATO</b>				<b>METODO B: SOMMA VETTORIALE</b>		
$A(8)$	$A(8)TOT$	$A(8)nelle\ 6h$	$A_{wSUM}$	$A(8)$	$A(8)TOT$	$A(8)nelle\ 6h$
0.11	0.15	0.35	0.46	0.13	0.18	0.42
0.10			0.46	0.12		
<b>VDV</b>						
<i>Max peak</i>	<i>FC A</i>	<i>FC B</i>	<i>VDV A</i>	<i>VDV TOT A</i>	<i>VDV B</i>	<i>VDV TOT B</i>
7.90	20.79	17.06	3.72	6.80	3.75	7.99
7.20	17.60	15.64	3.75		3.03	

Tabella 136: confronto metodi C e C' per la linea 722

<b>METODO C</b>			
<i>BMI</i>	<i>Sc</i>	<i>K<sub>i</sub></i>	<i>A(8) BMI</i>
$peso/h^2$	$h^2/peso$	$BMI * Sc$	$A_{w\ sum} * radq(Te/8) * K_i$
0.002188035	372	0.814342	0.52
<b>METODO C'</b>			
<i>BMI</i>	<i>Sc</i>	<i>K<sub>i</sub></i>	<i>A(8) BMI</i>
$peso/h^2$	$h^2/peso$	$BMI * Sc$	$A_{w\ sum} * radq(Te/8) * K_i$
0.002188035	372	0.814342	0.43

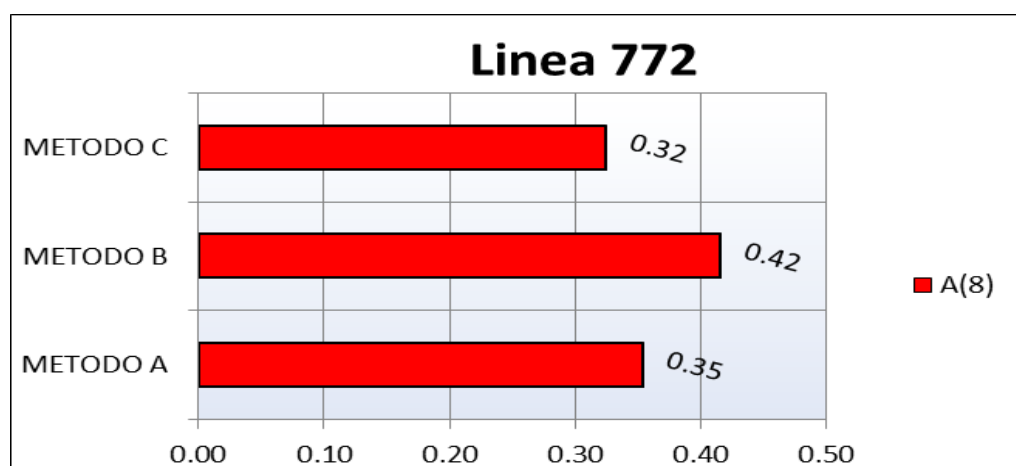


Fig. 391: confronto delle A(8) linea 772 Cursor



Linea 731 Alessandrini – Eroi di Rodi/Console

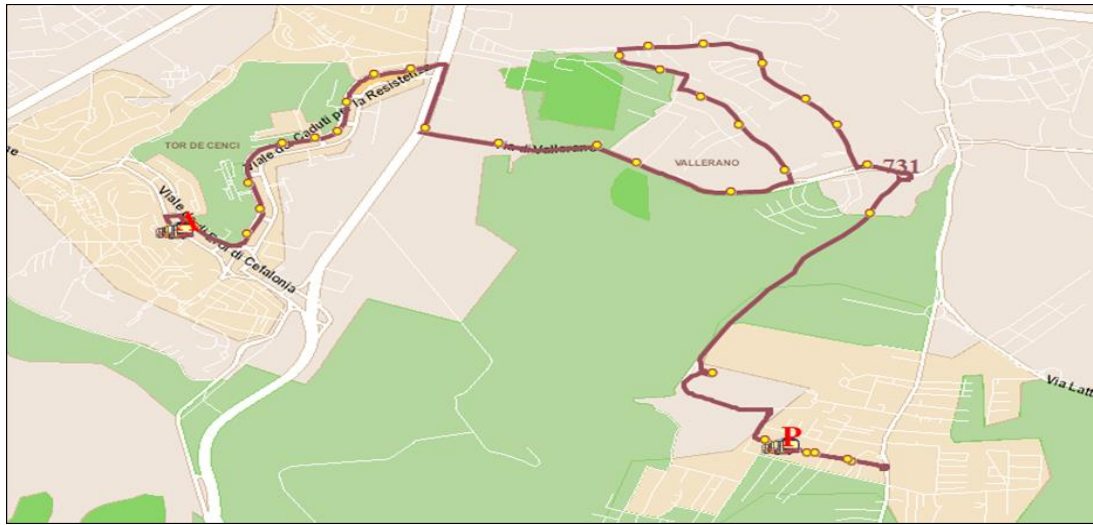


Fig. 392: percorso linea 731

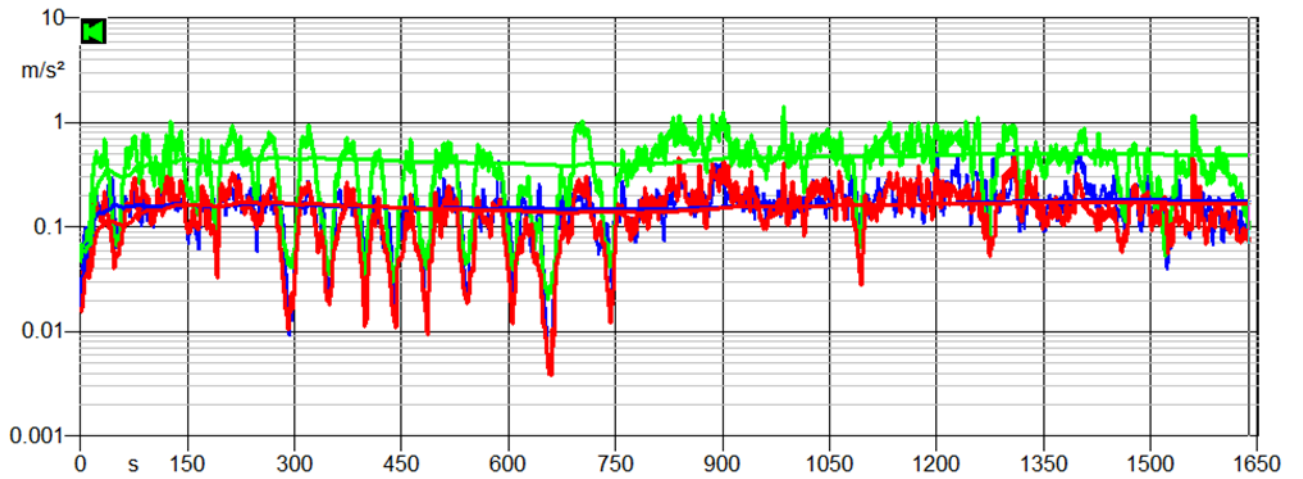


Fig. 393: time -history e Running Leq andata linea 731

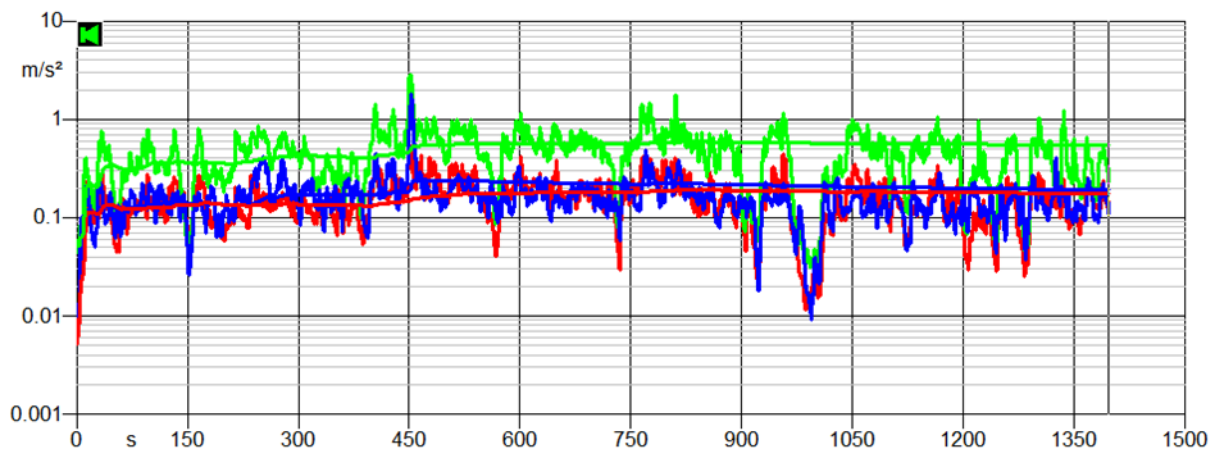


Fig. 394: time-history e Running Leq ritorno linea 731

Tabella 137: dati ricavati dalla linea 731

<b>DATI LINEA</b>				<b>Leq PONDERATA</b>		
<i>n</i> <i>vettura</i>	<i>modello</i>	<i>tratta</i>	<i>tempo di misura</i> [s]	$A_{wx}$	$A_{wy}$	$A_{wz}$
4320	City Class Cursor	Alessandrini - Eroi di Lodi	1397	0.2702	0.2464	0.504
4320	City Class Cursor	Eroi di Lodi- Alessandrini	1638	0.2492	0.2352	0.489
<b>A(8)</b>						
<b>METODO A: ASSE PIU' SOLLECITATO</b>			<b>METODO B: SOMMA VETTORIALE</b>			
$A(8)$	$A(8)_{TOT}$	$A(8)_{nelle\ 6h}$	$A_{wSUM}$	$A(8)$	$A(8)_{TOT}$	$A(8)_{nelle\ 6h}$
0.11	0.16	0.44	0.62	0.14	0.20	0.54
0.12			0.60	0.14		
<b>VDV</b>						
<i>Max</i> <i>peak</i>	<i>FC A</i>	<i>FC B</i>	<i>VDV A</i>	<i>VDV TOT</i> <i>A</i>	<i>VDV B</i>	<i>VDV TOT</i> <i>B</i>
25.30	50.20	40.63	4.31	8.53	5.33	10.48
8.60	17.59	14.40	4.36		5.32	

Tabella 138: confronto metodologie metodi C e C' per la linea 731

<b>METODO C</b>			
<i>BMI</i>	<i>Sc</i>	<i>K<sub>i</sub></i>	<i>A(8) BMI</i>
$\text{peso}/h^2$	$h^2/\text{peso}$	$BMI * Sc$	$A_{w\ sum} * \text{radq}(Te/8) * K_i$
0.002188035	372	0.81434237	0.66
<b>METODO C'</b>			
<i>BMI</i>	<i>Sc</i>	<i>K<sub>i</sub></i>	<i>A(8) BMI</i>
$\text{peso}/h^2$	$h^2/\text{peso}$	$BMI * Sc$	$A_{w\ sum} * \text{radq}(Te/8) * K_i$
0.002188035	372	0.81434237	0.54

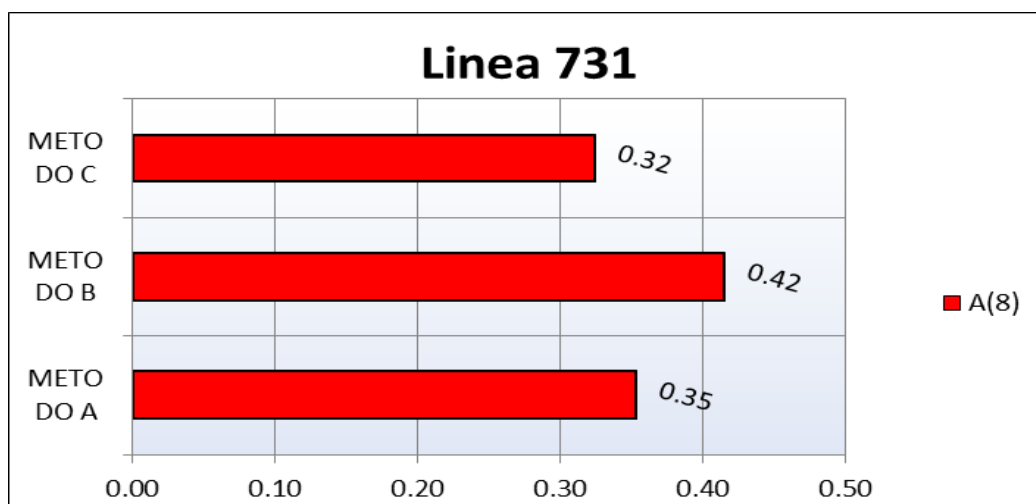


Fig. 395: confronto delle A(8) linea 731 Cursor



4 GIORNATA : 08/06/2017 Linea 69 Clodio – L.go Pugliese

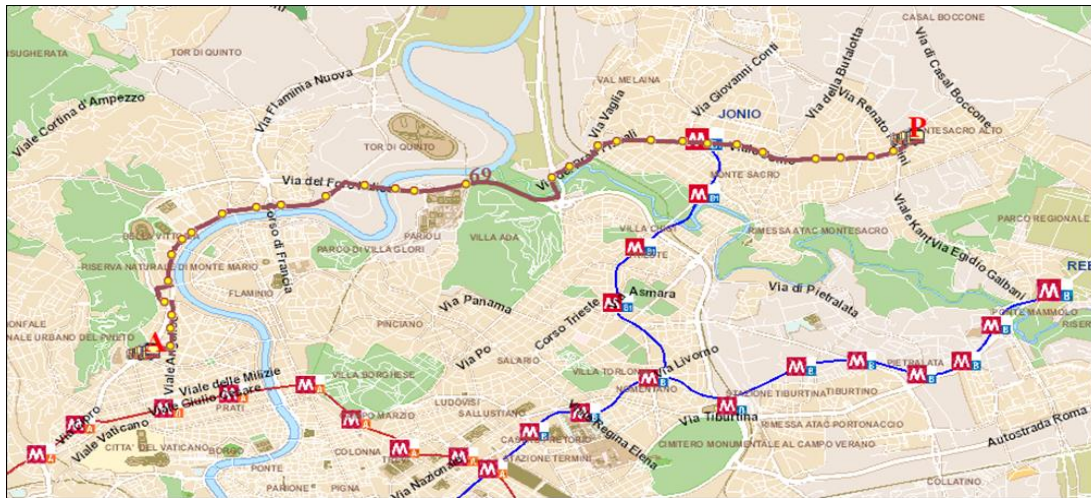


Fig. 396: percorso linea 69

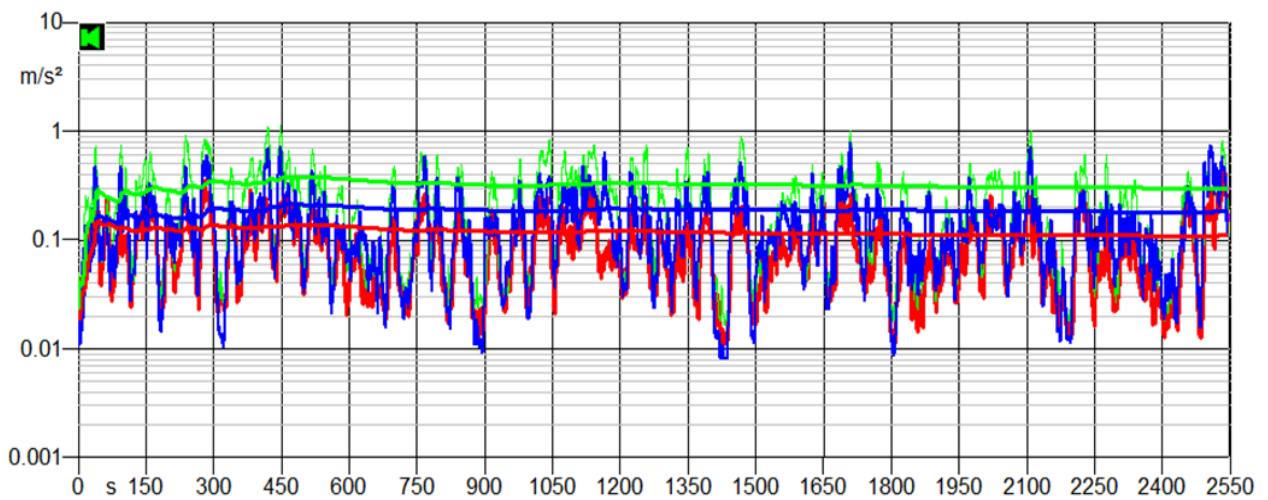


Fig. 397: time -history e Running Leq andata linea 69

Tabella 139: dati ricavati dalla linea 69

DATI LINEA				Leq PONDERATA		
<i>n</i> vettura	modello	tratta	tempo di misura [s]	$A_{wx}$	$A_{wy}$	$A_{wz}$
558	Urbanway 18 metri	L.go Pugliese - Clodio	2548	0.259	0.1568	0.126
<b>A(8)</b>						
<b>METODO A : ASSE PIU' SOLLECITATO</b>			<b>METODO B: SOMMA VETTORIALE</b>			
A(8)		A(8)nelle 6h	$A_{wSUM}$	A(8)	A(8)TOT	A(8)nelle 6h
0.077037686		0.23	0.33	0.10		0.29
<b>VDV</b>						
Max peak	FC A	FC B	VDV A	VDV TOT A	VDV B	VDV TOT B
9.80	37.84	29.88	2.58	2.58	3.26	5.65

Tabella 140: confronto metodi C e C' per la linea 69

<b>METODO C</b>			
<i>BMI</i>	<i>Sc</i>	<i>K<sub>i</sub></i>	<i>A(8) BMI</i>
<i>peso/h<sup>2</sup></i>	<i>h<sup>2</sup>/peso</i>	<i>BMI * Sc</i>	<i>A<sub>w sum</sub> * radq(Te/8) * K<sub>i</sub></i>
0.002188035	425	0.930674604	0.31
<b>METODO C'</b>			
<i>BMI</i>	<i>Sc</i>	<i>K<sub>i</sub></i>	<i>A(8) BMI</i>
<i>peso/h<sup>2</sup></i>	<i>h<sup>2</sup>/peso</i>	<i>BMI * Sc</i>	<i>A<sub>w sum</sub> * radq(Te/8) * K<sub>i</sub></i>
0.002188035	425	0.930674604	0.25

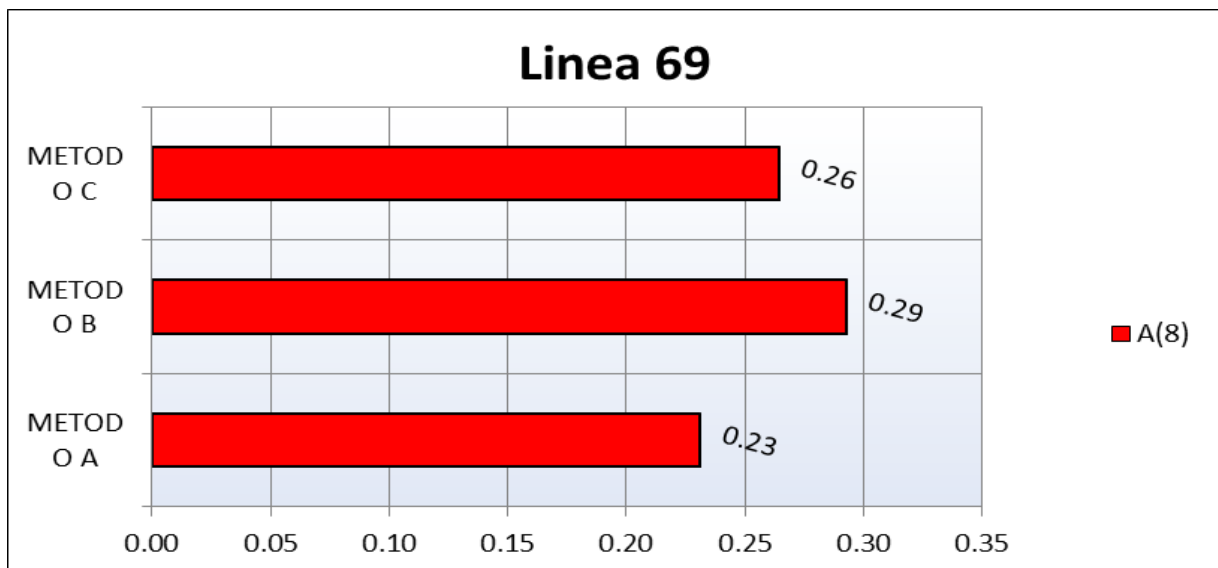


Fig. 398: confronto delle A(8) linea 69

## Linea 80 Porta di Roma – P.za Venezia

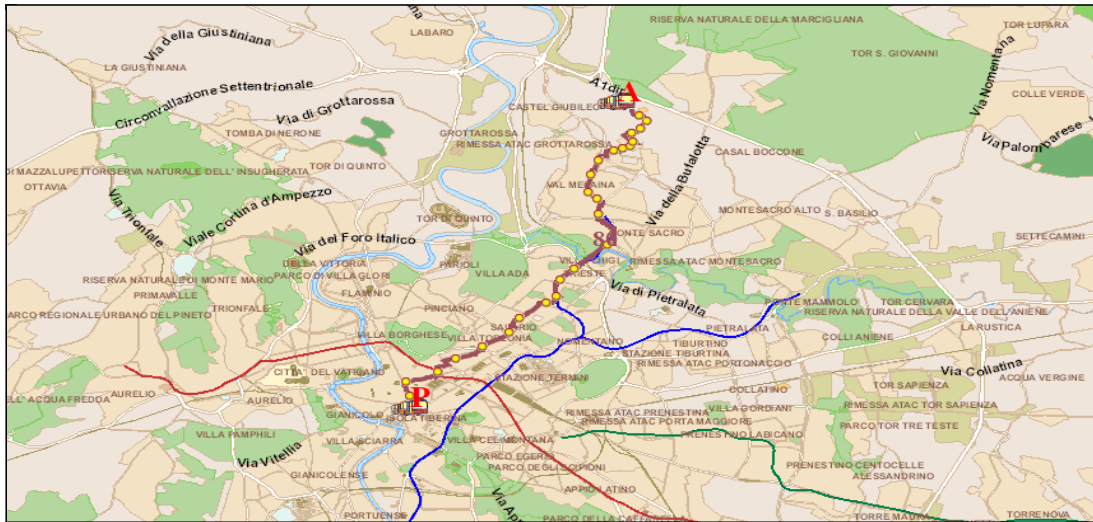


Fig. 399: percorso linea 80

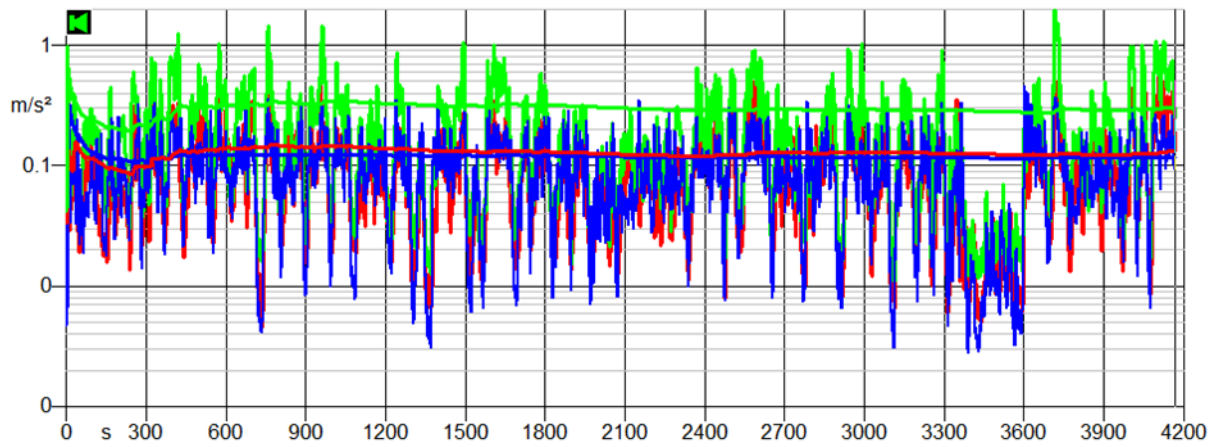


Fig. 400: time -history e Running Leq andata linea 80

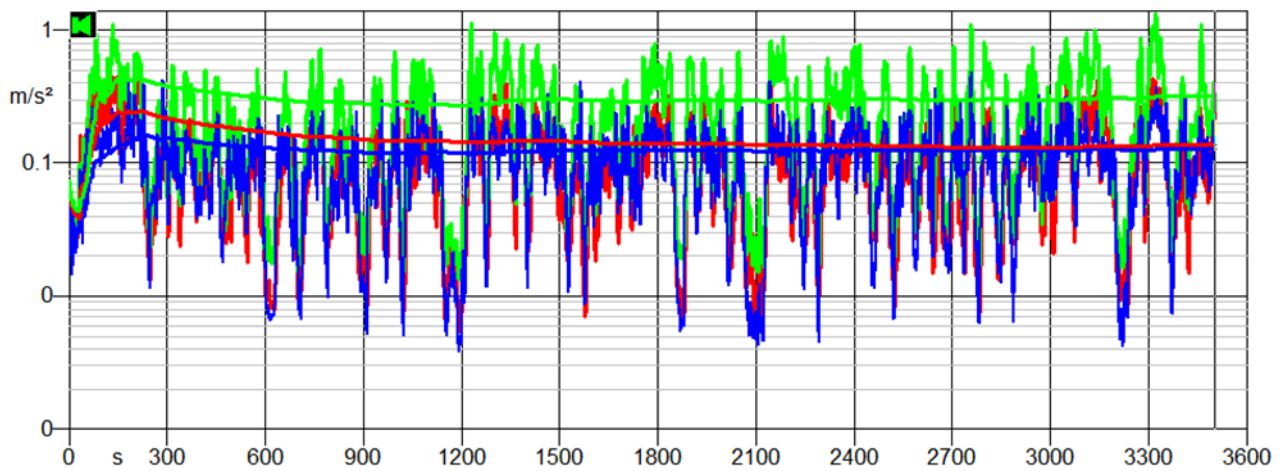


Fig. 401: time -history e Running Leq ritorno linea 80

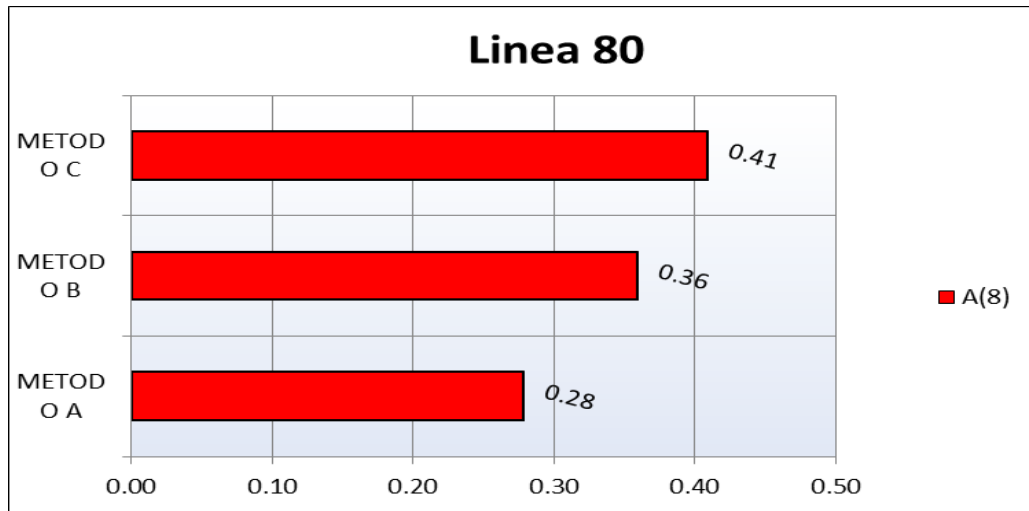


Fig. 402: confronto delle A(8) linea 80

Tabella 141: risultati ottenuti dalla linea 80

<b>DATI LINEA</b>				<b>Leq PONDERATA</b>		
<i>n</i> vettura	modello	tratta	tempo di misura [s]	$A_{wx}$	$A_{wy}$	$A_{wz}$
3092	Citelis 12 metri	Porta di Roma - P.zza Venezia	4170	0.1638	0.1848	0.306
3092	Citelis 12 metri	P.zza Venezia - Porta di Roma	3504	0.1778	0.1918	0.318
<b>A(8)</b>						
<b>METODO A: ASSE PIU' SOLLECITATO</b>			<b>METODO B: SOMMA VETTORIALE</b>			
A(8)	A(8)TOT	A(8)nelle 6h	$A_{wSUM}$	A(8)	A(8)TOT	A(8)nelle 6h
0.12	0.16	0.28	0.39	0.15	0.21	0.36
0.11			0.41	0.14		
<b>VDV</b>						
Max peak	FC A	FC B	VDV A	VDV TOT A	VDV B	VDV TOT B
25.30	82.68	64.34	3.44	5.37	4.42	6.93
29.90	94.03	72.62	3.43		4.43	

Tabella 142: confronto metodi C e C' per la linea 80

<b>METODO C</b>			
BMI	Sc	$K_i$	A(8) BMI
peso/h <sup>2</sup>	h <sup>2</sup> /peso	BMI * Sc	$A_{wsum} * radq(Te/8) * K_i$
0.002188035	372	0.814342	0.47
<b>METODO C'</b>			
BMI	Sc	$K_i$	A(8) BMI
peso/h <sup>2</sup>	h <sup>2</sup> /peso	BMI * Sc	$A_{wsum} * radq(Te/8) * K_i$
0.002188035	372	0.814342	0.37



5 GIORNATA: 09/06/2017 Linea 336 Quarrata – Conca D'oro

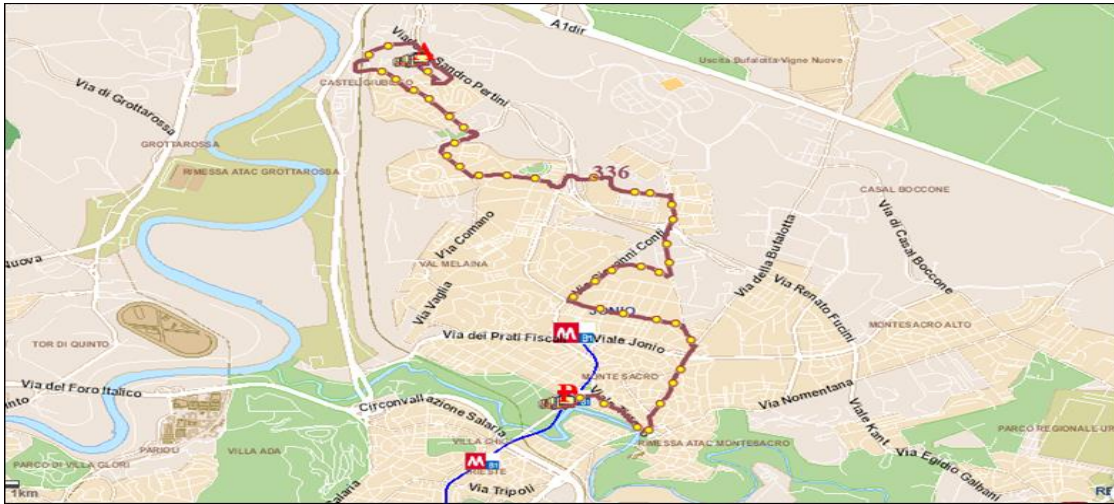


Fig. 403: percorso linea 336

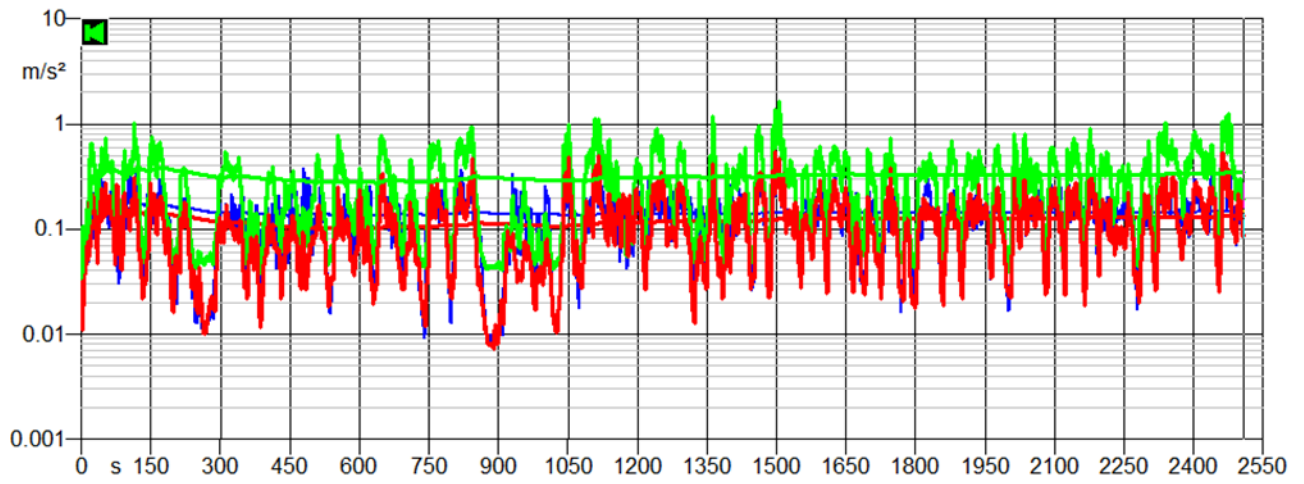


Fig. 404: time -history e Running Leq andata linea 336

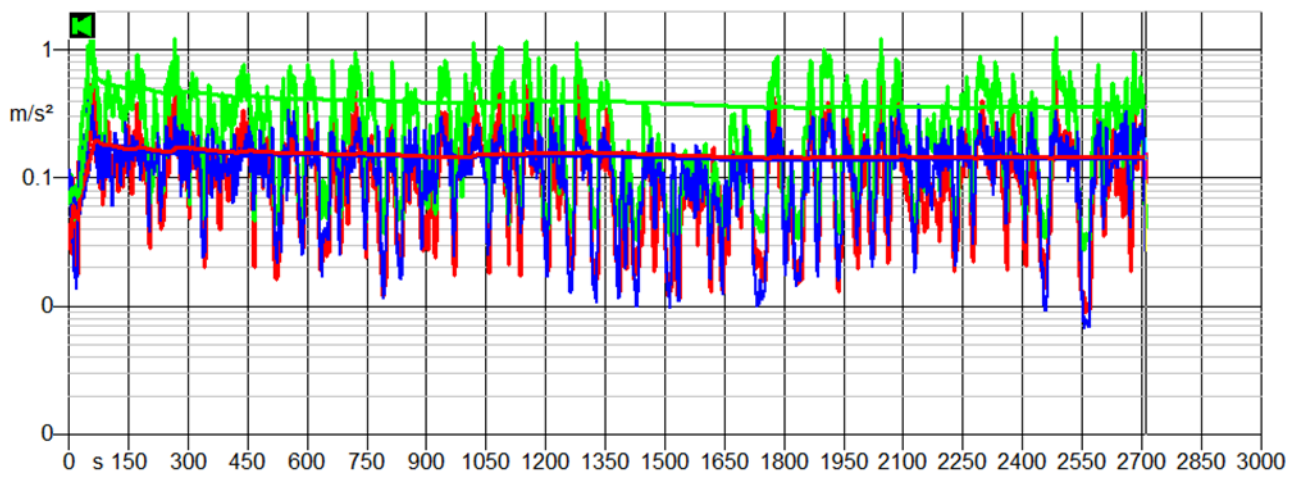


Fig. 405: time -history e Running Leq ritorno linea 336

Tabella 143: dati ricavati dalla msirazione per la linea 336

<b>DATI LINEA</b>				<b>Leq PONDERATA</b>		
<i>n</i> <i>vettura</i>	<i>modello</i>	<i>tratta</i>	<i>tempo di misura</i> [s]	$A_{wx}$	$A_{wy}$	$A_{wz}$
5904	City Class Cursor	Quarrata - Conca D'oro	2712	0.2016	0.203	0.359
5904	City Class Cursor	Conca D'oro - Quarrata	2507	0.2044	0.1876	0.349
<b>A(8)</b>						
<b>METODO A: ASSE PIU' SOLLECITATO</b>				<b>METODO B: SOMMA VETTORIALE</b>		
$A(8)$	$A(8)_{TOT}$	$A(8)_{nelle\ 6h}$	$A_{wSUM}$	$A(8)$	$A(8)_{TOT}$	$A(8)_{nelle\ 6h}$
0.11	0.15	0.32	0.46	0.14	0.19	0.41
0.10			0.45	0.13		
<b>VDV</b>						
<i>Max</i> <i>peak</i>	<i>FC A</i>	<i>FC B</i>	<i>VDV A</i>	<i>VDV TOT</i> <i>A</i>	<i>VDV B</i>	<i>VDV TOT</i> <i>B</i>
7.30	20.33	15.90	3.63	6.14	4.64	7.85
9.30	26.65	20.86	3.46		4.42	

Tabella 144: confronto metodi C e C' per la linea 336

<b>METODO C</b>			
<i>BMI</i>	<i>Sc</i>	<i>K<sub>i</sub></i>	<i>A(8) BMI</i>
<i>peso/h<sup>2</sup></i>	<i>h<sup>2</sup>/peso</i>	<i>BMI * Sc</i>	<i>A<sub>w sum</sub> * radq(Te/8) * K<sub>i</sub></i>
0.002188035	378	0.826543559	0.50
<b>METODO C'</b>			
<i>BMI</i>	<i>Sc</i>	<i>K<sub>i</sub></i>	<i>A(8) BMI</i>
<i>peso/h<sup>2</sup></i>	<i>h<sup>2</sup>/peso</i>	<i>BMI * Sc</i>	<i>A<sub>w sum</sub> * radq(Te/8) * K<sub>i</sub></i>
0.002188035	378	0.826543559	0.39

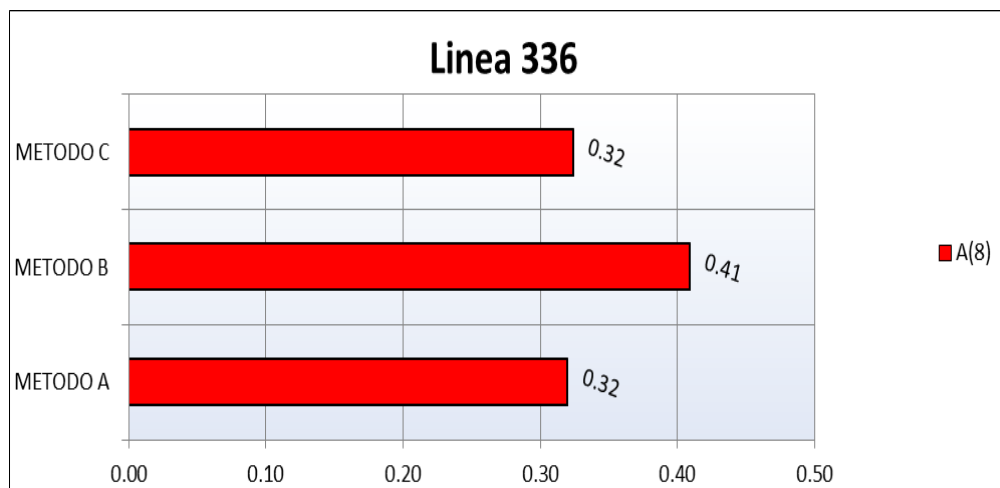


Fig. 406: confronto delle A(8) linea 336

Linea 90 Labia – Stazione Termini

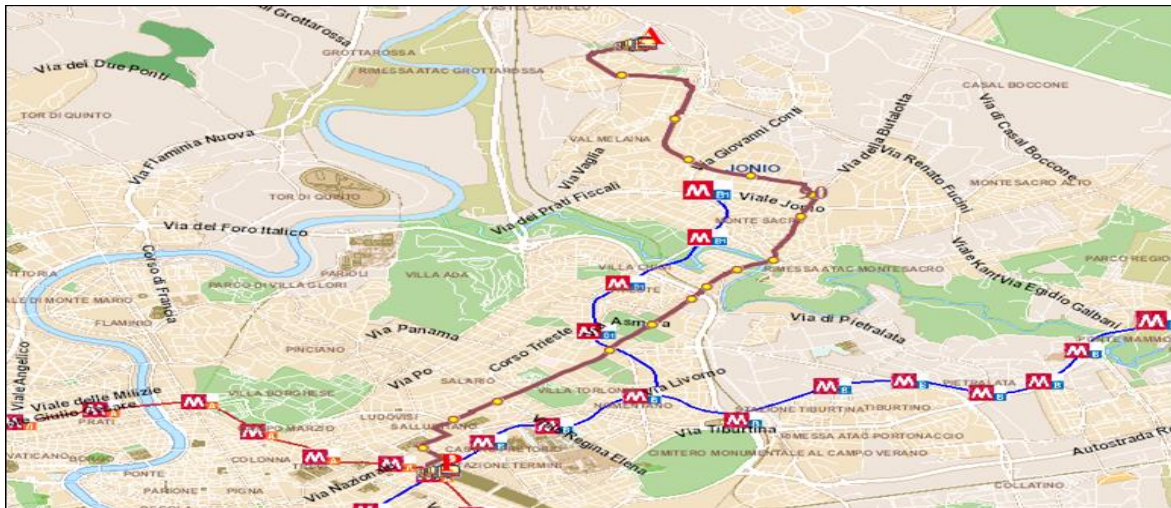


Fig. 407 : percorso linea 90

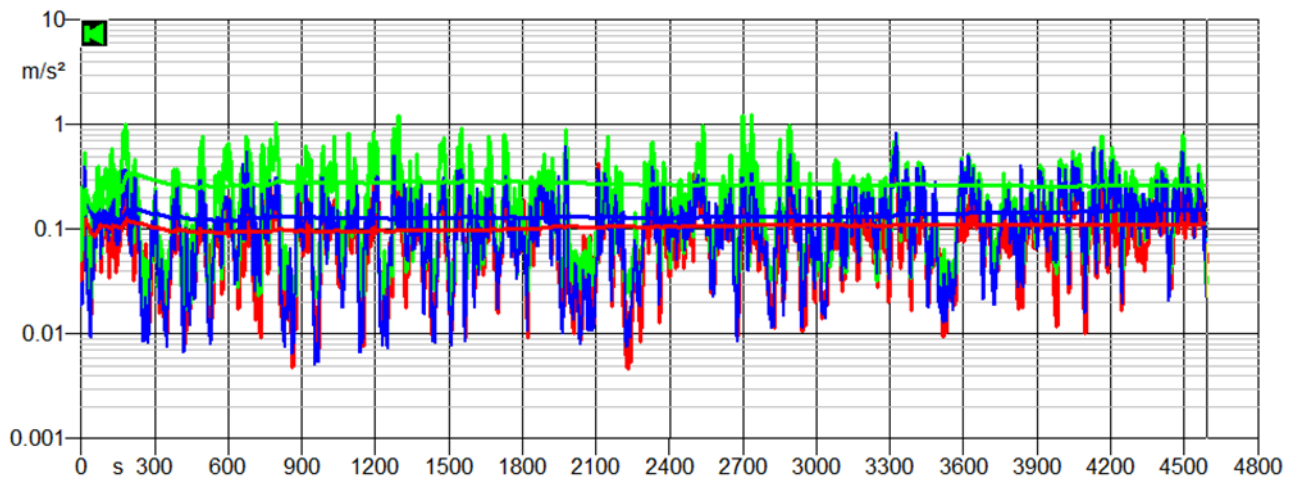


Fig. 408: time -history e Running Leq primo tratto linea 90

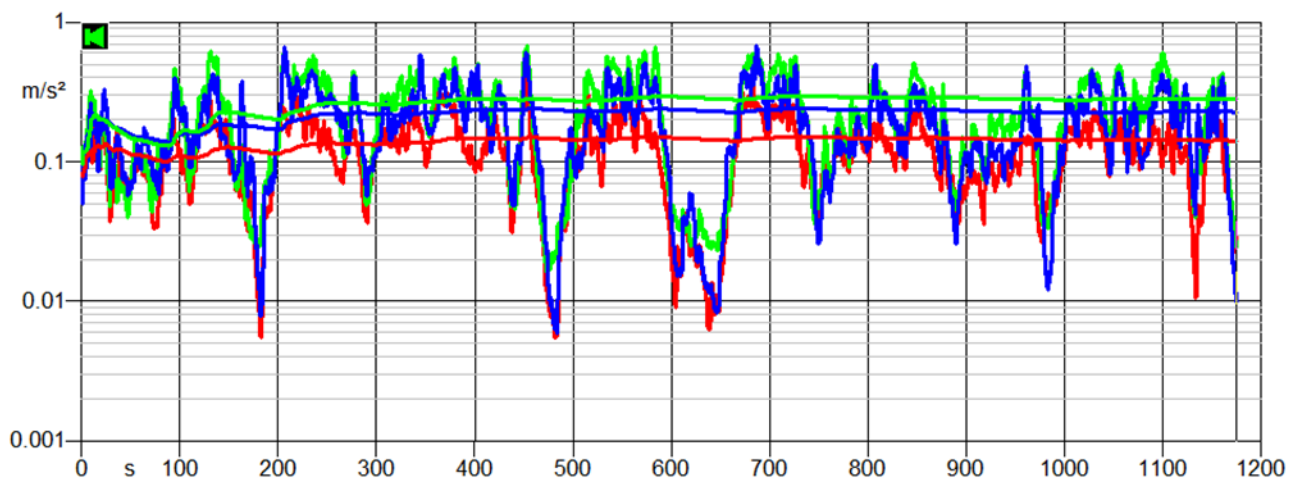


Fig. 409: time -history e Running Leq secondo tratto linea 90

Tabella 145: dati ricavati per la linea 90

<b>DATI LINEA</b>				<b>Leq PONDERATA</b>		
<i>n</i> <i>vettura</i>	<i>modello</i>	<i>tratta</i>	<i>tempo di misura</i> [s]	$A_{wx}$	$A_{wy}$	$A_{wz}$
8634	Filobus Breda Menarinibus	Labia- termini e ritorno	4593	0.217	0.1582	0.262
8634	Filobus Breda Menarinibus	Labia- termini e ritorno	1175	0.3178	0.1988	0.283
<b>A(8)</b>						
<b>METODO A: ASSE PIU' SOLLECITATO</b>				<b>METODO B: SOMMA VETTORIALE</b>		
A(8)	A(8)TOT	A(8)nelle 6h	$A_{wSUM}$	A(8)	A(8)TOT	A(8)nelle 6h
0.10	0.12	0.25	0.38	0.15	0.18	0.35
0.06			0.47	0.09		
<b>VDV</b>						
<i>Max peak</i>	<i>FC A</i>	<i>FC B</i>	<i>VDV A</i>	<i>VDV TOT A</i>	<i>VDV B</i>	<i>VDV TOT B</i>
7.50	28.63	19.99	3.02	4.77	4.32	6.91
6.90	21.71	14.69	2.60		3.85	

Tabella 146: confronto metodi C e C' per la linea 90

<b>METODO C</b>			
<i>BMI</i>	<i>Sc</i>	$K_i$	<i>A(8) BMI</i>
<i>peso/h^2</i>	$h^2/peso$	$BMI * Sc$	$A_{w sum} * radq(Te/8) * K_i$
0.002188035	415	0.908163228	0.39
<b>METODO C'</b>			
<i>BMI</i>	<i>Sc</i>	$K_i$	<i>A(8) BMI</i>
<i>peso/h^2</i>	$h^2/peso$	$BMI * Sc$	$A_{w sum} * radq(Te/8) * K_i$
0.002188035	415	0.908163228	0.28

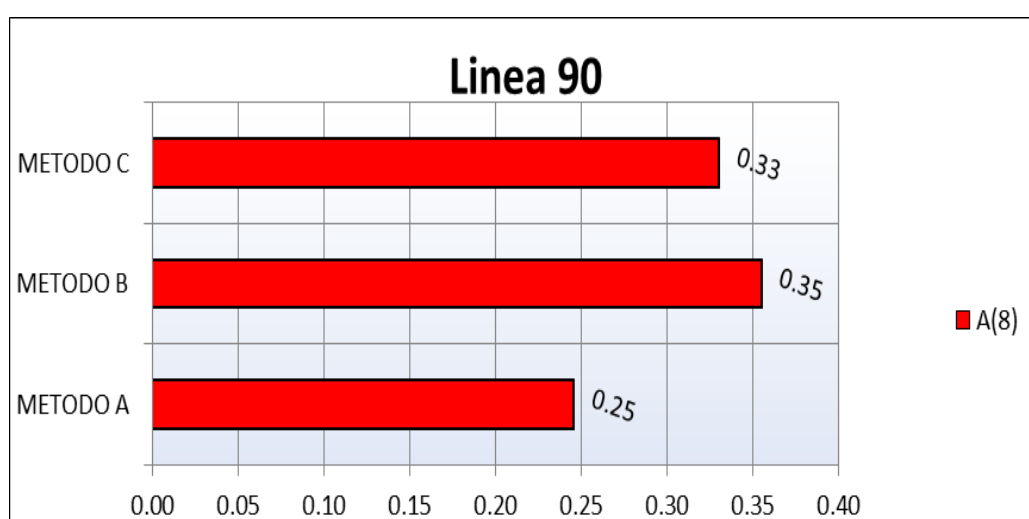


Fig. 410: confronto delle A(8) linea 90



6 GIORNATA : 13/06/2017 Linea 40 Termini – Traspontina/ Conciliazione



Fig. 411: percorso linea 40 andata

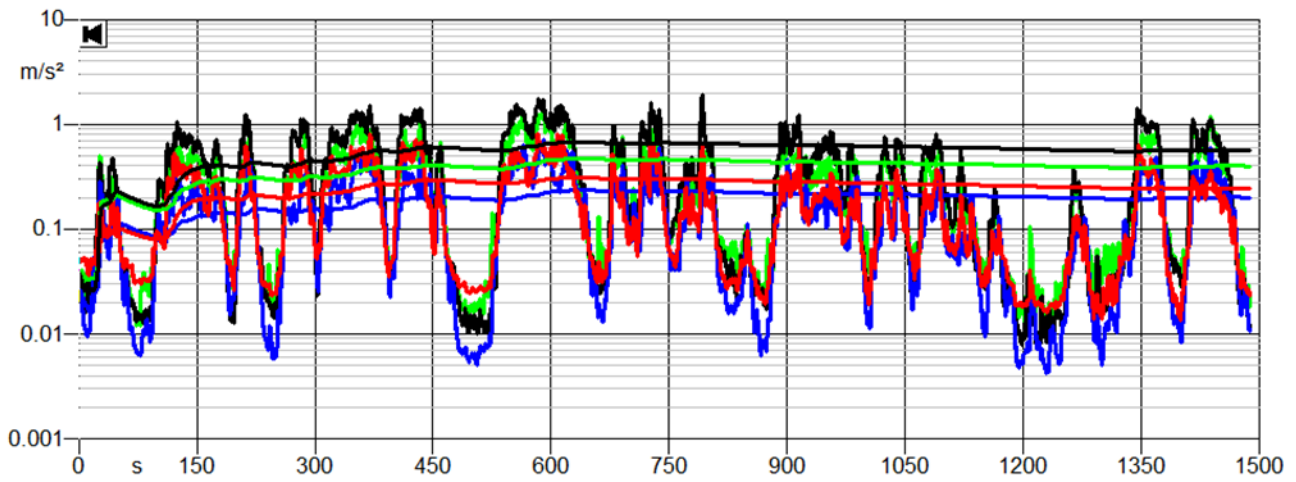


Fig. 412: time -history e Running Leq andata linea 40

Linea 40 P.za Pia/ Castel S. Angelo – Termini

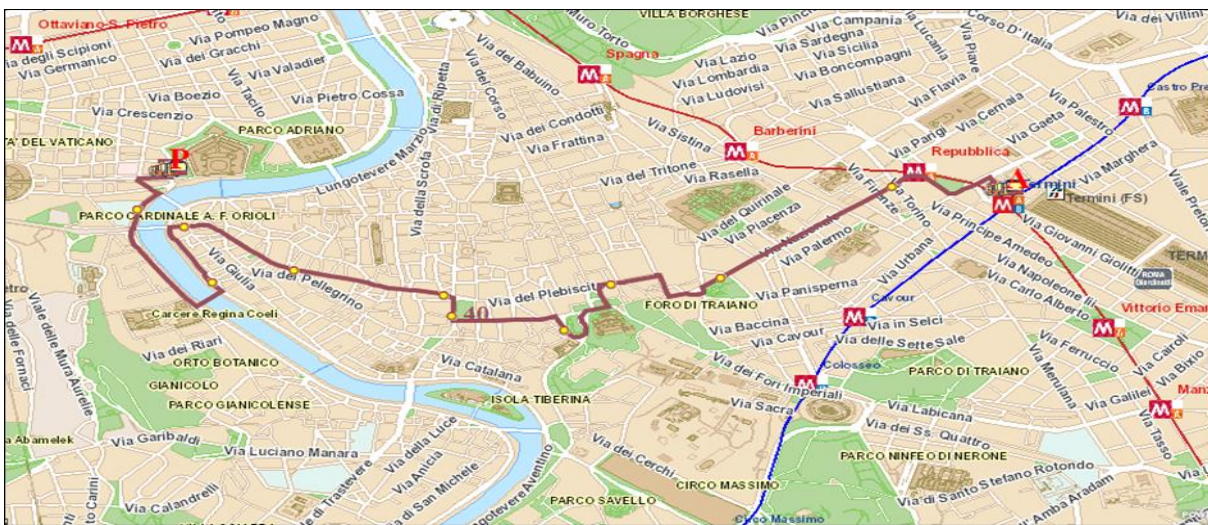


Fig. 413: percorso linea 40 ritorno

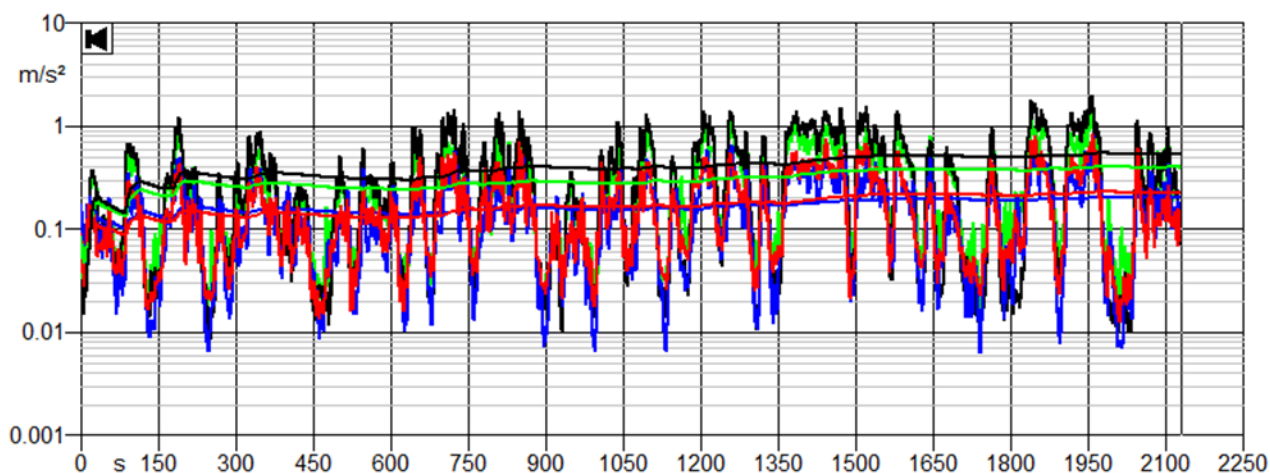


Fig. 414: time -history e Running Leq ritorno linea 40

Tabella 147: dati ricavati dalla linea 40

<b>DATI LINEA</b>				<b>Leq PONDERATA</b>		
<i>n</i> vettura	modello	tratta	tempo di misura [s]	$A_{wx}$	$A_{wy}$	$A_{wz}$
422	Citelis 18 metri	P.za Pia -Termini	2129	0.2828	0.0154	0.399
422	Citelis 18 metri	Termini - Traspertina	1488	0.28	0.14	0.399
<b>A(8)</b>						
<b>METODO A: ASSE PIU' SOLLECITATO</b>			<b>METODO B: SOMMA VETTORIALE</b>			
A(8)	A(8)TOT	A(8)nelle 6h	$A_{wSUM}$	A(8)	A(8)TOT	A(8)nelle 6h
0.11	0.14	0.35	0.49	0.13	0.18	0.43
0.09			0.51	0.12		
<b>VDV</b>						
Max peak	FC A	FC B	VDV A	VDV TOT A	VDV B	VDV TOT B
8.80	22.06	17.98	3.79	6.78	4.65	8.44
8.90	22.31	17.55	3.47		4.41	

Tabella 148: confronto metodi C e C' per la linea 40

<b>METODO C</b>			
BMI	Sc	$K_i$	A(8) BMI
peso/h <sup>2</sup>	h <sup>2</sup> /peso	BMI * Sc	$A_{w sum} * radq(Te/8) * K_i$
0.002188035	352	0.770213466	0.56
<b>METODO C'</b>			
BMI	Sc	$K_i$	A(8) BMI
peso/h <sup>2</sup>	h <sup>2</sup> /peso	BMI * Sc	$A_{w sum} * radq(Te/8) * K_i$
0.002188035	352	0.770213466	0.45



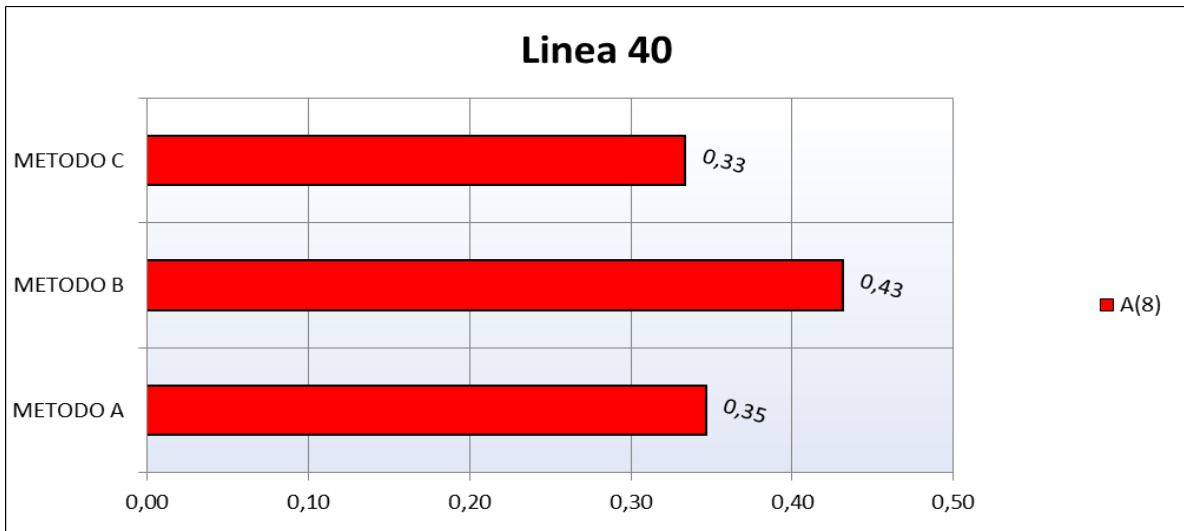


Fig. 415 : confronto delle A(8) linea 40

### 7 GIORNATA : 20/06/2017 Linea 558 Gardenie – Torre Maura

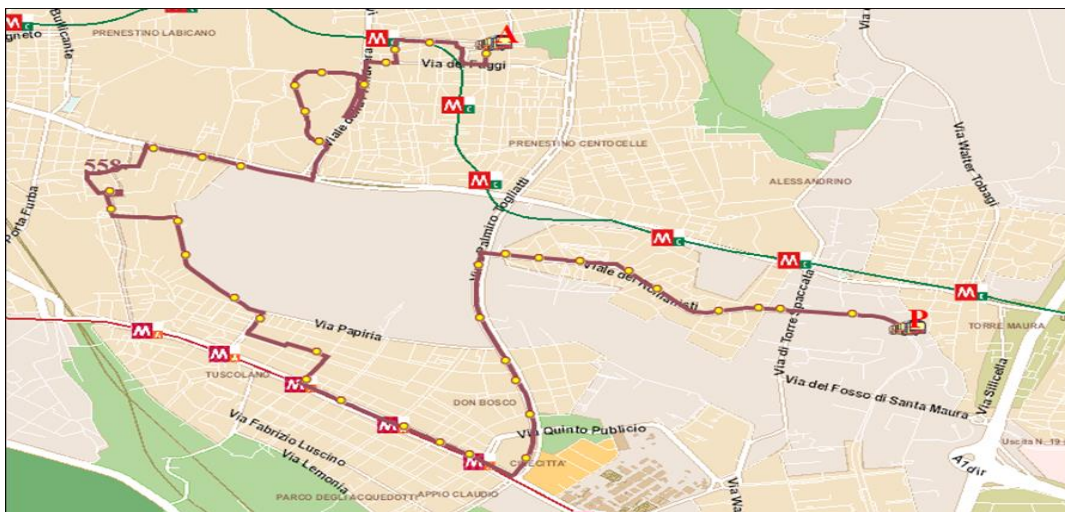


Fig. 416: percorso linea 558

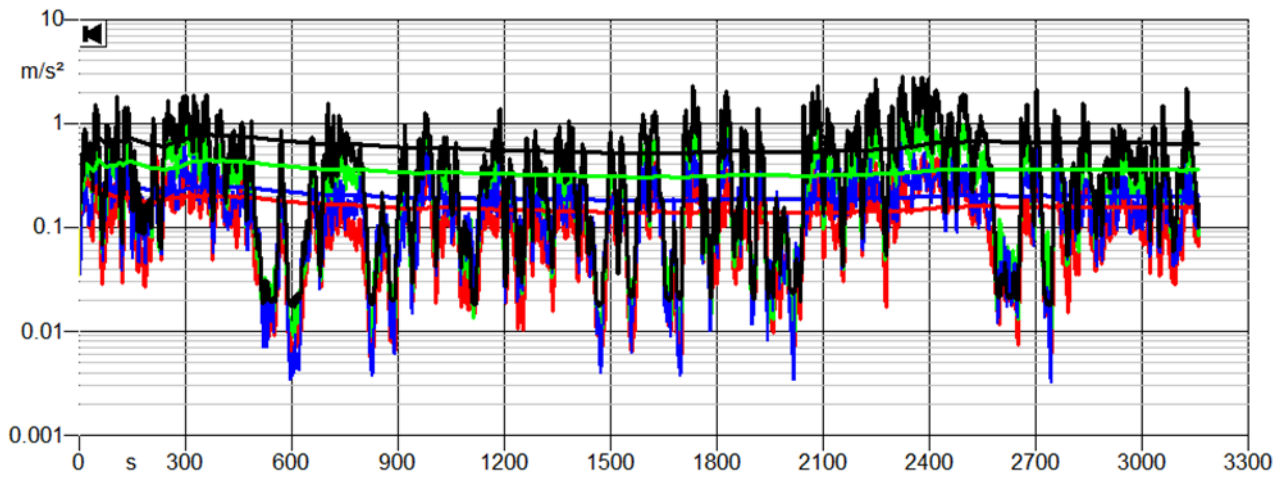


Fig. 417: time -history e Running Leq andata linea 558

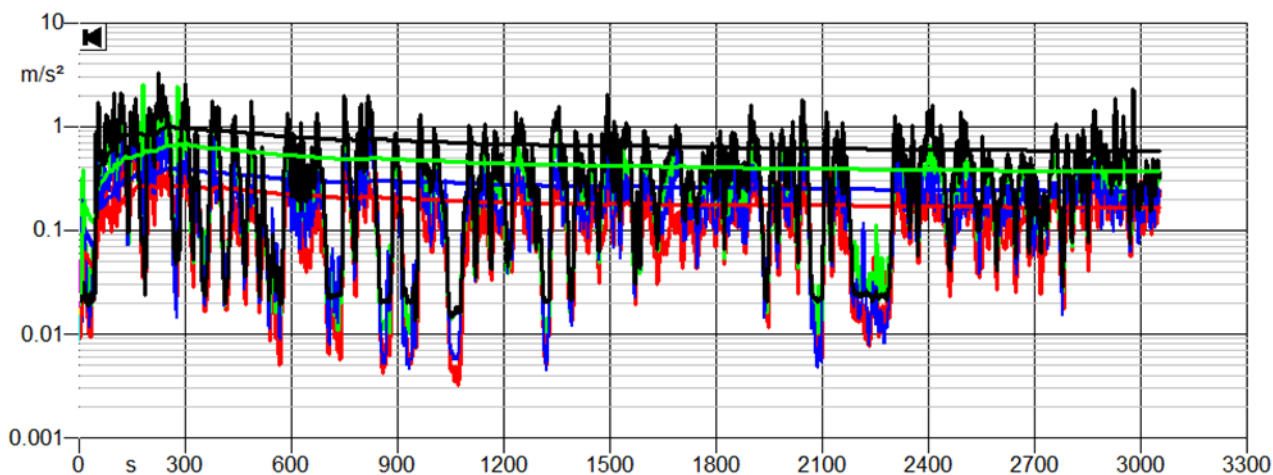


Fig. 418: time -history e Running Leq ritorno linea 558

Tabella 149: dati ricavati dalla linea 558

<b>DATI LINEA</b>				<b>Leq PONDERATA</b>		
<i>n</i> <i>vettura</i>	<i>modello</i>	<i>tratta</i>	<i>tempo di misura</i> [s]	$A_{wx}$	$A_{wy}$	$A_{wz}$
8132	Mercedes urbano Citro	Gardenie - Torre Maura	3162	0.2772	0.2184	0.355
8132	Mercedes urbano Citro	Torre Maura - Gardenie	3052	0.3332	0.2338	0.366
<b>A(8)</b>						
<b>METODO A: ASSE PIU' SOLLECITATO</b>			<b>METODO B: SOMMA VETTORIALE</b>			
A(8)	A(8)TOT	A(8)nelle 6h	$A_{wSUM}$	A(8)	A(8)TOT	A(8)nelle 6h
0.12	0.17	0.31	0.35	0.12	0.18	0.33
0.12			0.41	0.13		
<b>VDV</b>						
<i>Max</i> <i>peack</i>	<i>FC A</i>	<i>FC B</i>	<i>VDV A</i>	<i>VDV TOT</i> <i>A</i>	<i>VDV B</i>	<i>VDV TOT</i> <i>B</i>
8.00	22.54	22.67	3.73	6.13	3.70	6.50
11.00	30.05	27.02	3.81		4.24	

Tabella 150: confronto metodi C e C' per la linea 558

<b>METODO C</b>			
<i>BMI</i>	<i>Sc</i>	<i>K<sub>i</sub></i>	<i>A(8) BMI</i>
<i>peso/h<sup>2</sup></i>	<i>h<sup>2</sup>/peso</i>	<i>BMI * Sc</i>	<i>A<sub>w sum</sub> * radq(Te/8) * K<sub>i</sub></i>
0.002188035	438	0.958004508	0.34
<b>METODO C'</b>			
<i>BMI</i>	<i>Sc</i>	<i>K<sub>i</sub></i>	<i>A(8) BMI</i>
<i>peso/h<sup>2</sup></i>	<i>h<sup>2</sup>/peso</i>	<i>BMI * Sc</i>	<i>A<sub>w sum</sub> * radq(Te/8) * K<sub>i</sub></i>
0.002188035	438	0.958004508	0.32

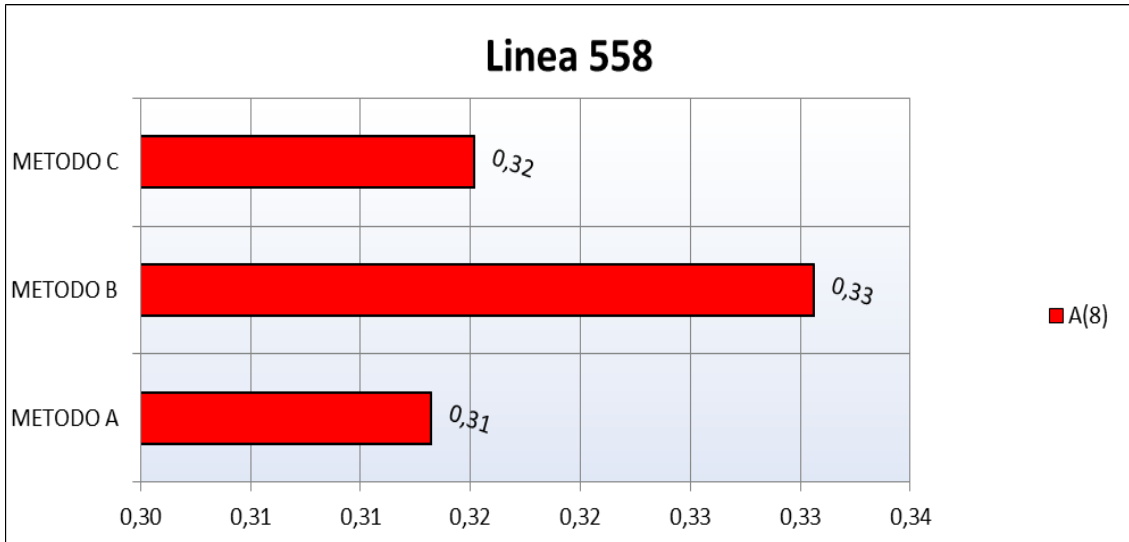


Fig. 419: confronto delle A(8) linea 558 Cursor



Fig. 420: percorso linea 504

La linea 504 è una circolare. La misura è stata effettuata sia con vettura di modello Citaro, sia con vettura Urbanway.

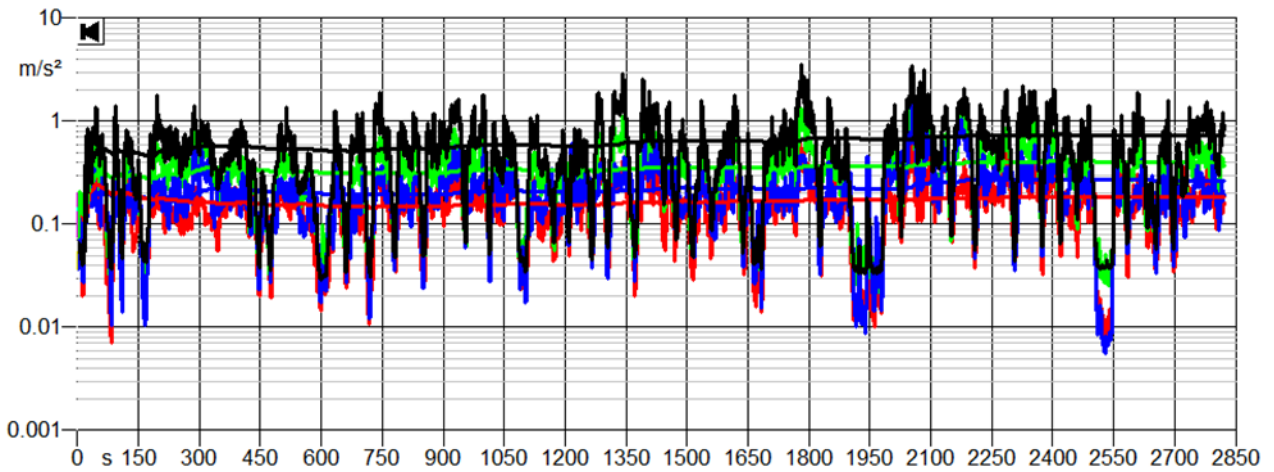


Fig. 421: time -history e Running Leq linea 504 Citaro

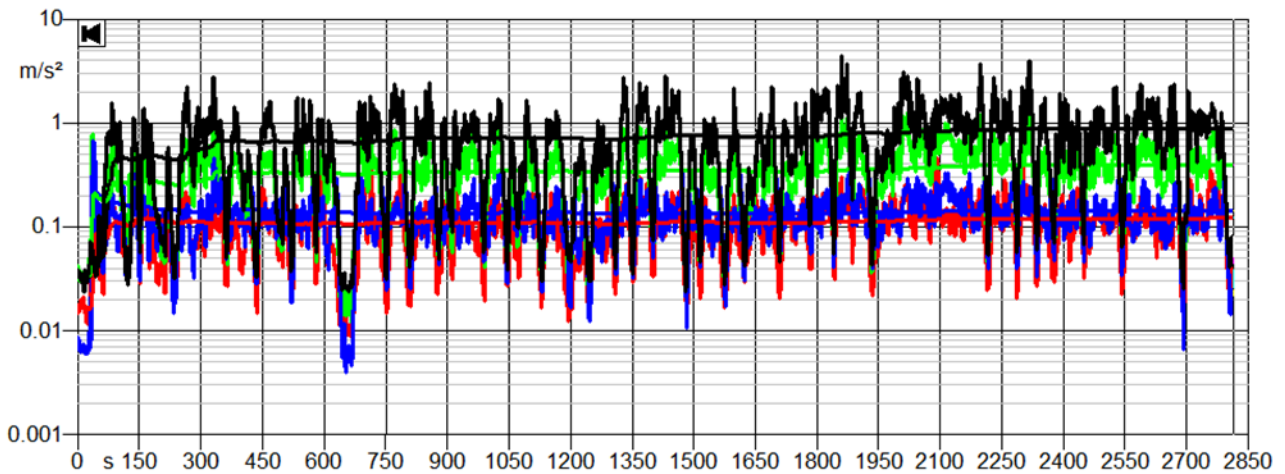


Fig. 422: time -history e Running Leq linea 504 Urbanway

Tabella 151: dati ricavati dalla linea 504 Urbanway

<b>DATI LINEA</b>				<b>Leq PONDERATA</b>		
<i>n</i> <i>vettura</i>	<i>modello</i>	<i>tratta</i>	<i>tempo di misura</i> [s]	$A_{wx}$	$A_{wy}$	$A_{wz}$
3331	Mercedes urbano Citaro	Anagnina circolare	2821	0.3696	0.2576	0.4
8177	Urbanway	Anagnina circolare	2813	0.2016	0.1708	0.398
<b>A(8)</b>						
<b>METODO A: ASSE PIU' SOLLECITATO</b>			<b>METODO B: SOMMA VETTORIALE</b>			
$A(8)$	$A(8)$ nelle 6h		$A_{wSUM}$	$A(8)$ nelle 6h		
0.13	0.35		0.60	0.53		
0.12	0.35		0.48	0.42		
<b>VDV</b>						
<i>Max</i> <i>peak</i>	<i>FC A</i>	<i>FC B</i>	<i>VDV A</i>	<i>VDV TOT</i> <i>A</i>	<i>VDV</i> <i>B</i>	<i>VDV TOT</i> <i>B</i>
20.20	50.50	33.53	4.08	6.86	6.15	10.34
16.90	42.46	35.38	4.06	6.82	4.87	8.19

Tabella 152: confronto metodi C e C' per la linea 504 Urbanway

<b>METODO C</b>			
<i>BMI</i>	<i>Sc</i>	$K_i$	$A(8) BMI$
<i>peso/h^2</i>	$h^2/peso$	$BMI * Sc$	$A_{w sum} * radq(Te/8) * K_i$
0.002188035	383	0.837607144	0.63
0.002188035	338.56	0.740781126	0.57
<b>METODO C'</b>			
<i>BMI</i>	<i>Sc</i>	$K_i$	$A(8) BMI$
<i>peso/h^2</i>	$h^2/peso$	$BMI * Sc$	$A_{w sum} * radq(Te/8) * K_i$
0.002188035	383	0.837607144	0.42
0.002188035	338.56	0.740781126	0.47

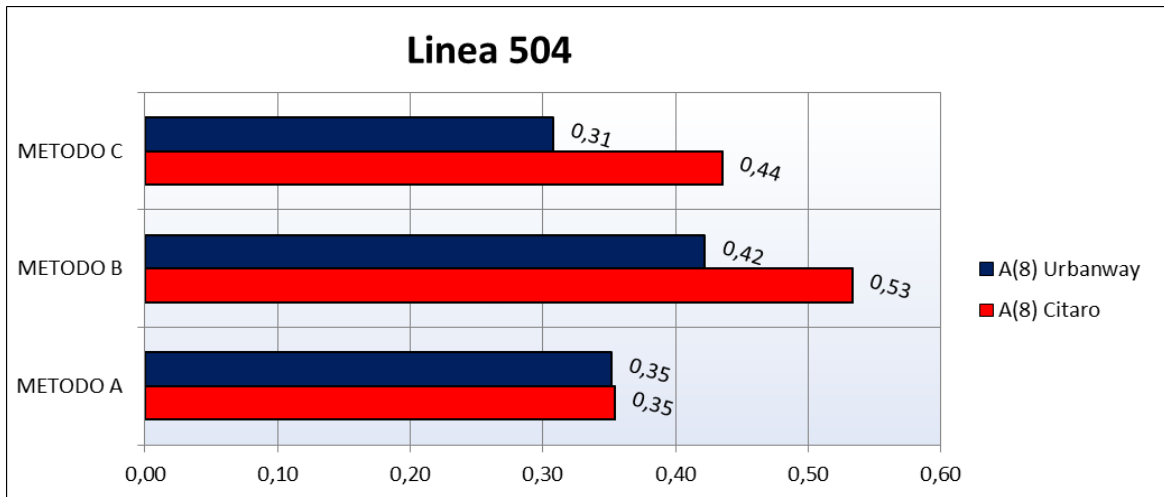


Fig. 423: confronto delle A(8) linea 504 Citaro e Urbanway

## 8 GIORNATA : 27/06/2017 Linea 058 Raimondi – Longoni / Inps

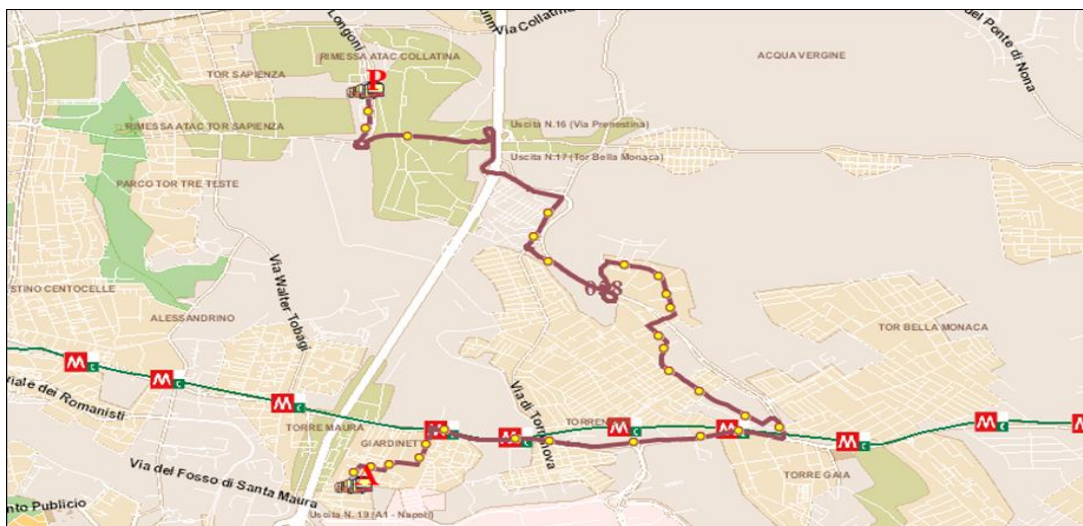


Fig. 424: percorso linea 058

Anche per la 058 la misura è stata effettuata sia con vettura di modello precedente, in questo caso Cursor, sia con vettura Urbanway



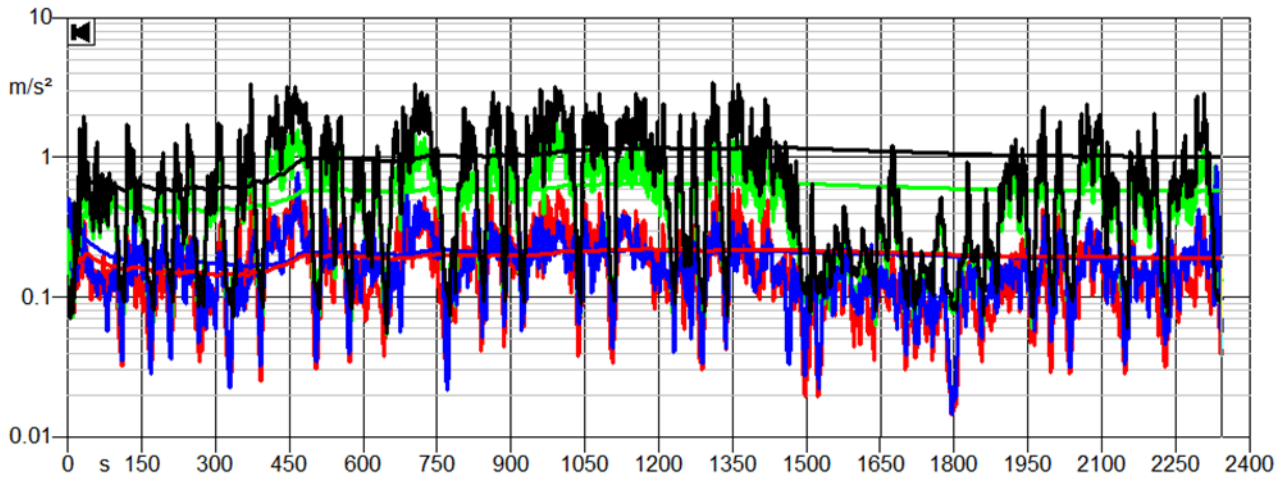


Fig. 425: time -history e running Leq andata linea 058 Cursor

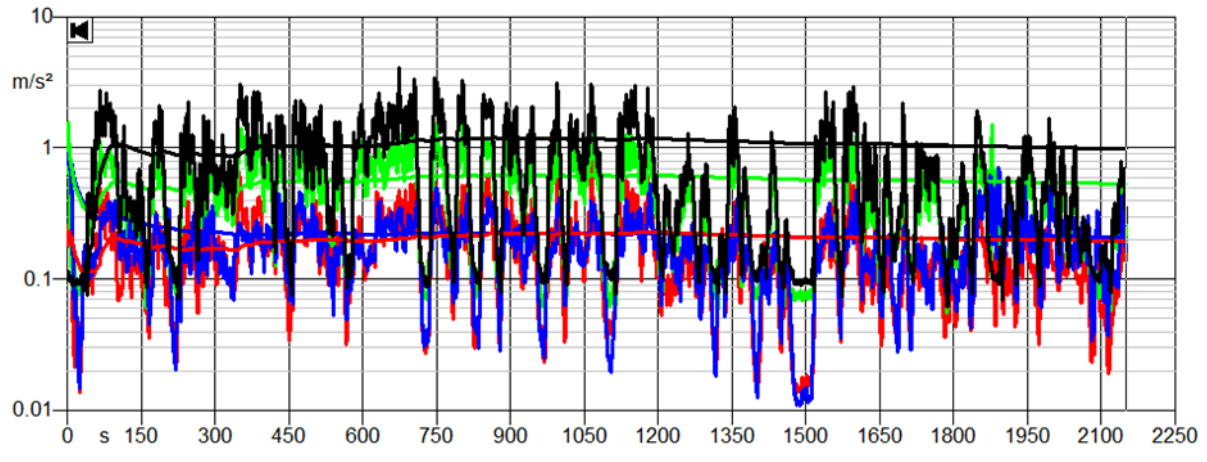


Fig. 426: time -history e Running Leq ritorno linea 058 Cursor

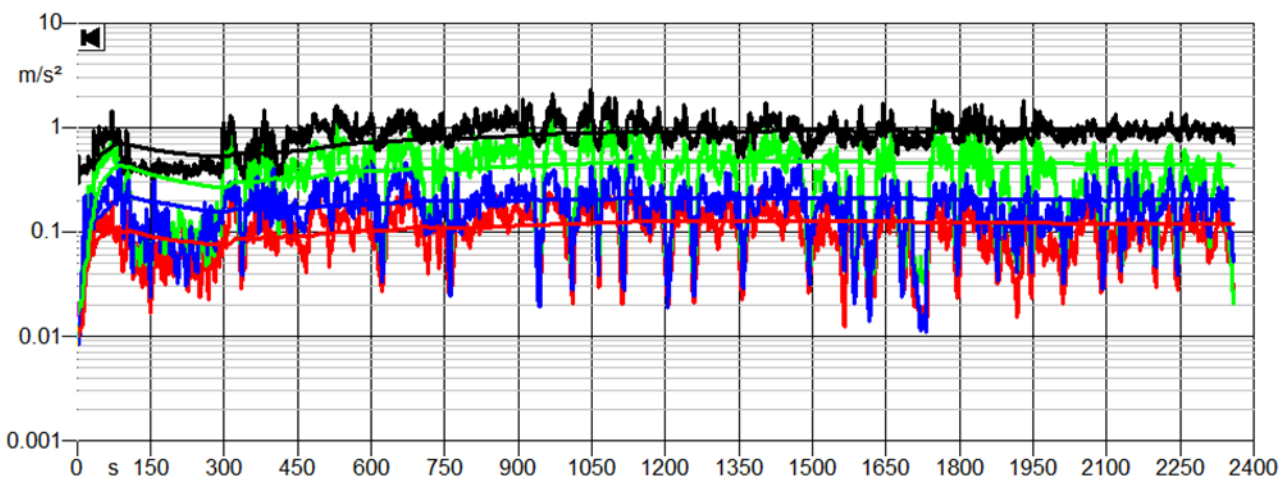


Fig. 427: time -history e Running Leq andata linea 058 Urbanway



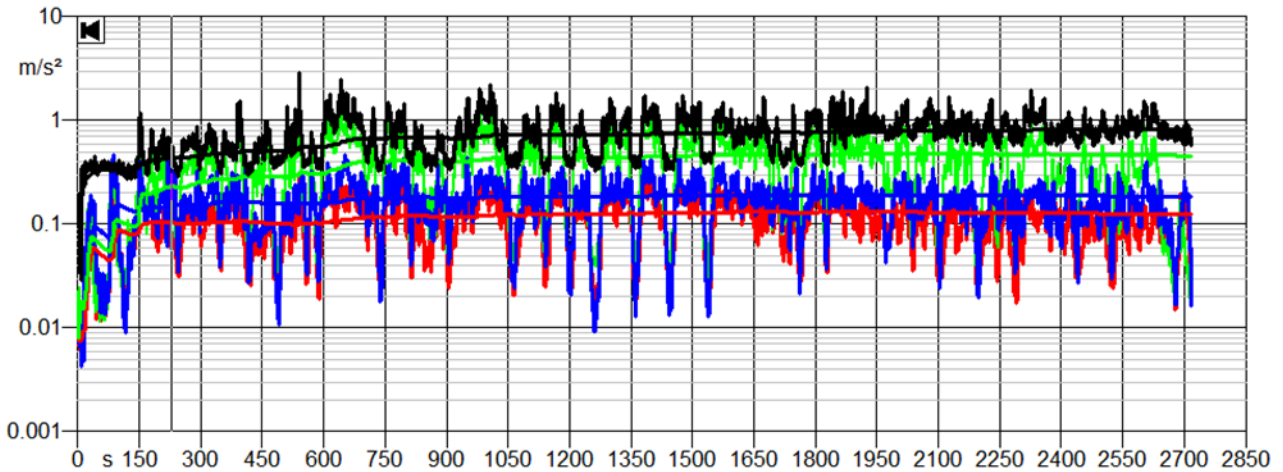


Fig. 428: time -history e Running Leq ritorno linea 058 Urbanway

Tabella 153: accelerazioni ponderate. A(8) con metodo A e B e VDV della linea 058 Cursor

<b>DATI LINEA</b>				<b>Leq PONDERATA</b>		
<i>n</i> vettura	modello	tratta	tempo di misura [s]	$A_{wx}$	$A_{wy}$	$A_{wz}$
3919	City Class Cursor	Raimondi - Birolli	2342.6	0.2716	0.266	0.573
3919	City Class Cursor	Birolli - Raimondi	2151.1	0.294	0.2716	0.532
<b>A(8)</b>						
<b>METODO A: ASSE PIU' SOLLECITATO</b>			<b>METODO B: SOMMA VETTORIALE</b>			
$A(8)$	$A(8)_{TOT}$	$A(8)_{nelle\ 6h}$	$A_{wSUM}$	$A(8)$	$A(8)_{TOT}$	$A(8)_{nelle\ 6h}$
0.16	0.22	0.49	0.69	0.20	0.27	0.60
0.15			0.67	0.18		
<b>VDV</b>						
<i>Max peak</i>	<i>FC A</i>	<i>FC B</i>	<i>VDV A</i>	<i>VDV TOT A</i>	<i>VDV B</i>	<i>VDV TOT B</i>
11.90	20.77	17.31	5.58	9.50	6.70	11.61
15.50	29.14	23.28	5.07		6.35	

Tabella 154: confronto metodi C e C' per la linea 058 Cursor

<b>METODO C</b>			
<i>BMI</i>	<i>Sc</i>	<i>K<sub>i</sub></i>	<i>A(8) BMI</i>
<i>peso/h<sup>2</sup></i>	<i>h<sup>2</sup>/peso</i>	<i>BMI * Sc</i>	<i>A<sub>w sum</sub> * radq(Te/8) * K<sub>i</sub></i>
0.002188035	428	0.935509988	0.64
<b>METODO C'</b>			
<i>BMI</i>	<i>Sc</i>	<i>K<sub>i</sub></i>	<i>A(8) BMI</i>
<i>peso/h<sup>2</sup></i>	<i>h<sup>2</sup>/peso</i>	<i>BMI * Sc</i>	<i>A<sub>w sum</sub> * radq(Te/8) * K<sub>i</sub></i>
0.002188035	428	0.935509988	0.52

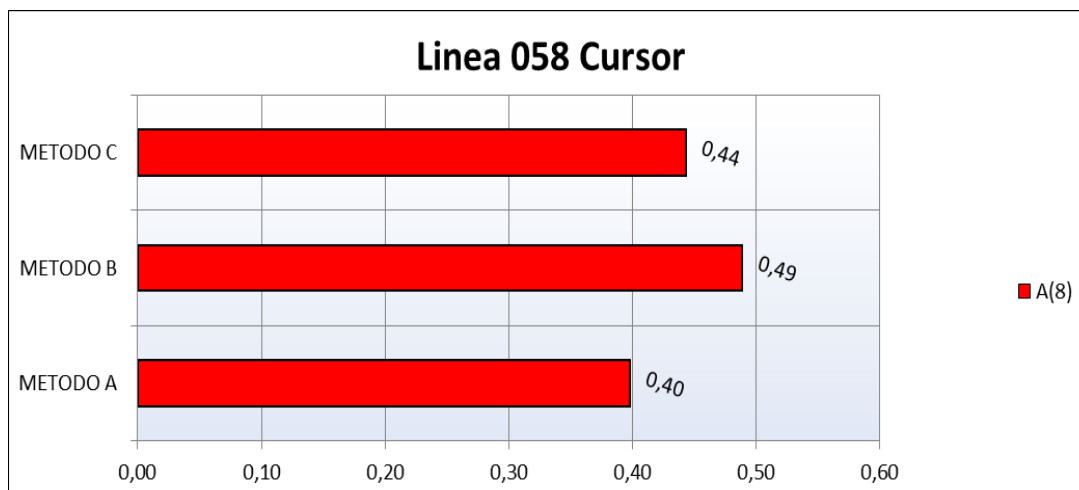


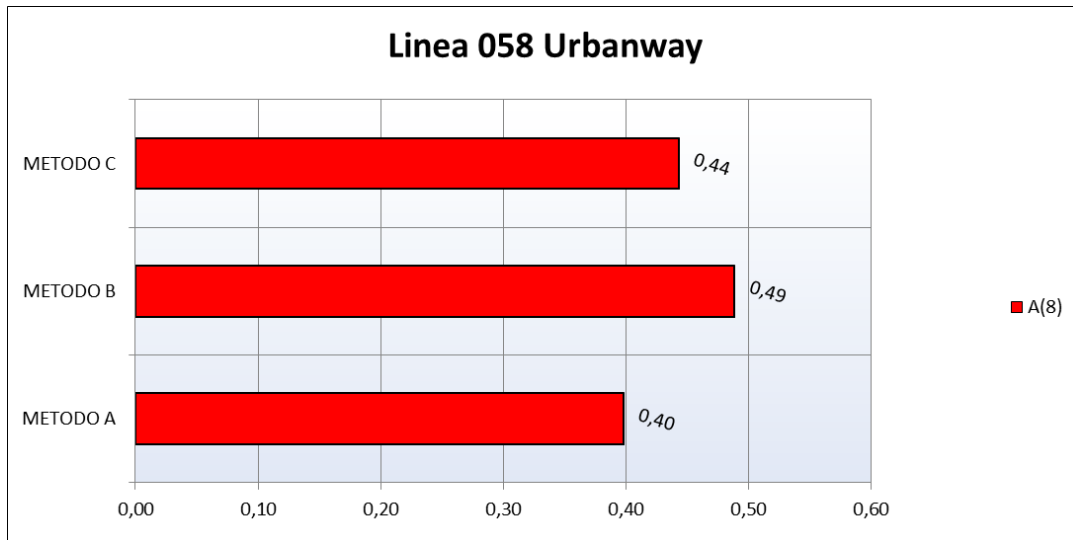
Fig. 429: confronto delle A(8) linea 058 Cursor

Tabella 155: dati ricavati dalla linea 058 Urbanway

<b>DATI LINEA</b>				<b>Leq PONDERATA</b>		
<i>n</i> vettura	modello	tratta	tempo di misura [s]	$A_{wx}$	$A_{wy}$	$A_{wz}$
3347	Urbanway	Raimondi - Birolli	2718.7	0.259	0.1736	0.456
3347	Urbanway	Birolli - Raimondi	2358.2	0.2814	0.1652	0.436
<b>A(8)</b>						
<b>METODO A: ASSE PIU' SOLLECITATO</b>			<b>METODO B: SOMMA VETTORIALE</b>			
A(8)	A(8)TOT	A(8)nelle 6h	$A_{wSUM}$	A(8)	A(8)TOT	A(8)nelle 6h
0.14	0.19	0.40	0.55	0.17	0.23	0.49
0.12			0.54	0.16		
<b>VDV</b>						
Max peak	FC A	FC B	VDV A	VDV TOT A	VDV B	VDV TOT B
21.00	46.05	38.02	4.61	7.69	5.58	9.45
7.00	16.06	12.85	4.25		5.31	

Tabella 156: confronto metodi C e C' per la linea 058 Urbanway

<b>METODO C</b>			
BMI	Sc	$K_i$	A(8) BMI
$peso/h^2$	$h^2/peso$	$BMI * Sc$	$A_{w sum} * radq(Te/8) * K_i$
0.002188035	428	0.932793863	0.53
<b>METODO C'</b>			
BMI	Sc	$K_i$	A(8) BMI
$peso/h^2$	$h^2/peso$	$BMI * Sc$	$A_{w sum} * radq(Te/8) * K_i$
0.002188035	426	0.932793863	0.43



*Fig. 430: confronto delle A(8) linea 058 Urbanway*

▪ *Appendice F: Campagna sperimentale in ambiente urbano*

Valutazione della funzione nella sezione 2 del percorso

• **Sorgente 2**

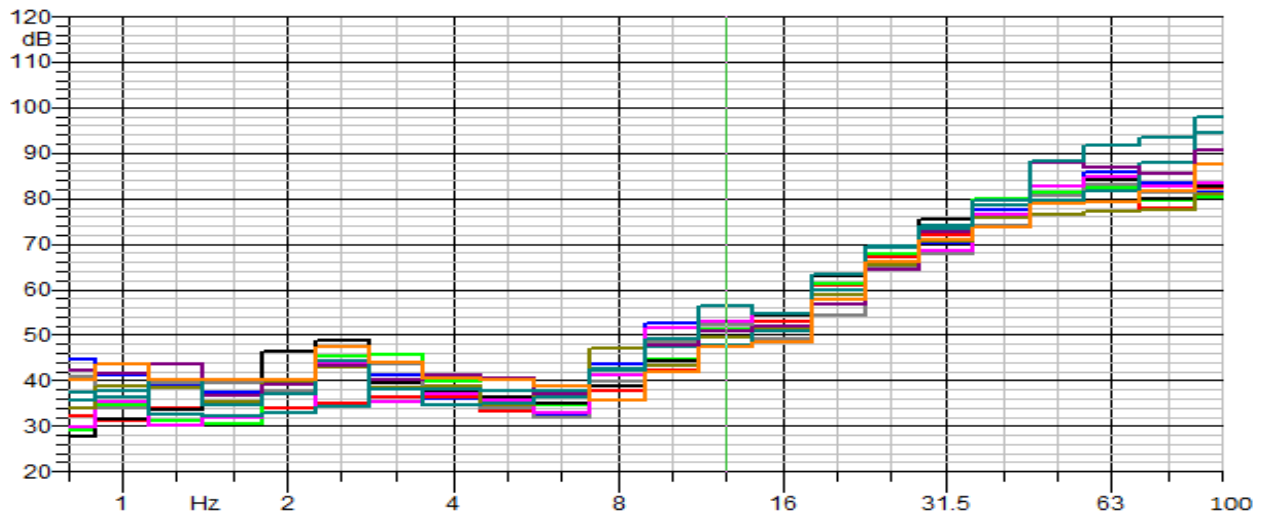


Fig. 431: confronto tra gli spettri degli eventi selezionati della sorgente 2

Tabella 157:

<b>S 2</b>	<b>Valori in dB ad ogni passaggio</b>											
<i>f [Hz]</i>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>Media</b>
<b>0.8</b>	44.9	37.6	42.5	44.6	42.8	35.5	32.4	37.2	39.6	48.7	43.6	42.1
<b>1</b>	41.8	39	38.1	41.9	42.2	38.6	36	33.2	41.3	49.2	37.4	41.5
<b>1.25</b>	39.5	36.1	34.9	40.6	41.7	35.3	31.5	34.6	39.8	51	47.1	42.6
<b>1.6</b>	38.1	36.3	33.7	38.7	40.9	32.1	33.7	32.9	36.4	52.4	49.7	41.5
<b>2</b>	41.1	37.5	41.7	46.8	39.1	31.7	36.9	35.2	40.2	53.7	51.4	43.7
<b>2.5</b>	45	36.6	46	49.6	45.2	33.4	44.7	31.6	43.8	53.3	54.1	46.9
<b>3.15</b>	43.1	42.1	48.1	43	45	34.7	38.2	33.8	42.2	53.9	55.4	46.6
<b>4</b>	39.7	47.8	45.8	44.6	39.8	35.4	40	37.5	42.9	54.1	56.7	46.5
<b>5</b>	41	43.3	46.4	43.2	38.3	39.4	40.3	39.2	41.8	51.8	56.9	46.5
<b>6.3</b>	44.2	43.5	43.4	42.2	44	44.6	44.9	49.4	46.8	51.8	57.8	48.3
<b>8</b>	57	48.2	52.4	50.2	52.3	52.8	53.7	58.4	57.6	55.4	60.1	54.6
<b>10</b>	62.3	54.4	56	54.7	60.1	61.9	61.8	63.5	53.1	59.1	63.6	59
<b>12.5</b>	60.5	57.9	58.4	59.3	60.1	64.4	62.6	63.8	56.1	62.3	66.7	60.9
<b>16</b>	61.7	59.7	60.8	63.9	58	62.1	61.9	64.1	60.9	61.1	67.7	62.4
<b>20</b>	67.9	70.4	70.7	73.1	65.6	69.3	67.6	68.1	67.6	69.1	75.9	69.7

<b>25</b>	77	78	78.8	80.1	75.6	75.5	75.8	75.9	75.4	78.2	81.1	77.3
<b>31.5</b>	83.7	84.5	85.9	89.1	80.9	81.6	81.6	80.9	84.4	81.6	85.8	83.3
<b>40</b>	90.1	88.1	88.2	89.1	85.8	84.2	87.3	88.5	86.3	87.3	90	87.7
<b>50</b>	92.2	89.9	91.4	92.1	91.5	90.6	93.9	92	88.1	88.9	97.5	92.6
<b>63</b>	96.4	92.1	92.9	93	94.3	92	95.2	93.5	87.8	89	99.9	94.4
<b>80</b>	91.8	87.7	88.5	90.5	90.9	87.6	92.1	89.3	94.5	94.4	102.9	93.9
<b>100</b>	95.6	90.1	87.4	90.4	88.7	87.8	89.9	86.6	96.7	98.2	107.6	95.9

• **Recettore 2**

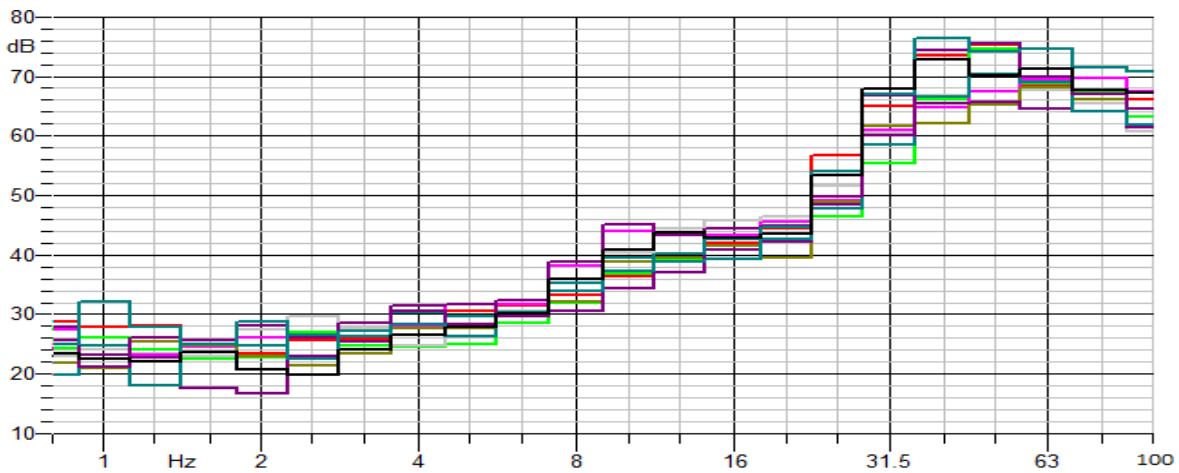


Fig. 432: confronto tra gli spettri degli eventi selezionati del recettore 2

Tabella 158: valori in decibel per il recettore 2 definiti per ciascuna frequenza

<b>R 2</b>	<b>Valori in dB ad ogni passaggio</b>										
<b>f [Hz]</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>Media</b>
<b>0.8</b>	30.5	28.7	29.9	27.9	25.5	28.4	27.7	29.7	27	24.3	28.3
<b>1</b>	31.1	28.2	23.2	33.4	26.8	25.4	25.2	28.8	24.3	27	28.1
<b>1.25</b>	30	26.7	29.2	31.3	27.3	26.1	26.2	26.9	27.5	26.3	27.8
<b>1.6</b>	27.6	28.1	28	28.2	26.9	27.8	29.2	33.3	28.8	28.4	28.4
<b>2</b>	31.5	34.7	33.5	33	35.1	32.7	32	35.8	31.6	33	33.1
<b>2.5</b>	31.4	32.2	31.8	28.6	35.5	32.3	28.9	32.8	30.3	30.6	31.2
<b>3.15</b>	31.6	33.2	32.8	30.9	34.8	32	30.9	35.1	31.3	32	32.8
<b>4</b>	34.4	33	34.1	34.4	32.6	33.4	34.8	40.5	32.6	34.5	34.9
<b>5</b>	37.5	32.2	37.7	35.2	36	37	36.5	41	35.8	36.4	36.5
<b>6.3</b>	39.5	36.2	41.1	38.5	37.6	41.2	38.2	41.5	39.4	40.3	39.8
<b>8</b>	41.8	41.4	49.8	43.3	43.7	46	43.4	41.8	42.2	46.2	43.9
<b>10</b>	48.6	50	56.7	47.9	51.7	54.5	52.5	46.3	51.5	48.8	50.4

<b>12.5</b>	48.3	49.2	57.7	48.5	54.9	54.8	54.8	45.4	50.3	49.3	<b>50.8</b>
<b>16</b>	50.1	49.5	55.1	52.4	56.2	55.8	54.1	49.6	50.8	50.8	<b>52.3</b>
<b>20</b>	55.5	55.8	56.8	59.3	58	58.3	57.7	56.1	51.5	55.4	<b>57.3</b>
<b>25</b>	66.6	62.6	62.9	68.5	65.9	66.3	69.2	65.5	63	62.6	<b>65.2</b>
<b>31.5</b>	74.8	67.7	71.7	77.8	73.3	72.7	80.9	76.5	73	69.8	<b>73.0</b>
<b>40</b>	85	75.5	87.2	87	79.8	76.6	85.4	78.8	74.7	77.9	<b>79.2</b>
<b>50</b>	86.1	84.4	82.1	84.3	79	77.5	80.3	74.3	77.5	80.1	<b>80.5</b>
<b>63</b>	78.6	79.1	78.4	82.6	76.4	79.6	79.9	73.9	76.9	78.4	<b>77.7</b>
<b>80</b>	77.5	75.4	75	80.8	72.9	77.3	75.6	73.8	74.6	75	<b>74.4</b>
<b>100</b>	75.5	73.7	71.1	78.1	67.6	76.8	73.5	69.9	70	70.7	<b>72.6</b>

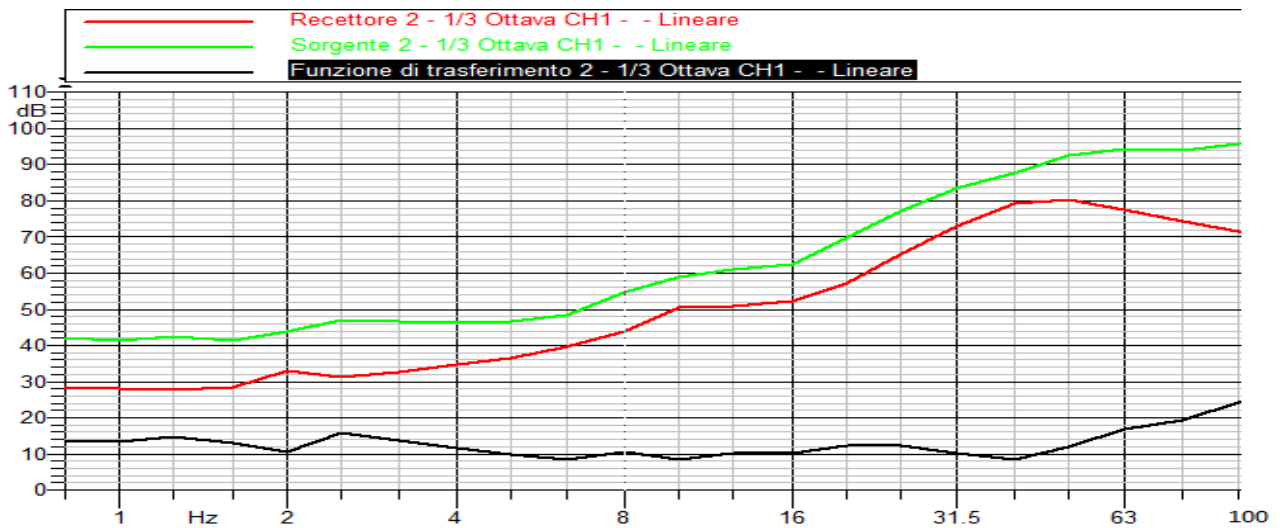


Fig. 433: funzione di trasferimento 2

Valutazione della funzione nella sezione 3 del percorso

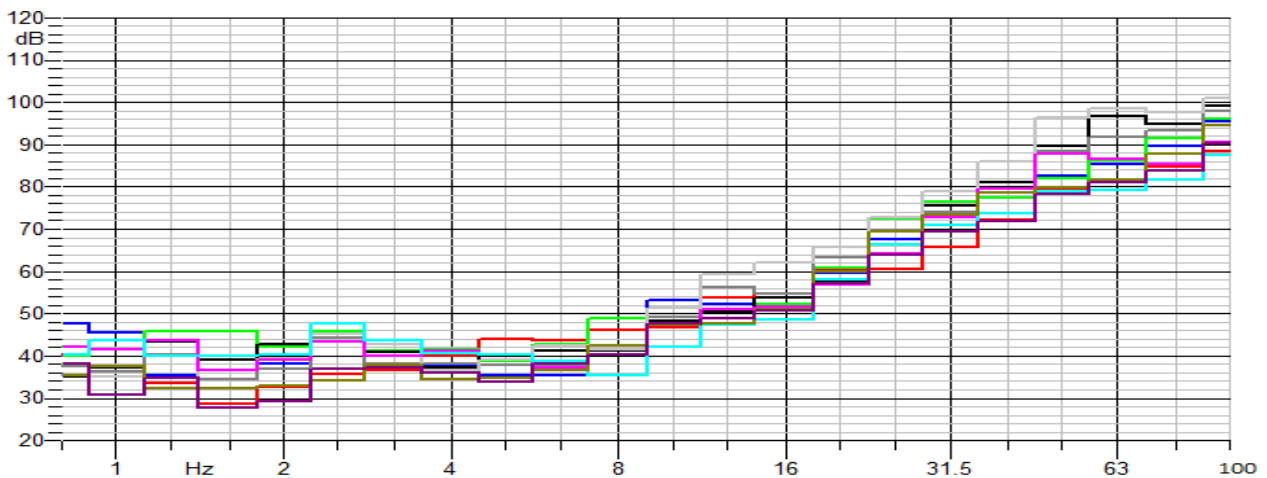


Fig. 434: confronto tra gli spettri degli eventi selezionati della sorgente 3

Tabella 159: valori in decibel per la sorgente 3 definiti per ciascuna frequenza

<b>S.3</b>	<b>Valori in dB ad ogni passaggio</b>										
<b>F [Hz]</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>Medie</b>
<b>0.8</b>	49.2	39.7	42.7	39.8	39.9	41.9	43.5	43.9	48.7	41.6	43.1
<b>1</b>	47.9	36.2	43.2	43.1	37.4	40.8	46.1	47.5	49.2	34	42.5
<b>1.25</b>	40.4	36.9	51.8	47	47.1	56.5	47.8	44.6	51	36.6	46.0
<b>1.6</b>	41.3	34.7	50.9	44.1	49.7	59.1	43.1	41.6	52.4	30.4	44.7
<b>2</b>	41	37.2	49.2	45.1	51.4	61.5	44.4	42.6	53.7	33.9	46.0
<b>2.5</b>	46.1	38	49.8	46.1	54.1	65.5	46.1	48.6	53.3	39.7	48.7
<b>3.15</b>	46.4	42	50.2	44	55.4	62.3	44.8	48.8	53.9	42.7	49.1
<b>4</b>	43.6	44.8	50.7	44.1	56.7	60.4	43.6	48.4	54.1	43.2	49.0
<b>5</b>	46.3	47.6	50.2	46.6	56.9	64.8	45.4	44.6	51.8	42.7	49.7
<b>6.3</b>	47.5	47.9	54.2	48	57.8	64.3	47.8	44.9	51.8	48	51.2
<b>8</b>	57.8	51.3	57.6	55.7	60.1	69.1	53.8	45.4	55.4	50.4	55.7
<b>10</b>	63.9	55.1	57.6	62	63.6	72.8	58.5	49.4	59.1	58.6	60.1
<b>12.5</b>	61.8	61.5	60.5	63.1	66.7	69.8	61.3	54	62.3	59.7	62.1
<b>16</b>	60.2	64.7	64.7	62.7	67.7	72.7	63.5	56.7	61.1	59.8	63.4
<b>20</b>	71.7	67.6	72.1	69.3	75.9	76.2	68.2	67.1	69.1	65	70.2
<b>25</b>	77	69.7	81	80.5	81.1	84.1	74.6	74.3	78.2	72.7	77.3
<b>31.5</b>	82.5	74.6	85.8	87.6	85.8	89.4	82.6	78.5	81.6	78.2	82.7
<b>40</b>	87.6	81.6	88	92	90	96.4	90.2	82.2	87.3	81.5	87.7
<b>50</b>	91.5	89.7	91.6	98.7	97.5	105.8	96	87.5	88.9	87.5	93.5
<b>63</b>	93.1	91.3	94.7	104.7	99.9	107.1	94.4	90	89	89.2	95.3
<b>80</b>	96	92.3	97.1	103.3	102.9	107.1	95.8	90.3	94.4	90.5	97.0
<b>100</b>	101	94.1	101.3	106.4	107.6	109.9	99.6	94.2	98.2	95.3	100.8

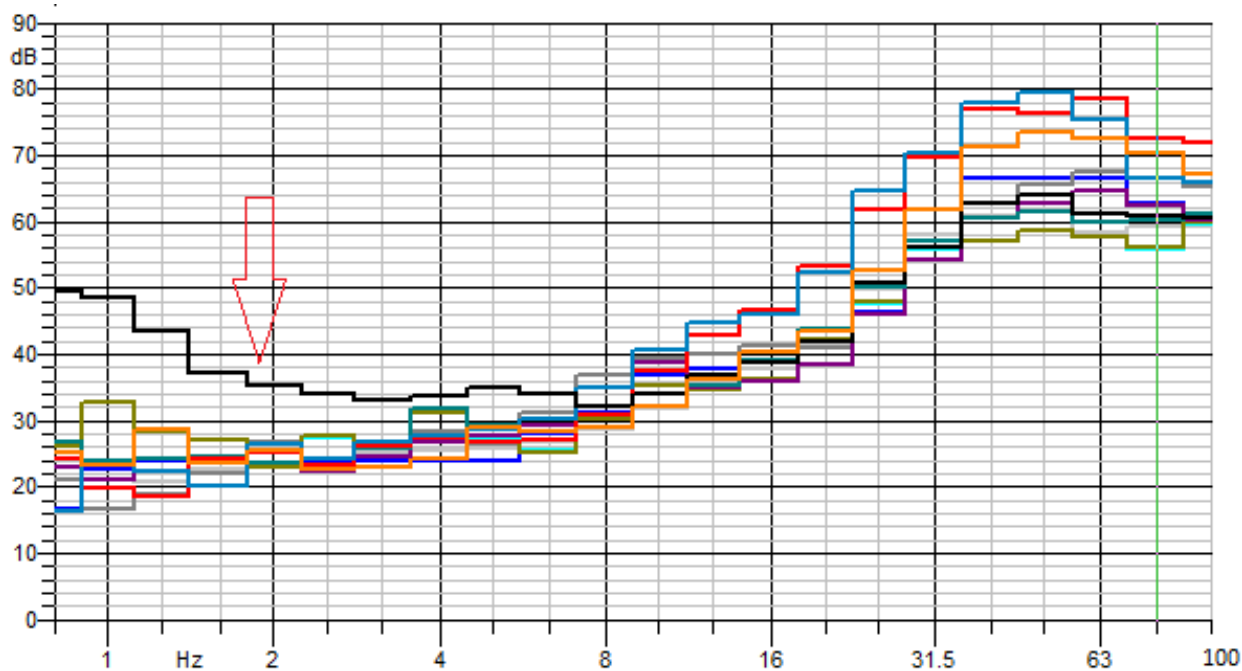


Fig. 435: confronto tra gli spettri degli eventi selezionati del recettore 3

Tabella 160: valori in decibel per il recettore 3 definiti per ciascuna frequenza

<b>R. 3</b>	<b>Valori in dB ad ogni passaggio</b>										
<i>f</i> [Hz]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Medie
<b>0.8</b>	26.1	26.5	28.4	30.2	30.2	32	28.5	31.7	25.5	26.8	28.8
<b>1</b>	24.8	25.1	27.9	34.6	34.6	30.6	25.6	28.6	26.8	28.1	29.0
<b>1.25</b>	26	24.5	24	30.3	30.4	31.1	26.2	27.5	27.3	26.2	27.5
<b>1.6</b>	27.2	27.1	27.6	30.8	30.8	28.9	28.3	29	26.9	25.3	28.7
<b>2</b>	27.9	34.4	32.9	30.4	30.2	32.6	31.3	33.9	35.1	33.4	31.4
<b>2.5</b>	29.4	31.4	31.8	33	33	30.7	31.8	32.6	35.5	29.7	31.6
<b>3.15</b>	33.8	32.6	36.9	37.1	37.2	32.7	35	37	34.8	36.3	35.0
<b>4</b>	34.9	34.8	38.4	38.2	38.2	34.1	41.6	36.8	32.6	36.1	37.2
<b>5</b>	33.6	35.8	37.5	36	36	35.8	39.9	38.8	36	35.7	36.4
<b>6.3</b>	38.7	39.2	37.7	37.6	37.6	39.8	39.9	40.4	37.6	40.8	38.6
<b>8</b>	41.8	48.3	38.8	41.3	41.2	44.7	42.6	41.6	43.7	45.5	42.7
<b>10</b>	48.5	50.6	42.9	43.8	43.8	49.3	43.9	46.8	51.7	47	46.1
<b>12.5</b>	49.3	50.6	44.1	44.6	44.6	45	44.9	50.1	54.9	47.2	46.2
<b>16</b>	48.8	51.1	47.8	46.3	46.4	44.8	47.8	51.3	56.2	51.1	47.6
<b>20</b>	52.2	52.4	52.9	52.3	52.4	49	55.4	57.8	58	64.2	52.4



<b>25</b>	60	59.8	65.1	60.3	60.4	58.9	64	69	65.9	64.3	61.2
<b>31.5</b>	68.1	67.3	68.1	65	65.1	64.7	68.4	75.1	73.3	72.7	66.7
<b>40</b>	76.7	71.5	69.8	67.2	67.3	72.3	69.5	72.4	79.8	75.5	70.6
<b>50</b>	77.6	76.3	70.6	68.3	68.4	73.4	71.4	74.5	79	76.5	72.3
<b>63</b>	77.5	79.1	68.7	67.7	67.8	76	69.2	71.6	76.4	70.8	72.3
<b>80</b>	72.6	75.7	67.5	64.7	64.8	72	69.2	66.5	72.9	66	69.5
<b>100</b>	69.1	73.6	67.2	66.4	66.5	69.4	67.7	63	67.6	63.8	68.6

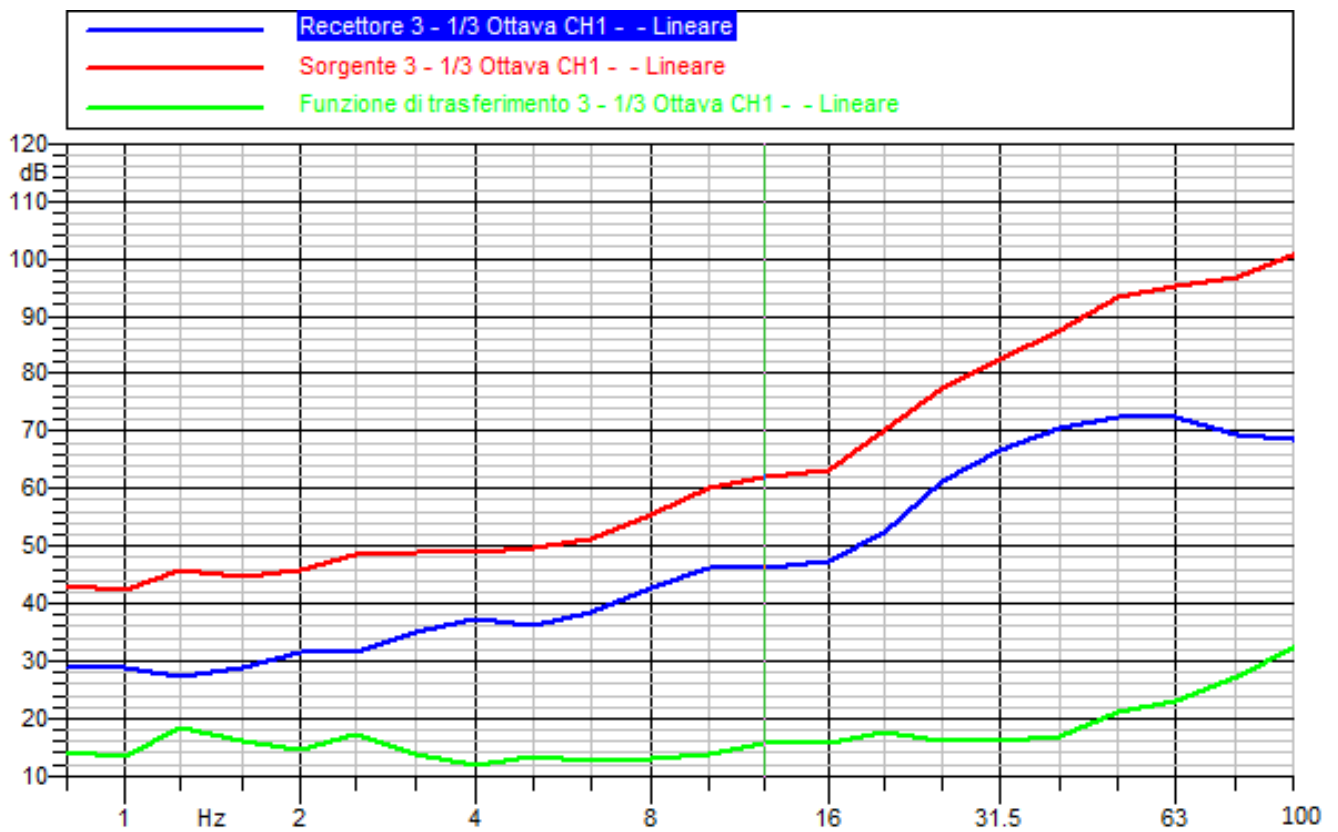


Fig. 436: funzione di trasferimento 3

## Sezione di verifica

### Sorgente di verifica

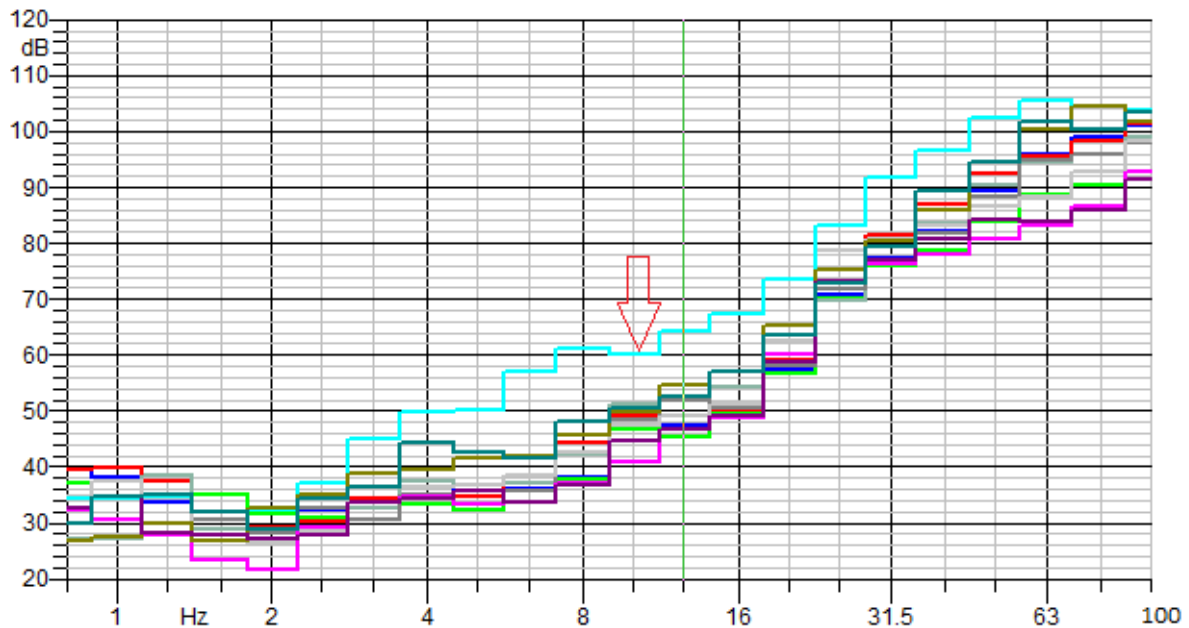


Fig. 437: confronto tra gli spettri degli eventi selezionati della sorgente di verifica

Tabella 161: valori in decibel per la sorgente di verifica definiti per ciascuna frequenza

S verifica	Valori in dB ad ogni passaggio											
$f$ [Hz]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Media
0.8	41.3	41.2	38.6	29.4	35.6	35.7	34	39.8	31.2	35.1	32.7	35.9
1	40	41.8	37.3	30.7	36.8	40.2	33	41.3	32.6	39.3	38.3	37.4
1.25	37.1	42.1	40.1	42.5	33	38.1	30.8	45.3	33.4	36.2	46.4	38.6
1.6	41.1	47.5	37.4	36.6	34.9	34.4	29.7	43.5	38.2	32.5	47.3	38.5
2	39.6	45.9	36	37	37.9	35.6	34.7	45.1	47.6	33.1	51.4	40.4
2.5	43.4	46.3	35.5	37.8	37.2	36.2	39.8	47.1	48.6	35.8	53	41.9
3.15	44.9	46.4	37.6	39.6	38.2	44.4	46.4	52.1	51.9	44.5	56	45.6
4	46	48.7	37.9	41.7	38.6	43	45.7	58.2	51.5	45.6	59	46.9
5	47.7	51.9	39.3	41.7	40.4	42.9	40.3	65.2	52.6	44.8	59.8	47.9
6.3	49.3	54.3	45.1	45.3	44.8	44.6	43	70.5	53.7	42.8	61.3	50.4
8	51.8	57.6	50.1	51	54.4	53.2	48.3	70.7	59	47.7	61.1	55.0
10	61.3	61.9	58.5	65.9	60.9	59.6	50.4	70.7	64.4	57.4	64.9	61.4
12.5	59.9	63.5	57.8	62.9	62.6	59.4	54.3	72.8	68.8	58	65.7	62.3
16	63.7	61.2	60.8	64.3	63	62.5	60.7	77.9	70.5	60	71	65.1
20	71.1	72.2	69.6	70.8	71	75	73.8	83.8	77.1	72.6	77.5	74.0

<b>25</b>	80.3	81.7	78.8	79	80.4	88.8	81.7	95	86.4	81.9	83.8	<b>83.4</b>
<b>31.5</b>	86.1	89.4	84	84.7	85.8	88.3	84.5	102.9	92.7	84.8	88.9	<b>88.4</b>
<b>40</b>	91.9	95	86.9	90	89.9	89.9	86.2	104.9	95.7	87.2	97.4	<b>92.3</b>
<b>50</b>	96.2	99.4	91.4	97	96.4	94.2	88.2	110.8	101.3	90.9	101.3	<b>97.0</b>
<b>63</b>	100.8	101.4	95.3	99.9	100.7	95.1	89	112.1	106.3	90	107.3	<b>99.8</b>
<b>80</b>	104	103.6	95.8	101.5	100.8	98.5	92.5	109	110.1	91.7	106.1	<b>101.2</b>
<b>100</b>	104.6	105.3	98.8	104.7	103.6	102.8	98.9	109.3	105.8	95.9	107.7	<b>103.4</b>

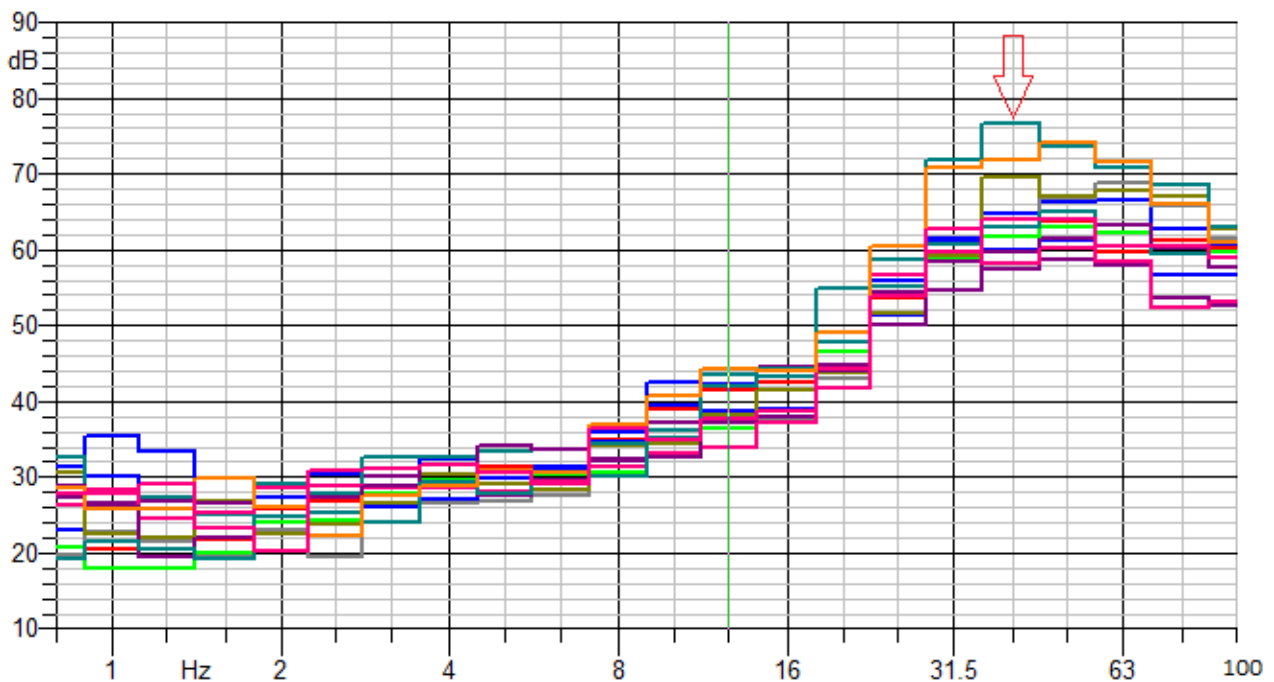


Fig. 438: confronto tra gli spettri degli eventi selezionati del recettore di verifica

Tabella 162: valori in decibel per il recettore di verifica definiti per ciascuna frequenza

<b>R verifica</b>	<b>Valori in dB ad ogni passaggio</b>													
$f_s$ [Hz]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	<b>Media</b>
<b>0.8</b>	27.8	30.9	28.8	34.8	28.2	31.7	28.6	30.1	31.5	33.4	34.6	32.2	33.7	<b>31.3</b>
<b>1</b>	32.9	25.9	27.9	36.7	28	28.6	29.4	29.2	30.9	30.6	32.4	32.5	34.5	<b>30.7</b>
<b>1.25</b>	31.1	27.5	24.2	34.3	25.8	27.5	28.5	32.5	29.3	31.6	32.5	34.8	29.6	<b>29.9</b>
<b>1.6</b>	30.8	26.6	26.9	34	29	29	27.9	32.2	32	32.1	33.2	30.9	29.3	<b>30.3</b>
<b>2</b>	34.3	30.7	32.4	36.1	30.4	33.9	33.2	34.1	32.8	35.2	35.3	34.1	33.9	<b>33.6</b>
<b>2.5</b>	31.1	30.8	32.9	38.2	29.3	32.6	32.9	32.2	32.7	33.9	36	35.8	36.3	<b>33.4</b>
<b>3.15</b>	32.6	34.4	35.1	37.6	31.8	37	33.2	35.8	35.5	34.2	41	38.1	41.9	<b>36.0</b>
<b>4</b>	35.7	38.5	38.9	40.5	34	36.8	34.5	39.3	38.4	36.4	41.2	37.8	38.2	<b>37.7</b>

<b>5</b>	36.2	38.4	38.8	39.9	34.8	38.8	35.6	40.1	37.2	36.2	42.6	39	37.8	<b>38.1</b>
<b>6.3</b>	40.3	41.8	39.8	43.2	39.7	40.4	38.4	41.5	40	39.4	43.1	40.5	36.8	<b>40.4</b>
<b>8</b>	49.1	52	39.8	50.3	44.3	41.6	42.2	45.2	44	43.9	45.8	44.7	40.3	<b>44.9</b>
<b>10</b>	57.8	55.1	43.2	55.4	48.4	46.8	50.3	56.2	49.9	51.1	49.2	47	42.7	<b>50.2</b>
<b>12.5</b>	55.2	56.4	46.3	51.2	49.4	50.1	55.2	56.2	50.9	50.6	53.7	48.6	45.4	<b>51.5</b>
<b>16</b>	53.2	55.2	50.1	51.8	48.4	51.3	56.9	56.7	54.3	50.7	53.8	50.1	46.3	<b>52.2</b>
<b>20</b>	56	59.1	59.7	56.4	58	57.8	65.7	63.6	58.6	56.8	60.5	55.1	57.6	<b>58.8</b>
<b>25</b>	66.1	69.3	69	70.8	67.9	69	73.4	76	66.9	64.1	69.8	69.3	72.2	<b>69.5</b>
<b>31.5</b>	76.9	76.8	77.4	76.1	76	75.1	83.6	86.2	75.7	69.6	78.5	77.4	79	<b>77.6</b>
<b>40</b>	79.4	81.6	81.7	75.8	82.4	72.4	87.8	86.6	86.1	73.2	83	75.3	83.5	<b>80.7</b>
<b>50</b>	79.4	80.8	80.8	75.6	84.2	74.5	87.1	87.3	82.9	74.5	82.7	76.3	81.1	<b>80.6</b>
<b>63</b>	81.6	73.6	76.9	71.6	82.6	71.6	83.4	87.1	82.1	77.2	74.3	70.8	74.6	<b>77.5</b>
<b>80</b>	76.9	74.5	74.3	70.1	78.7	66.5	79.7	78.9	79.1	73.2	72.6	65.4	73.1	<b>74.1</b>
<b>100</b>	72	72.7	73	71.1	73.3	63	74	73.6	74.5	69.4	71.9	64.6	71.2	<b>71.1</b>

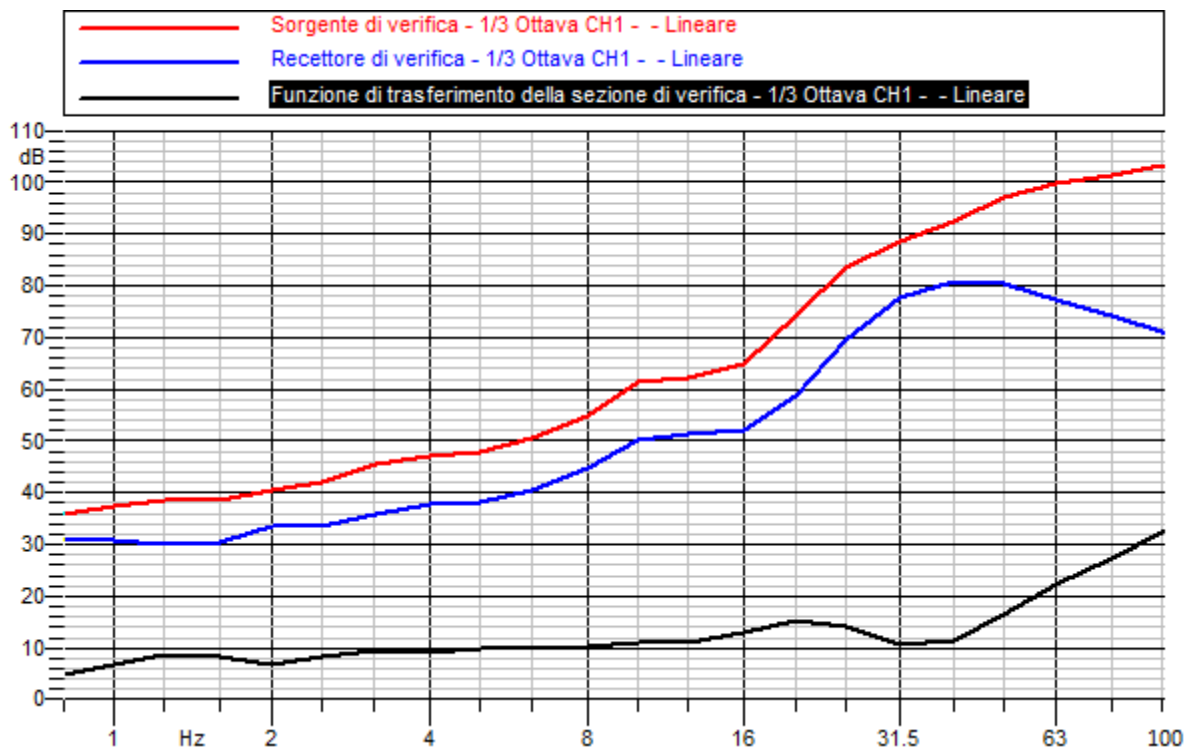
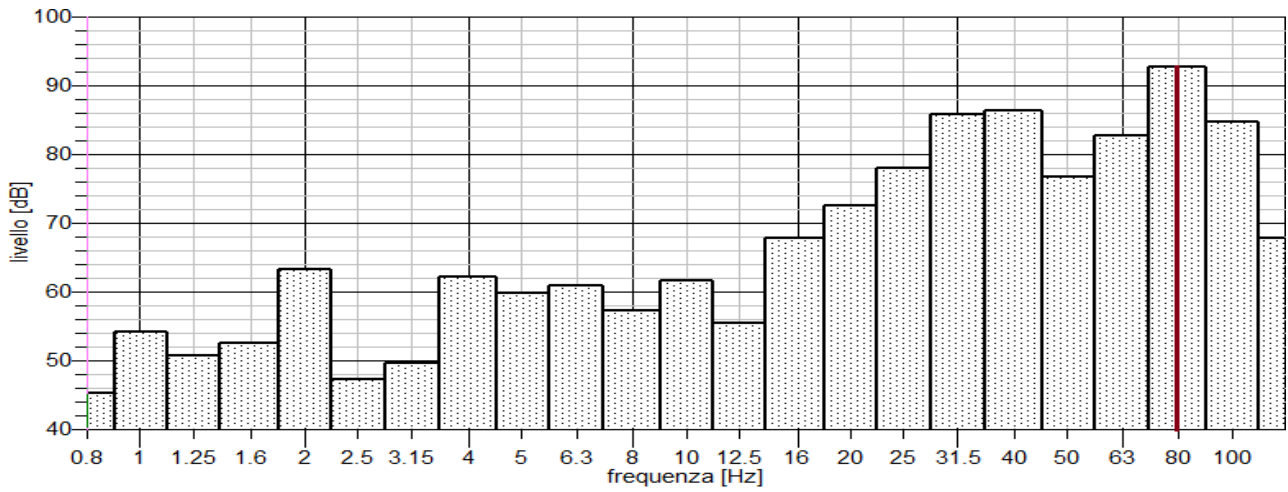
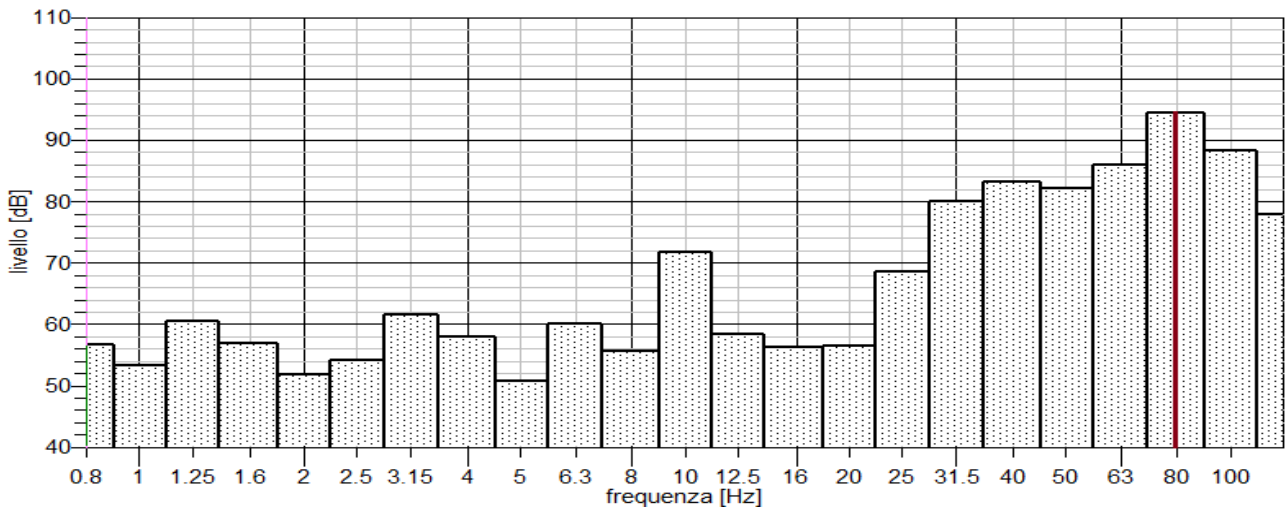


Fig. 439: funzione di trasferimento della sezione di verifica

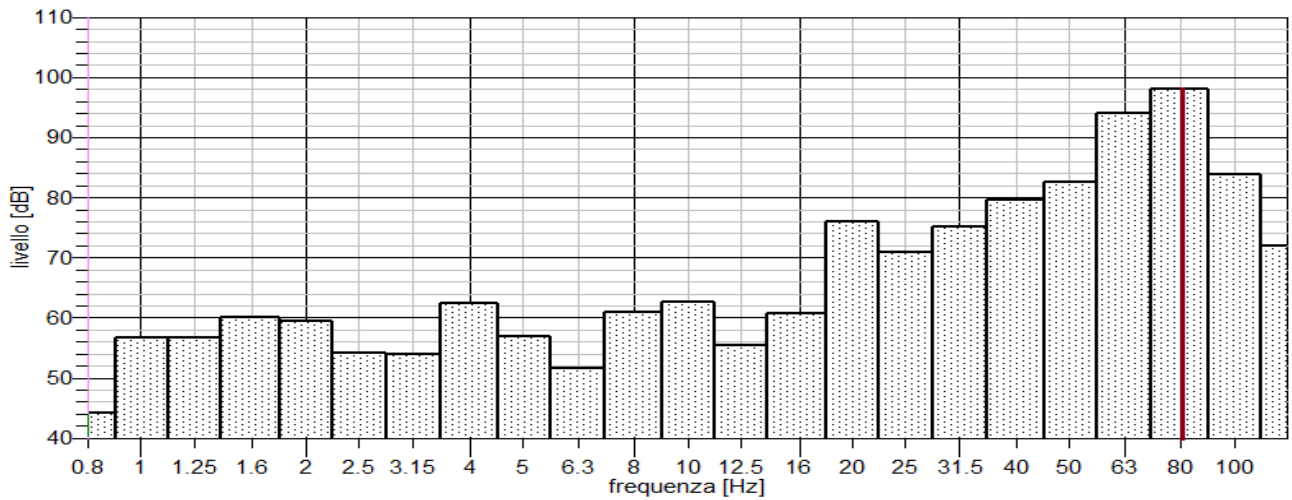
▪ *Appendice G: Grafici delle misure per il confronto con i valori imposti dalla normativa*



*Fig. 440: Frequenza fondamentale della vibrazione all'istante 2228 s*



*Fig. 441: frequenza fondamentale della vibrazione all'istante 2663 s*



*Fig. 442: frequenza fondamentale della vibrazione all'istante 3307 s*

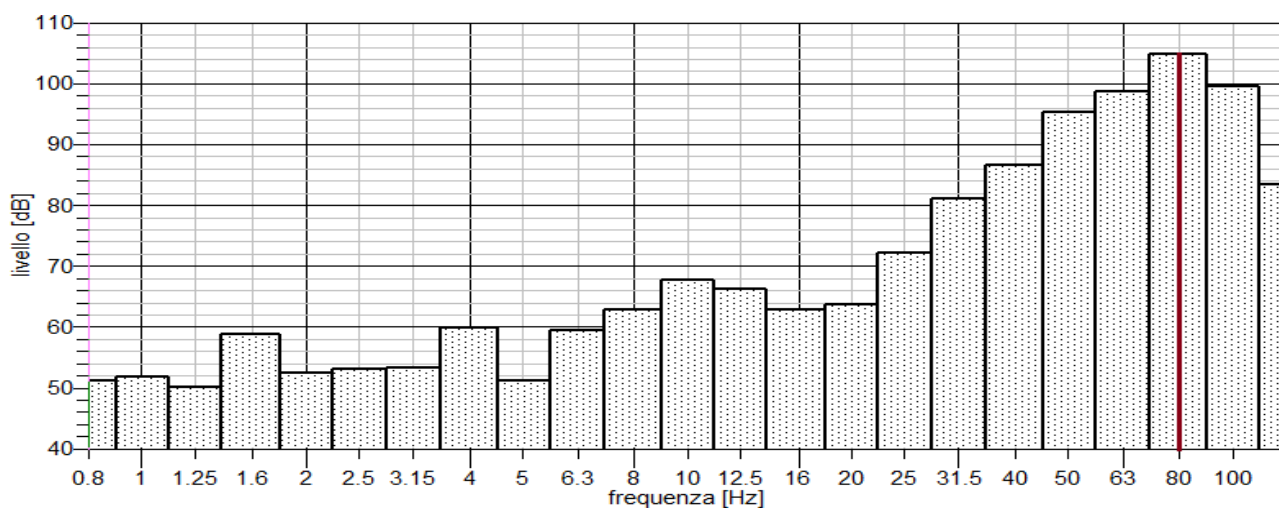


Fig. 443: frequenza fondamentale della vibrazione all'istante 3652 s

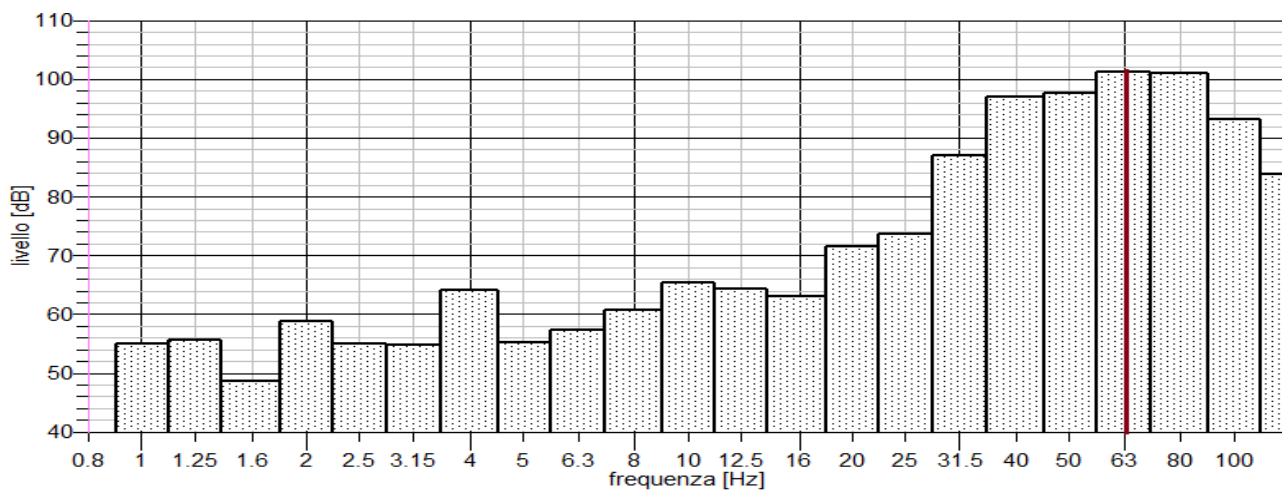


Fig. 444: Frequenza fondamentale della vibrazione all'istante 4200 s

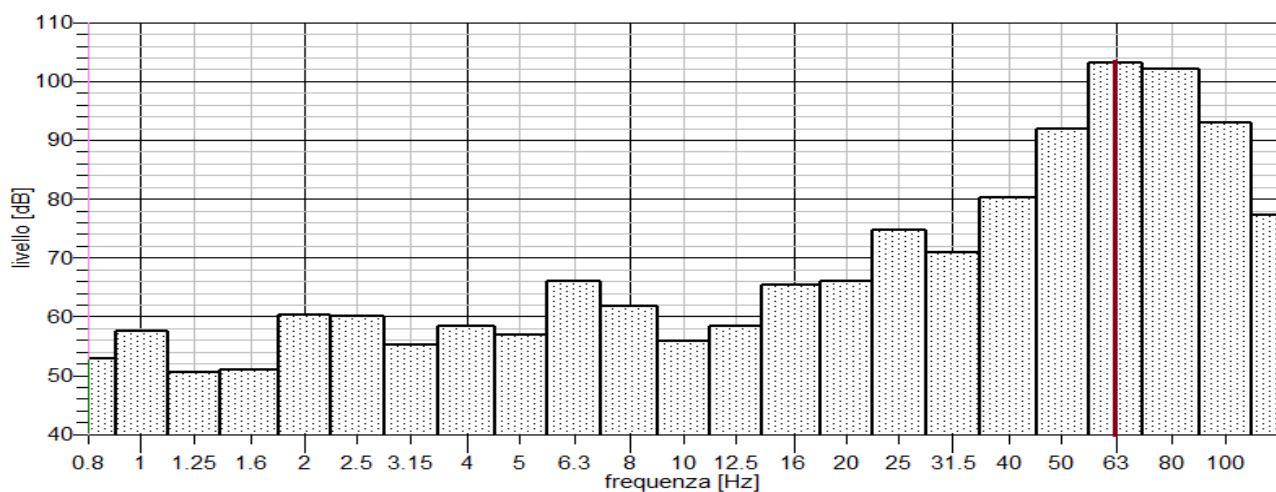
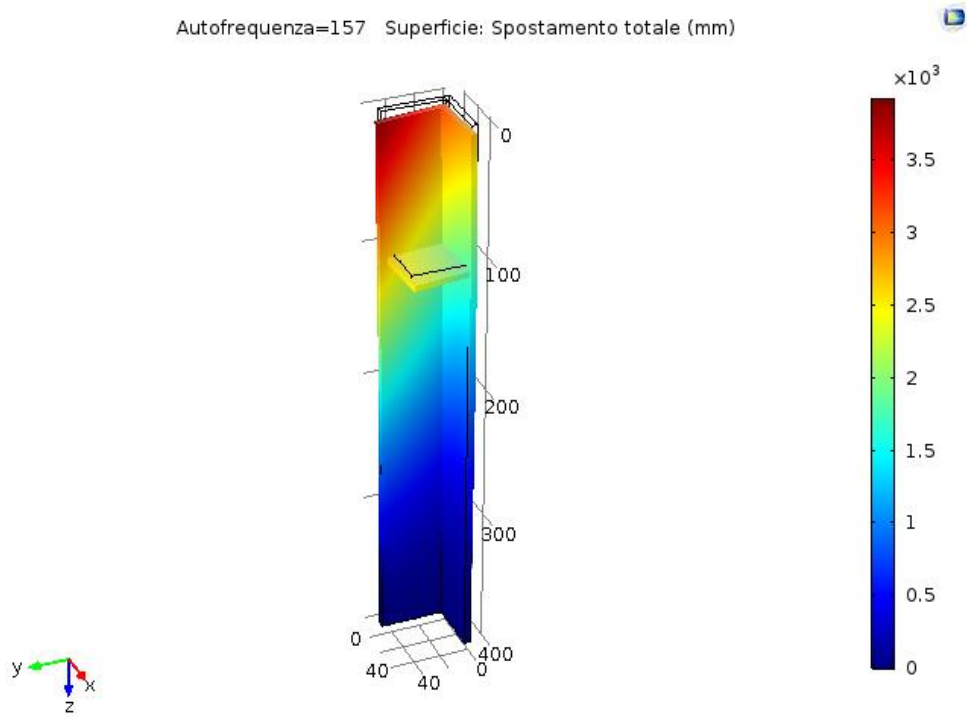


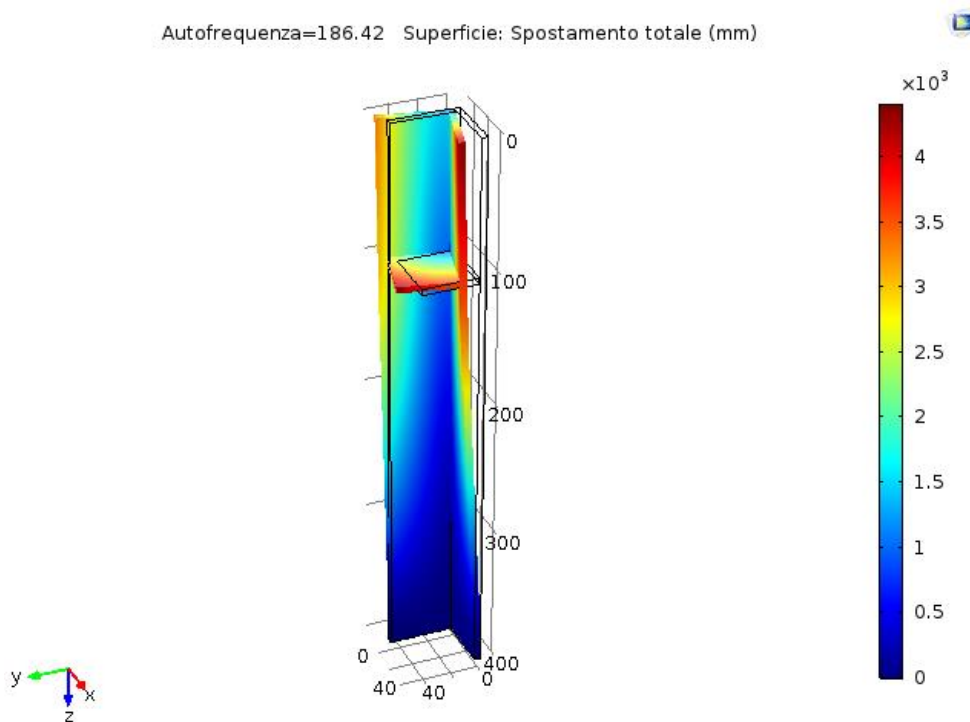
Fig. 445: Frequenza fondamentale della vibrazione all'istante 4200 s

▪ *Appendice H: Grafici simulazioni del profilato metallico*

**2 SIMULAZIONE**



*Fig. 446: grafico della prima auto-frequenza*



*Fig. 447: grafico della seconda auto-frequenza*

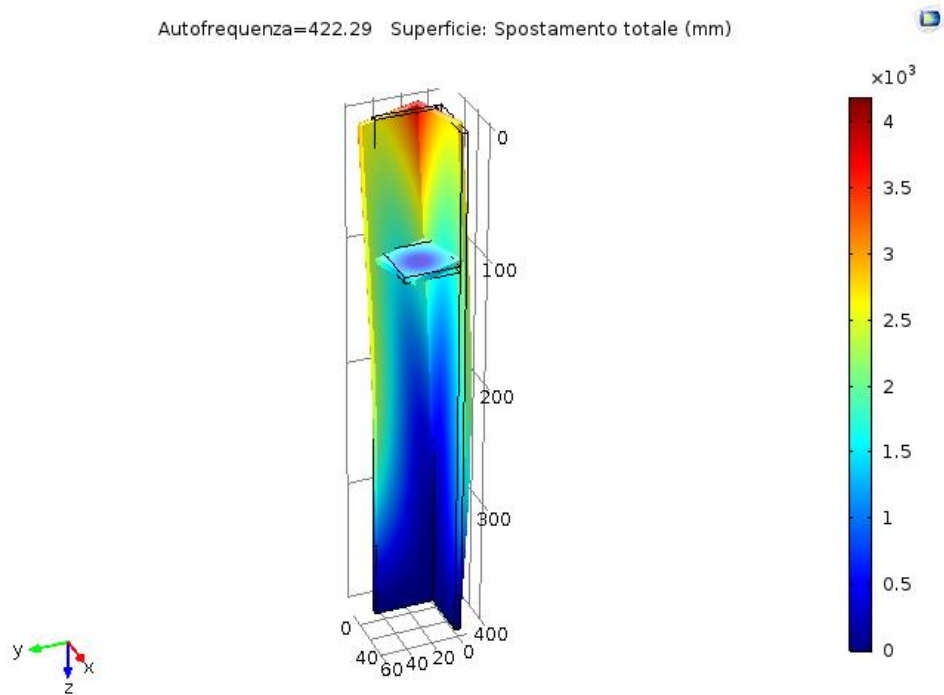


Fig. 448: grafico della terza auto-frequenza

### 3 SIMULAZIONE

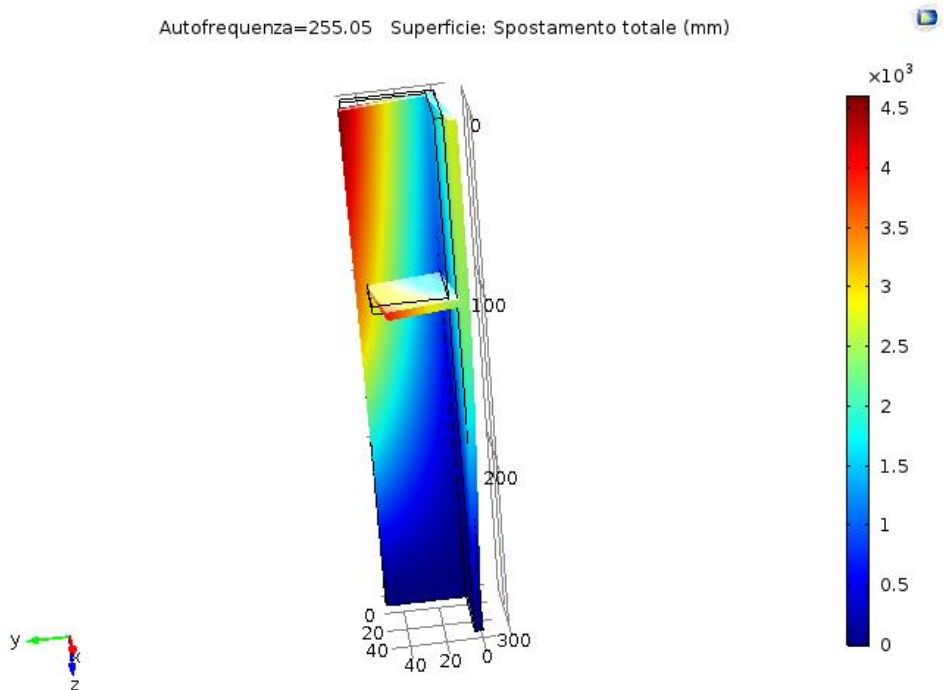


Fig. 449: grafico della prima auto-frequenza



Autofrequenza=288.95 Superficie: Spostamento totale (mm)

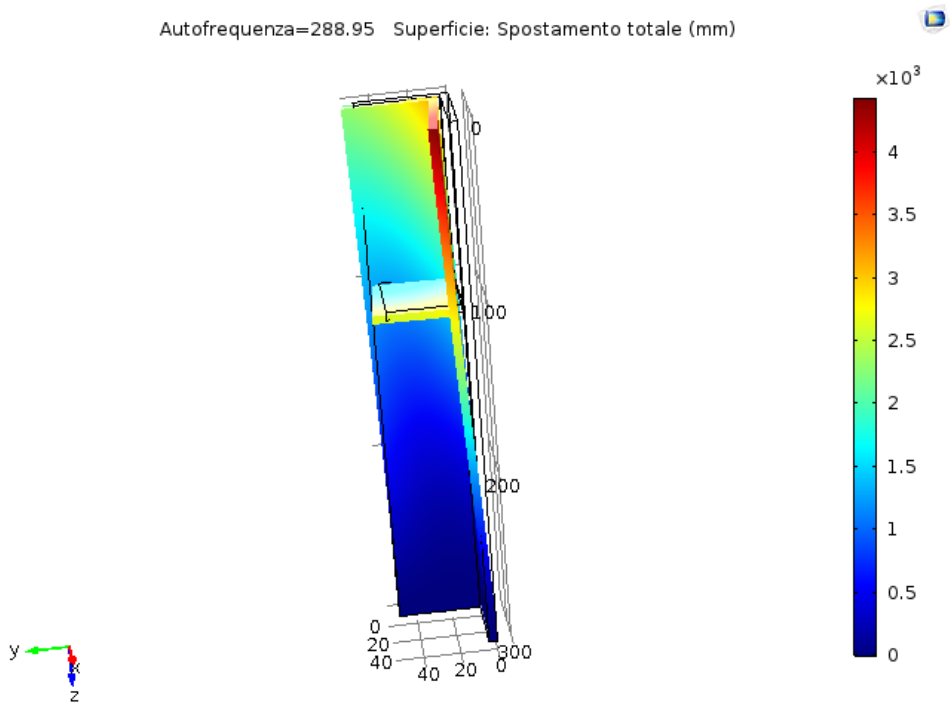


Fig. 450: grafico della seconda auto-frequenza

Autofrequenza=700.93 Superficie: Spostamento totale (mm)

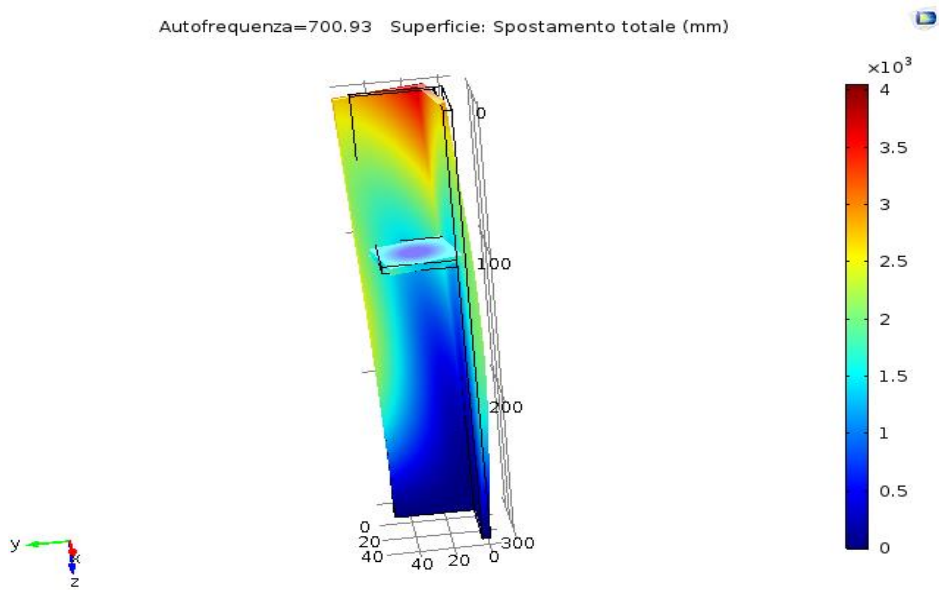


Fig. 451: grafico della terza auto-frequenza

## 4 SIMULAZIONE

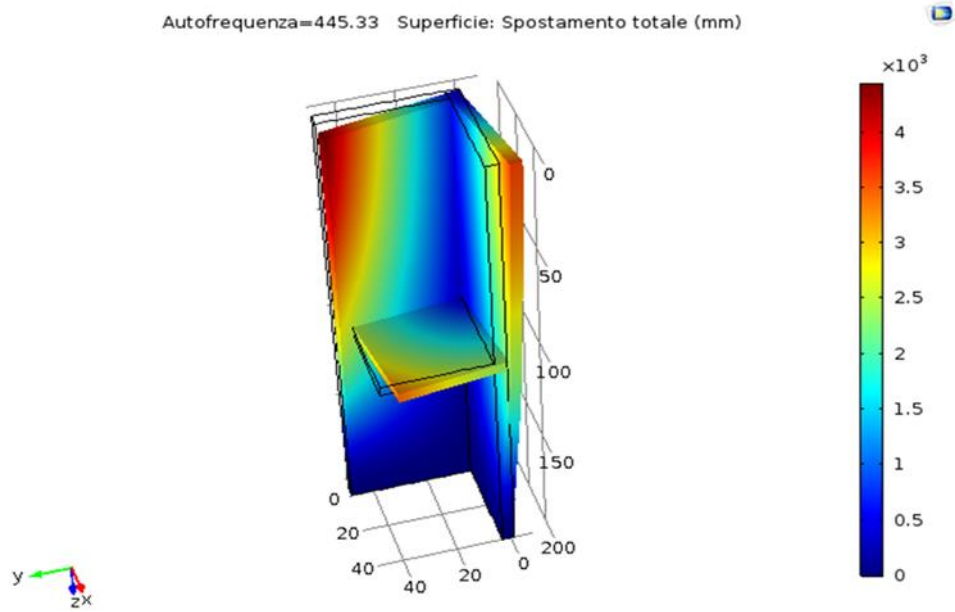


Fig. 452: grafico della prima auto-frequenza

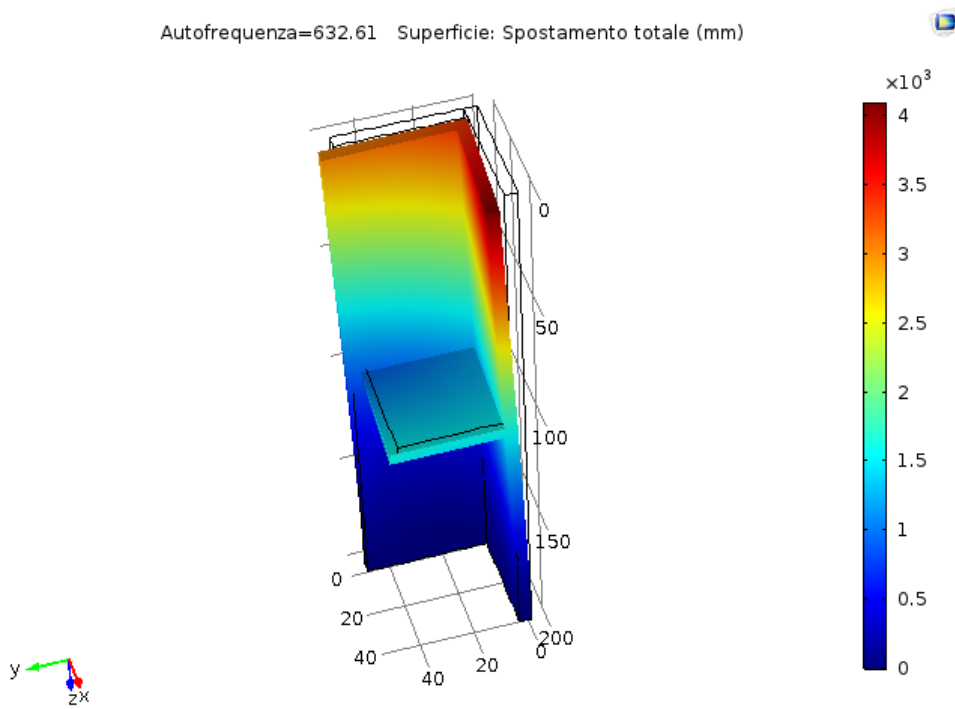


Fig. 453: grafico della seconda auto-frequenza

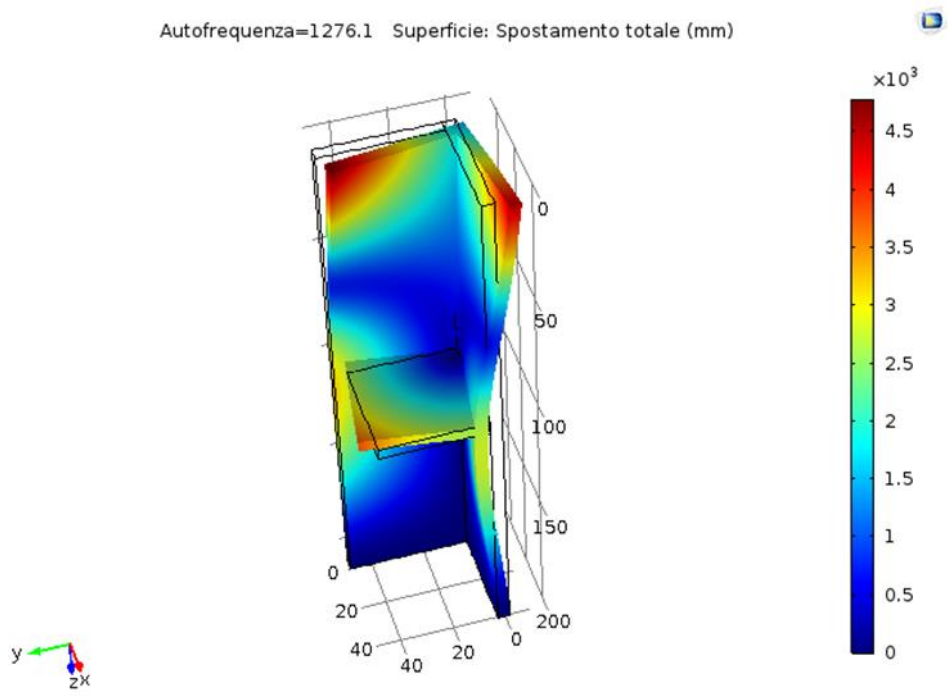


Fig. 454: grafico della terza auto-frequenza

## 5 SIMULAZIONE

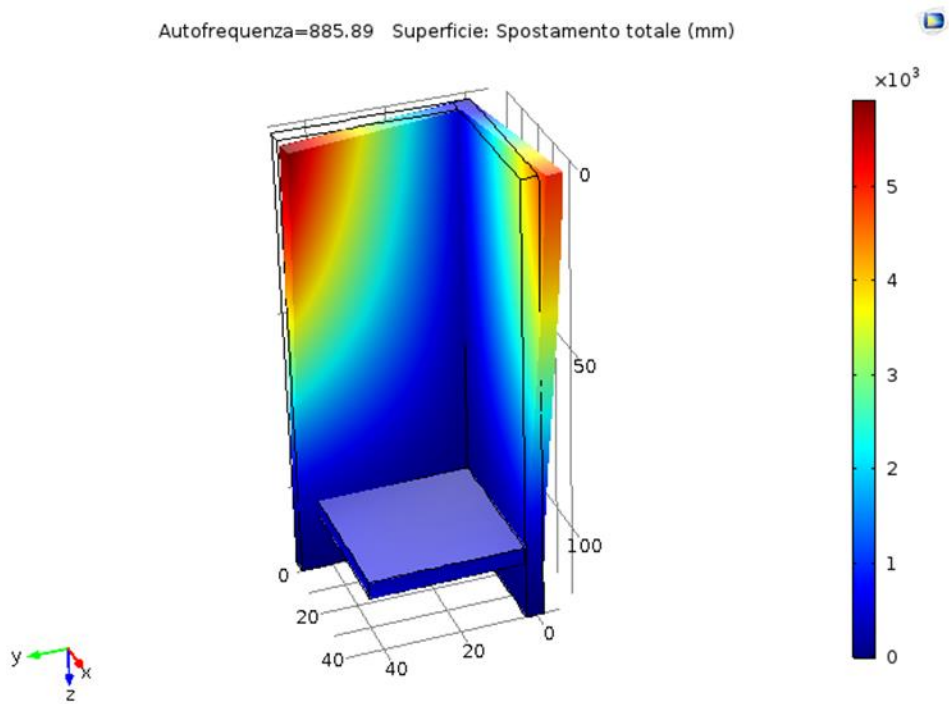


Fig. 455: grafico della prima auto-frequenza

Autofrequenza=1567.3 Superficie: Spostamento totale (mm)

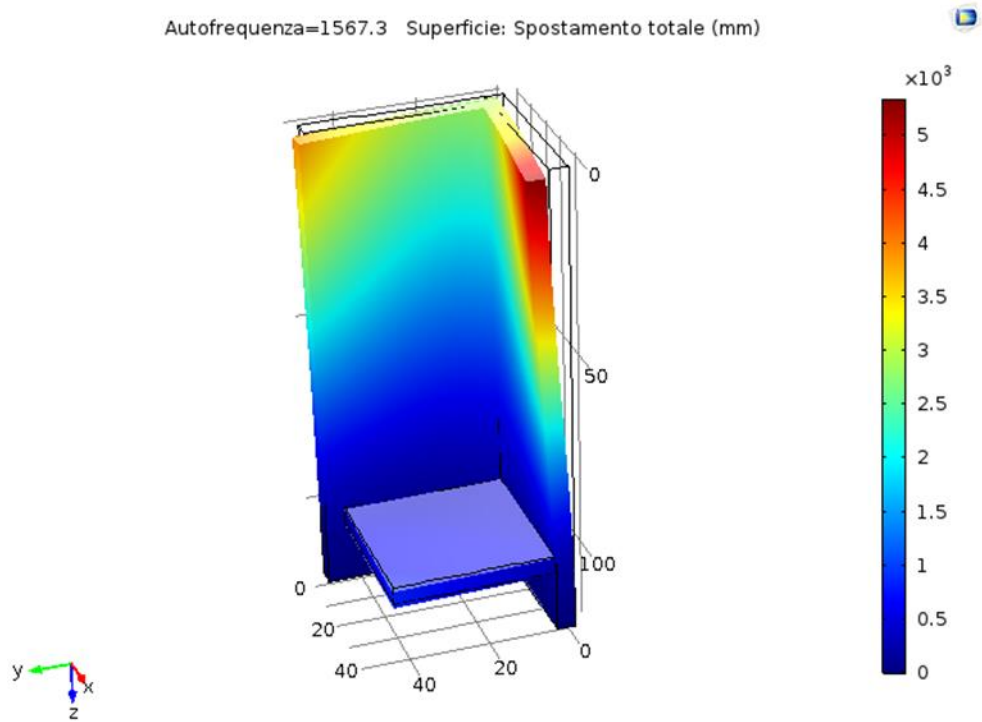


Fig. 456: grafico della seconda auto-frequenza

Autofrequenza=2927.3 Superficie: Spostamento totale (mm)

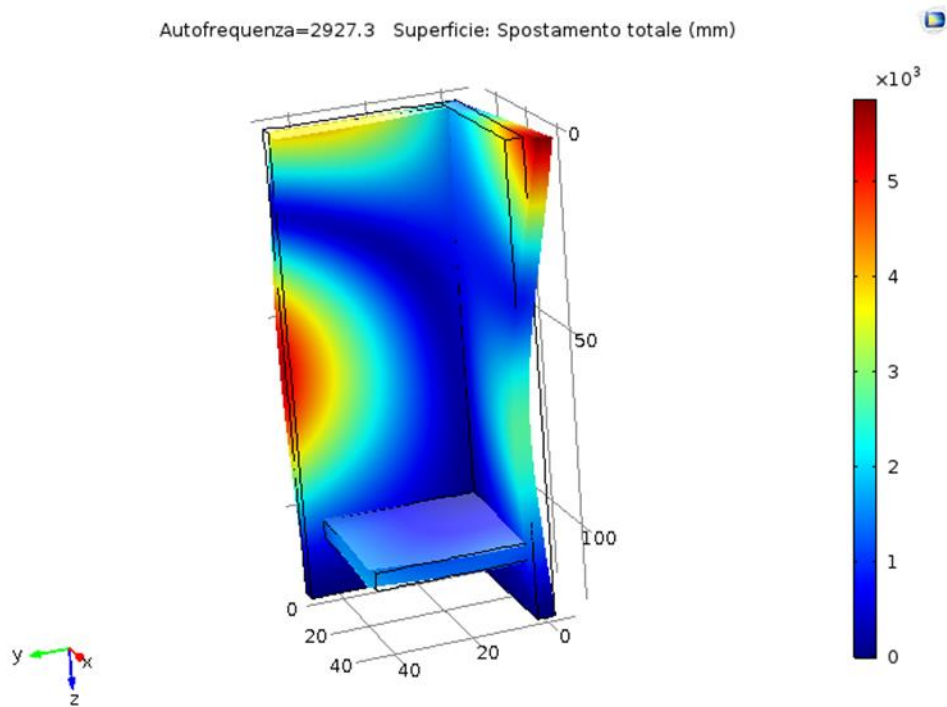
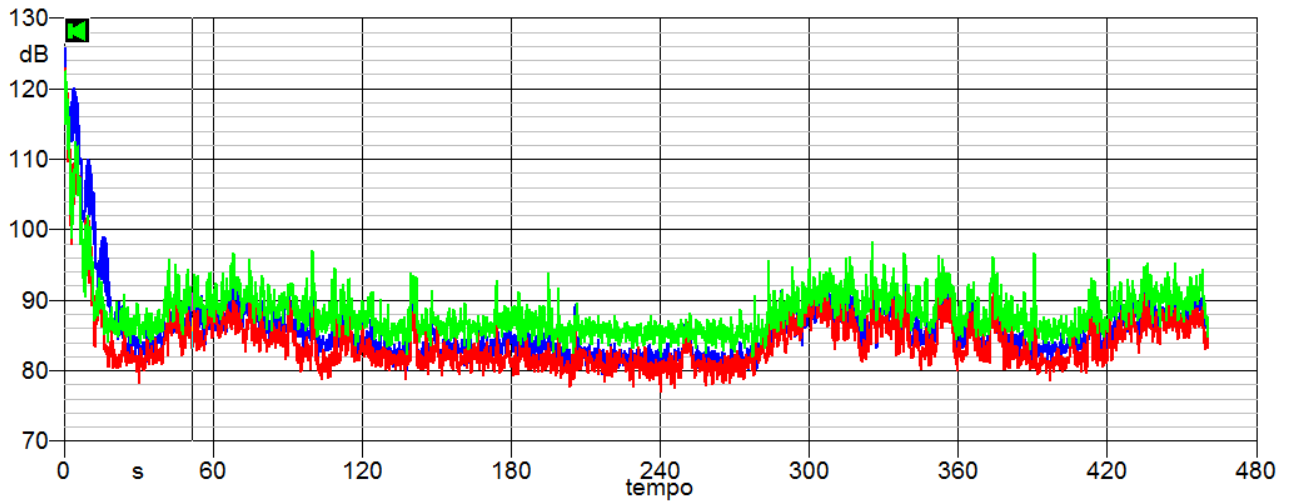


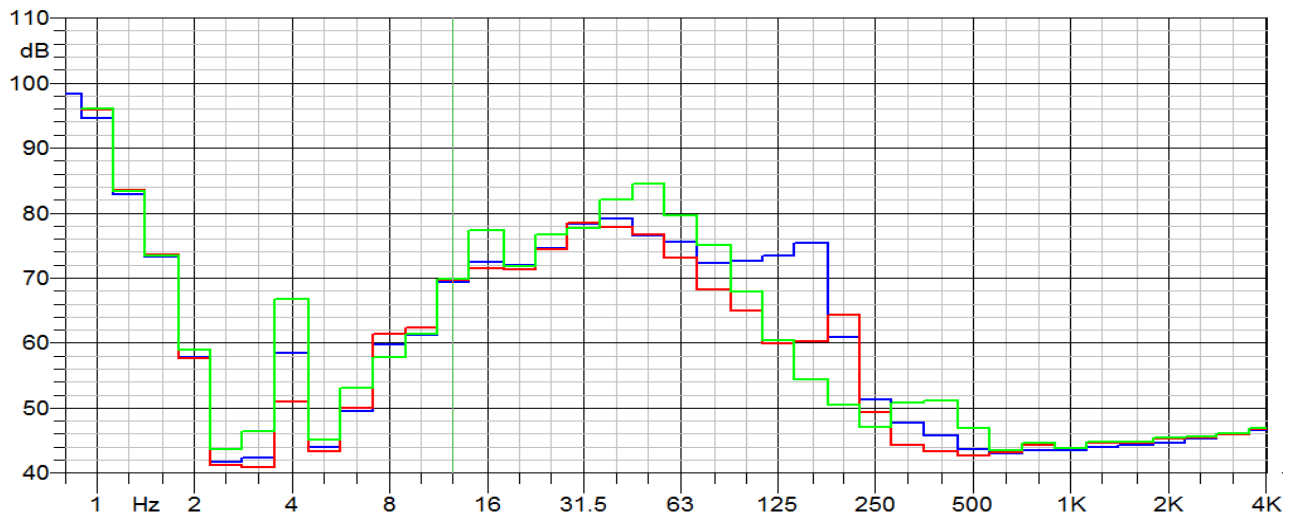
Fig. 457: grafico della terza auto-frequenza

▪ *Appendice I: Grafici misurazioni dell'impianto di lavorazione*

*Misura 2*



*Fig. 458: andamento del segnale vibratorio nel tempo del punto di misura 2*



*Fig. 459 : Spettro in frequenza (1/3 bande d'ottava) del punto di misura 2*

### Misura 3

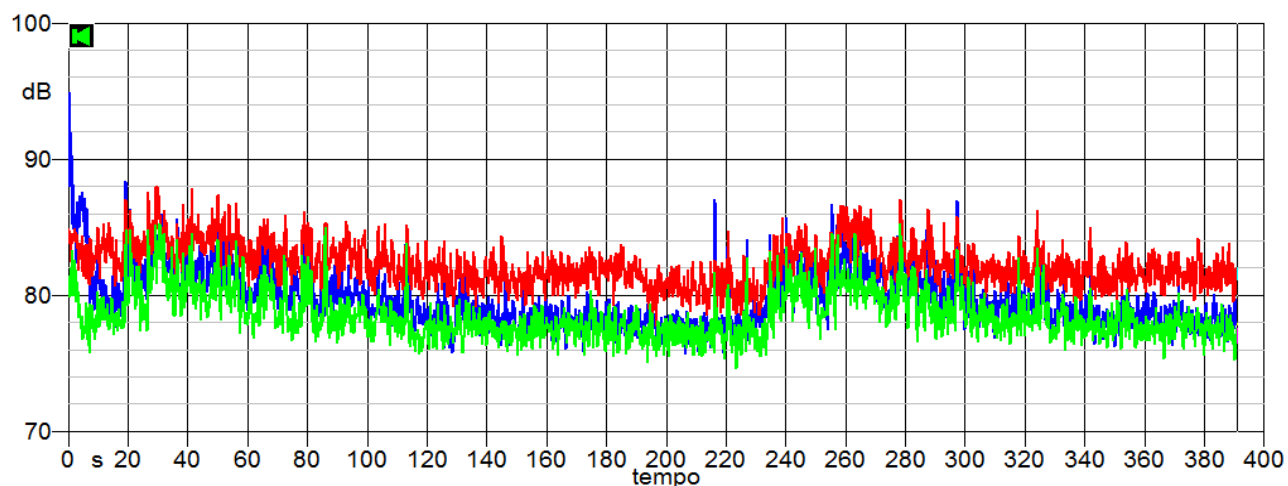


Fig. 460: andamento del segnale vibratorio nel tempo del punto di misura 3 in prossimità dell'impianto

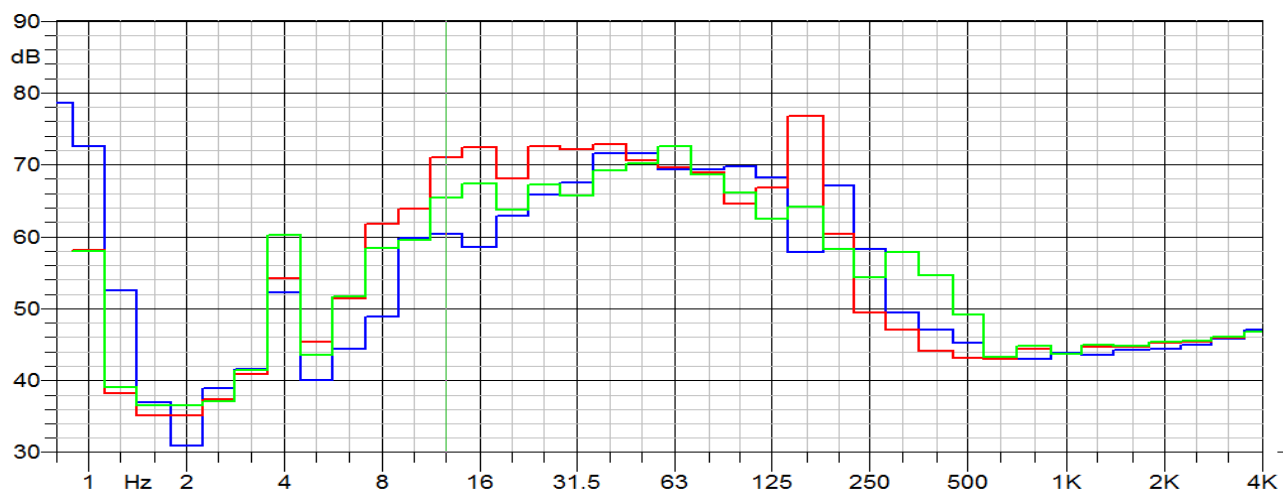


Fig. 461: spettro in frequenza (1/3 bande d'ottava) del punto di misura 3

### Misura 4

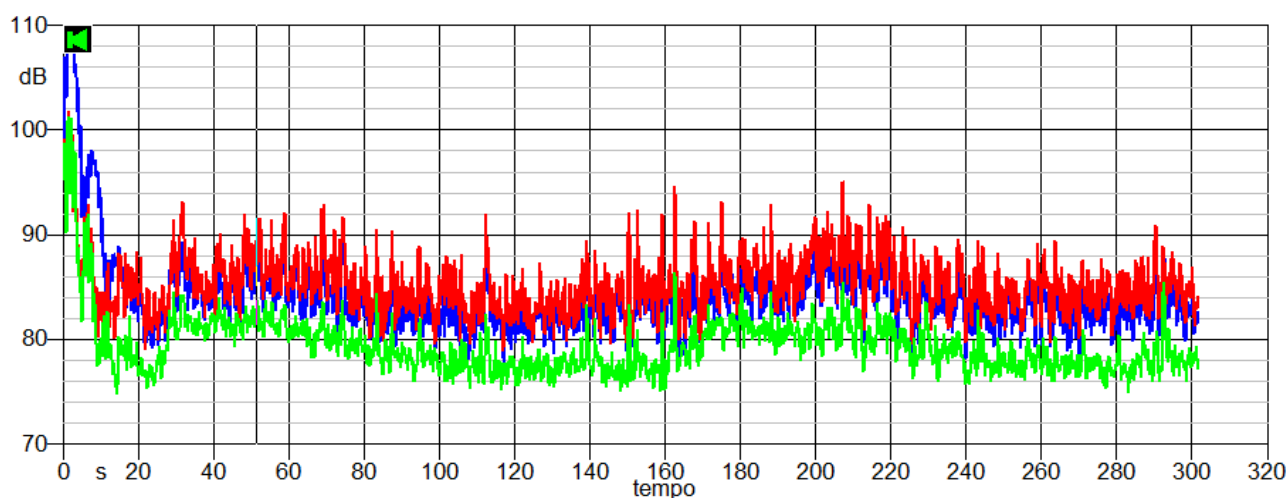


Fig. 462: andamento del segnale vibratorio nel tempo del punto di misura 4

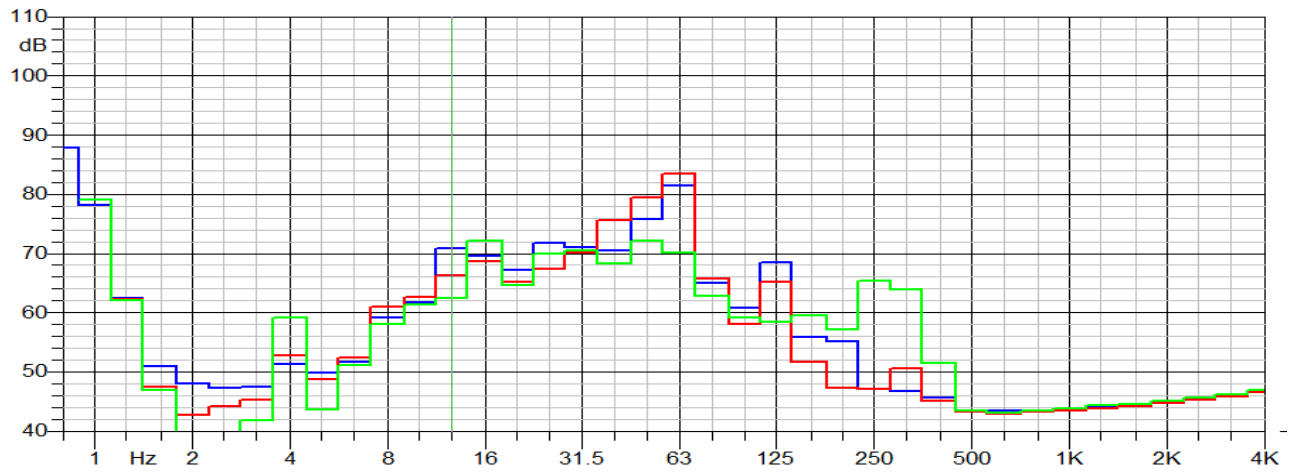


Fig. 463: spettro in frequenza (1/3 bande d'ottava) del punto di misura 4

### Misura 5

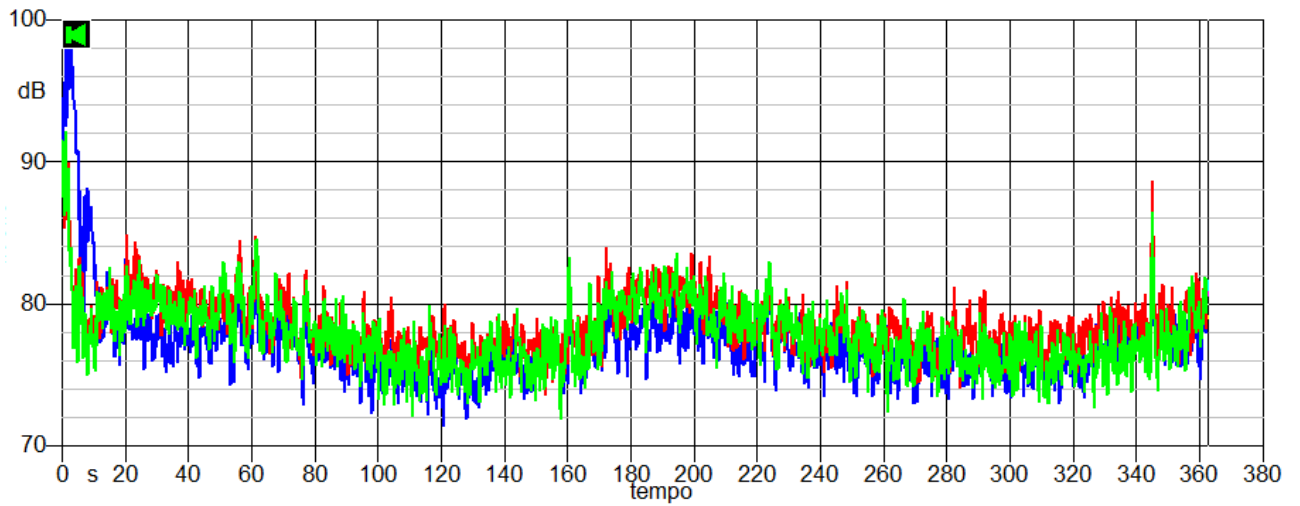


Fig. 464: andamento del segnale vibratorio nel tempo del punto di misura 5

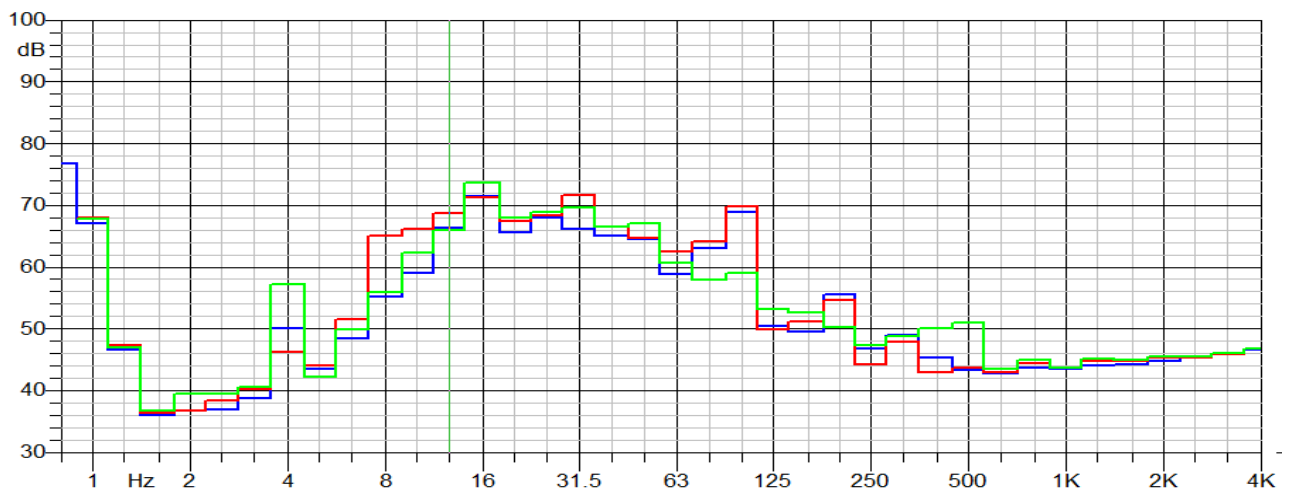


Fig. 465: spettro in frequenza (1/3 bande d'ottava) del punto di misura 5

## Misura 6

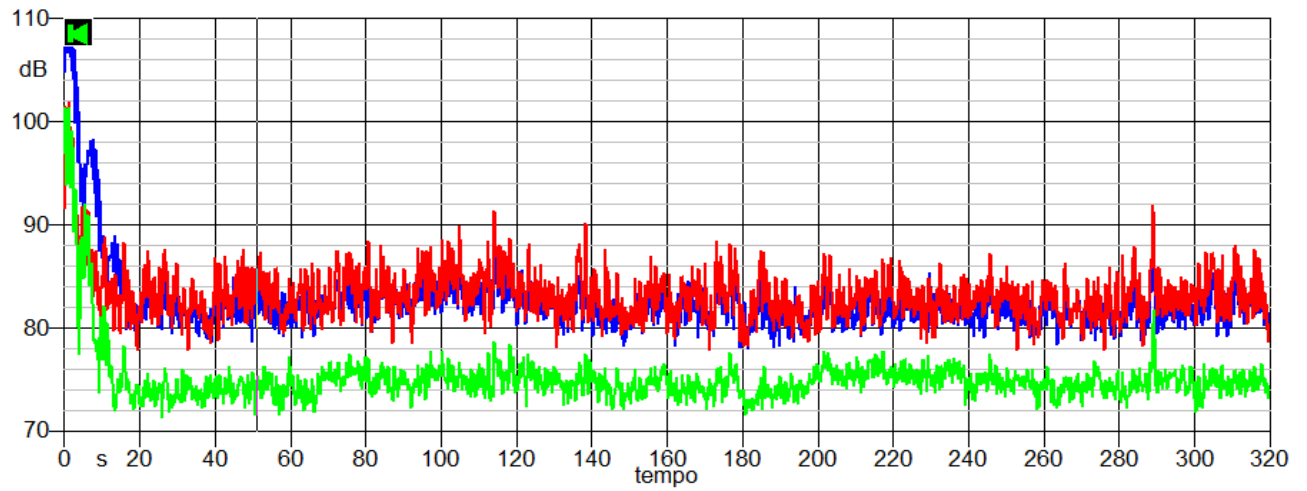


Fig. 466: andamento del segnale vibratorio nel tempo del punto di misura 6

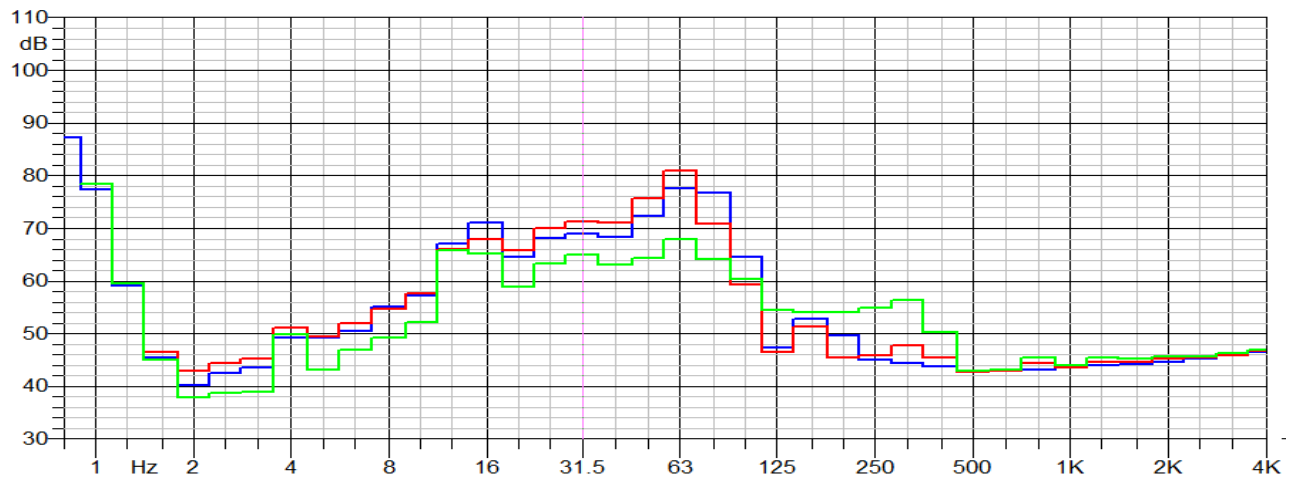


Fig. 467: spettro in frequenza (1/3 bande d'ottava) del punto di misura 6

## Misura 7

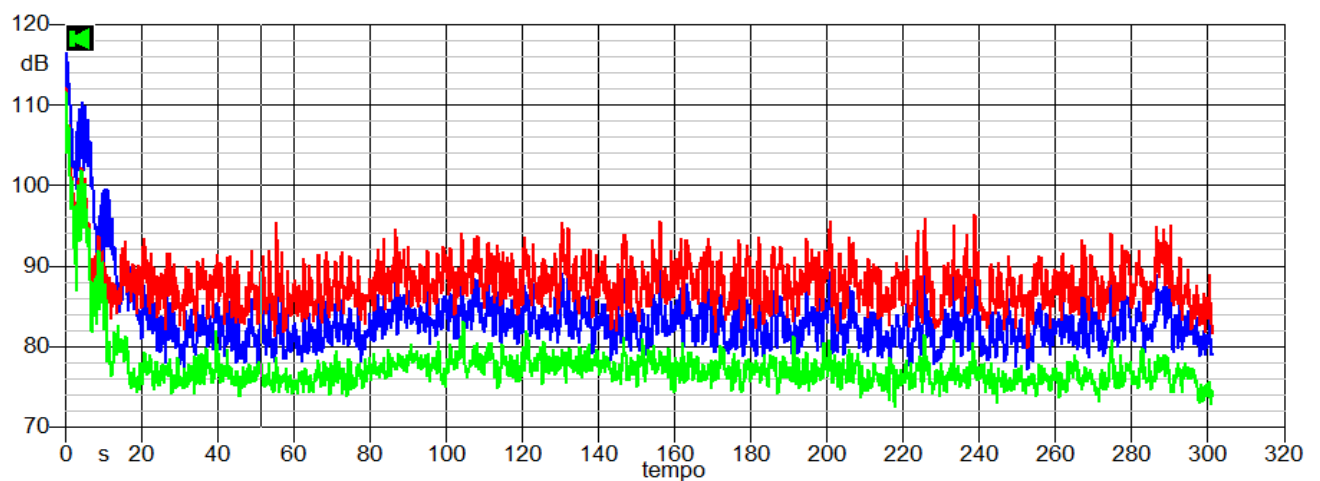


Fig. 468: andamento del segnale vibratorio nel tempo del punto di misura 7



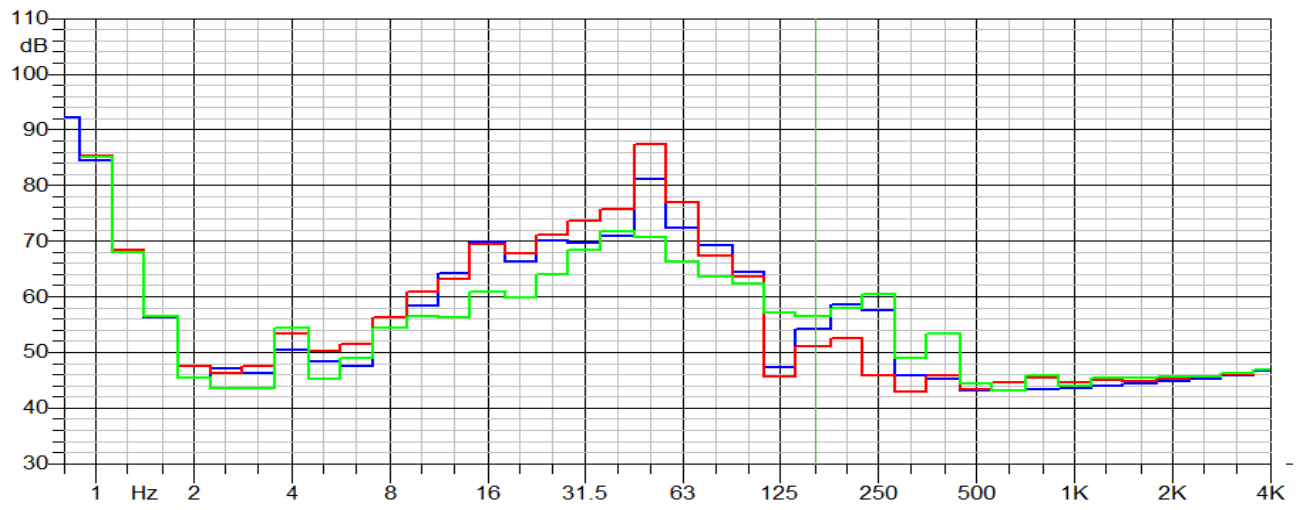
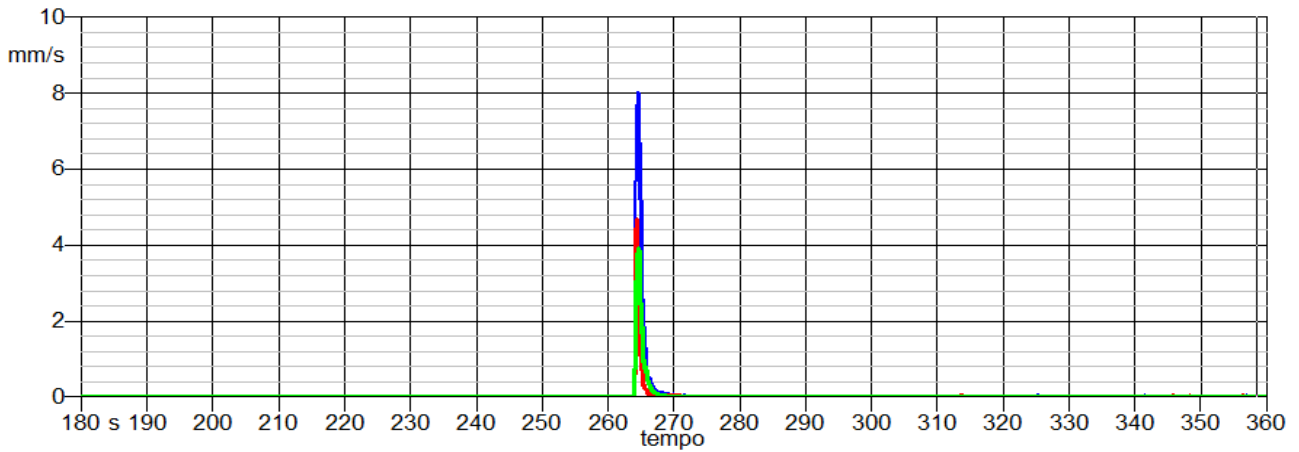


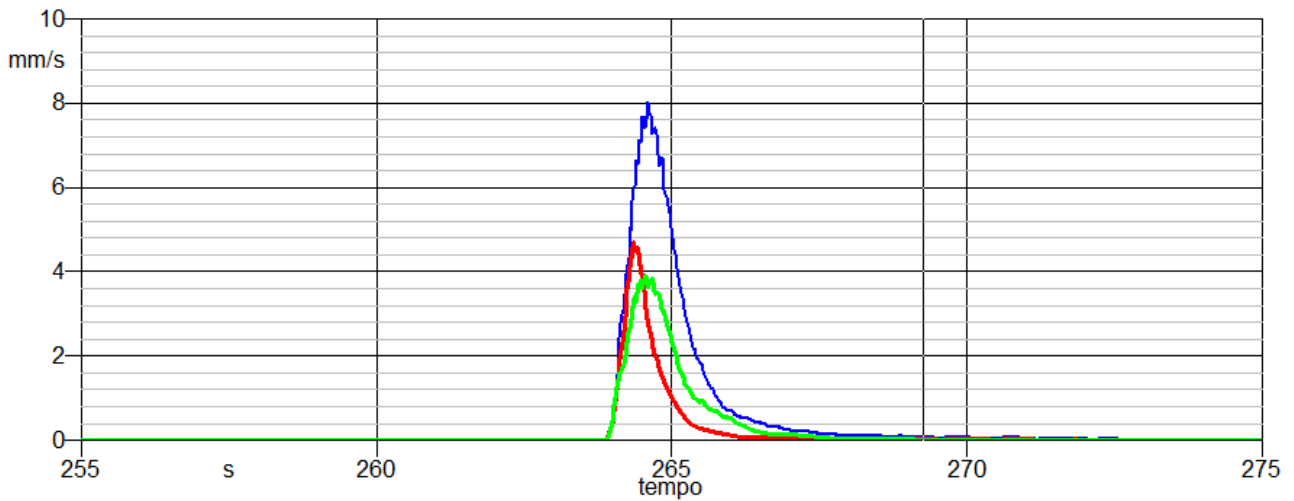
Fig. 469: spettro in frequenza (1/3 bande d'ottava) del punto di misura 7

▪ *Appendice L : Grafici delle misurazioni delle volate  
1° campagna di misurazione Fase I*

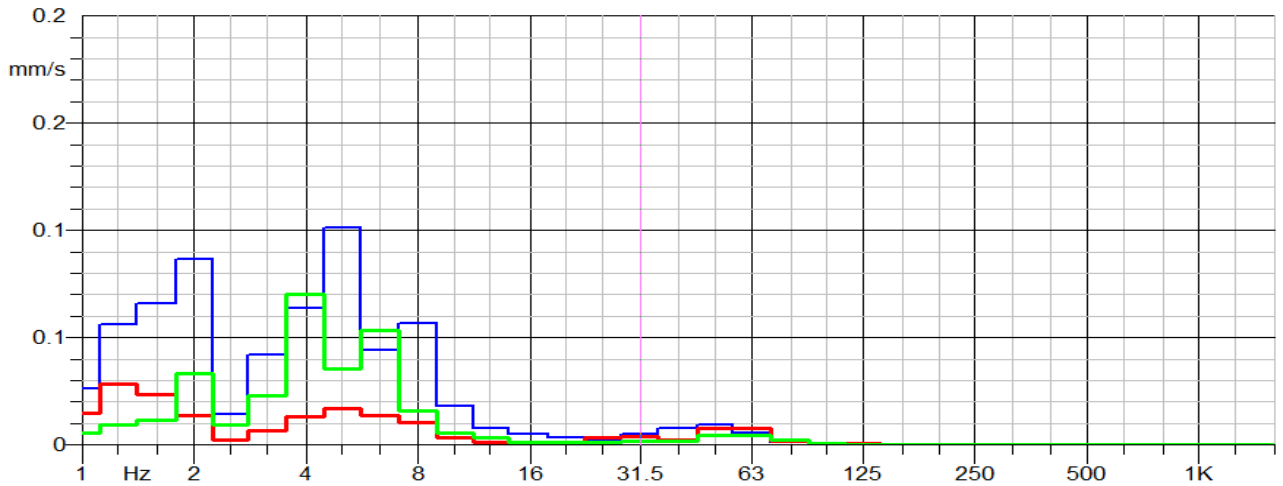
**2 volata 2 Dicembre**



*Fig. 470: Time History completa della 2 volata misurata con l'accelerometro*



*Fig. 471: ingrandimento dell'impulso della volata lungo le tre direzioni di riferimento misurato con accelerometro*



*Fig. 472: spettro in frequenza della volata ottenuta con rilevamento dell'accelerometro*

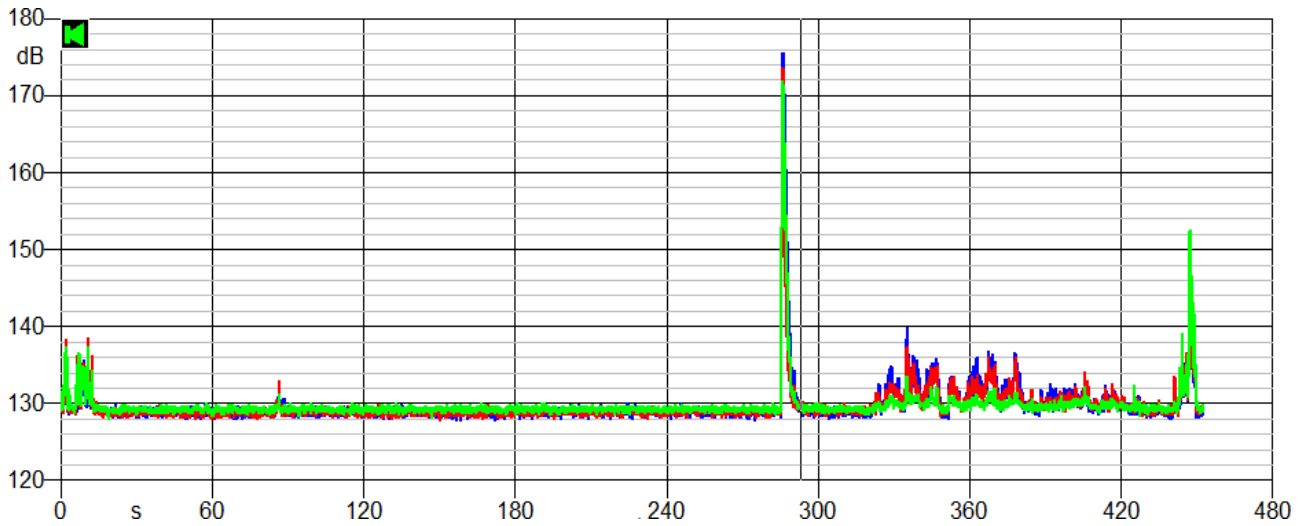


Fig. 473: Time History velocimetro completa della 2 volata

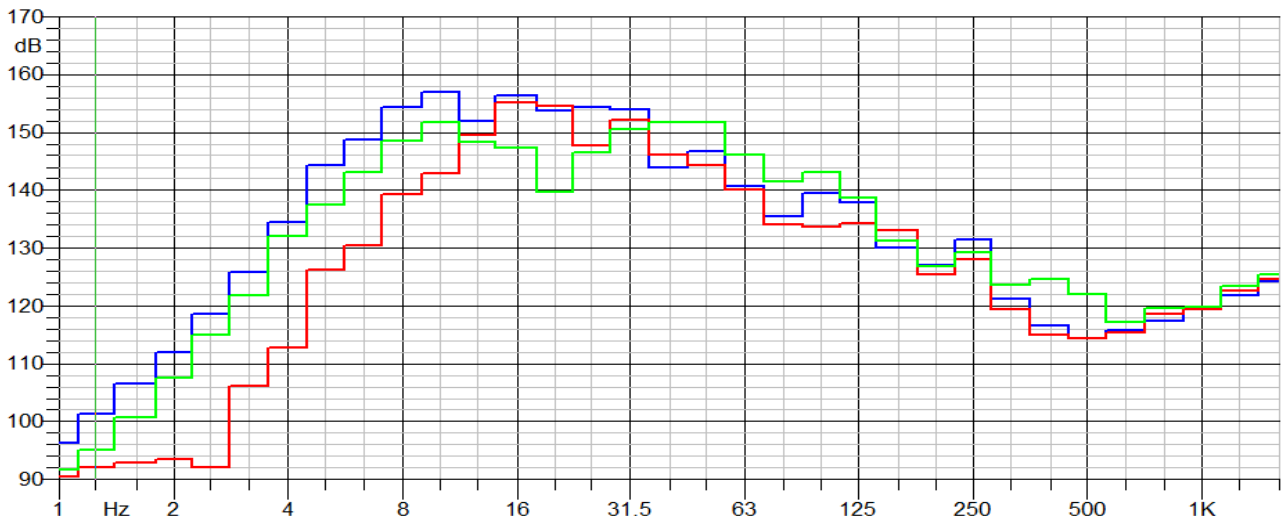


Fig. 474: spettro in frequenza della 2 volata ottenuta con il velocimetro

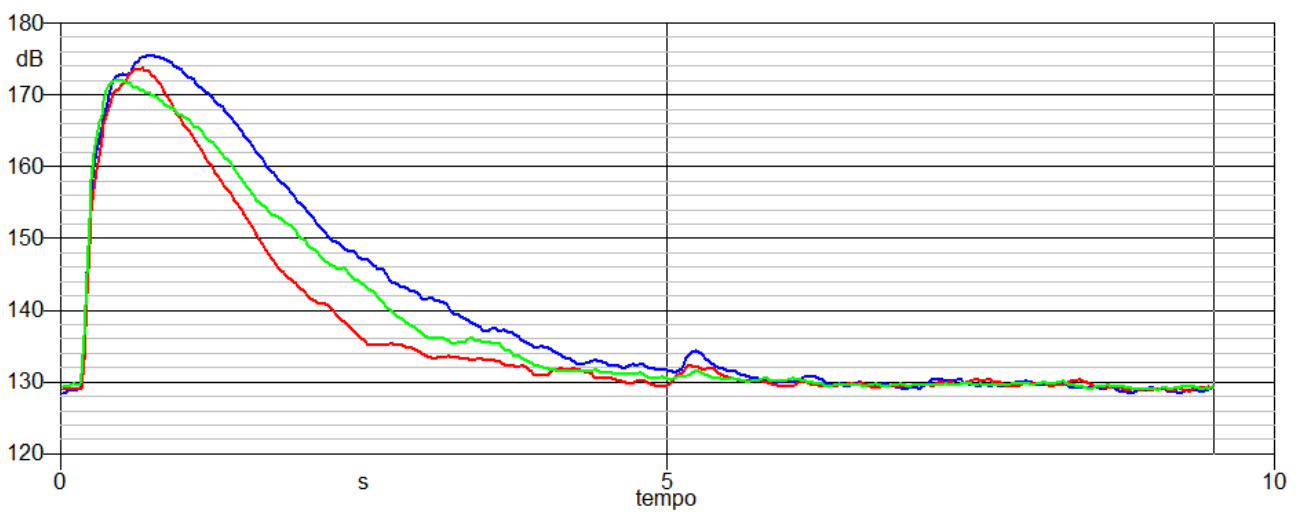


Fig. 475: ingrandimento dell'impulso della volata lungo le tre direzioni di riferimento misurata con velocimetro

### 3 Volata 9 dicembre

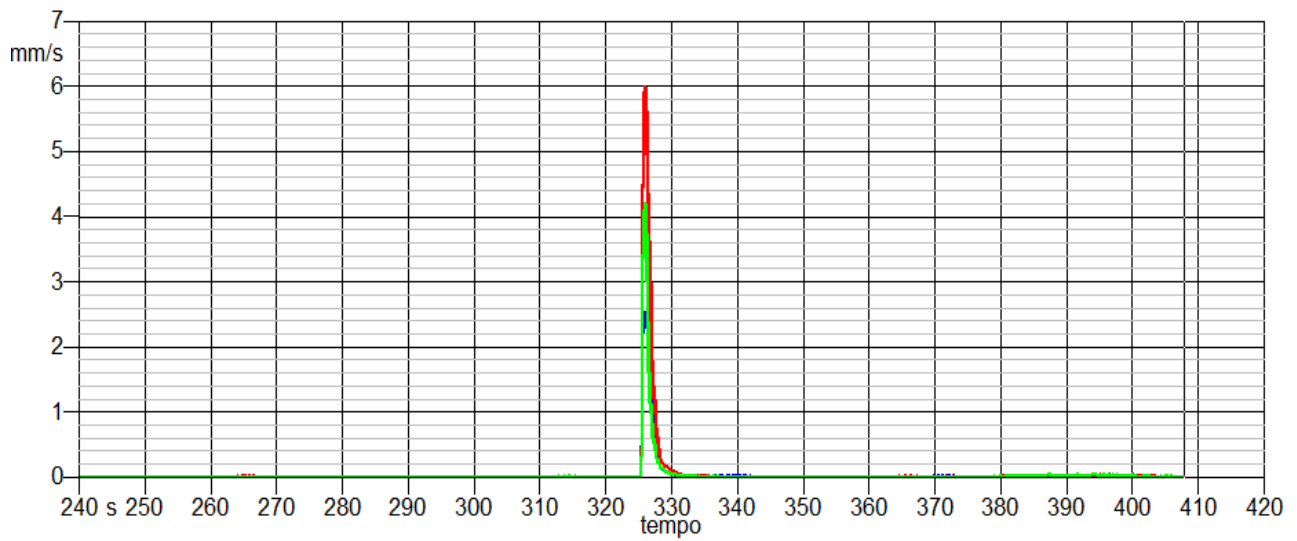


Fig. 476: Time History accelerometro completa della 3 volata misurata con l'accelerometro

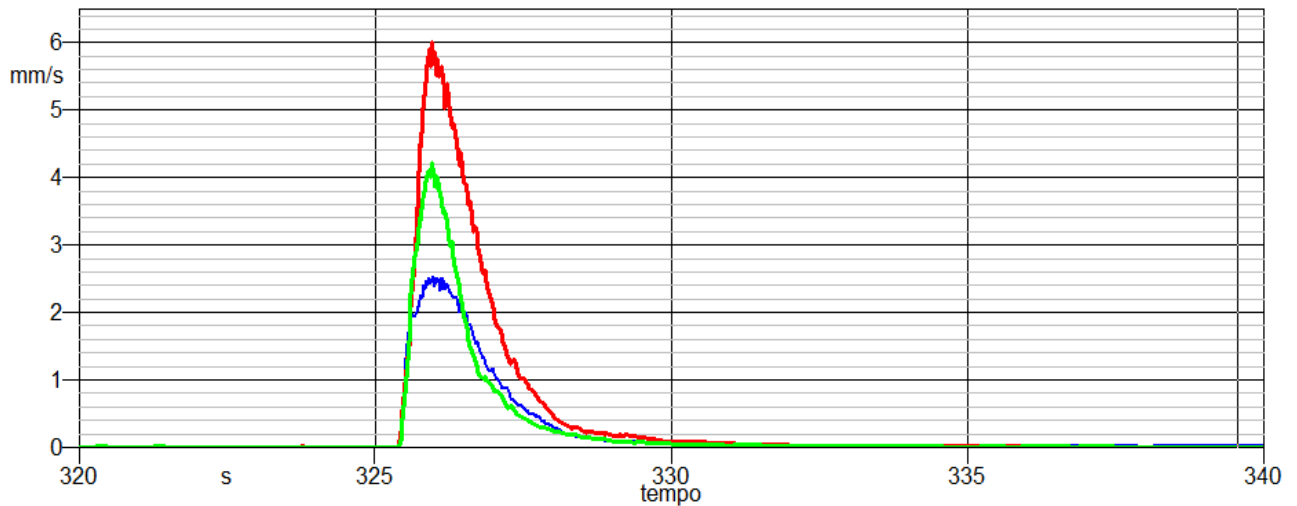


Fig. 477: accelerometro ingrandimento dell'impulso della volata lungo le tre direzioni di riferimento

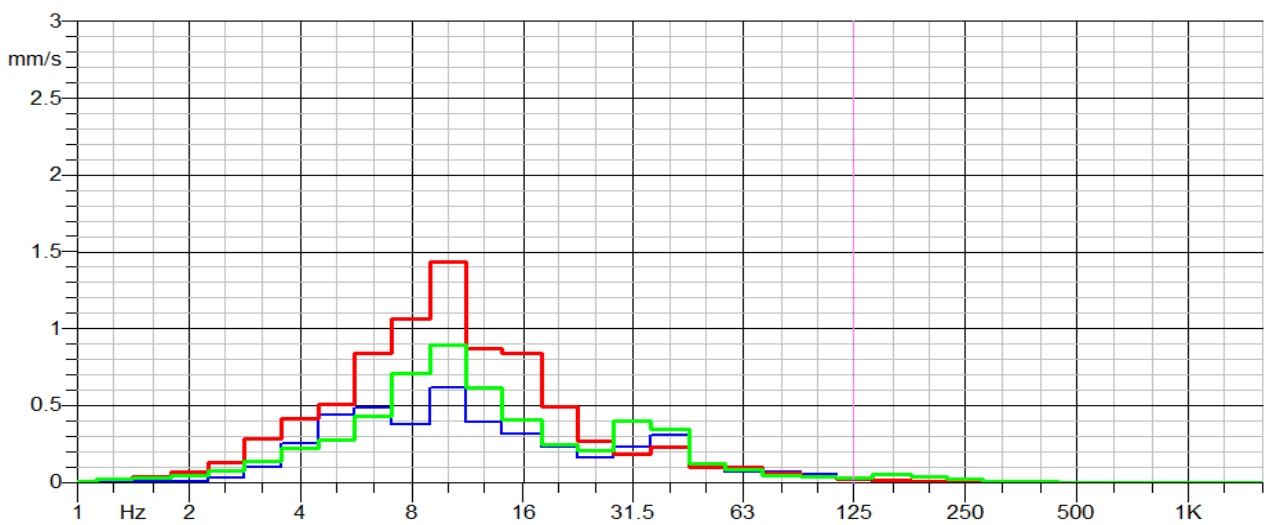


Fig. 478: spettro in frequenza della volata misurata con l'accelerometro

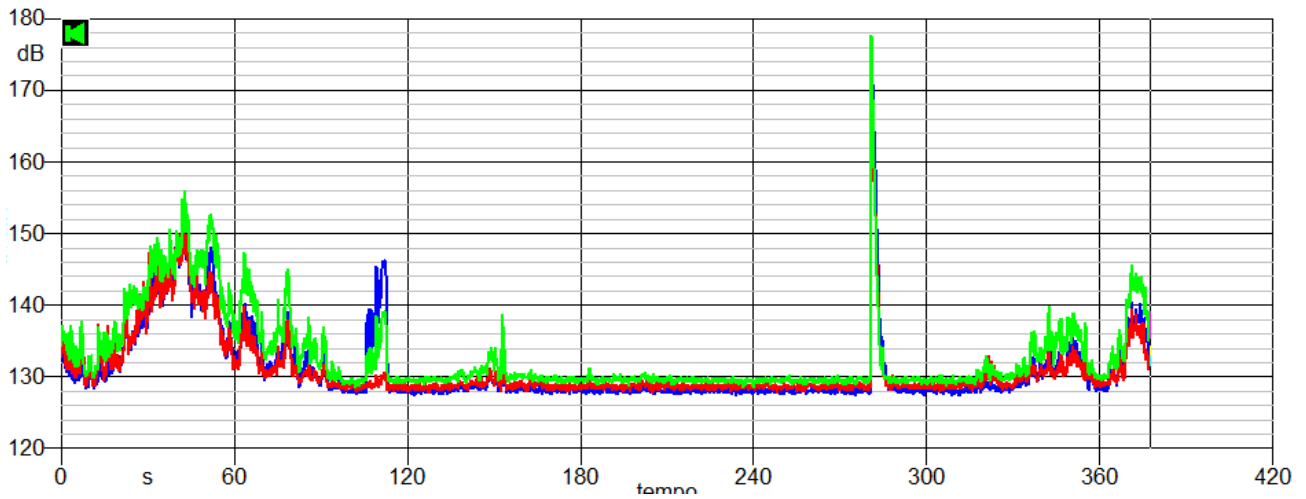


Fig. 479: Time History velocimetro completa della 3 volata

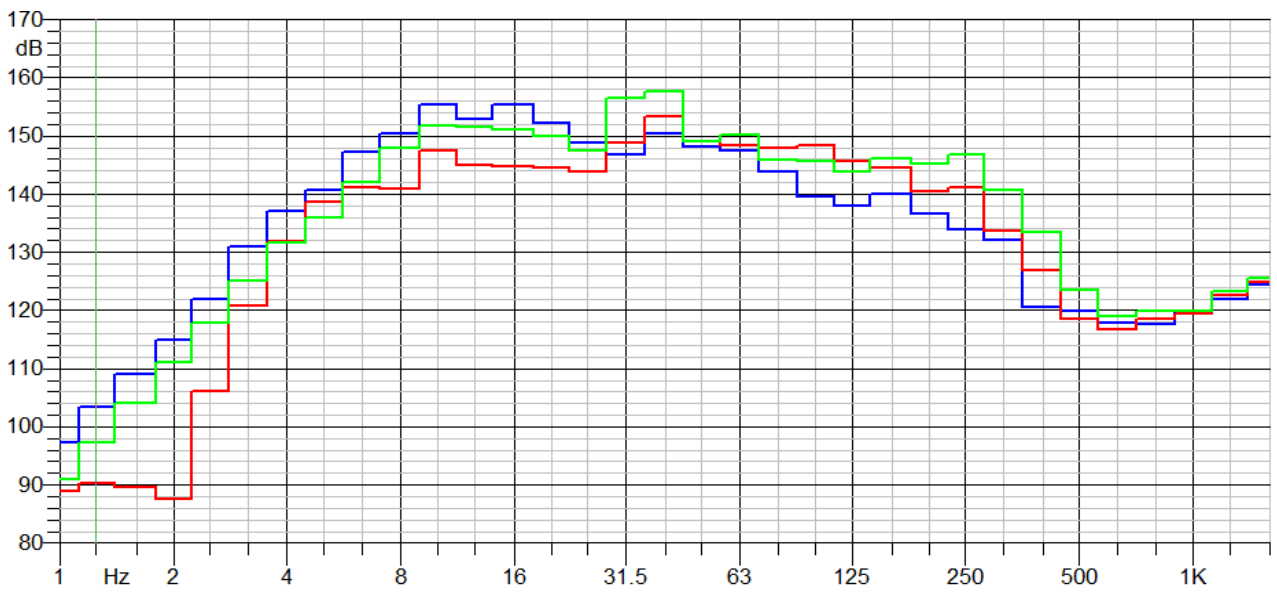


Fig. 480: spettro in frequenza della 3 volata con velocimetro

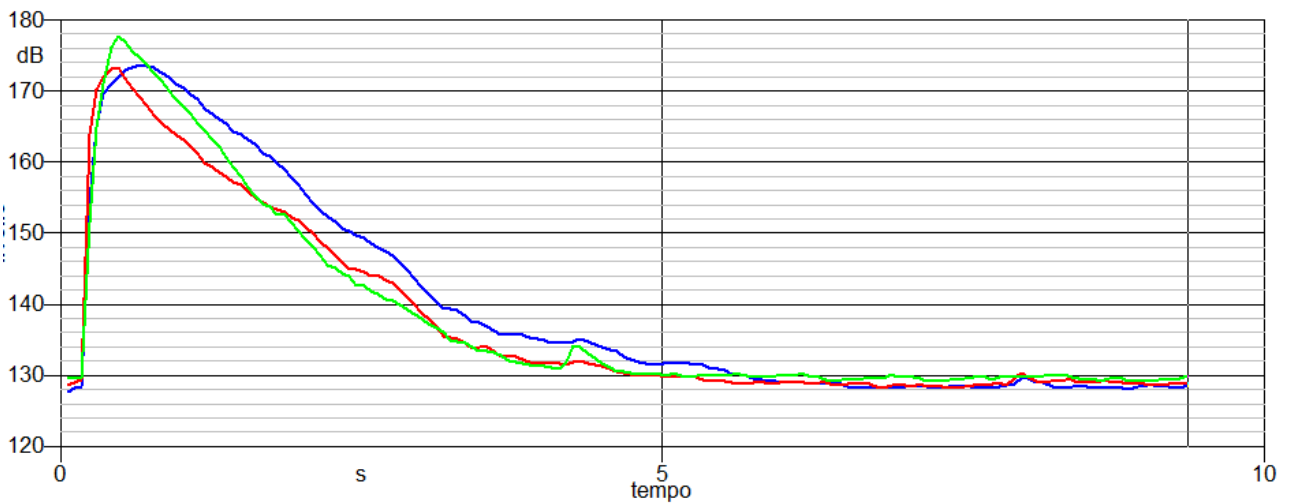


Fig. 481: ingrandimento dell'impulso della volata lungo le tre direzioni misurato con velocimetro

#### 4 Volata 11 dicembre

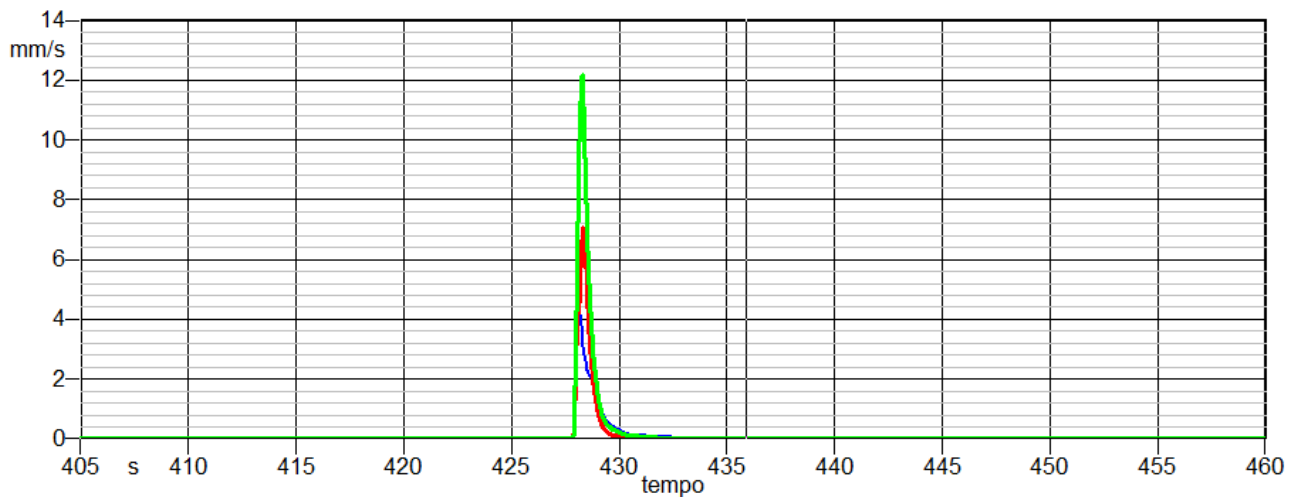


Fig. 482: Time History completa della 4 Volata con accelerometro :

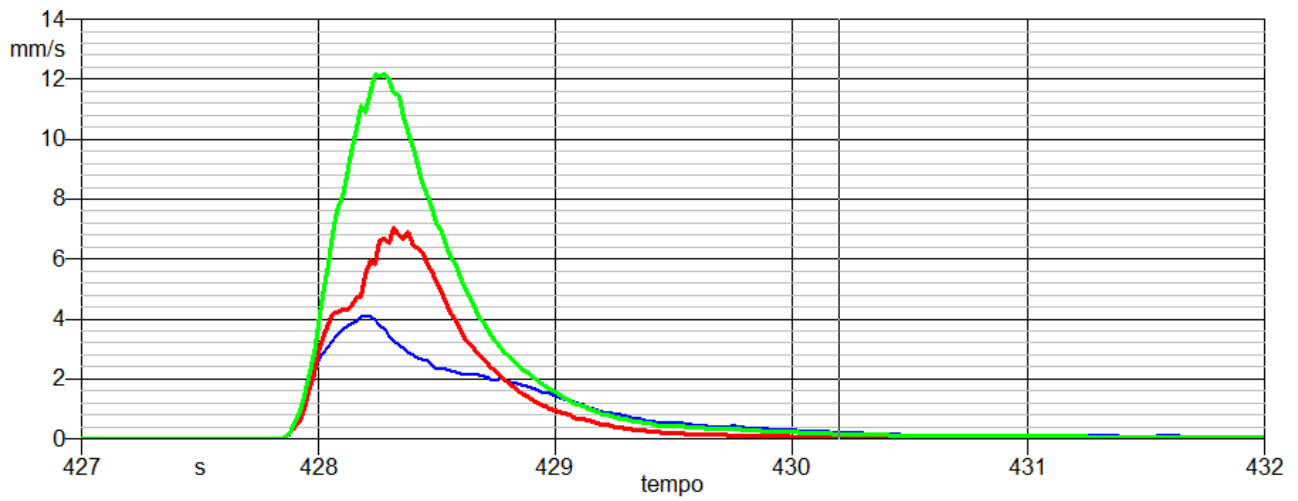


Fig. 483 : ingrandimento dell' impulso della volata lungo le tre direzioni con accelerometro

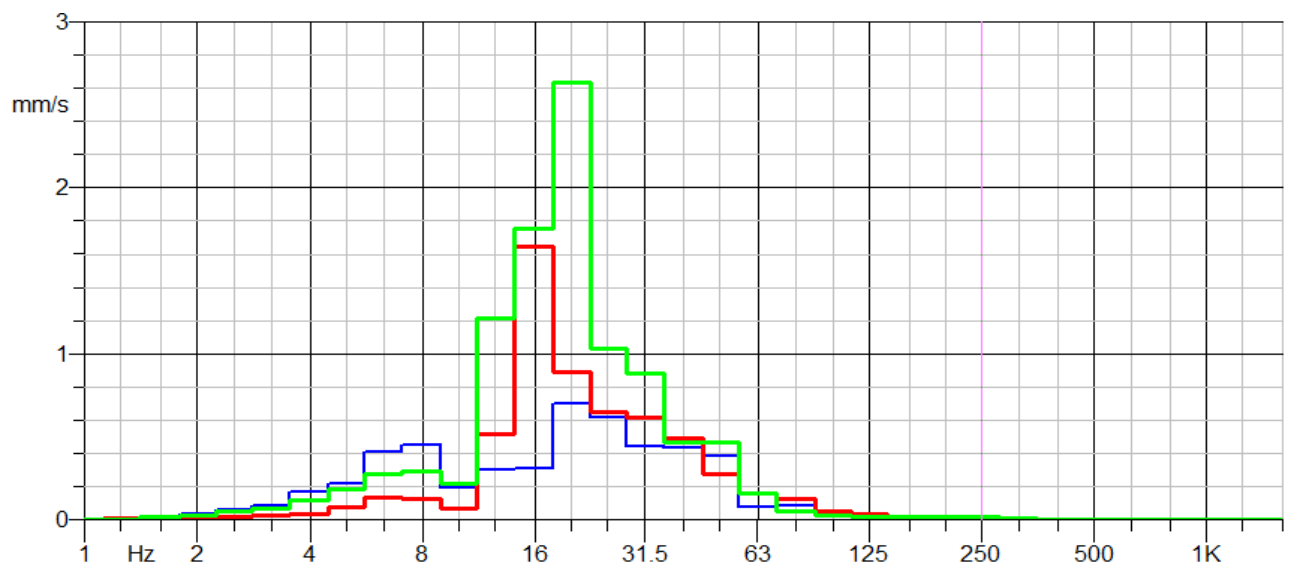


Fig. 484: spettro in frequenza della volata con accelerometro

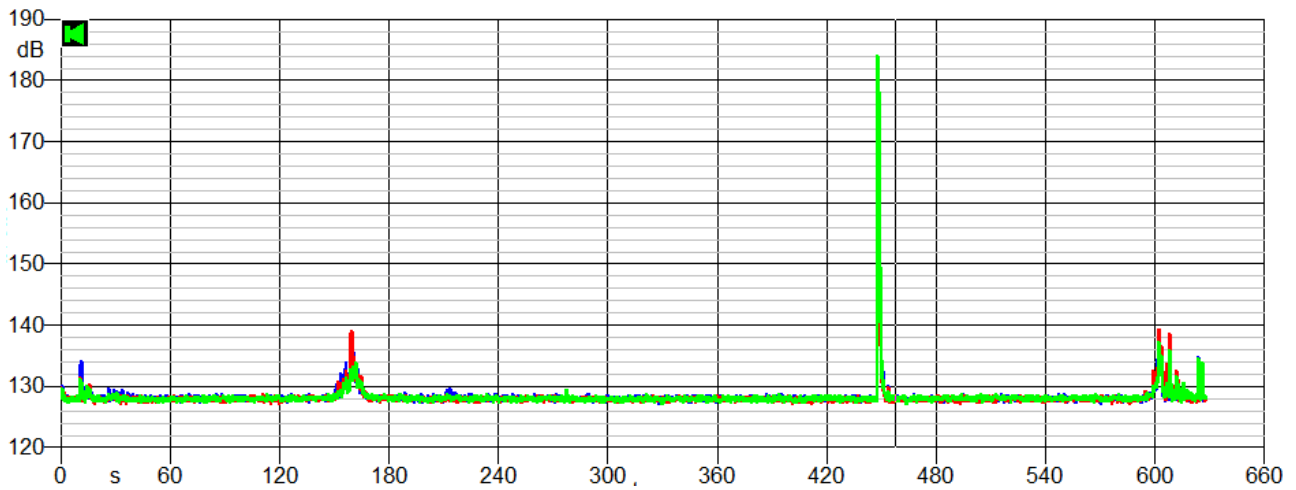


Fig. 485: Time History velocimetro completa della 4 volata

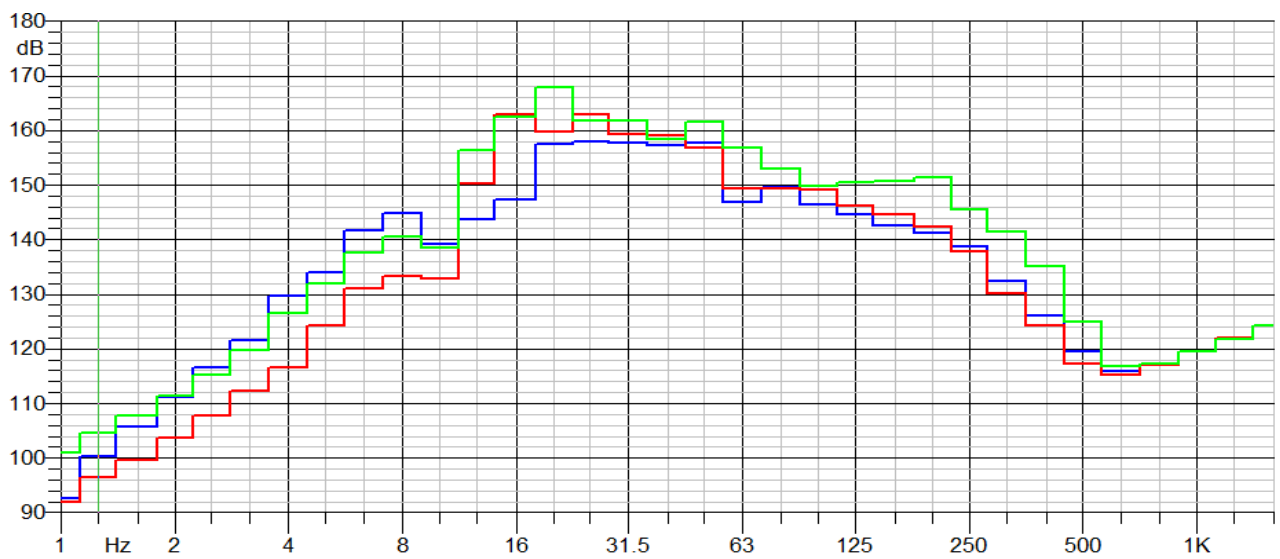


Fig. 486: spettro in frequenza della 4 volata misurata rilevata con velocimetro

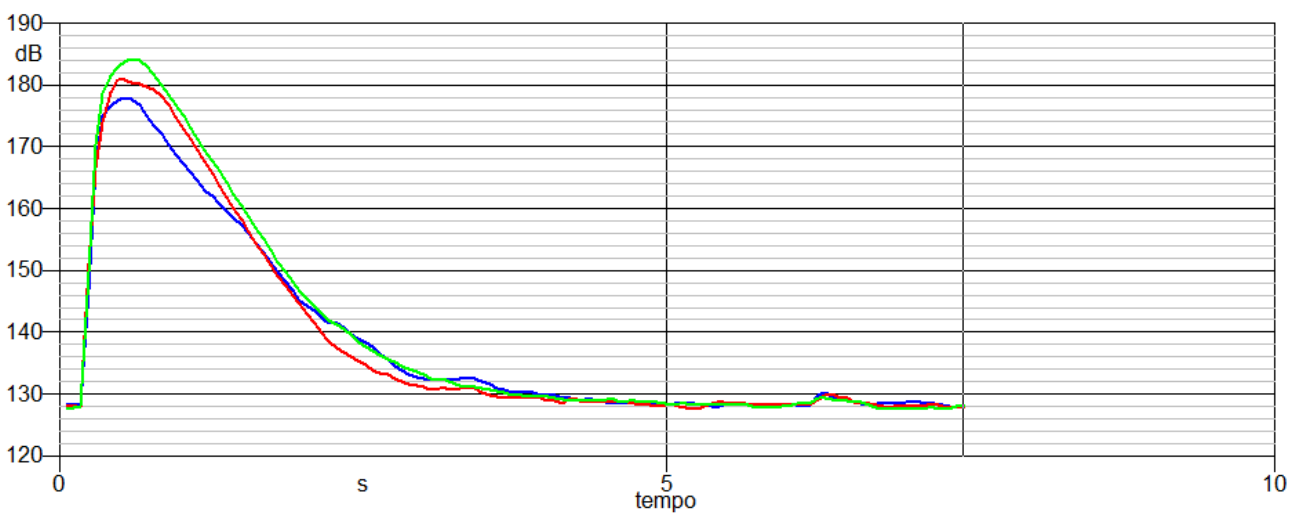


Fig. 487: ingrandimento dell'impulso della volata lungo le tre direzioni misurato con velocimetro

**5 Volata 14 dicembre**

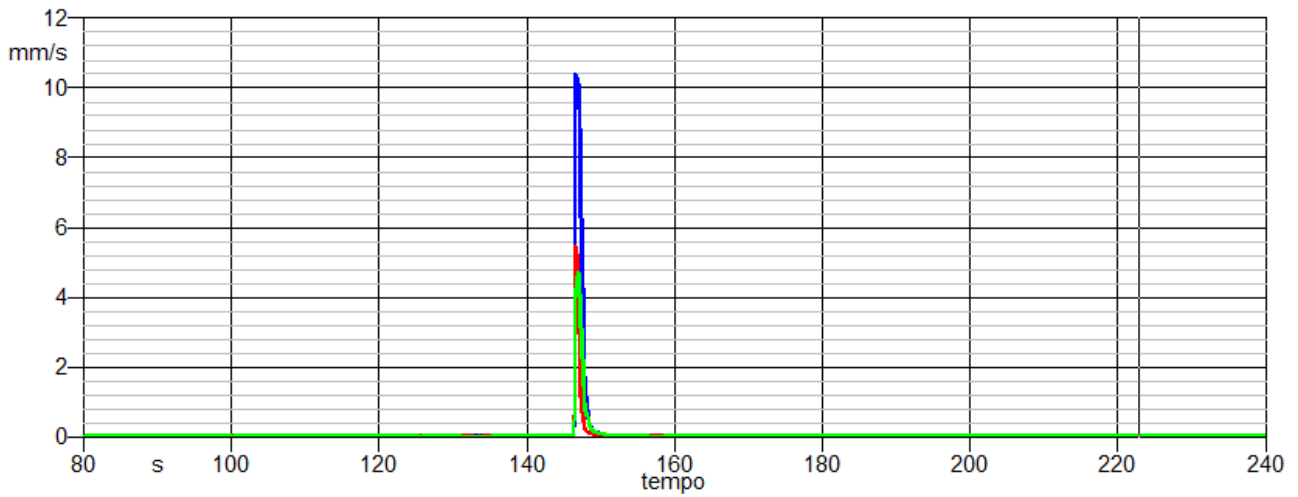


Fig. 488 :Time History completa della 5 Volata con accelerometro

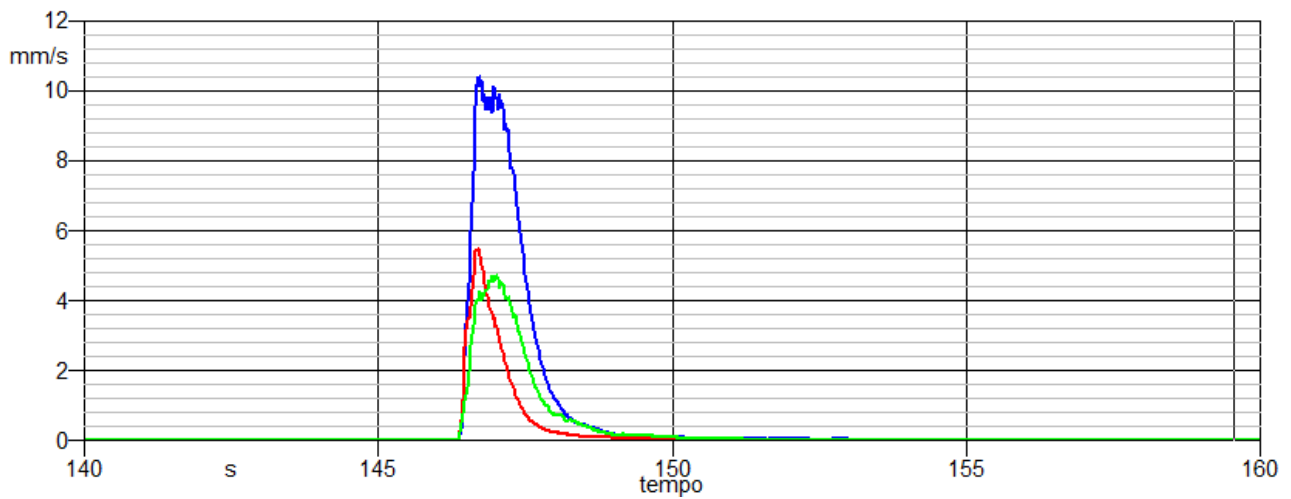


Fig. 489: ingrandimento dell' impulso della volata lungo le tre direzioni con accelerometro

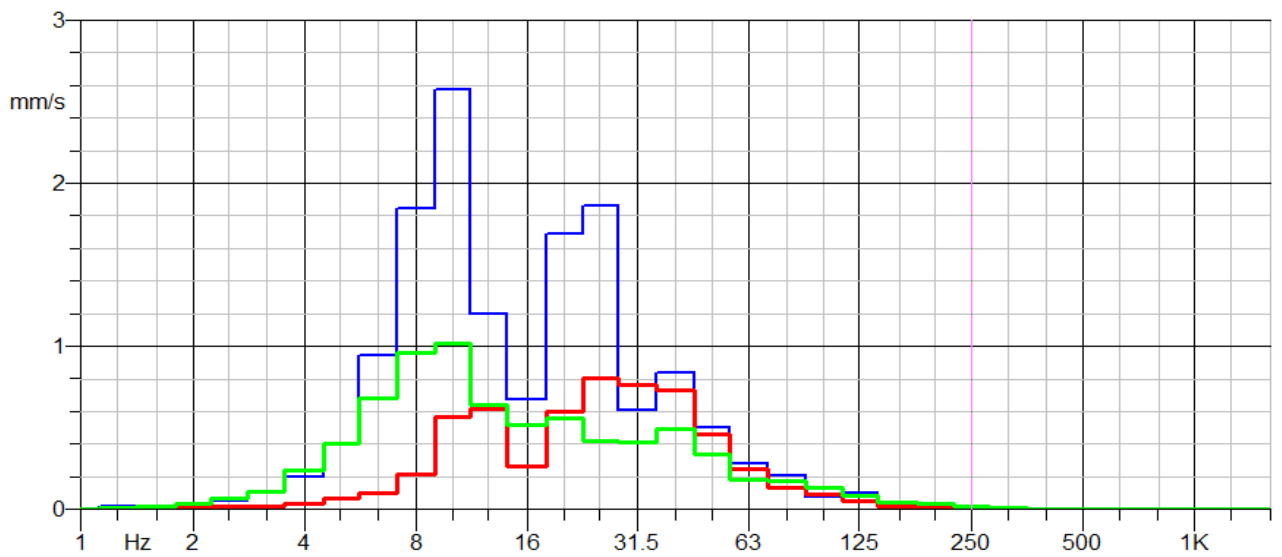


Fig. 490: spettro in frequenza della volata con accelerometro



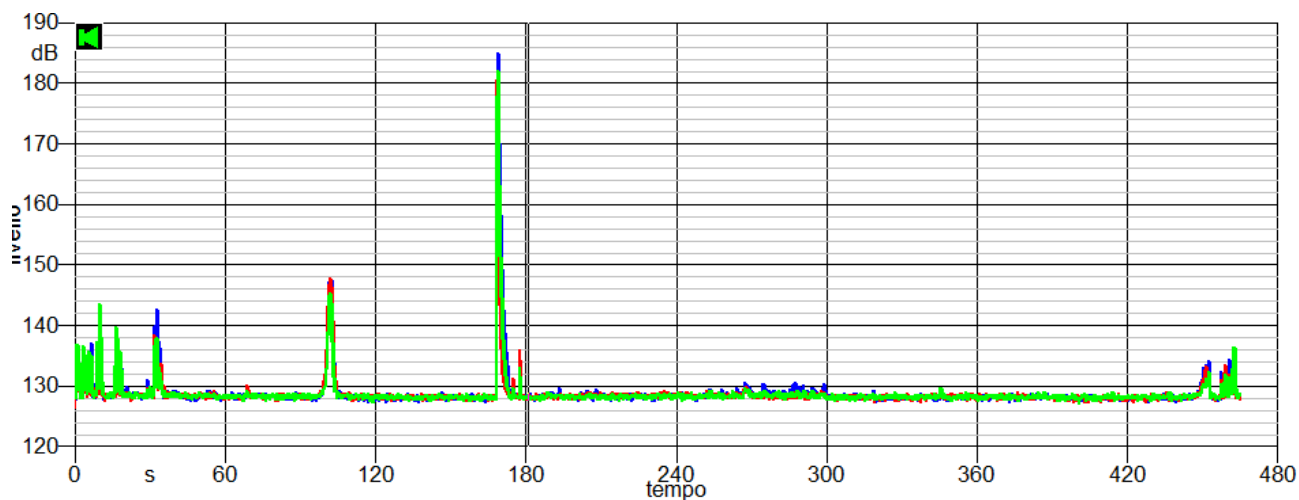


Fig. 491: Time History velocimetro completa della 5 volata

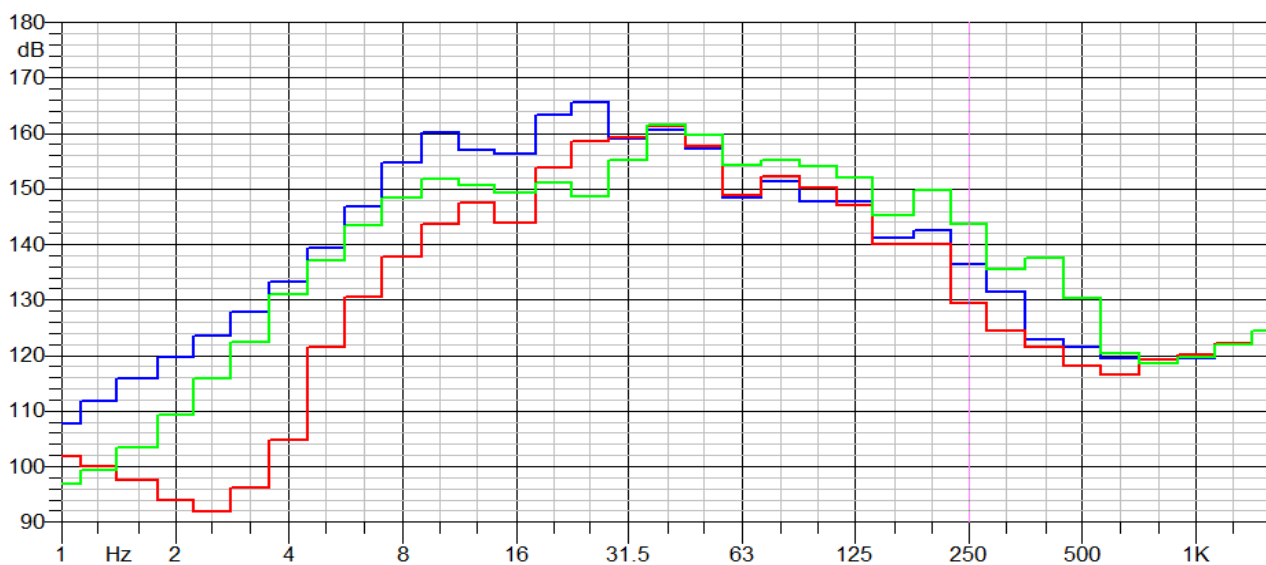


Fig. 492: spettro in frequenza della 5 volata misurata con il velocimetro

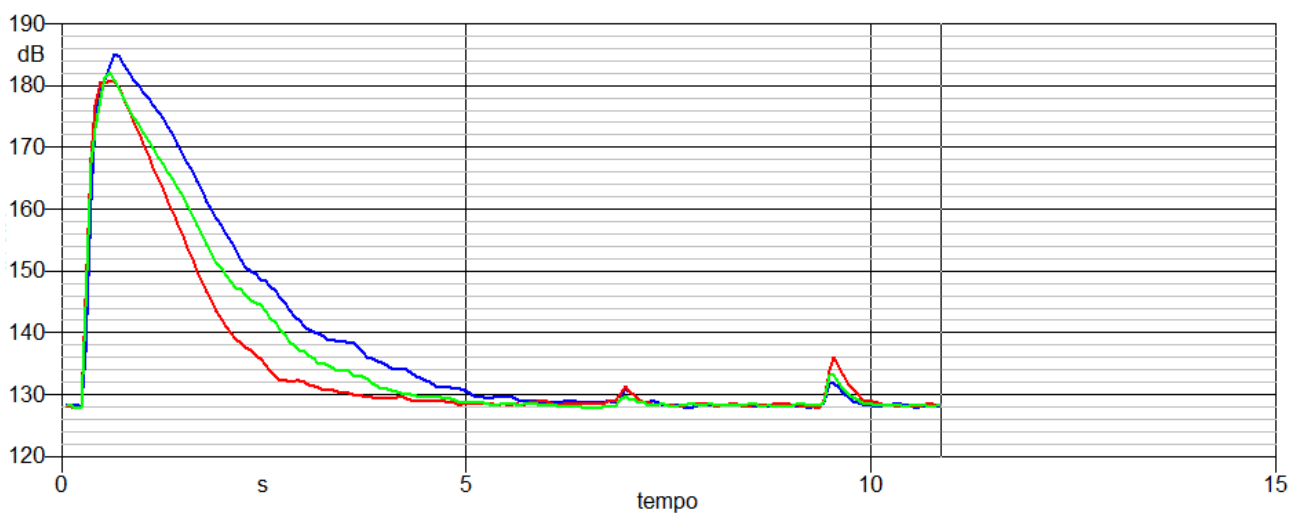
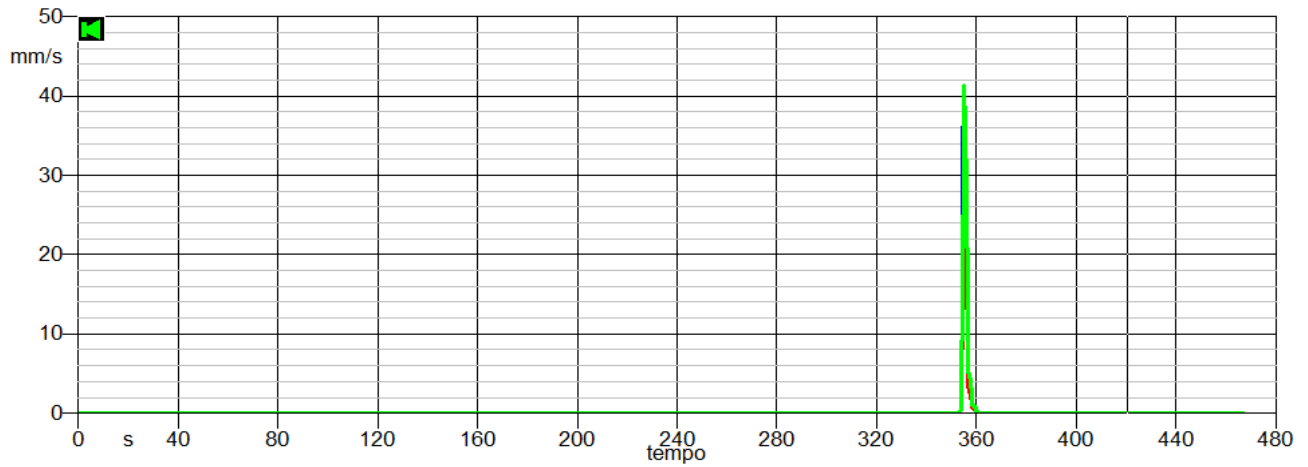


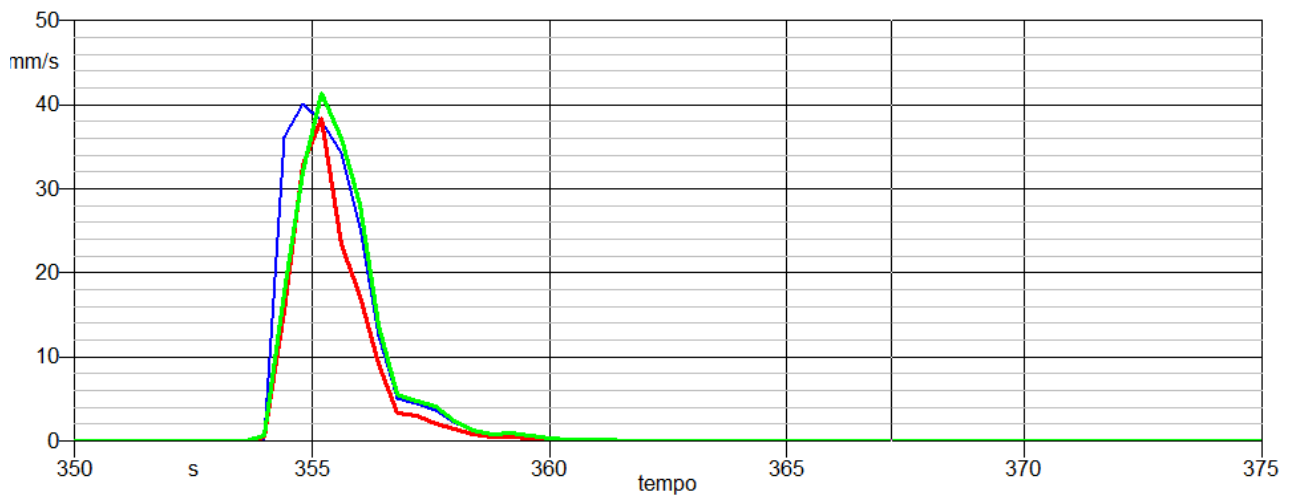
Fig. 493: ingrandimento dell'impulso della volata lungo le tre direzioni di riferimento misurato con velocimetro

▪ *Appendice M: Grafici delle misurazioni delle volate  
1° campagna di misurazione Fase II*

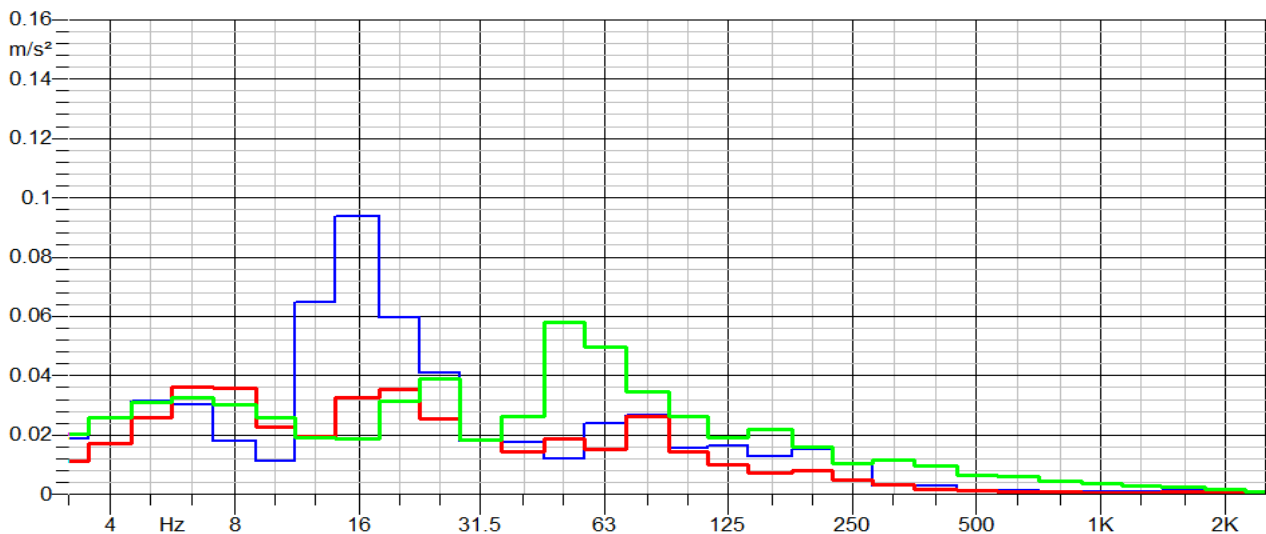
**7 volata 7 gennaio**



*Fig. 494: Time History completa misurata con accelerometro della 7 Volata*



*Fig. 495: ingrandimento dello specifico impulso della volata lungo le tre direzioni di riferimento con accelerometro*



*Fig. 496: spettro in frequenza della volata ottenuta con l'accelerometro*

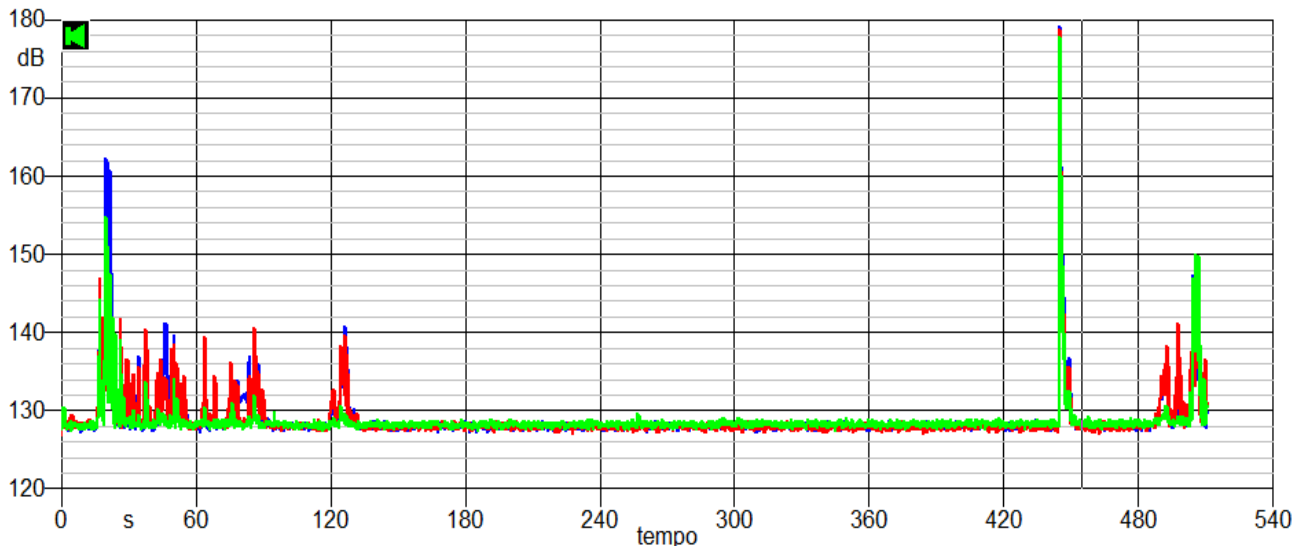


Fig. 497: Time History completa della misura del velocimetro della 7 volata

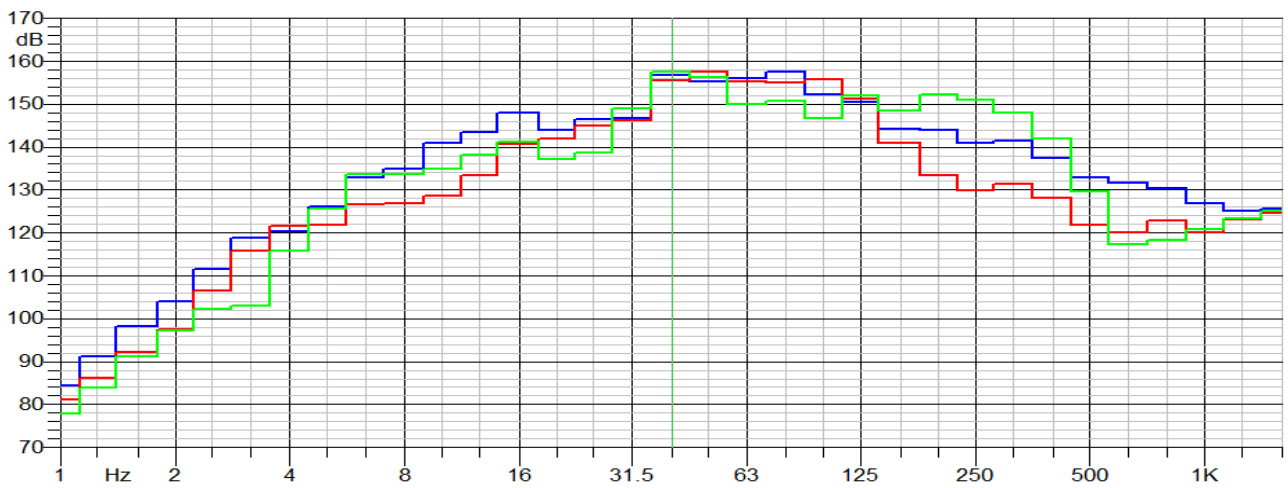


Fig. 498: spettro in frequenza della 7 volata con velocimetro

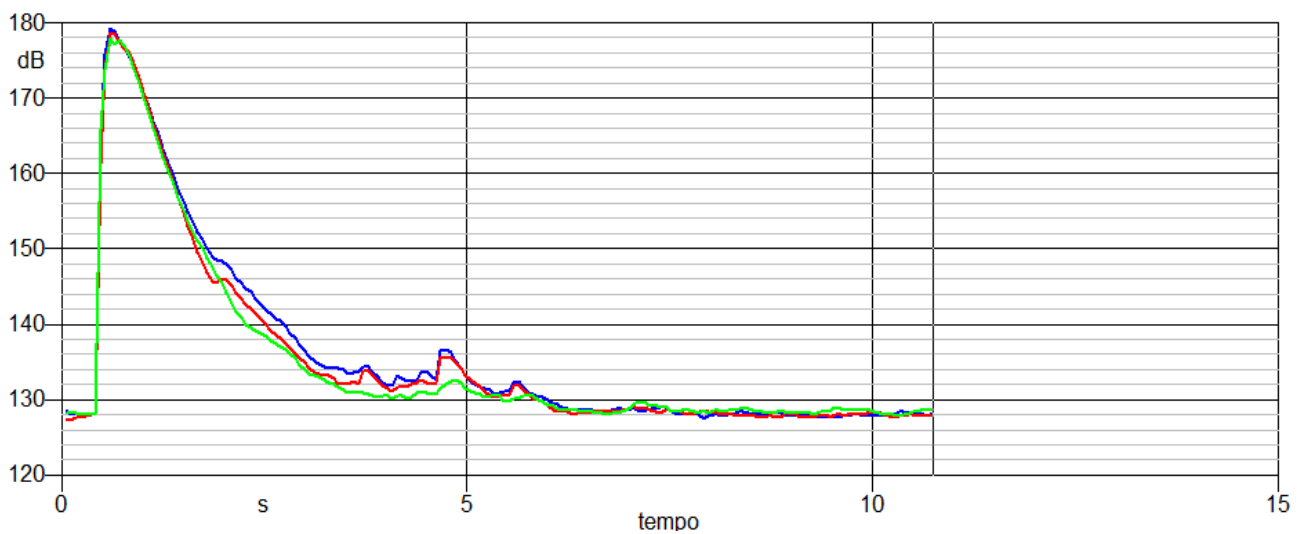


Fig. 499: ingrandimento dell'impulso della volata lungo le tre direzioni misurato con velocimetro

**8 volata 14 Gennaio**

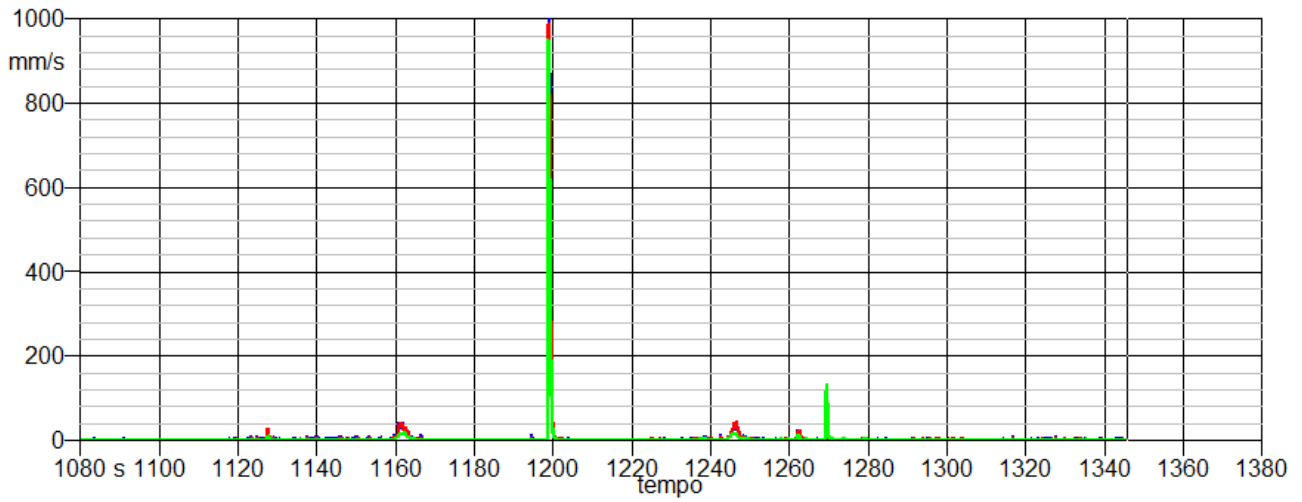


Fig. 500: Time History completa della 8 Volata misurata con l'accelerometro

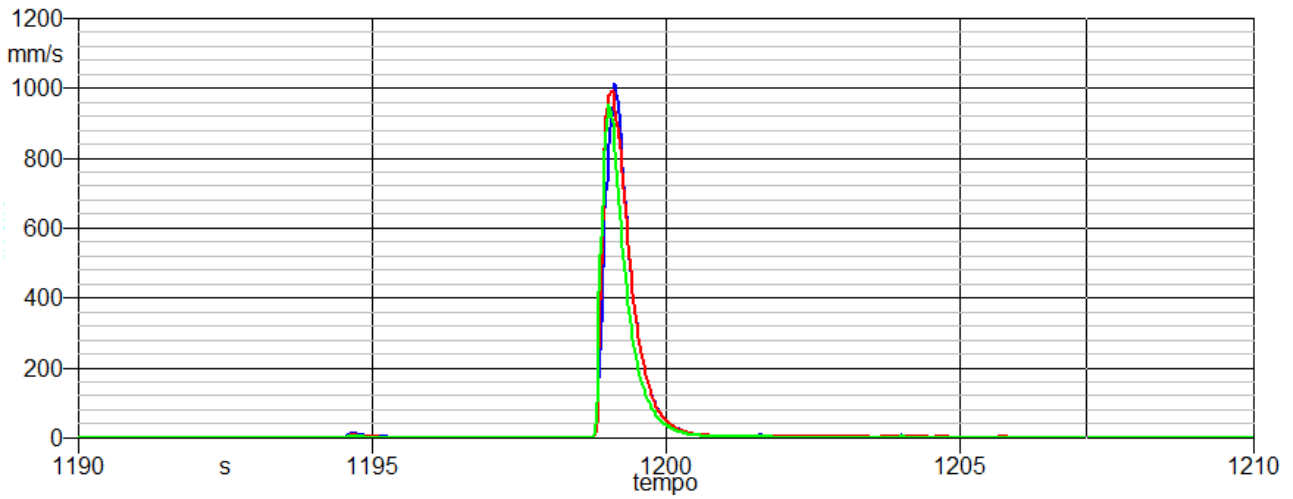


Fig. 501: ingrandimento dell'impulso della volata lungo le tre direzioni di riferimento misurate con accelerometro

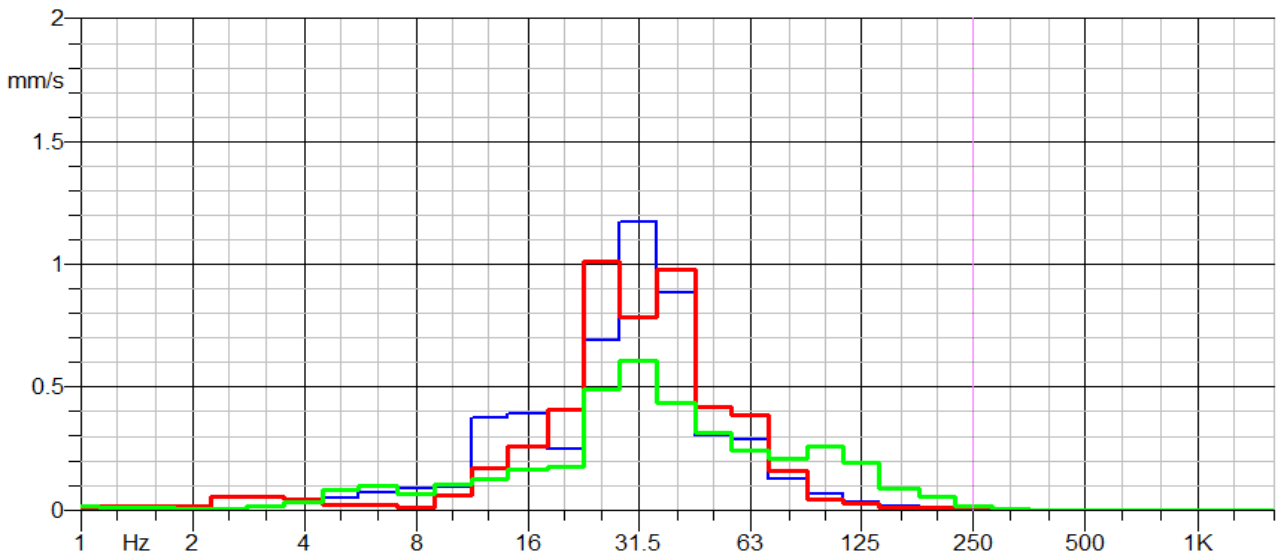


Fig. 502: spettro in frequenza della volata misurata con l'accelerometro

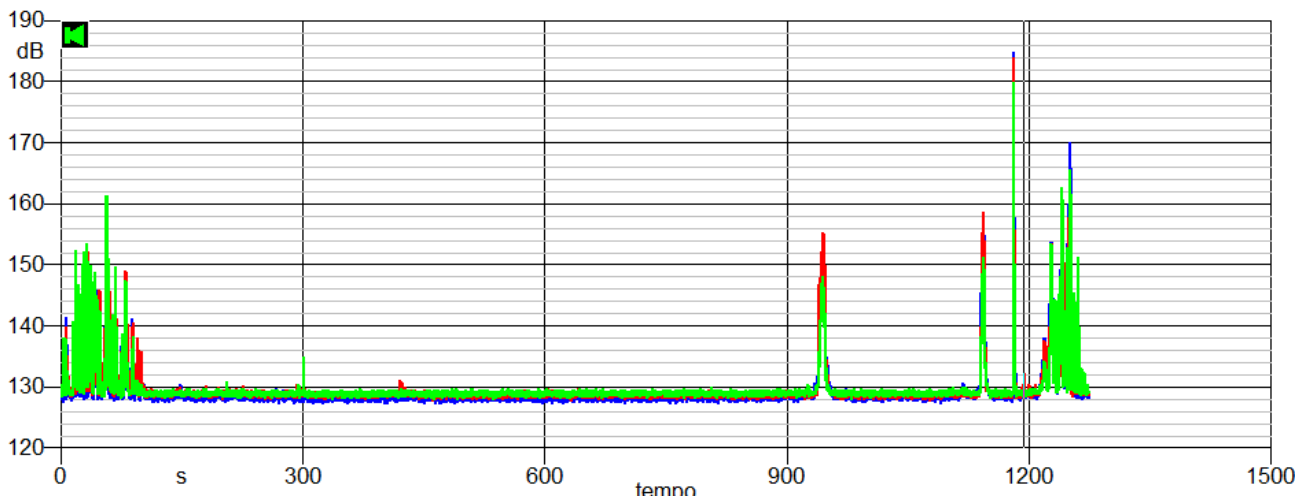


Fig. 503: Time History del velocimetro completa della 8 volata

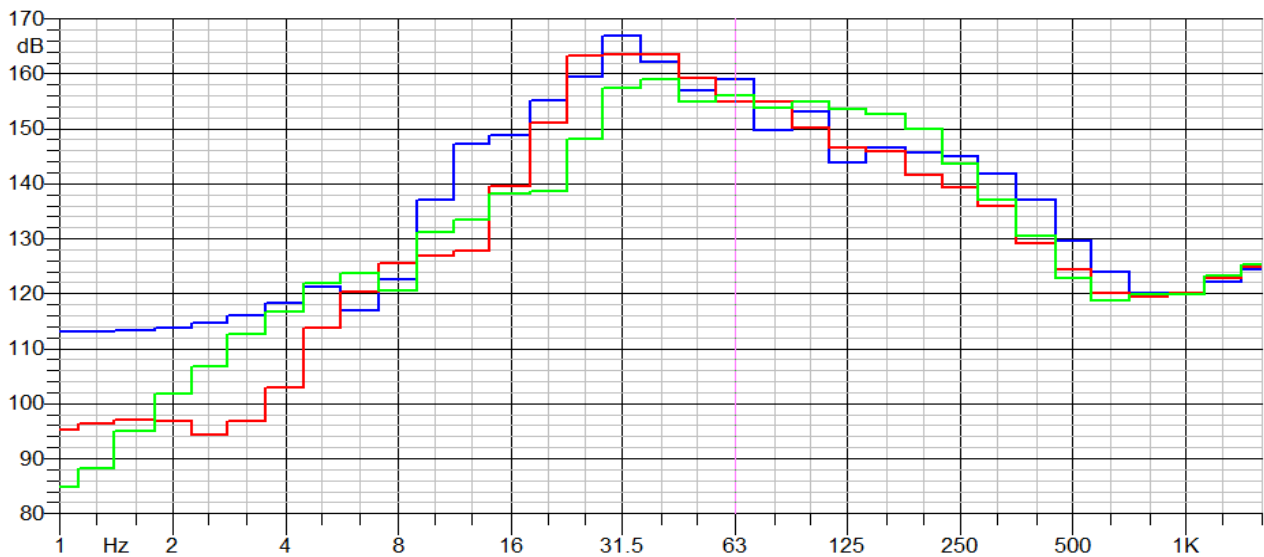


Fig. 504: spettro in frequenza della volata 8 ottenuta tramite impiego del velocimetro

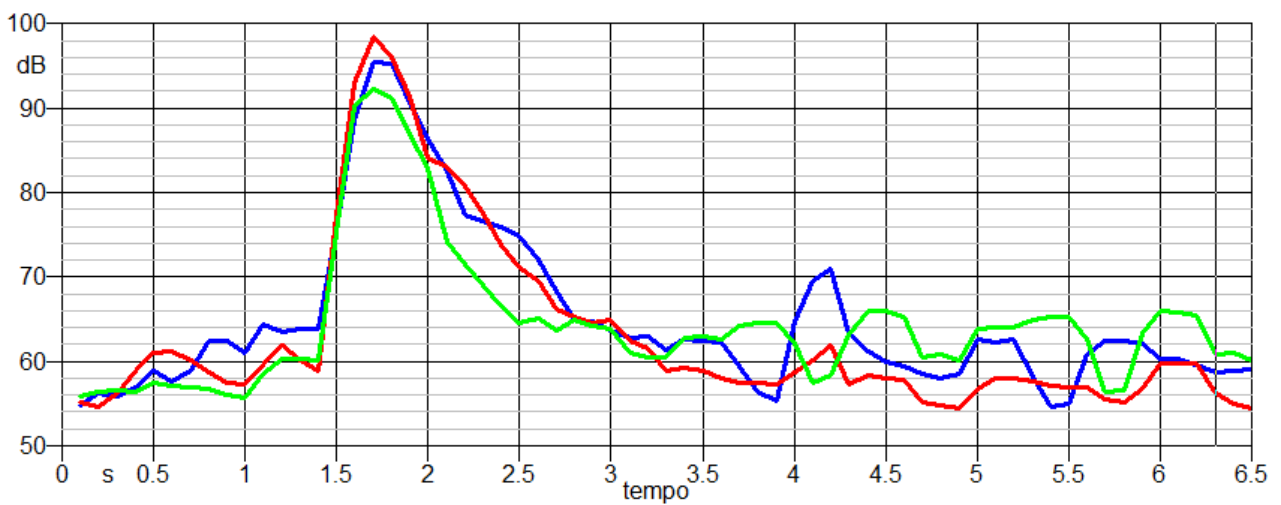


Fig. 505: ingrandimento dell'impulso misurato con il velocimetro lungo le tre direzioni di riferimento

**9 volata 22 Settembre**

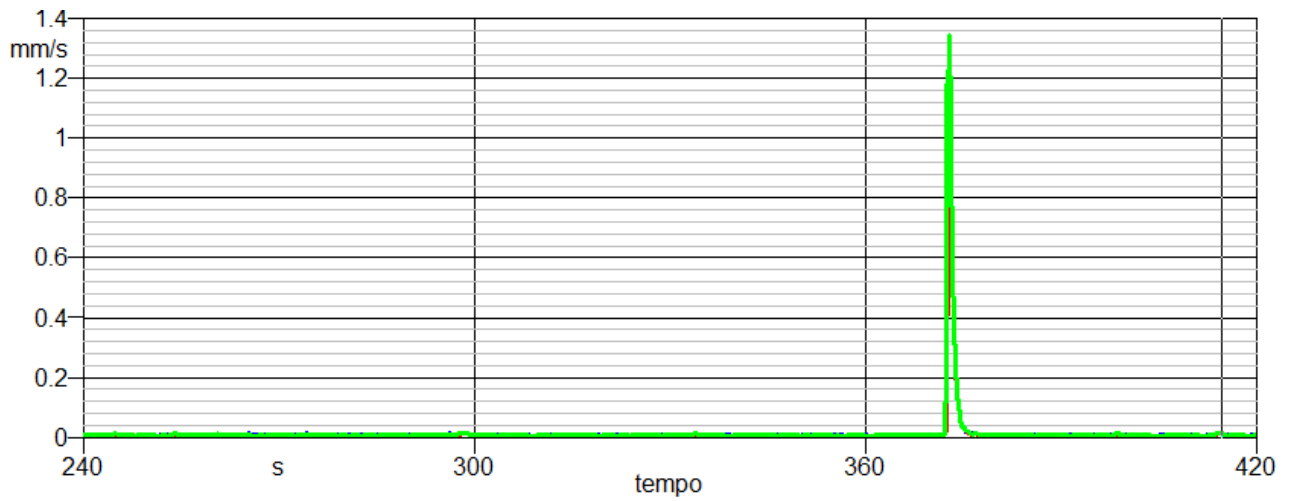


Fig. 506: Time History completa della 9° volata ricavata con l'accelerometro

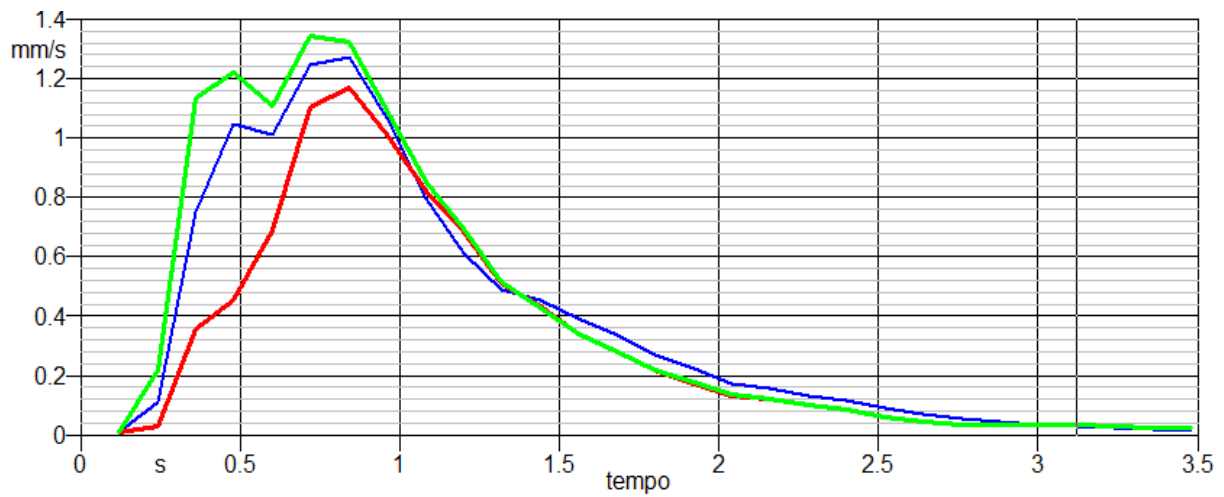


Fig. 507: ingrandimento dell'impulso della volata lungo le tre direzioni di riferimento misurata con l'accelerometro

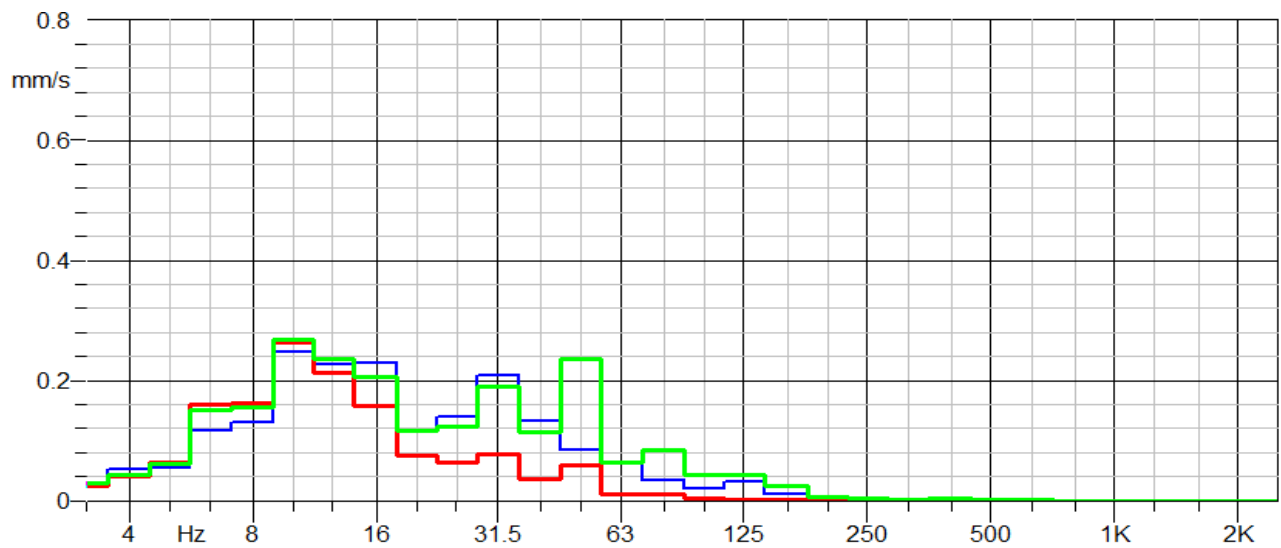


Fig. 508: spettro in frequenza della volata misurata con l'accelerometro

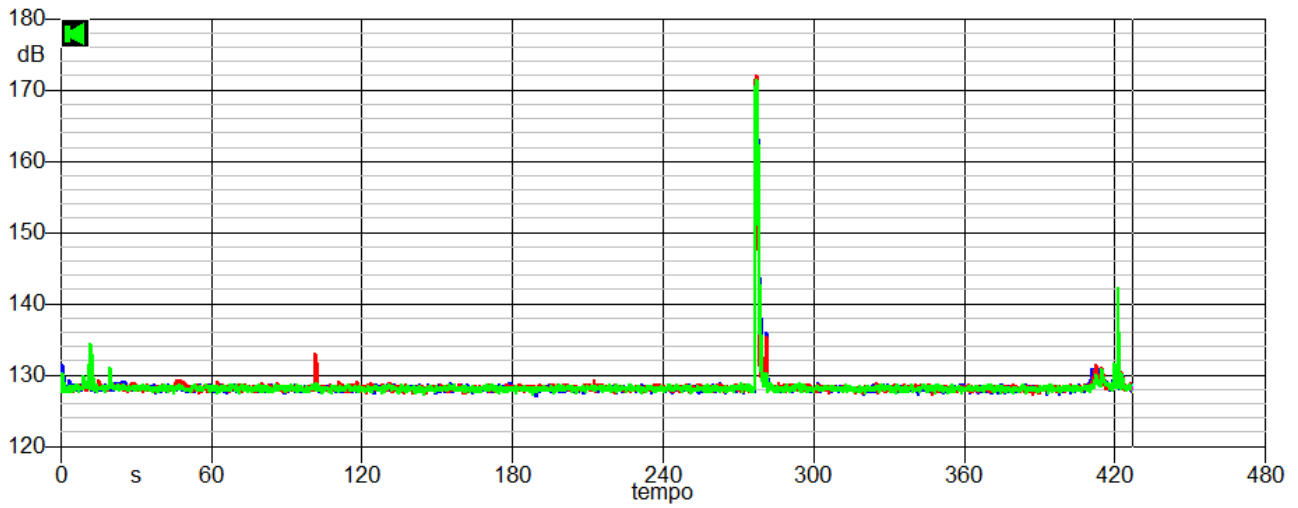


Fig. 509: Time History completa della 9 volata ricavata misurando con il velocimetro

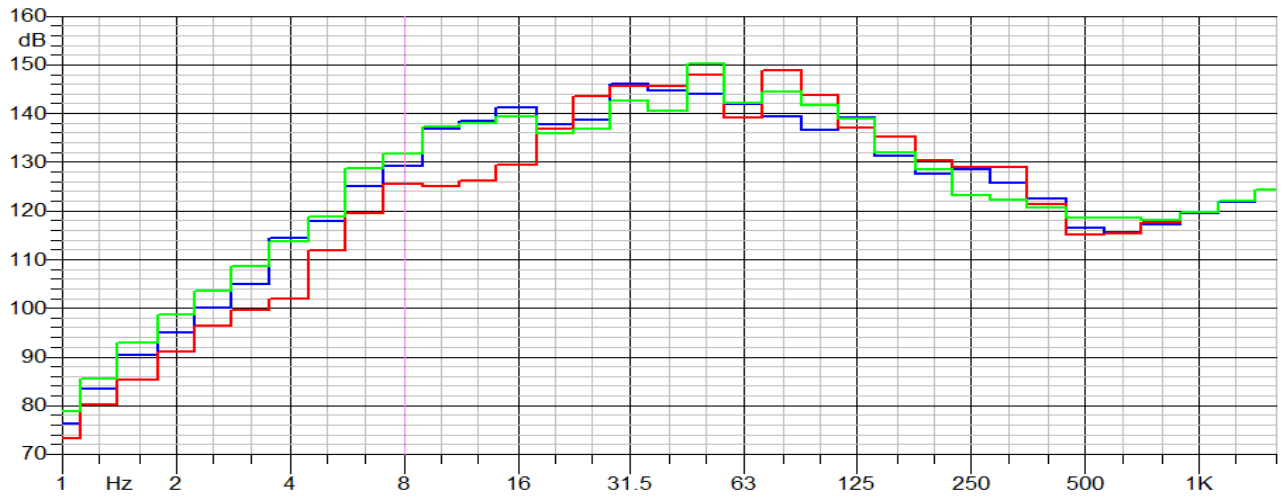


Fig. 510: spettro in frequenza della 9 volata misurata con il velocimetro

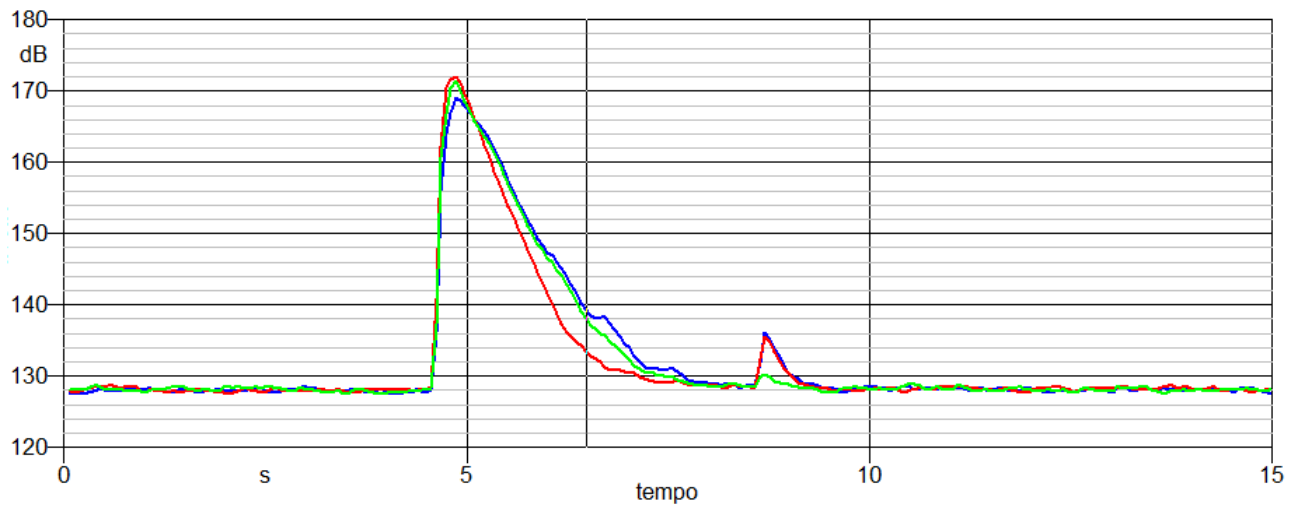


Fig. 511: ingrandimento dell'impulso della volata misurato con velocimetro lungo le tre direzioni di riferimento

## 10 volata 29 Settembre

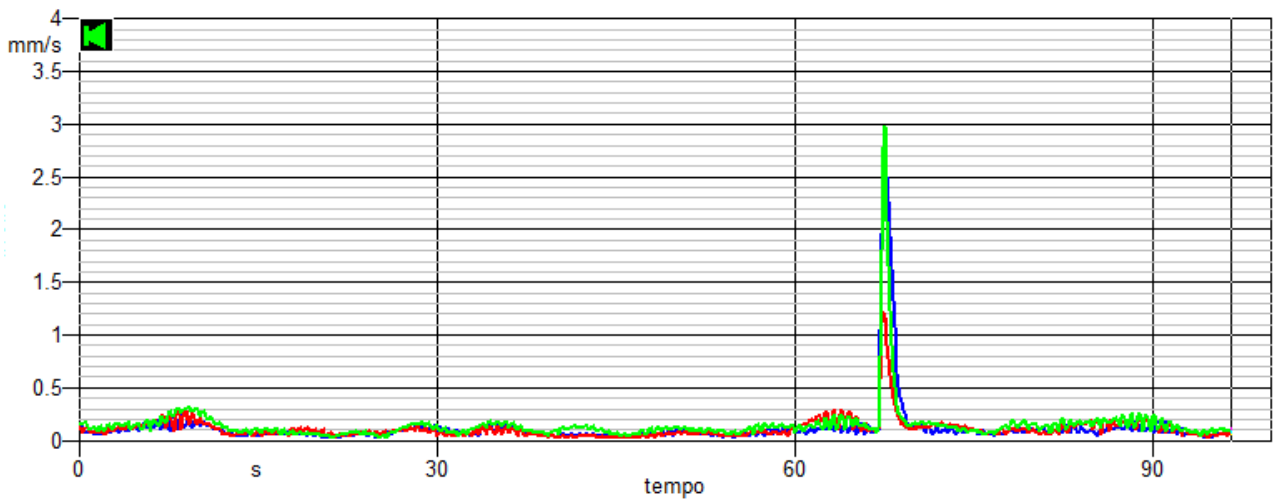


Fig. 512: Time History completa della 10° volata ricavata con l'accelerometro

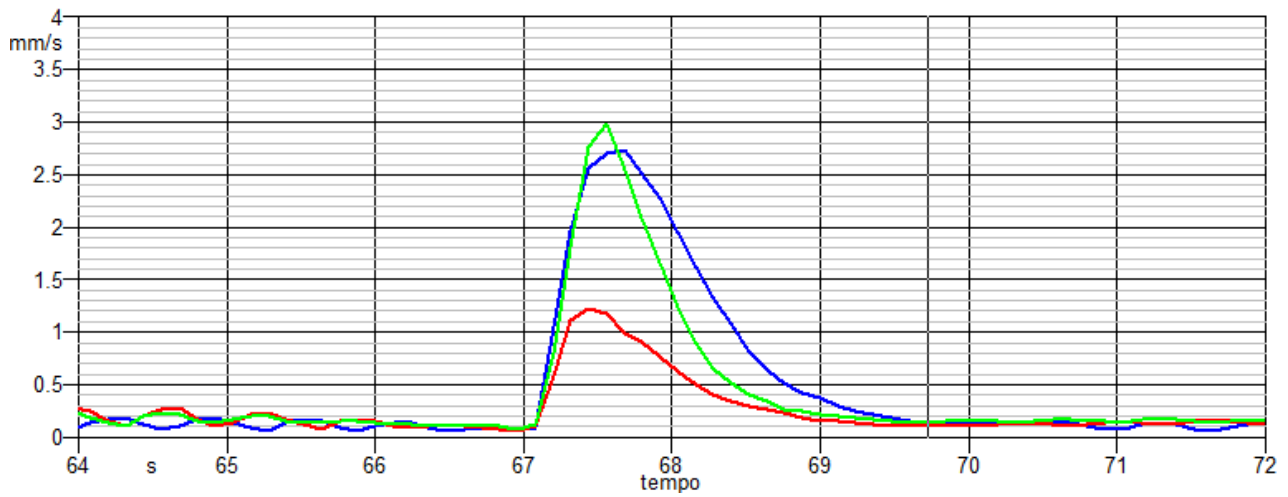


Fig. 513: ingrandimento dell'impulso della volata lungo le tre direzioni ottenute con l'accelerometro

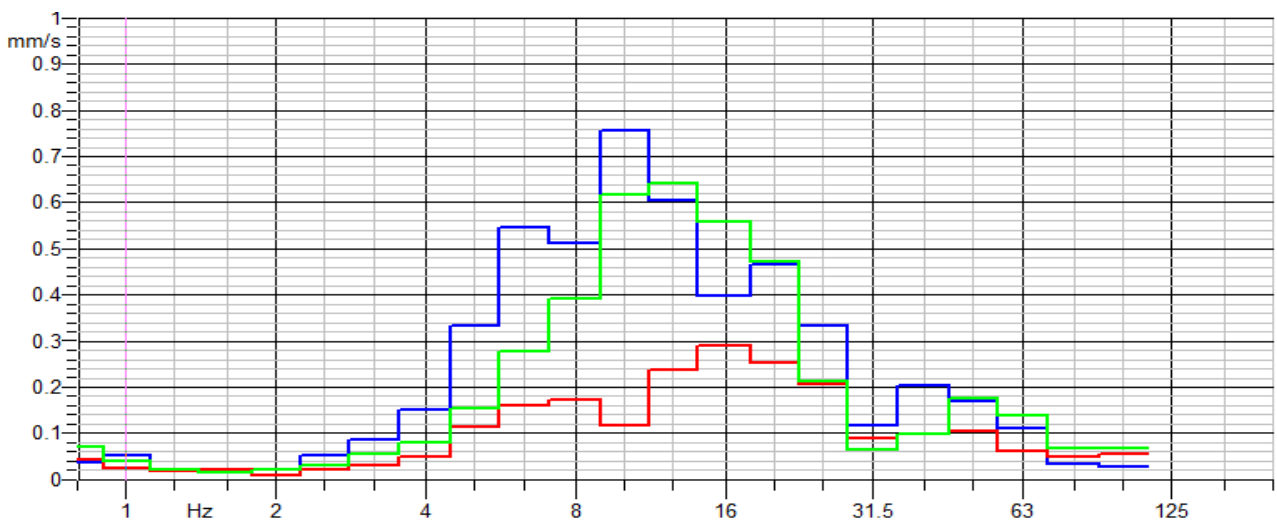


Fig. 514: spettro in frequenza della volata ricavata con l'accelerometro



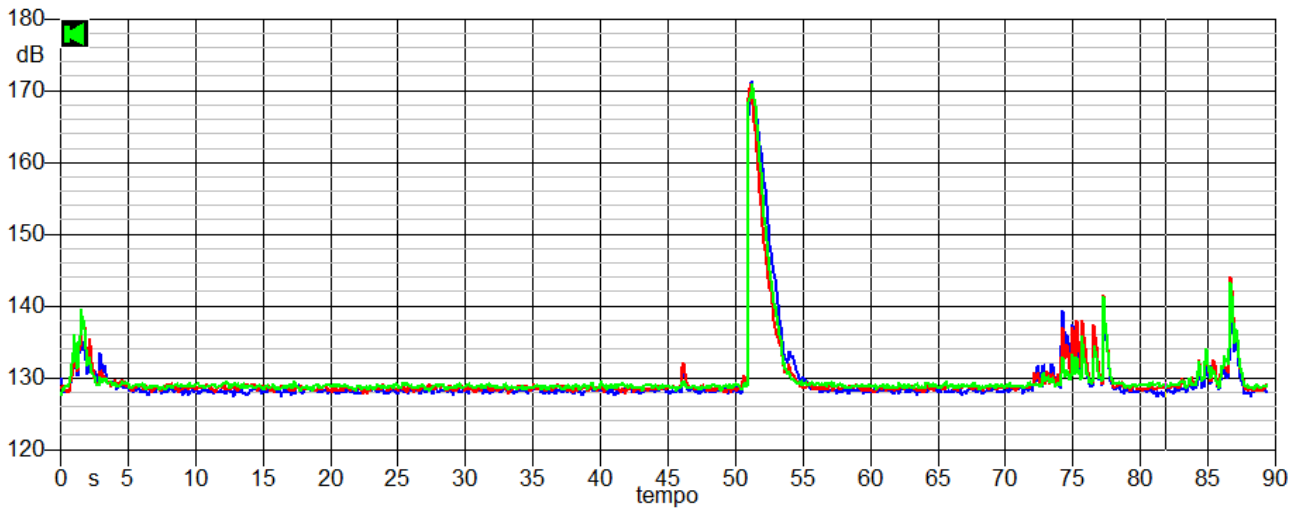


Fig. 515: Time History completa della 10° volata ricavata con il velocimetro

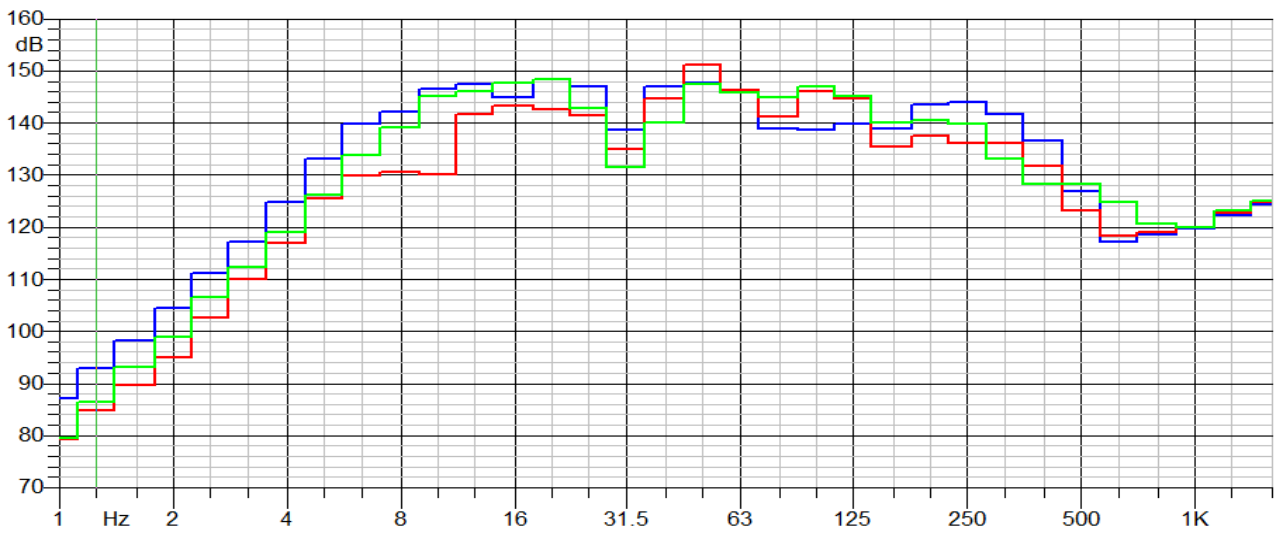


Fig. 516: spettro in frequenza della 10° volata con il velocimetro

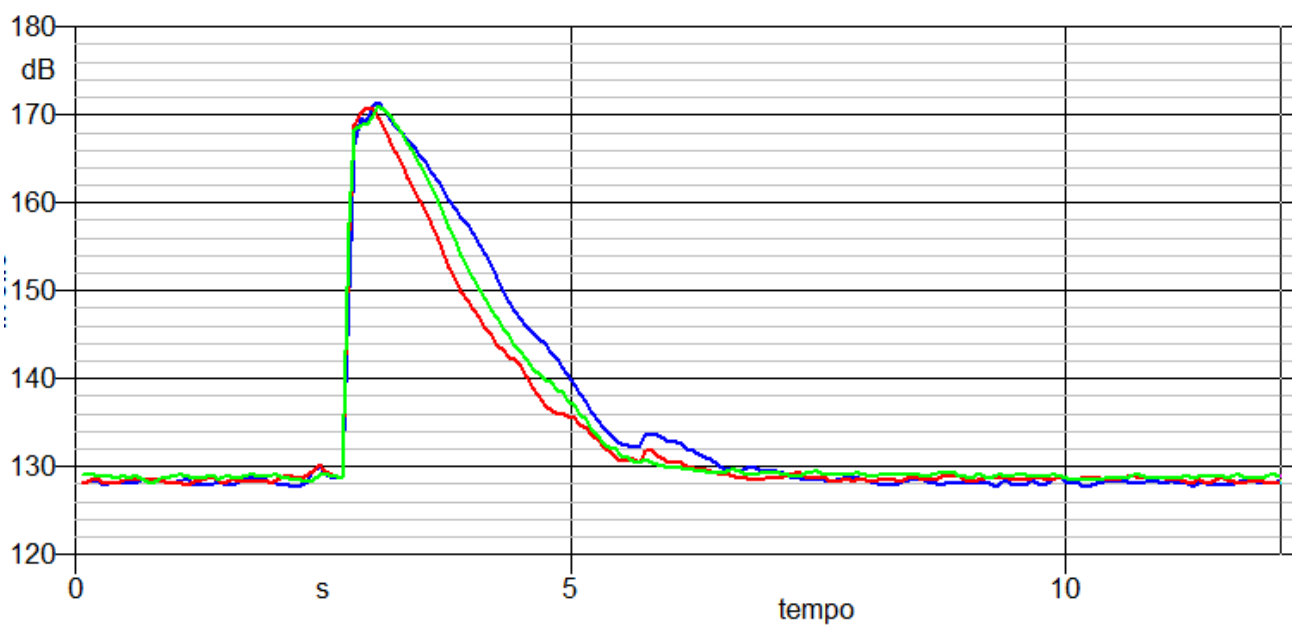


Fig. 517: ingrandimento dell'impulso della volata misurato con velocimetro lungo le tre direzioni di riferimento