



DOTTORATO DI RICERCA IN INGEGNERIA CIVILE

XXXI CICLO

MODELLAZIONE E CARATTERIZZAZIONE DELLA
SUPERFICIE STRADALE MEDIANTE MISURE LiDAR
TERRESTRI

Dottorando: Alessandro Di Benedetto

firma

Tutor:

Chia.ma Prof.ssa Maria Rosaria De Blasiis

firma

Co Tutor:

Chia.ma Prof.ssa Margherita Fiani

firma

Coordinatore:

Chia.mo Prof. Gianmarco De Felice

firma

Collana delle tesi di Dottorato di Ricerca
In Ingegneria Civile
Università degli Studi Roma Tre
Tesi n° 76

Sommario

Lo studio proposto ha come obiettivo l'analisi di tecniche e metodologie di rilievo efficaci per acquisire dati metrici più dettagliati e di supporto alle tecniche tradizionali di misura su infrastrutture. Nello specifico, si è studiata la tecnica LiDAR (*Light Detection And Ranging*), utile per elaborare modelli tridimensionali della superficie. In particolare, da misure acquisite con Laser Scanner Terrestre, è possibile ottenere un modello tridimensionale accurato della superficie dell'infrastruttura, utilizzabile per avere informazioni complete sulle condizioni di degrado in cui essa versa. La superficie modellizzata può essere altresì inserita in un software di simulazione per studiare gli effetti sull'utente prodotti dalla dinamica del veicolo. L'utilità di operare su un modello 3D che descrive correttamente la geometria dell'oggetto rilevato è indubbio. E' tuttavia necessario studiare nuovi protocolli per il rilievo di infrastrutture, che garantiscano un adeguato livello di accuratezza, una riduzione dei tempi di esecuzione dei rilievi e di conseguenza una riduzione dei costi in modo da garantire una maggiore efficienza. Alla luce di quanto detto, si propongono nuove metodologie di acquisizione e di elaborazione dei dati, allo scopo di cercare di superare le criticità presenti nella tradizionale individuazione e classificazione di alcune tipologie di degrado della superficie stradale. Il lavoro di tesi di dottorato è suddiviso in quattro parti. Nella prima parte sono analizzate e discusse alcune problematiche inerenti alle tecniche tradizionali e ai principali indicatori di regolarità. Nella seconda parte è introdotta la tecnica di rilievo topografico LiDAR, il principio di funzionamento su cui si fonda e è fornita la bibliografia specifica sulle più significative applicazioni in ambito infrastrutturale. Nella terza parte sono descritte le procedure, i metodi e gli algoritmi proposti per l'estrazione dei parametri di interesse. Infine, nell'ultima parte è descritta l'applicazione dei metodi proposti a casi studio e sono analizzate le eventuali criticità incontrate.

Abstract

The purpose of this study is the analysis of efficient survey techniques and methodologies to obtain more detailed metric data that support the classical techniques of measurement on infrastructure. Specifically, the technique of topographical survey LiDAR (Light Detection and Ranging) has been studied, which is useful to develop tridimensional models of surfaces. From data acquired by using a Terrestrial Laser Scanner it is possible to obtain an accurate model of the surface of the infrastructure, which in addition can be used to obtain complete details about the degree of deterioration of the surface that the infrastructure stands on. The modelled surface can also be uploaded on a simulation software to study the effects on the user as a result of the dynamics of the vehicle. The importance of using a tridimensional model that correctly reproduce the geometry of the surveyed object is unquestionable. However, it is still necessary to develop new protocols to survey infrastructures, which guarantee an adequate level of accuracy, a reduction in the time of work, and consequently a reduction in costs, in order to guarantee a higher efficiency. In the light of what has been said, new methodologies to obtain and develop data are proposed in order to overcome the critical issues of the traditional methodologies to identify and class some of the typologies of deterioration of the road surface. This doctorate thesis is divided into four parts. The first part analyses and discuss some problems related to the traditional techniques and the main indicators of regularity. The second part introduces the technique of topographical survey LiDAR and the functional principles that this technique is based on. The specific bibliography about the most significant applications related to infrastructure is also provided. The third part describes the procedures, methods and algorithms proposed to obtain the parameters of interest. Finally, the last part describes the application of the proposed methods to case studies, and the encountered critical issues are analysed.

Indice

ELENCO DELLE FIGURE	VII
ELENCO DELLE TABELLE	XIII
ELENCO DEI SIMBOLI	XV
1 INTRODUZIONE	1
2 CARATTERIZZAZIONE DELLA REGOLARITÀ STRADALE	5
2.1 L'INTERNATIONAL ROUGHNESS INDEX.....	7
2.2 REGOLARITÀ E CONFORT DI MARCIA.....	9
2.3 INDICI GEOMETRICI.....	10
3 TECNICHE DI MISURE TRADIZIONALI E LIMITI	12
3.1 I SISTEMI A RISPOSTA DINAMICA.....	13
3.2 I PROFILOMETRI INERZIALI.....	14
3.3 METODI MANUALI.....	16
3.4 LE CLASSI DI MISURA.....	17
4 TECNICHE INNOVATIVE, IL LIDAR	17
4.1 LASER SCANNER TERRESTRE (LST).....	18
4.1.1 <i>Principio di Funzionamento</i>	19
4.1.2 <i>Laser Scanner Terrestre Statico: Applicazioni, Review</i>	22
4.1.3 <i>Laser Scanner Terrestre Dinamico: Applicazioni, Review</i>	24
4.2 SISTEMA INERZIALE (MMS).....	27
4.2.1 <i>Sensori Laser Scanner</i>	28
4.2.2 <i>Sistema GNSS</i>	30
4.2.3 <i>Sensori Dinamici IMU e DMI</i>	31
4.2.4 <i>Camere Digitali</i>	32
5 IL RUOLO DELLA TECNICA LIDAR NELLA GESTIONE DELLA MANUTENZIONE STRADALE	32
5.1 ANALISI DEI COSTI.....	35
5.2 BENEFICI NON QUANTIFICABILI.....	37
5.3 PRIORITÀ DI INTERVENTO SECONDO IL COMFORT E LA SICUREZZA.....	38
6 CARATTERIZZAZIONE DELLA PIATTAFORMA STRADALE	42
6.1 ESTRAZIONE DELLA PIATTAFORMA STRADALE.....	43
6.1.1 <i>Il metodo RANSAC e MSAC (M-estimator SAmple Consensus)</i>	45
6.1.2 <i>Estrazione Semi-Automatica</i>	47
6.1.3 <i>Applicazione in ambito Urbano ed Extraurbano</i>	53

6.2	ESTRAZIONE SEGNALETICA ORIZZONTALE	62
6.2.1	<i>Correzione Empirica dell'Intensità</i>	63
6.2.2	<i>Il metodo della soglia di Otsu</i>	69
6.3	ESTRAZIONE PROFILI LONGITUDINALI E TRASVERSALI.....	72
6.3.1	<i>Modello Digitale di Elevazione Curvilineo (DEMc)</i>	72
6.3.2	<i>Organizzazione dei Profili</i>	77
6.4	STIMA DELLA GEOMETRIA ALTIMETRICA E PLANIMETRICA	78
6.4.1	<i>Andamento Planimetrico e Altimetrico</i>	79
6.4.2	<i>Stima delle Pendenze Trasversali</i>	83
6.4.3	<i>Applicazione in ambito extraurbano</i>	85
7	VALUTAZIONE DELLA REGOLARITÀ SUPERFICIALE	94
7.1	REGOLARITÀ LONGITUDINALE	94
7.1.1	<i>Algoritmo ASTM IRI</i>	95
7.1.2	<i>Deviazione Standard σ dei valori di elevazione</i>	100
7.1.3	<i>Valutazione del Confort di Guida</i>	101
7.1.4	<i>Confronto tra LST e LSM</i>	103
7.1.5	<i>Confronto tra LSM e tecniche standardizzate</i>	114
7.2	REGOLARITÀ TRASVERSALE	126
7.2.1	<i>Straight Edge Algorithm</i>	127
7.2.2	<i>Validazione dell'algoritmo</i>	129
7.3	DEGRADI LOCALIZZATI.....	131
7.3.1	<i>Valutazione dei degradi</i>	132
7.3.2	<i>Segmentazione e Classificazione dei Degradi</i>	133
7.3.3	<i>Validazione dell'algoritmo</i>	137
7.4	FAULTING	149
7.4.1	<i>Determinazione dell'assetto delle lastre</i>	150
7.4.2	<i>Individuazione delle Zone Critiche</i>	152
7.4.3	<i>Stima dell'Incertezza dei parametri calcolati</i>	155
7.4.4	<i>Applicazione su Piazzola Aeroportuale</i>	157
8	CONCLUSIONI	171
	BIBLIOGRAFIA	175

Elenco delle figure

4.1	<i>Misura del Δt.</i>	21
4.2	<i>Misura della differenza di fase.</i>	22
4.3	<i>Dal Report 748 NCHRP; Applicazioni in funzione della densità e dell'accuratezza della nuvola di punti.</i>	25
5.1	<i>Densità della nuvola di punti LSM (WMX-450) alle diverse velocità di percorrenza e risoluzioni ottenibili.</i>	34
6.1	<i>Schema degli elementi costituenti l'ambiente stradale.</i>	44
6.2	<i>Diagramma di flusso sintetico per l'estrazione della polilinea della traiettoria.</i>	48
6.3	<i>Schema Creazione dei Box.</i>	49
6.4	<i>Schema generazione Griglia di Nodi, vista planimetrica e stralcio di un "Bounding Box".</i>	50
6.5	<i>Falsi Inliers.</i>	51
6.6	<i>Mesh 2D e individuazione dei vertici di bordo.</i>	52
6.7	<i>Diagramma di flusso sintetico del processo di Editing.</i>	53
6.8	<i>a) Immagine satellitare con l'Area Test evidenziata, b) Foto della strada, c) Sezione Ovest-Est.</i>	54
6.9	<i>a, b, c) Densità superficiale (Punti/dm²) per le differenti combinazioni e al variare della distanza dalla traiettoria; d) Distanza tra le linee di scansione per le diverse combinazioni.</i>	56
6.10	<i>Densità superficiale (punti/m²) della combinazione A10</i>	57
6.11	<i>Scelta dei box.</i>	58

- 6.12 *Andamento del numero di punti della Sub-Cloud 19 al variare dei parametri impostati.* 59
- 6.13 *a) Nuvola di punti in input colorata secondo l'Intensità; b) Carreggiata estratta e sovrapposta alla nuvola di punti in input, i colori sono proporzionali ai valori di elevazione; c, d, e) Alcuni zoom prospettici del pannello (b).* 60
- 6.14 *a) Stralcio della schermata di scelta dei box; b) Carreggiata estratta dal box 120 al box 140 sovrapposta alla nuvola di input, la scala cromatica è proporzionale all'intensità (scala di grigi = nuvola di input, RGB = carreggiata estratta); c) Vista prospettica ovest-est.* 61
- 6.15 *a) Stralcio della schermata di scelta dei box; b, c) Viste prospettiche della carreggiata estratta dal box 6 al box 13 sovrapposta alla nuvola di input, la scala cromatica è proporzionale all'intensità (scala di grigi = nuvola di input, RGB = carreggiata estratta).* 62
- 6.16 *Intensità I_o vs Distanza: in rosso la funzione quadratica interpolata, il punto giallo individua il massimo della funzione (Max=8,17m).* 65
- 6.17 *Intensità I_o vs Distanza: in rosso la funzione polinomiale f_1 interpolata.* 65
- 6.18 *Intensità corretta I_c vs Distanza: in rosso la funzione polinomiale f_1 interpolata.* 66
- 6.19 *Stralcio pavimentazione, la scala di grigi è proporzionale ai valori di intensità; a) Intensità I_o originale; b) Intensità I_c corretta.* 66
- 6.20 *Intensità I_o vs Distanza: in rosso la funzione quadratica interpolata, il punto giallo individua il massimo della funzione (Max=7,08m).* 67
- 6.21 *Intensità I_o vs Distanza; a) Suddivisione delle zone e*

<i>interpolazione delle funzioni; b) Raccordo con la smoothing spline in corrispondenza della discontinuità.</i>	67
6.22 <i>Intensità corretta I_c vs Distanza: in rosso la funzione polinomiale interpolata.</i>	68
6.23 <i>Stralcio pavimentazione, la scala di grigi è proporzionale ai valori di intensità; a) Intensità I_o originale; b) Intensità I_c corretta.</i>	69
6.24 <i>Segmentazione di Otsu; a) Istogramma dei valori di intensità non corretti I_o con individuazione della soglia limite k; b) Stralcio di pavimentazione con Intensità I_o non corretta; c) Segmentazione di Otsu dell'Intensità I_o; d) Istogramma dei valori di intensità corretti I_c con individuazione della soglia limite k; e) Stralcio di pavimentazione con Intensità I_c corretta; f) Segmentazione di Otsu dell'Intensità I_c.</i>	71
6.25 <i>Griglia ad ascissa curvilinea.</i>	73
6.26 <i>Ciclo di Offset.</i>	75
6.27 <i>Schema di costruzione della matrice $D \in \mathbb{R}^{n,c,3}$</i>	77
6.28 <i>Esempio struttura file di testo.</i>	78
6.29 <i>Angolo α.</i>	79
6.30 <i>Massimi e minimi locali.</i>	81
6.31 <i>Stima del Diagramma delle Curvature.</i>	82
6.32 <i>Individuazione dei tratti a pendenza costante: a) RANSAC applicato a tutti i punti del profilo trasversale; b) RANSAC applicato agli outlier raggruppati $O_{lr} \subseteq O_l$; c) Individuazione del punto appartenente all'asse di rotazione.</i>	84
6.33 <i>Stralcio della mappa di Densità Superficiale della</i>	

<i>carreggiata.</i>	86
6.34 <i>Statistica dei Residui.</i>	90
6.35 <i>Andamento Plano-Altmetrico; a) Planimetria; b) Profilo Altmetrico; c) Diagramma delle curvature.</i>	92
6.36 <i>Sezioni Trasversali e Pendenze.</i>	93
7.1 <i>Modello implementato in Simulink (Matlab).</i>	99
7.2 <i>Calcolo della distanza d_i.</i>	100
7.3 <i>Progetto Rilievo; a) LST Ilris 3₆D; b) Disposizione Target e Stazioni LST; c) Target Sferico; d-e) LSM Riegl VMX-450.</i>	105
7.4 <i>Mappa di Densità LST.</i>	105
7.5 <i>Mappe di Densità LSM alle diverse velocità medie di passaggio; a) 10km/h; b) 40km/h; c) 60km/h.</i>	106
7.6 <i>Disposizione Profili Longitudinali.</i>	110
7.7 <i>Valori di IRI per ogni profilo.</i>	110
7.8 <i>Valori di IRI e giudizi secondo ASTM-E1926.</i>	112
7.9 <i>Sollecitazioni "Full Car"; a) Accelerazione quadratica media Verticale; b) Frequenza.</i>	113
7.10 <i>Stralcio della mappa di Densità Superficiale della carreggiata.</i>	115
7.11 <i>DEM_c della corsia Nord sovrapposto alla nuvola di punti.</i>	117
7.12 <i>Scema dei profili estratti e analizzati.</i>	118
7.13 <i>IRI DEM_c vs IRI profilometro.</i>	119
7.14 <i>σ vs IRI profilometro.</i>	120

7.15	<i>Diagrammi di correlazione.</i>	121
7.16	<i>Configurazioni; a) Simmetrica; b) Eccentrica.</i>	123
7.17	<i>Sollecitazioni Configurazione Simmetrica; a) Accelerazione quadratica media verticale, b) Frequenza di superamento soglia limite.</i>	124
7.18	<i>Sollecitazioni Configurazione Eccentrica; a) Accelerazione quadratica media verticale, b) Frequenza di superamento soglia limite.</i>	125
7.19	<i>Algoritmo “Straight Edge”.</i>	129
7.20	<i>DEMc con i valori delle profondità “Rut Depth”.</i>	130
7.21	<i>Piano Locale e calcolo Δh.</i>	133
7.22	<i>Matrice $D \in \mathbb{R}^{n,c,5}$ del DEMc con scalari Δh e RMSE.</i>	134
7.23	<i>Calcolo Parametri Geometrici; a) Perimetro; b) Volume.</i>	136
7.24	<i>Processo di Segmentazione; a) Immagine binaria I_b con pixel a Δh assegnati (pixel bianchi); b) Immagine binaria dopo la segmentazione.</i>	137
7.25	<i>Determinazione del Δh con KernelSize 60cm.</i>	139
7.26	<i>Valori di RMSE con KernelSize 60cm.</i>	140
7.27	<i>Buche.</i>	142
7.28	<i>Rigonfiamenti.</i>	143
7.29	<i>Segmentazione a differenti KernelSize.</i>	146
7.30	<i>KernelSize e Livelli di Severità; a) Buche; b)Rigonfiamenti.</i>	147
7.31	<i>Effetto Bordo; a) Nuvola di punti; b) Residui Δh.</i>	148

7.32	<i>Sistemi di Riferimento.</i>	151
7.33	<i>Parametri di Assetto.</i>	152
7.34	<i>Distanza dal piano generale.</i>	153
7.35	<i>Estrazione della sezione in prossimità dei giunti.</i>	154
7.36	<i>Determinazione del Faulting (f).</i>	155
7.37	<i>Area Test, Stazioni LST e Target.</i>	159
7.38	<i>Densità superficiale; a) Numero di punti per ogni lastra; b) Densità superficiale (n°punti/m²).</i>	160
7.39	<i>Errore di Interpolazione vs Distanza centro stazione.</i>	161
7.40	<i>Modulo e direzione dei vettori $\underline{\epsilon}$ proiettati sul piano generale.</i>	163
7.41	<i>Mappa Classificata dei ΔZ.</i>	164
7.42	<i>Individuazione delle zone critiche.</i>	164
7.43	<i>Relazione tra numero di punti e spessore della sezione.</i>	166
7.44	<i>Confronto valori di faulting determinati sulle aree (100x150mm) e (100x200mm).</i>	169

Elenco delle tabelle

4.1	<i>Principali caratteristiche di alcuni sensori laser montati su piattaforme dinamiche.</i>	29
5.1	<i>Impatto delle singole voci sul costo totale chilometrico.</i>	37
5.2	<i>Fattori associati alla sicurezza e percezione da parte dell'utenza.</i>	40
5.3	<i>Classificazione dei Dissesti in funzione della Sicurezza e del Comfort.</i>	40
6.1	<i>Matrice delle Combinazioni</i>	55
6.2	<i>Caratteristiche Rilievo.</i>	85
6.3	<i>Statistica dei Residui.</i>	89
7.1	<i>Livello di Comfort.</i>	102
7.2	<i>Caratteristiche ILRIS 36D e Parametri Impostati.</i>	103
7.3	<i>Statistica dei Residui.</i>	109
7.4	<i>Statistica IRI per singole corsie.</i>	111
7.5	<i>Caratteristiche Rilievo.</i>	115
7.6	<i>Statistica dei Residui.</i>	117
7.7	<i>Misure Profilometriche.</i>	118
7.8	<i>Parametri Geometrici impostati per la segmentazione.</i>	141
7.9	<i>Livelli di Severità.</i>	141
7.10	<i>Parametri geometrici delle Buche.</i>	142

7.11	<i>Parametri geometrici dei Rigonfiamenti.</i>	144
7.12	<i>Caratteristiche LST Riegl VZ400.</i>	158
7.13	<i>Statistica residui di Georeferenziazione.</i>	159
7.14	Angolo di deviazione α con incertezza associata.	162
7.15	Statistica Vettori direzione \underline{g} con incertezze associate.	162
7.16	Faulting in corrispondenza delle zone critiche.	165
7.17	<i>Massima Distanza vs spessore 2τ</i>	165
7.18	<i>Faulting (100x150mm).</i>	167
7.19	<i>Faulting, Locale vs Intera Lastra.</i>	167
7.20	<i>Faulting (100x200mm).</i>	168

Elenco dei simboli

Nell'elenco che segue sono riportati i principali simboli che compaiono nei capitoli della tesi.

<i>IRI</i>	<i>International Roughness Index</i>
<i>LiDAR</i>	<i>Light Detection And Ranging</i>
<i>LST</i>	<i>Laser Scanner Terrestre</i>
<i>LSM</i>	<i>Laser Scanner Mobile</i>
<i>DEMc</i>	<i>Digital Elevation Model ad ascissa curvilinea</i>
$D \in \mathbb{R}^{n,c}$	<i>Matrice Multidimensionale</i>
ρ	<i>Risoluzione del DEMc</i>
a_{wz}	<i>Accelerazione quadratica media verticale ponderata in frequenza</i>
<i>RMSE</i>	<i>Root Mean Square Error</i>
σ	<i>Deviazione Standard dei valori di elevazione</i>

1 Introduzione

La pavimentazione affinché possa svolgere al meglio la sua funzione e garantire livelli di sicurezza adeguati, deve assicurare requisiti in termini di Portanza, Regolarità, Aderenza e Rumorosità. Tutti questi requisiti sono strettamente legati tra loro; i sintomi di un degrado strutturale, nella maggior parte dei casi, sono la presenza di fessurazioni o depressioni sulla superficie viaria. L'Aderenza e la Rumorosità sono anch'essi strettamente legati alla regolarità superficiale; è ben noto che l'interazione ottimale tra pneumatico e piano viario garantisce il moto di "puro rotolamento", moto perturbato se il piano viario è caratterizzato da uno stato di degrado. Per cui, l'aliquota che garantisce aderenza semplicemente per il contatto tra pneumatico e strada sarà inferiore rispetto ad una condizione superficiale ideale. Si intuisce quindi che la sicurezza stradale è strettamente connessa al degrado superficiale; una delle maggiori cause di incidentalità, come ben evidenziato da approfondite analisi incidentali, è proprio la presenza di ammaloramenti che nella maggior parte dei casi sono i principali fattori scatenanti [1-5]. La programmazione e l'applicazione degli interventi manutentivi si basano principalmente su processi che mirano al raggiungimento dell'ottimo economico e nella maggior parte dei casi prescindono da condizioni di sicurezza e confort, requisiti fondamentali di una infrastruttura sicura e funzionale.

La sicurezza stradale negli anni ha comportato la necessità di sviluppare veri e propri programmi di gestione e di manutenzione delle infrastrutture stradali; il PMS (Pavement Management Systems) è uno strumento di pianificazione che assiste il gestore nel processo decisionale. In Italia, il Consiglio Nazionale delle Ricerche con il Bollettino Ufficiale n° 125/88 ("Istruzioni sulla Pianificazione della Manutenzione Stradale", 1986) ha definito la manutenzione stradale *"quel complesso di operazioni ed attività tese a conservare le caratteristiche funzionali e strutturali della strada"*. Essa ha acquisito un ruolo strategico nell'ambito della gestione del patrimonio stradale ma una sempre più ridotta disponibilità di risorse sta spingendo verso una maggiore attenzione nei confronti della conservazione del patrimonio esistente e delle problematiche legate alla sicurezza stradale. Ancora, la norma UNI 9910 definisce la manutenzione

quale “*combinazione di tutte le azioni tecniche ed amministrative incluse le azioni di supervisione, volte a mantenere o riportare una entità in uno stato in cui possa eseguire la funzione richiesta*”. Il Ministero delle Infrastrutture e Trasporti, sulla base del manuale del C.N.R del 1985, ha elaborato delle linee guida che dettano i criteri e le modalità per effettuare controlli sulla sicurezza stradale, ispezioni sulle infrastrutture esistenti e procedure per l’attuazione del piano di gestione della rete stradale. L’ispezione e la classificazione delle condizioni in cui versa una infrastruttura sono due processi imprescindibili per le successive fasi di scelta degli interventi e analisi della rete da un punto di vista della sicurezza. Il legislatore ha preso atto del fatto che difetti di progettazione e carenze di manutenzione della strada possano causare un vertiginoso aumento dell’incidentalità stradale, o perlomeno contribuirvi. Pertanto, si è ritenuto necessario individuare in capo ai soggetti proprietari e ai gestori della rete viaria una serie di obblighi di protezione nei confronti dell’utenza. In definitiva, ai fini dell’acquisizione delle caratteristiche delle pavimentazioni ciascun Ente è tenuto a predisporre un catalogo dei dissesti valido per la propria rete di competenza. In realtà, la normativa mette anche in risalto la possibilità e l’obbligo di quantificare lo stato della pavimentazione mediante l’introduzione di indicatori globali o locali. Questi indici danno informazioni generali e sintetiche dello stato della pavimentazione e quasi nella totalità dei casi non riescono a interpretare con completezza lo stato e l’evoluzione del degrado che risulta essere complesso e articolato. Recentemente l’Associazione Mondiale della Strada (AIPCR/PIARC) ha elaborato un manuale contenente delle linee guida e alcune raccomandazioni a supporto della gestione del patrimonio infrastrutturale [6]. Il manuale si rivolge sia alle organizzazioni nazionali che agli enti locali gestori, comprese tutte le figure aventi poteri decisionali. Le fasi fondamentali che compongono il processo manutentivo si sviluppano secondo i punti:

- Rilievo dei dati
- Analisi dei possibili interventi
- Programmazione degli interventi
- Esecuzione e controllo degli interventi

Il rilievo e la costruzione di una banca dati è indispensabile, senza di essa o quando è incompleta o poco attendibile vi è l’impossibilità di effettuare scelte manutentive; è dunque uno dei pilastri che reggono l’analisi e il processo complessivo. Il monitoraggio è un processo ideale per ottenere

una banca dati storica dei dissesti; tuttavia praticarlo con le tecniche tradizionali risulta oneroso, poco efficiente e nella maggior parte dei casi rischioso in quanto compromette il corretto esercizio della viabilità e la sicurezza degli operatori, per cui è stato quasi del tutto abbandonato. Tali obiettivi è possibile perseguirli con la messa a punto di un complesso sistema di monitoraggio e di un modello in grado di descrivere accuratamente, a livello globale e locale, lo stato superficiale della pavimentazione senza limitazioni dovute alla vastità delle reti stradali e garantendo la continuità dei flussi veicolari.

Per analizzare e individuare le varie tipologie di degrado, gli enti gestori generalmente fanno riferimento ai maggiori cataloghi degli ammaloramenti (*S.E.T.R.A.*, *C.N.R.*, *C.O.R.D.*, *R.D.D.H.D.*, *S.H.R.P.*, *V.S.S.*). Esistono molteplici cataloghi; ogni ente gestore ha redatto un proprio catalogo che raccoglie i principali dissesti caratteristici dell'infrastruttura di propria competenza. Questi cataloghi forniscono solo un supporto generale all'identificazione dei principali ammaloramenti localizzati e alle eventuali tecniche di bonifica. La descrizione è puramente descrittiva; alcuni fanno riferimento alle problematiche del rischio associato secondo diversi livelli di severità, funzione della geometria. Al contrario, lo stesso dissesto può avere differenti livelli di rischio, a esempio, con la sola variazione di velocità del veicolo a parità di tutte le altre condizioni. Da queste poche considerazioni è possibile notare come tutti questi cataloghi, seppur molto articolati, sono incapaci di fornire indicazioni per la redazione di piani di manutenzione basati su un'analisi di confort e sicurezza. Con il passare del tempo sono stati introdotti standard e strumentazioni a alto rendimento per poter misurare e quantificare i degradi al fine di limitare le interferenze con i flussi veicolari. Le ASTM (*American Society for Testing and Materials*), le norme UNI (*Ente nazionale italiano di unificazione*), le ISO (*International Organization for Standardization*) e le AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*) forniscono gli standard per la diagnosi e la misura dei degradi superficiali; contengono tutti i processi di cablaggio delle apparecchiature, i procedimenti di misura da adottare e i relativi indici rappresentativi delle caratteristiche superficiali da determinare. Tra i più comuni, a esempio, l'IRI (*International Roughness Index*) fu introdotto per esprimere su scala internazionale il livello di confort offerto dalla sovrastruttura stradale [7]. In ambito scientifico, però, esistono molte perplessità dato che su base sperimentale è stato dimostrato che il livello

di confort percepito dall'utente non rispecchia esaustivamente l'interpretazione fornita dall'IRI. I metodi di misurazione tradizionale delle irregolarità superficiali, nella maggior parte dei casi, non riescono ad essere altrettanto esaurienti dato che forniscono misure di profili lineari di una superficie tridimensionale, variabile trasversalmente. Un classico profilometro inerziale non a contatto richiede una misura a velocità pressoché costante, situazione impensabile all'interno di un contesto urbano a alto tasso di traffico, oltre al fatto che riesce a ricoprire solo una corsia e solo poche traiettorie longitudinali. Un altro aspetto importante è la questione della ripetibilità della misura; è quasi impossibile avere con la maggior parte dei misuratori inerziali due misure in due tempi differenti sul medesimo profilo, situazione imprescindibile per un processo di monitoraggio. Altre tipologie standardizzate di misura che mirano principalmente alla determinazione di profili longitudinali e trasversali (metodi geometrici) risultano non utilizzabili a livello di rete ma solo a livello locale dato che sono dei dispositivi tipicamente manuali. Metodi non geometrici, invece, possono risultare più interessanti visto che si basano sulla valutazione dell'effetto dinamico che si ha per effetto delle irregolarità della pavimentazione ma non sufficienti vista la percezione soggettiva del disagio. Diverse risultanze sperimentali mettono alla luce ulteriori questioni che aboliscono quasi totalmente l'utilizzo delle metodologie tradizionali; la percezione del disagio non è funzione solo dei degradi superficiali ma anche delle condizioni al contorno della sede stradale e che quindi non possono essere misurate e rilevate con le strumentazioni standard dettate dalle normative. La segnaletica orizzontale e verticale, la presenza di sottopassi, la larghezza della banchina, manufatti che compromettono la visibilità in curva, sono solo alcune componenti che influenzano la guida dell'utente, se a queste si somma la percezione del disagio fornita dalle caratteristiche superficiali della pavimentazione è facile comprendere le forti lacune che hanno le metodologie tradizionali finora utilizzate.

Con l'avvento di nuovi strumenti, tra cui il laser scanner terrestre (LST) e il laser scanner mobile (LSM), è possibile ricorrere a nuove modalità di rilievo della superficie viaria e dell'intera scena circostante in modo da minimizzare le interferenze tra fase di rilievo e fase di esercizio della sovrastruttura stessa che comporterebbe gravi disagi alla circolazione e condizioni di pericolo per gli operatori [8]. I sistemi a scansione laser operano in modo quasi completamente automatico e sono in grado di acquisire un numero notevole di punti al secondo (anche dell'ordine delle

migliaia). Il dato ottenuto ha le potenzialità per rappresentare la complessità dello stato deformativo superficiale, composto a volte dalla sovrapposizione di più eventi deformativi. Inoltre, risulta georiferito nello spazio, così da poter essere inserito su cartografia gestibile tramite i comuni strumenti conosciuti e poter redigere mappe contenenti informazioni sullo stato della pavimentazione.

La tesi si articola in due parti generali:

- La prima parte consiste nello studio delle tecniche di misura tradizionali e dei principali indici caratteristici dei degradi superficiali.
- La seconda parte si basa sull'analisi della regolarità e della sicurezza affidata alla superficie sulla base di processi che regolano l'interazione pneumatico-strada, osservabili mediante l'ausilio di software di simulazione.

E' necessario tuttavia, conoscere adeguatamente le loro potenzialità al fine di utilizzare al meglio le loro specificità, gestendo opportunamente gli inevitabili limiti che ciascuna tecnica di misura ed elaborazione può presentare. A tal fine, sono state evidenziate le differenti criticità che esistono negli strumenti tradizionali e le potenzialità delle tecniche innovative applicate ad alcune tipologie di irregolarità.

2 Caratterizzazione della Regolarità Stradale

In letteratura esistono differenti definizioni di regolarità superficiale: Il comitato Tecnico delle Caratteristiche Superficiali dell'AIPCR in un congresso tenutosi a Bruxelles nel 1987 [9] propose una classificazione delle caratteristiche geometriche superficiali della pavimentazione in funzione della risoluzione geometrica (orizzontale e verticale) all'interno di certe classi di lunghezza d'onda. Altri Enti forniscono differenti definizioni: l'International Organization for Standardization (ISO 13473) [10] definisce la regolarità superficiale come la deviazione del piano viario rispetto a una superficie planare: "*The deviation of a pavement surface from a true planar surface, within the wavelenght ranges...*", una

definizione quindi puramente geometrica. Lo standard ASTM E 867 [11], invece, associa la regolarità agli effetti che la stessa ha sulla dinamica dei veicoli: *“The deviations of a pavement surface from a true planar surface with characteristic dimensions that affect vehicle dynamics, ride quality, dynamic loads, and drainage, for example, longitudinal profile, transverse profile, and cross slope”*.

Le condizioni della pavimentazione sono definite da indici di prestazione, specifici o globali, i quali sintetizzano le condizioni di regolarità mediante valori numerici e scale di valutazione. In particolare, possono essere di tipo geometrico o dinamico e sono determinati a partire dalla misura di profili longitudinali e trasversali della superficie viaria, altri si basano invece sulla misura puntuale dei differenti degradi. I profili longitudinali sono misurati lungo il senso di marcia dei veicoli, i profili trasversali sono misurati ortogonalmente al senso di marcia. La regolarità è misurata principalmente sui profili longitudinali, mentre i profili trasversali sono utilizzati per stimare le pendenze trasversali e le depressioni trasversali prodotte dalle deformazioni della sovrastruttura in corrispondenza della traiettoria delle ruote, denominate Ormaie [12].

Qualsiasi sezione ideale (longitudinale o trasversale) della superficie stradale rappresenta un profilo “vero” [12]. Il profilo vero è approssimato da un profilo misurato il quale è composto da una sequenza di punti misurati a un certo intervallo. Analiticamente un profilo può essere descritto dalla sovrapposizione di differenti funzioni sinusoidali ognuna avente lunghezza d’onda, ampiezza e fase differenti. Non tutte le lunghezze d’onda sono importanti ai fini della stima del confort di marcia; infatti generalmente le vibrazioni indotte dall’irregolarità del profilo riguardano lunghezze d’onda che oscillano tra 50cm e 30m [12]. In fase di elaborazione, le lunghezze d’onda fuori dalla gamma critica vengono eliminate tramite l’applicazione di filtri matematici, a esempio con l’applicazione della media mobile (filtro passa bassi), o mediante l’applicazione di filtri meccanici come a esempio le sospensioni di un veicolo strumentato di misura [12]. L’utilizzo della densità spettrale PSD (*Power Spectral Density*) degli spostamenti verticali per descrivere la regolarità di un profilo stradale fu introdotto da Dodds e Robson [13]. Gli studiosi affermano che il profilo stradale può essere ricondotto a un processo casuale gaussiano omogeneo e isotropo bidimensionale. Lo standard che utilizza questa metodologia è la ISO 8608 [14]; oltre che alla densità spettrale di potenza delle quote in funzione della frequenza

spaziale (Gd), la norma introduce anche quella funzione della frequenza spaziale angolare (W). La regolarità è stimata a partire dal grado di regolarità DR (*Degree of Roughness*); a ogni tratta è associata una classe funzione del grado di regolarità.

2.1 L'International Roughness Index

L'indice IRI (*International Roughness Index*), è uno degli indici più utilizzati per la stima della regolarità di un profilo stradale. Fu introdotto dalla *World Bank* nel 1986 [15] con lo scopo di risolvere la questione fondamentale della riproducibilità e della stabilità della misura nel tempo della regolarità longitudinale. La *World Bank* nel 1982 contribuì all'*International Road Roughness Experiment* (IRRE) [7]; l'obiettivo della sperimentazione era la produzione di una scala sintetica e globale di calibrazione della regolarità, unica per i differenti sistemi di misura. I risultati dell'IRRE sono stati successivamente utilizzati per lo sviluppo dell'IRI. A differenza dei sistemi *Response Type Road Roughness Measuring Systems* (RTRRMS) che misurano la risposta dinamica di un veicolo strumentato, l'IRI è determinato tramite un algoritmo e quindi rimane stabile nel tempo e riproducibile. L'IRI è un indice dinamico, si basa sulla simulazione dinamica del *quarter-car* (*Quarter-Car Simulation*, QCS), che percorre il profilo misurato a una prestabilita velocità (80km/h). Tale velocità è giustificata dal fatto che l'IRI si dimostra sensibile alle stesse lunghezze d'onda che provocano vibrazioni nei veicoli in condizioni medie di utilizzo. Il movimento simulato delle sospensioni viene accumulato e diviso per la distanza percorsa, così facendo si ottiene un valore analogo all' *Average Rectified Slope* (ARS [m/km]) derivato dai sistemi RTRRMS. I parametri introdotti all'interno del modello meccanico, descritto mediante un sistema di equazioni differenziali del secondo ordine, sono quelli della "Golden Car". Questi parametri sono stati determinati in maniera tale da avere una risposta correlata con la maggior parte dei veicoli. Esistono differenti studi che evidenziano l'inappropriato utilizzo di questi parametri dato che i sistemi meccanici dei veicoli oggi sono all'avanguardia rispetto a quelli utilizzati negli anni '80 [16]. L'indice filtra tutte quelle lunghezze d'onda non critiche; quelle critiche sono comprese nell'intervallo tra 1m e 30m circa con un intervallo di campionamento prossimo allo 0, per cui non dovrebbero essere valutati segmenti inferiori a 30m [17]. Con passi di campionamento superiori a 150mm la risposta in frequenza tende ad

attenuarsi; intorno a questo valore la risposta risulta comunque soddisfacente. I moderni profilometri possono registrare valori di IRI anche a intervalli di 10m; questo consente di mettere in evidenza le irregolarità localizzate e i difetti isolati i quali comportano valori di picco. Questi picchi su una tratta più lunga verrebbero mediati e quindi non evidenziati. I valori IRI dipendono, quindi, dalla lunghezza dei tratti esaminati e ai fini di un monitoraggio dovrebbero essere riferiti a tratti di lunghezza standardizzata. La scala IRI varia da 0m/km a 20m/km; il valore 0m/km rappresenta una superficie perfettamente liscia, il valore 20m/km, invece, rappresenta una superficie molto accidentata e priva di uno strato di usura [12]. L'incertezza nel calcolo dell'IRI è funzione anche del passo di campionamento del profilo longitudinale; il picco massimo si raggiunge intorno ai 167mm producendo un incremento dell'errore in percentuale di circa 1,5%; generalmente il passo non dovrebbe superare i 300mm [17]. Per ridurre la sensibilità dell'algoritmo IRI ai passi di campionamento e per simulare l'impronta dei pneumatici sul profilo in esame, il metodo richiede l'applicazione di un filtro a media mobile con una base di 250mm. Questo filtro "passa bassi" è applicato solo se il profilo ha un intervallo di campionamento inferiore ai 167mm. Gli effetti di inizializzazione del modello di simulazione influenzano i primi 20m; specifici studi sono stati condotti in merito a questo per individuare una metodologia in grado di minimizzare gli errori computazionali in questo intervallo [17]. Differenti sono le ulteriori perplessità e le criticità sull'utilizzo dell'IRI. Alcuni studi mostrano come le variazioni stagionali e gli effetti ambientali ne influenzino i risultati [18]. La misura dell'IRI non permette una stima completa della qualità di guida dato che è necessario conoscere la dinamica dell'intero veicolo e i principali fattori che la condizionano [19]. È evidente che i sistemi di gestione della pavimentazione (PSM) nel tempo dovranno adattarsi alle nuove metodologie di stima del confort [20]. Altri studiosi hanno correlato la percezione degli utenti all'IRI evidenziando che i valori di soglia utilizzati non sono in linea con i pareri espressi [21].

Una valutazione più realistica può essere effettuata se l'indice di regolarità è stimato tenendo conto dei profili misurati in corrispondenza di entrambe le tracce degli pneumatici. L'*Half Car Index* (HRI) è un indice che utilizza lo stesso algoritmo di calcolo dell'IRI; invece di utilizzare un solo profilo utilizza la media dei profili delle due tracce degli pneumatici [22]. Questo metodo richiede che i profili siano misurati simultaneamente su entrambe le tracce o che i due profili siano

perfettamente sincronizzati. Esiste una stretta correlazione tra HRI e IRI; l'HRI è sempre inferiore all'IRI (circa del 10%) calcolato sui singoli profili. Il *Mays Response Meter* (MRM) rappresenta il modello Half Car a differenti velocità di simulazione; se la velocità è posta pari a 80km/h questi coincidono. Un altro indice simile all'HRI è il *Mean Roughness Index* (MRI); la risposta dinamica è calcolata separatamente sul profilo destro e sinistro, successivamente le risposte sono mediate in modo da ottenere l'MRI. L'accelerazione verticale fornita dal modello di simulazione del quarto di veicolo è utilizzata anche per ottenere l'indice RMSA (*Root Mean Square Acceleration*) o soltanto RMS, ovvero, la radice della media quadratica delle accelerazioni verticali. L'RMSA è perfettamente correlabile all'IRI o all'HRI se viene utilizzata la stessa velocità di simulazione [12], pertanto fornisce poche informazioni aggiuntive.

2.2 Regolarità e Confort di marcia

L'RMSA risulta utile per lo studio del confort di marcia; infatti lo standard ISO 2631 [23] emanato nel 1997 ha introdotto i metodi per la valutazione del confort e gli effetti delle vibrazioni sul corpo umano valutati a partire dall'RMS [24]. Le vibrazioni non incidono solo sul confort di guida a breve termine ma possono incidere sulle problematiche di salute a lungo termine. I possibili rischi interessano la colonna vertebrale e il sistema nervoso [23]. Il disagio durante la guida deriva, in particolar modo, dalle variazioni e dagli improvvisi sbalzi di accelerazione verticale, noti come *Jerk*. Il *Jerk* è il tasso di variazione di accelerazione, espresso generalmente in m/s^3 .

Negli anni '80 il *National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP) contribuì allo sviluppo di alcuni progetti di ricerca che miravano allo studio degli effetti della regolarità della superficie stradale sul confort di marcia. I progetti principali sono due e sono descritti nei report NCHRP 275 [25] e NCHRP 308 [26], scritti a distanza di 3 anni circa. L'obiettivo, perseguito già da diversi anni, era quello di individuare un metodo in grado di "convertire" le misure profilometriche in misure di percezione del confort di marcia espresso tramite il *Rideability Number* (RN). Il confort di marcia è stato stimato a partire dai sondaggi dei cosiddetti *Mean Panel Ratings* (MPR), una valutazione media prodotta da un gruppo di votanti; stessa metodologia effettuata dall'*AASHO Road Test* ma con criteri statistici più robusti. In particolare fu sviluppato un

metodo in cui le funzioni PSD (*Power Spectral Density*), calcolate per due profili longitudinali (in corrispondenza di entrambe le tracce dei pneumatici), erano analizzate per fornire una statistica riassuntiva denominata PI (*Profile Index*). I valori PI sono stati combinati in una trasformazione non lineare per ottenere una stima del MPR, tradotta sotto forma di RN.

Negli anni l'interdisciplinarietà è stata fondamentale per la ricerca, data la complessità dei vari fenomeni che intercorrono nella caratterizzazione dell'interazione strada/veicolo/utenza. Liu e Herman nel 1998 [27] hanno introdotto una descrizione teorica e dettagliata dell'interazione veicolo-strada insieme all'analisi sul confort di marcia. I ricercatori, utilizzando il modello del *quarter-car* e applicando l'analisi della densità spettrale, hanno determinato le espressioni analitiche degli indici dinamici, tra i quali il tasso di accelerazione (*Jerk*), la velocità media rettificata (ARV), l'ARS e l'indice IRI. Un anno dopo, gli autori evidenziano che l'indice *Jerk* è uno dei parametri più importanti per valutare la praticabilità e la regolarità delle strade da un punto di vista del confort [28].

È facile intuire come già da allora c'era la necessità di introdurre metodologie più complesse in grado di simulare la risposta dinamica di un veicolo in modo più fedele possibile con l'obiettivo di valutarne gli effetti. Le limitazioni erano dovute principalmente alle forti carenze computazionali dei calcolatori, algoritmi e tecniche di misura incapaci di presentare il problema nella sua reale complessità. La possibilità di ottenere dati 3D della superficie stradale su cui simulare modelli "*full car*" è solo di recente applicazione [29], grazie anche ai software di simulazione molto affidabili e di recente commercializzazione. Gli studiosi hanno confermato la buona corrispondenza tra le risposte dinamiche ottenute da simulazione e quelle misurate sul veicolo strumentato. Esistono differenti studi in merito; a partire dalle sollecitazioni stimate in ambiente di simulazione, è possibile dedurre gli effetti delle vibrazioni sul benessere dell'utente senza l'ausilio di veicoli strumentati [30].

2.3 Indici Geometrici

In alcuni Paesi sono utilizzati indici geometrici per caratterizzare la regolarità della pavimentazione. In Giappone si utilizza la deviazione standard σ delle differenze di elevazione rispetto ad una retta di riferimento locale (detta anche base) avente una certa lunghezza;

generalmente la base è compresa tra 1m e 5m [31]. Questo indice deriva dalla simulazione di una barra profilometrica che avanza lungo il profilo a intervalli fissati [12]. I valori di deviazione devono essere calcolati su tratte di 100m (*Japan Road Association*, JRA, 1989); alcuni Enti suggeriscono anche 150m. Studi sulla correlazione tra indici dinamici e geometrici evidenziano come la significatività degli indici puramente geometrici non è inferiore a quella degli indici dinamici; questo aspetto mette in discussione le diverse critiche nei confronti della valutazione della regolarità a partire dalla sola interpretazione delle caratteristiche geometriche [31]. Importanti sono gli studi sulla combinazione di indici geometrici e dinamici perché combinano gli effetti dinamici dovuti alle irregolarità con valutazioni puramente geometriche, quest'ultime non dipendenti da parametri dinamici del sistema o dalla velocità di simulazione [32].

Per regolarità si intende anche quella trasversale, in particolare lungo i profili trasversali si possono individuare deformazioni permanenti in corrispondenza delle traiettorie delle ruote del veicolo, note anche come ormaie. L'indice associato è legato alla profondità delle deformazioni, misurata rispetto un riferimento. Il riferimento cambia a secondo del tipo di strumento che si utilizza e della metodologia di misura. Se la misura è condotta con un regolo [33] (un asta rigida di dimensioni standardizzate, ASTM E1703) l'indice di profondità "*Rut Depth*" sarà la distanza tra l'asta poggiata trasversalmente sulla superficie e il punto maggiormente depresso. La "*Pseudo Ruts*", invece, è la distanza tra i punti più depressi e una retta di riferimento orizzontale solidale con il punto più alto del profilo trasversale. Come per i profili longitudinali, i profili trasversali sono ottenuti da misure di tipo discreto. La discretizzazione influenza la misura della profondità delle ormaie [34]. Le variazioni laterali dei dispositivi di misura inerziale compromettono anch'esse la misura [35].

Gli indici dinamici o geometrici forniscono informazioni di sintesi sulle condizioni dello stato generale della viabilità in modo da definire le priorità di intervento mediante la realizzazione di scale gerarchiche di intervento. Il monitoraggio delle condizioni puntuali di ammaloramento generalmente è la fase successiva e prevede l'analisi puntuale dei singoli degni. Spesso le valutazioni sono fortemente condizionate dall'esperienza del personale tecnico perché la maggior parte delle tecniche in uso si basano su analisi puramente soggettive. Negli anni, per rendere le analisi più oggettive e uniformi, sono stati redatti differenti

cataloghi specifici dei dissesti. Il *Pavement Condition Index* (PCI) è uno degli indici che può essere definito geometrico ed è utilizzato per stimare lo stato di degrado della pavimentazione mediante ispezioni visive dirette [36]. Ogni degrado individuato è descritto secondo la dimensione, il grado di severità e la posizione all'interno della sezione. Il punteggio attribuito alla sezione esaminata (da 0 a 100) è funzione della densità pesata di ogni singolo degrado individuato. I pesi sono attribuiti in funzione dei livelli di severità individuati. La matrice decisionale del PCI fornisce informazioni sui miglioramenti richiesti al variare della destinazione d'uso della strada.

3 Tecniche di Misure Tradizionali e Limiti

Prima dell'avvento delle tecniche di misura dei profili, i ricercatori si basavano sulle opinioni degli utenti per stimare il livello di confort fornito dalla regolarità della strada. Hveem nel 1960 affermava che per comprendere al meglio le condizioni di una strada bisognava analizzare le opinioni degli utenti, ai quali venivano forniti dei veri e propri questionari in cui esprimere un giudizio scegliendo un livello di confort. L'AASHTO negli anni '50 condusse un test su larga scala "*AASHTO Road Test*" fornendo agli utenti un modulo di valutazione con una scala a 5 livelli (da "*very poor*" a "*very good*"). È chiaro che le valutazioni risultavano essere molto soggettive, dato che erano influenzate da una percezione del confort di marcia differente per ogni singolo utente. Le valutazioni furono elaborate per assegnare un singolo valore numerico a ogni tratta esaminata. Il valore sintetico fu denominato *Present Serviceability Rating* (PSR) e rappresentava la capacità della sezione di garantire una elevata velocità, a un volume elevato di traffico misto (mezzi pesanti e leggeri), nelle sue condizioni attuali. L'indice attuale *Present Serviceability Index* (PSI) è figlio del PSR ed è basato anch'esso sulla stessa scala a 5 livelli di valutazione; va oltre una semplice valutazione della qualità di guida. Le valutazioni furono condotte da esperti che analizzarono anche le caratteristiche geometriche e superficiali delle tratte in esame. Carey and Irick proposero due modelli matematici di PSI (per pavimentazioni flessibili e rigide) basati sui risultati statistici sulle tratte analizzate con lo

scopo di utilizzarli come indicatori di prestazione. Il valore minimo di qualità che un utente può tollerare è denominato ‘prestazione terminale’. Differenti sono le relazioni che legano il PSI ai principali indici dinamici [37,38]. Il PSI è stato correlato anche al numero di passaggi di determinati assi di veicoli pesanti così da definire una stima quantitativa dell’influenza del “comportamento a fatica” della pavimentazione [39].

3.1 I Sistemi a Risposta Dinamica

La regolarità può essere stimata indirettamente a partire dalla quantificazione della risposta dinamica di un veicolo strumentato che percorre la strada in esame (*Response-Type Road Roughness Measuring Systems* RTRRMS) [7]. Questo tipo di sistema non è in grado di fornire una misura diretta del profilo geometrico; le sospensioni del veicolo vengono utilizzate per filtrare e evidenziare le sole lunghezze d’onda responsabili del confort di marcia. Il parametro stimato mediante tali dispositivi è la pendenza media rettificata (ARS) che rappresenta i movimenti accumulati dalle sospensioni per unità di distanza percorsa [m/km]. A partire dagli anni ’20 questo fu uno dei primi metodi utilizzati per la stima della regolarità e era molto utilizzato dato che il contenuto in frequenza degli spostamenti registrati dalle sospensioni è molto simile a quello corrispondente alle accelerazioni provocate a bordo dei veicoli; i dati acquisiti risultavano simili alle vibrazioni interne percepite dai passeggeri. Nel tempo questi dispositivi sono stati abbandonati perché le misure prodotte non erano riproducibili data la variabilità nel tempo della risposta dinamica delle sospensioni dei veicoli. I risultati erano poco rappresentativi ai fini di un confronto diretto tra misure multi-temporali e le misure prodotte che dipendono completamente dalle proprietà del sistema sospensioni/pneumatici. Sayers et al. nel 1986 [15] evidenziarono che il sistema di ammortizzazione dei veicoli strumentati risultava essere l’elemento più critico; il veicolo dovrebbe essere dotato di un sistema di ammortizzazione rigido e la calibrazione del sistema è necessaria ogni volta che si percepisce una inevitabile variazione di rigidità del sistema (ammortizzatori, pressione e tipo di pneumatici, carichi). Le caratteristiche di smorzamento delle sospensioni sono sensibili alla temperatura, in particolare per temperature inferiori ai 5°C. Per cui vi è la necessità di effettuare una fase di riscaldamento prima di poter effettuare le misure. Se i processi di calibrazione sono stati effettuati in condizioni asciutte, le misure effettuate in condizioni di bagnato possono essere affette da errori non trascurabili. Di fondamentale importanza risulta il

controllo della velocità: la misura dovrebbe essere effettuata a una velocità pressoché costante, condizioni in ambito urbano quasi del tutto irrealizzabili. Un altro aspetto che ha reso presto obsoleto questo sistema è la necessità di avere informazioni in merito alle caratteristiche trasversali della strada, parametri non stimabili dato che le informazioni ricavate sono esclusivamente lungo il senso di marcia e in corrispondenza delle tracce dei pneumatici.

3.2 I Profilometri Inerziali

Metodi più moderni dei precedenti prevedono la misura diretta del profilo, che è successivamente processata per determinare la regolarità stimando l'ARS mediante simulazione dinamica. Uno dei primi dispositivi di profilatura ad alta velocità è apparso negli anni '60. In particolare, sono definiti profilometri inerziali a alta velocità quei dispositivi in grado di misurare il profilo con velocità superiori a 100km/h. Un sensore posto sulla barra profilometrica misura la distanza dalla base di misura alla superficie stradale e l'utilizzo di accelerometri permette di depurare gli spostamenti relativi del veicolo. I sensori possono essere laser, ottici, infrarossi e ultrasonici. A differenza dei sistemi RTRRMS i sensori sono calibrati in fabbrica dal produttore e rimangono calibrati per un lungo periodo. I sensori maggiormente utilizzati sono quelli laser; questi sono molto precisi ma non permettono la misura su strade sterrate. Analogamente, i sensori a ultrasuoni non funzionano correttamente su superfici molto ruvide e risultano essere molto sensibili alla temperatura e all'umidità dell'aria. I sensori di tipo ottico, invece, sono molto sensibili alla segnaletica orizzontale e a superfici molto scure, producendo segnali di picco nel profilo di output. Esistono differenti linee guida e standard per un corretto funzionamento e calibrazione dei differenti sistemi [40].

Lo standard di riferimento è l'ASTM E950 [41] che detta le specifiche sui metodi di misura e sugli aspetti della calibrazione, compresa la validazione dei risultati ottenuti. I profilometri più moderni sono in grado di misurare il profilo longitudinale e trasversale contemporaneamente, fornendo in tal modo informazioni sia sulla regolarità longitudinale sia su quella trasversale. Sebbene i componenti siano calibrati dal produttore, sono sempre necessari particolari test e procedure di controllo molto onerose per assicurare che il profilo misurato sia accurato. Le condizioni e il tipo di pavimentazione sono aspetti che influenzano le misure.

Superfici molto ruvide e la presenza di fessurazioni profonde, buche o giunti possono causare anomalie nel profilo misurato; queste anomalie si presentano come dei picchi localizzati. Solo alcuni fenomeni di questo tipo possono essere ridotti con l'applicazione di particolari filtri *anti-aliasing*. La posizione longitudinale e laterale del profilometro può variare durante la misura poiché è difficile per l'operatore seguire una linea retta o percorrere la stessa traccia seguita in una precedente misura. Questo influisce molto sulla ripetibilità della misura dato che piccole variazioni della posizione laterale possono provocare significative variazioni dei profili misurati producendo, a esempio, una variazione del 20% del valore IRI su una sezione di 300m [12]. Una singola misura profilometrica non basta a quantificare il grado di regolarità di una pavimentazione, a prescindere dall'accuratezza del sistema, dato che la pavimentazione non possiede profili univoci. Occorre, quindi, effettuare una serie di misure lungo differenti traiettorie che successivamente andranno trattate statisticamente.

Un altro importante aspetto che inficia i risultati è che l'operatore non sempre è in grado di mantenere una velocità costante [42]. Velocità improprie o forti variazioni di accelerazione comportano errori nelle misure. Tutti i profilometri inerziali hanno limiti di velocità (superiore e inferiore) oltre i quali producono misure errate. Oggigiorno, la maggior parte dei sistemi funzionano correttamente su una ampia gamma di velocità ma forti variazioni di accelerazioni e interruzioni, dovute ad esempio al traffico e alla presenza di intersezioni, sono inevitabili principalmente in ambito urbano; in questi casi la misura dovrebbe essere sospesa. In curva, l'accelerazione laterale può compromettere le misure dell'accelerometro dato che l'asse verticale dello stesso tende a subire una piccola inclinazione. L'errore della misura sarà proporzionale all'accelerazione subita dal veicolo; ad esempio accelerazioni laterali di 0,25g possono produrre un angolo di rollio di circa $2,5^\circ$ producendo un errore inaccettabile nella stima del profilo. Accelerazioni laterali tollerabili si aggirano intorno ai 0,15g, solo se le misure sono destinate alla caratterizzazione della regolarità a livello di rete. Analoghe considerazioni possono essere fatte per le variazioni della pendenza longitudinale; in questo caso l'asse verticale dell'accelerometro sarà inclinato di un angolo proporzionale a quello di beccheggio. In sintesi, si nota quindi che gli errori nelle misure con profilometri derivano dai vari componenti dell'intero sistema, nonché dalle condizioni superficiali della pavimentazione e dall'operatore/guidatore. Negli anni sono state

apportate molte migliorie ai sistemi di profilatura a alta velocità, ma attualmente queste misure risultano essere ancora molto costose e dispendiose in termini anche di tempo dato che richiedono differenti ripetizioni sulla stessa tratta [43].

3.3 Metodi Manuali

Metodi di profilatura molto meno celeri sono quelli che utilizzano i profilografi. Questi strumenti sono generalmente formati da una trave a struttura reticolare che può estendersi fino a 10m di lunghezza. La struttura reticolare può spostarsi lungo una traiettoria grazie a un sistema di ruote (da 4 a 12) [12]. Nasce come metodo manuale; la velocità massima di misura si aggira intorno i 3÷5km/h e è necessaria la chiusura della tratta oggetto di misura. Le misure di elevazione sono effettuate tramite la registrazione degli spostamenti verticali di una ruota posta in mezzera della trave. I profilografi sono sensibili a lunghezze d'onda comprese tra i 30cm e i 23m.

Esistono altri differenti metodi di misura prettamente manuali. Un classico metodo statico di misura è condotto con il livello e la stadia. È un metodo topografico e si basa sullo schema di livellazione geometrica da un estremo; lo standard di riferimento è l'ASTM E1364 [44]. I requisiti in termini di accuratezza sono molto più restrittivi rispetto a una classica livellazione geometrica ($\sigma=0,5\text{mm}$) e la lettura alla stadia deve essere effettuata a intervalli massimi di 300mm. Prima dell'avvento dei dispositivi celeri questa tecnica era molto utilizzata; recenti studi hanno dimostrato l'inadeguatezza del metodo ai fini della misura della regolarità per misure con lunghezze d'onda inferiori a un 1m [45].

Altri strumenti poco celeri sono gli inclinometri; questi dispositivi utilizzano un inclinometro di precisione per stimare la differenza di altezza tra due supporti distanziati solitamente tra i 250mm e 300mm, i "Dipstick" [46]. Esistono anche inclinometri mobili "Rolling Dipstick", dotati di un sistema di ruote che fornisce un supporto scorrevole e più comodo. A differenza del livello, questi dispositivi hanno dimostrato buone capacità per la stima della regolarità superficiale [45] e sono generalmente utilizzati per ottenere profili di riferimento per calibrare dispositivi a alto rendimento. È facile intuire come queste metodologie richiedano tempi di misura molto lunghi e l'inevitabile chiusura dei tronchi stradali esaminati.

3.4 Le Classi di Misura

Nel corso degli anni sono stati sviluppati molteplici tecniche e strumenti di misura profilometrica; questi si differenziano in termini di funzionamento, principi di acquisizione, accuratezza e precisione, quest'ultima intesa come ripetibilità della misura. Per questo motivo nel 1986 Sayers et al. [15] introdussero una classificazione dei dispositivi di misura sulla base dell'accuratezza e della precisione di misura. Le classi erano quattro: andavano dalla classe 1, che comprendeva tutti quei dispositivi molto accurati utili per misure di monitoraggio, alla classe 4, che includeva dispositivi non accurati e che non richiedevano una calibrazione. In pratica, uno strumento di classe 1 deve essere così accurato da poter trascurare gli errori casuali; la misura dell'IRI appartenente a questa classe risulterebbe il "vero IRI" da utilizzare come riferimento, un metro di confronto per la calibrazione di altre misure. Dispositivi di classe 2 forniscono profili con sufficiente accuratezza per la misura della regolarità, ma non garantiscono la riproducibilità necessaria per le applicazioni di classe 1. La classe 3 comprendeva, invece, tutti quei dispositivi e tecniche in grado di produrre dati correlabili all'IRI mediante equazioni di correlazione. Un'ulteriore distinzione tra i profili della classe 1 e della classe 2, è riportata nello standard ASTM E950-98, il quale differenzia i dispositivi sulla base dell'intervallo di campionamento e sulla risoluzione delle misure di elevazione. Tuttavia, diversi studi hanno evidenziato che l'introduzione delle restrizioni dettate dalle classi non hanno valide fondamenta: dispositivi appartenenti alla classe 1 non fornivano sempre misure con caratteristiche di ripetibilità e nella maggior parte dei casi le misure avevano una dispersione in percentuale maggiore del 2%. Inoltre, la variazione dell'indice IRI tra i diversi strumenti era circa del 20% [12].

4 Tecniche Innovative, Il LiDAR

La tecnologia LiDAR (*Light Detection And Ranging*) è attualmente una delle tecniche del telerilevamento più interessanti in ambito infrastrutturale. Negli ultimi anni, le classiche tecniche di modellazione e

di rilievo del territorio sono state integrate e alcune quasi totalmente sostituite dalla tecnica 3D laser scanning. I sistemi a scansione che si basano su questa tecnologia forniscono informazioni 3D molto accurate e a alta risoluzione tramite nuvole di punti dense; il risultato della misura di un numero elevato di punti dell'oggetto è la digitalizzazione e la modellazione della superficie scansionata. Le tecniche di misura su cui si basano i laser scanner nascono nel 1933 grazie al sovietico Balaicov, il quale brevettò il primo distanziometro a onde, insieme al connazionale Lebedev che costruì uno dei primi prototipi.

Questa tecnologia è in una fase di continuo sviluppo e diverse sono le migliorie che nel tempo si stanno apportando in modo da ottenere un'accuratezza della misura e una velocità di acquisizione sempre più spinte. Oltre alle coordinate 3D dei punti dell'oggetto, i sensori permettono di determinare la potenza dell'impulso riflesso. Alcuni sistemi permettono l'eco-digitalizzazione del segnale laser di ritorno e la classificazione automatica tramite l'analisi della "*Full Waveform*" [47].

I laser scanner sono costituiti da sensori ottici e elettro-meccanici di tipo attivo, operano generalmente nella banda dell'infrarosso vicino. Possono essere montati su piattaforme statiche o dinamiche e si dividono in Laser Scanner Terrestri (LST) e Laser Scanner Aerei (LSA).

La tecnologia Laser Scanner combinata con sistemi di posizionamento assoluto e con altri tipi di sensori di navigazione e orientamento, permette la sincronizzazione di tutte le informazioni provenienti dai differenti sensori in modo tale da ottenere un unico modello finale accurato e direttamente georeferenziato. Questo sistema *Mobile* risulta essere molto versatile e produttivo, specialmente in ambito infrastrutturale; rispetto a altri metodi di rilievo questi dispositivi sono in grado di effettuare la misura a una velocità di esercizio, a alta frequenza e in condizioni di piena sicurezza per gli operatori così da contenere notevolmente i costi delle acquisizioni. I primi strumenti moderni furono ideati negli anni '90, in particolare nel 1993 fu ideato il primo prototipo di sistema commerciale a scansione laser aerotrasportato per scopi topografici e cartografici.

4.1 Laser Scanner Terrestre (LST)

Distanziometri sempre più precisi e con elevate prestazioni uniti a apparati meccanici anch'essi di alta precisione hanno permesso la realizzazione dei Laser Scanner. Per Laser Scanner Terrestri si intendono

tutti quei dispositivi che operano a contatto con la superficie terrestre o su manufatti, differenti da quelli aerei. Tra questi rientrano i Laser Scanner Terrestri Mobili, più comunemente detti Laser Scanner Mobili (LSM), che operano su piattaforme in movimento (veicoli su strada, veicoli su rotaie, imbarcazioni); grazie a sistemi di posizionamento GNSS (*Global Navigation Satellite System*) e di orientamento le nuvole di punti misurate sono direttamente allineate e georeferenziate rispetto ad un sistema cartografico. I Laser Scanner Terrestri Statici (LSTS) sono laser scanner messi in stazione solitamente su treppiede topografico o su pilastrino e prevedono la misura di più scansioni, da differenti punti di stazione, successivamente co-registrate e allineate per ottenere la nuvola di punti completa.

I sensori laser presenti sul mercato hanno caratteristiche differenti per principio di acquisizione, per le precisioni ottenibili, frequenza di acquisizione e portata massima raggiungibile. Una prima classificazione si basa principio di funzionamento.

4.1.1 Principio di Funzionamento

Il LASER (*Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation*), nacque nel 1917 ad opera di Albert Einstein. Le caratteristiche principali del laser sono l'unidirezionalità, la monocromaticità e la coerenza, cioè la luce si propaga lungo una direzione ben definita (al contrario delle classiche lampadine) e se due sorgenti emettono onde continue e uguali nel tempo le intensità saranno le medesime.

I sistemi a scansione laser possono distinguersi in due grosse categorie a seconda del principio di funzionamento e del campo di applicazione: sistemi distanziometrici e sistemi a triangolazione. Gli scanner distanziometrici sono progettati per operare in vaste aree del territorio e in campo architettonico (anche indoor). Gli scanner triangolatori sono utilizzati per la prototipazione di oggetti di piccole dimensioni, si basano principalmente sulla tecnica topografica dell'intersezione in avanti. Sono utilizzati principalmente per la modellazione meccanica in ambito industriale e da diversi anni anche in ambito biomedico e come ausilio alla catalogazione di reperti in ambito archeologico. La loro accuratezza è dell'ordine di poche decine di micron.

I laser scanner utilizzati in ambito dell'ingegneria civile/infrastrutturale sono quelli di tipo distanziometrico o detti anche "*Ranging Scanner*". I

principi con cui è misurata la distanza sono due: sistemi che si basano sulla misura del tempo di volo (*TOF, Time of Flight*) e sistemi che si basano sulla misura della differenza di fase del segnale inviato e riflesso (*PS, Phase Shift*).

Gli scanner che si basano sul principio della misura del tempo di volo possono effettuare misure anche su distanze maggiori di un chilometro. La misura della distanza è determinata tramite la misura del tempo Δt che trascorre tra l'emissione dell'impulso laser e la riflessione del segnale dall'oggetto colpito; l'impulso riflesso viene captato da un fotodiodo ricevitore generando così un segnale elettrico di ricezione. Nota la velocità di propagazione dell'impulso ($v \cong 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$), la distanza D è data dalla relazione:

$$2D = v \cdot \Delta t$$

Nei distanziometri è presente un oscillatore di precisione molto stabile ($p \cong 3 \cdot 10^{-8} \text{ s}$) con una frequenza di 14,985MHz. Il fascio laser è emesso da un diodo attraversato da una corrente a alto amperaggio (20-30A) per un intervallo di tempo molto piccolo, circa 12ns. Dopo un certo intervallo di tempo Δt il segnale di ritorno arriva al ricevitore; il valore approssimato della distanza è successivamente calcolato, insieme allo scarto quadratico medio σ_D .

$$\sigma_D = p \cdot v = 3 \cdot 10^{-8} \text{ s} \cdot 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cong \pm 9 \text{ m}$$

Questa distanza approssimata serve per determina il numero intero di lunghezze d'onda, necessario per un successivo affinamento della misura. Il tempo di volo Δt impiegato dall'impulso laser è pari al numero di periodi interi trascorsi ($n \cdot T$, il periodo T è pari all'inverso della frequenza fondamentale) più la somma dei periodi compresi tra la partenza del segnale t_a , l'arrivo del segnale t_b e la prima oscillazione di riferimento (figura 4.1); l'oscillatore di riferimento si attiva all'accensione dello scanner e non alla partenza del segnale.

$$\Delta t = nT + t_a + t_b$$

I periodi t_a e t_b vengono determinati tramite un convertitore tensione/tempo costituito da un condensatore. Il condensatore è aperto nell'istante della partenza del segnale e chiuso in corrispondenza della prima rampa del segnale dell'oscillatore, in tal modo si determina t_a . Nota la tensione raggiunta q dal condensatore nella generica frazione di tempo

t e la tensione Q raggiunta nel periodo T , la relazione che lega i tempi alle cariche è:

$$\frac{t}{q} = \frac{T}{Q}$$

La determinazione di t_b avviene dopo aver modulato il segnale con la frequenza data dall'oscillatore interno, questo perché l'intensità del segnale ricevuto è molto debole.

Durante tutto il processo all'interno dello strumento avviene una misura interna di calibrazione, il tempo di calibrazione è il tempo di percorrenza del segnale nei circuiti, a distanza nulla, e va sottratto al tempo misurato in modo tale da ottenere il solo tempo esterno di volo. Le misure sono caratterizzate da impulsi laser molto brevi così da eliminare rumori di fondo e ottenere misure più accurate. Alla misura del tempo di volo è associata anche una misura angolare di precisione e del dato radiometrico relativo alla riflettanza dell'oggetto colpito. L'accuratezza ottenibile con strumenti a tempo di volo è di circa di 3-6mm@100m, valori che aumentano all'aumentare della distanza [48].

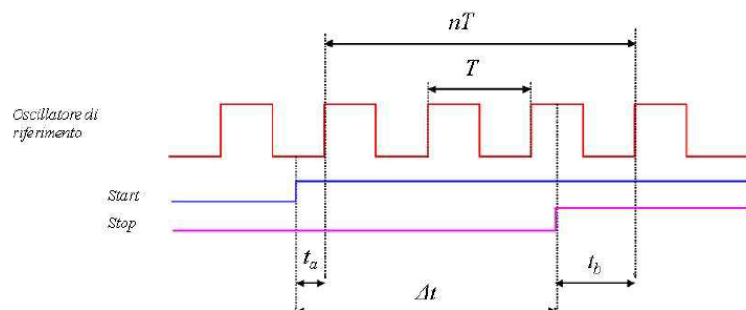


Figura 4.1 – Misura del Δt [48].

I sistemi a differenza di fase si basano sulla discriminazione della fase del segnale emesso/riflesso; la distanza D è determinata confrontando la fase dell'onda emessa con quella ricevuta per effetto della riflessione sulla superficie dell'oggetto colpito (figura 4.2). Lo strumento in grado di misurare lo sfasamento $\Delta\varphi$ è detto discriminatore o comparatore di fase. La misura della distanza necessita la misura dello sfasamento e del numero intero di lunghezze d'onda N , noto anche come ambiguità, dato che la misura dello sfasamento permette di valutare solo la porzione di

distanza che eccede il numero intero di mezze lunghezze d'onda in essa contenuto. Nota la lunghezza d'onda λ , le relazione della distanza vale:

$$2D = N\lambda + \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \lambda$$

L'ambiguità N è determinabile con differenti metodologie, tra le più note ed utilizzate c'è il metodo per Decadi. Gli scanner a misura di fase hanno una portata più limitata rispetto a quelli a tempo di volo (<150m), in compenso hanno una frequenza di acquisizione superiore (più di un milione di punti al secondo) [48].

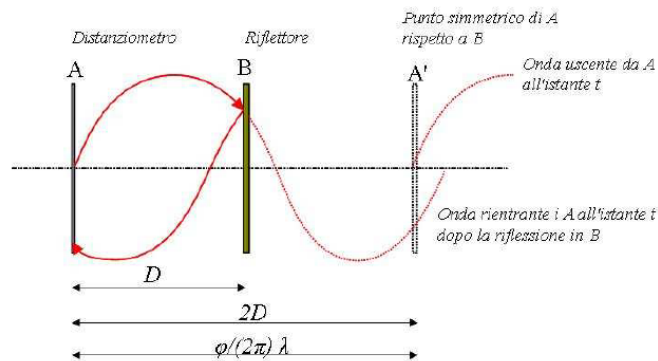


Figura 4.2 – Misura della differenza di fase [48].

Per entrambi i sistemi, la misura della distanza avviene lungo direzioni azimutali e zenitali definite a priori impostando i passi angolari. Le principali configurazioni meccaniche di acquisizione sono due: una testa rotante che devia la pulsazione laser insieme a uno specchio che ruota nella direzione ortogonale, oppure un emettitore laser fisso insieme a un sistema di specchi rotanti. Il sistema meccanico che permette la rotazione degli specchi e dell'emettitore influenza la precisione della misura.

4.1.2 Laser Scanner Terrestre Statico: Applicazioni, Review

La tecnologia Laser Scanner Terrestre Statica permette di determinare un profilo “vero” in modo più efficace rispetto ai metodi tradizionali statici e offre un significativo vantaggio fornendo informazioni di tutta la superficie stradale [49]. Un confronto effettuato evidenzia come la densità spettrale dei profili derivanti da LST sia in linea con quella derivante dalle principali tecniche tradizionali; ciò mette in evidenza

l'affidabilità della tecnica dato che dimostra avere le stesse sensibilità alle lunghezze d'onda ottenute con i metodi standard [49]. Misure profilometriche condotte tramite profilometri multi-laser e livello di precisione hanno una correlazione del 99% con i dati provenienti da misure LST [50]; i confronti derivano da sperimentazioni su tre aree test, ognuna con differenti livelli di regolarità. Verifiche dell'accuratezza di una misura LSTS in ambito stradale hanno dimostrato che il dato 3D è più che sufficiente per misure della regolarità e della geometria stradale in cui è richiesta, nella maggior parte dei casi, una accuratezza molto spinta [51].

I modelli 3D forniti dalla tecnica LSTS permettono la determinazione dei principali indici su tutta la pavimentazione in modo tale da avere una caratterizzazione completa della regolarità su tutta la carreggiata, non più localizzata solo lungo alcune traiettorie [52]. Altri studi hanno dimostrato l'efficienza della tecnica di scansione laser in ambito aeroportuale per la caratterizzazione geometrica di alcuni elementi di collegamento della pista, al fine di garantire livelli di sicurezza e confort adeguati [53].

Questa tecnologia è diventata molto popolare e sempre più utilizzata anche per misure e ispezioni di opere d'arte. Il monitoraggio periodico di ponti, viadotti, sottopassi e sovrappassi richiedono anch'esse azioni che, se condotte in maniera tradizionale, sono quasi del tutto irrealizzabili senza intralciare il regolare flusso veicolare. Nella maggior parte dei casi le ispezioni si basano su un'interpretazione visiva e altamente soggettiva per classificare le condizioni superficiali e la catalogazione delle stesse [54]. Kim et al. [55] propongono una metodologia automatizzata per la valutazione dello stato superficiale delle strutture in calcestruzzo, evidenziando in modo automatico le zone erose e prive di copriferro, elemento fondamentale per la salvaguardia delle armature. Particolari test sono stati effettuati anche per valutare le deformazioni verticali prodotte da prove di carico; nonostante la tecnica della scansione laser non possa sostituire le convenzionali tecniche geodetiche ad hoc e di alta precisione, risulta comunque essere un sistema integrativo [56]. Olsen et al. [57] propongono una metodologia per il rilievo dei danni e per l'analisi delle variazioni volumetriche per campioni sottoposti a prove strutturali. I dati LST hanno fornito ulteriori informazioni sulle variazioni geometriche non evidenziate da metodi convenzionali. Tang et al. [58] dimostrano come dalla nuvola di punti è possibile misurare difetti di planarità di superfici in calcestruzzo a distanze oltre i 20m con una buona risoluzione.

Di recente pubblicazione è il *Caltras Surveys Manual*, un manuale online redatto dal *California Department of Transportation* [59]. L'obiettivo principale del manuale è fornire un contributo ai fini della sicurezza, sostenibilità, integrazione e efficienza, al sistema infrastrutturale così da migliorare l'economia e la vivibilità in California. Il manuale contiene una raccolta di sperimentazioni e osservazioni delle differenti tecniche tradizionali di rilievo topografico utilizzate, oltre a specifiche molto dettagliate sulle misure prodotte con laser scanner terrestre statico [59].

4.1.3 Laser Scanner Terrestre Dinamico: Applicazioni, Review

L'LSM è un sistema a scansione laser che consente l'acquisizione di dati 3D per mezzo di uno o più laser scanner montati su una piattaforma mobile (autoveicoli/imbarcazioni/veicoli su rotaie). Il sistema consente di rilevare dati a altissima risoluzione e precisione in modalità dinamica per le più svariate applicazioni, molte delle quali ancora oggetto di studio [60,61]. La nuvola di punti ottenuta da una misura LSM permette di realizzare un inventario completo di tutti gli elementi che compongono l'infrastruttura; dalla caratterizzazione della geometria stradale a quella della segnaletica e delle opere d'arte [62,63].

La tecnologia LSM presenta benefici in termini di sicurezza, efficienza e costi [64]. La misura viene eseguita da una squadra di operatori a bordo di un veicolo attrezzato che transita a una velocità pari a quella di esercizio, non essendo così soggetti a particolari condizioni di rischio. Glennie [65] riporta alcuni test effettuati su circa 7km di strada a alto tasso di traffico, evidenziando le potenzialità dello strumento da un punto di vista dell'efficienza. Altri studiosi sottolineano come questa tecnica possa abbattere notevolmente i costi e i tempi di acquisizione dei dati rispetto alle metodologie tradizionali [66].

In letteratura esistono molte applicazioni ma poche discutono approfonditamente i risultati e le criticità del metodo. Considerato il forte interesse maturato da parte di differenti Enti gestori, il report 748 dell'NCHRP (2013) [67] nasce con l'obiettivo di fornire delle linee guida per l'uso della tecnologia LSM e gli strumenti necessari di ausilio alla pianificazione, alla progettazione e alla manutenzione delle infrastrutture. Le due variabili fondamentali considerate sono l'accuratezza e la densità della nuvola di punti, attraverso le quali sono state redatte delle correlazioni con le possibili applicazioni (figura 4.3).

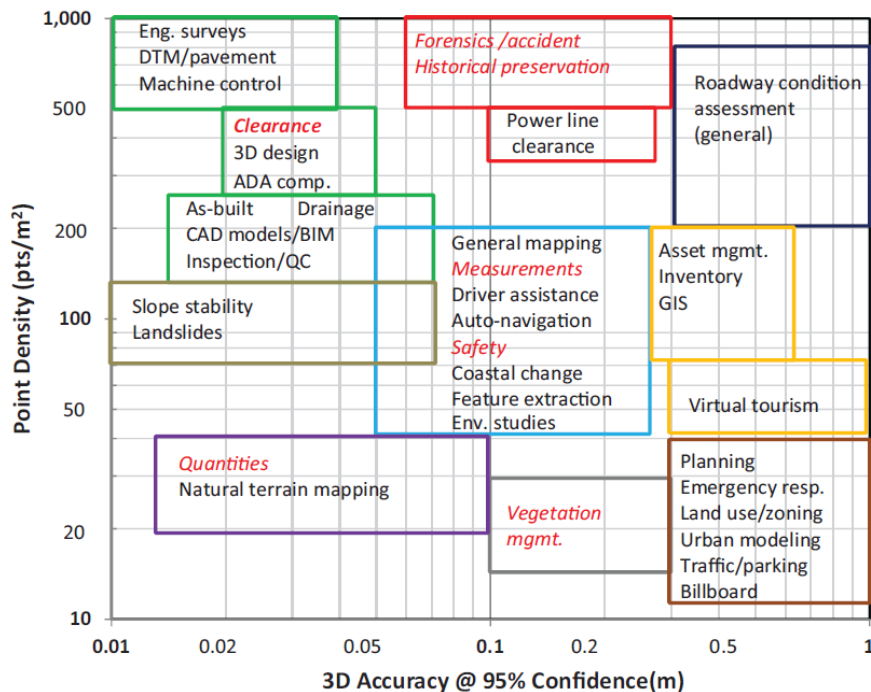


Figura 4.3 – Dal Report 748 NCHRP [67]; Applicazioni in funzione della densità e dell'accuratezza della nuvola di punti.

Il LSM è un sistema multi-sensore; ogni sensore è caratterizzato da un errore che influisce sulla precisione della misura [68,69]. È fondamentale conoscere l'incidenza degli errori attesi per ciascun sensore in modo da stimare e controllare l'accuratezza complessiva della misura in funzione dell'applicazione prevista [70].

I Modelli Digitali di Elevazione (DEMs), elaborati a partire dalle nuvole di punti, forniscono le basi per l'implementazione di alcuni automatismi: Grafe [71] evidenzia come alcune particolari macchine per la manutenzione stradale possano essere controllate automaticamente utilizzando il DEM. Alcuni autori dimostrano come i modelli digitali possano fornire un grosso contributo nella fase progettuale in quanto risultano molto utili per la determinazione dei volumi di terreno movimentato [72]. Scansioni periodiche dei siti in costruzione permettono lo studio della conformità del progetto e la valutazione dello stato di avanzamento dei lavori con la possibilità di avere un computo metrico in itinere [73].

Le nuvole di punti ottenute da una scansione LSM richiedono particolari elaborazioni e processi di editing per estrarre i soli parametri di interesse. Alcuni autori descrivono degli algoritmi automatizzati, basati su relazioni topologiche, per riconoscere i principali elementi che compongono l'infrastruttura, tra i quali: muri, edifici, alberi, barriere di sicurezza, segnaletica verticale e pali dell'illuminazione stradale [61,74,75]. Uno dei primi studi sull'estrazione di particolari elementi presenti sulla scena fu condotto da Manandahar e Shibasaki (2002) [76] utilizzando algoritmi di segmentazione sulle linee di scansione per separare veicoli, alberi e muri dalla superficie stradale. La segmentazione si basa su parametri geometrici, come la pendenza e la densità del dato, derivando così le soglie mediante l'analisi degli istogrammi. Dopo la segmentazione la nuvola di punti è stata ulteriormente suddivisa in zone aventi punti raggruppati e punti sparsi, mediante l'analisi della deviazione standard delle coordinate spaziali.

Di particolare interesse sono le applicazioni riguardanti la caratterizzazione geometrica delle pendenze trasversali della carreggiata stradale. Le pendenze delle sezioni stradali sono appositamente progettate per garantire un efficiente drenaggio delle acque meteoriche e per avere una corretta angolazione in modo da contrastare parte dell'accelerazione centrifuga in curva. In merito a questo, sono proposti degli algoritmi automatizzati per ottimizzare i processi di misura e di controllo, considerato che gli Enti gestori hanno il compito e il dovere di valutare costantemente nel tempo questi parametri [77,78].

La valutazione delle condizioni della pavimentazione da misure LSM è uno dei principali obiettivi degli studiosi e degli Enti gestori, considerata la celerità di acquisizione e l'efficienza della tecnica. La maggior parte dei metodi sviluppati per stimare la regolarità si basano su interpolazioni piane e sull'analisi della deviazione standard delle differenze di elevazione rispetto al riferimento piano [79]. L'obiettivo degli autori era quello di identificare una metodologia in grado di fornire informazioni rapide, economiche e complete della regolarità mediante la determinazione della deviazione standard dei valori di elevazione rispetto ad una superficie planare interpolata. Una identificazione rapida e automatica dei difetti superficiali localizzati è possibile utilizzando anche solo l'intensità del raggio riflesso. Funzioni morfologiche e particolari filtri ne permettono l'identificazione [80]. Questo processo, però, risulta molto sensibile alla densità spaziale del dato, una bassa densità può

compromettere i risultati finali. Guan et al. hanno sviluppato una metodologia di valutazione per la caratterizzazione delle fessurazioni basato sull'MSTV (*Multi-scale Tensor Voting*) [81]. Díaz-Vilariño et al. hanno sviluppato un metodo per la classificazione della tipologia di pavimentazione in ambito urbano (lapidea o in conglomerato bituminoso) tramite la determinazione di alcuni descrittori di rugosità [82]. Un algoritmo di clustering “*K-means*” viene applicato per ciascun test per raggruppare e classificare automaticamente i punti della nuvola.

La segnaletica orizzontale svolge un ruolo fondamentale per la sicurezza stradale, la sua visibilità è l'elemento chiave. I dati di intensità che danno informazioni sulla potenza riflessa sono stati utilizzati per estrarre e caratterizzare la segnaletica orizzontale [8,83]. Le principali tecniche di estrazione fanno riferimento a algoritmi di segmentazione basati su tecniche di *Multilevel Thresholding*, trasformazioni di *Hough*, analisi morfologica e *Multi-Scale Tensor Voting*. In più vengono studiati particolari tipologie di filtri per la rimozione del rumore. L'intensità del segnale ricevuto dallo scanner RSSI (*Received Signal Strength Indication*) è influenzata in modo significativo dalla geometria di scansione, in particolar modo dall'angolo di incidenza e dalla distanza dell'oggetto scansionato. Nei sistemi LSM l'intensità del segnale ricevuto è inversamente proporzionale alla distanza di scansione, dato che i bersagli sono molto vicini. L'area di impronta del raggio laser aumenta all'aumentare dell'angolo di incidenza; anche questo influenza non poco l'intensità del segnale ricevuto [84]. Molti altri fattori incidono sul valore dell'intensità, a esempio le proprietà chimico fisiche dei materiali e le condizioni ambientali ma comunque meno della geometria di scansione. Esistono infine diversi studi sulla calibrazione dei valori di intensità per poter estrarre correttamente gli elementi di interesse mediante l'ausilio della potenza riflessa [47,85].

4.2 Sistema Inerziale (MMS)

L'acronimo MMS sta per *Mobile Mapping System*. È una piattaforma mobile sulla quale sono installati sistemi e sensori di misura in grado di acquisire la posizione 3D, in un sistema di coordinate esterne, della piattaforma insieme a dati metrici.

Sebbene esistano in commercio differenti tipi di sistemi, la maggior parte delle piattaforme *Mobile* sono composti da cinque parti essenziali:

- Uno o più laser scanner;
- Un sistema di navigazione GNSS con ricevitori e antenne integrate;
- Una unità di misura inerziale IMU (*Inertial Measurement Unit*);
- Un sistema che permette la misura distanza percorsa dalla piattaforma mobile DMI (*Distance Measurement Indicator*);
- Un sistema di camere fotografiche digitali.

L'unità di controllo ha il compito di sincronizzare tutti i dispositivi presenti. Ogni sensore va rigorosamente calibrato; solitamente la calibrazione e la determinazione degli offset dei differenti dispositivi è realizzata in laboratorio dalle case produttrici dei sistemi.

4.2.1 Sensori Laser Scanner

I sensori laser utilizzati sono di tipo distanziometrico, possono essere montati sia sistemi a tempo di volo sia a misura di fase. Questi tipi di sensori laser scanner possono essere 2D se realizzati per scansionare in modalità profilometrica. Le specifiche tecniche fornite dai produttori non sono direttamente confrontabili, è bene quindi introdurre i parametri che in particolare si differenziano nei diversi sistemi e responsabili dei diversi livelli di precisione e accuratezza (Tabella 4.1). Le caratteristiche fondamentali sono:

- Precisione Angolare
- Accuratezza della misura delle distanze
- Risoluzione
- Portata massima di misura
- Frequenza di acquisizione
- Ampiezza del campo visivo

La precisione angolare è legata ai sistemi meccanici utilizzati per la deviazione del raggio laser (oscillatori o specchi rotanti). Il calcolo delle coordinate polari rispetto al centro strumentale è effettuato mediante la misura dei valori angolari azimutali e zenitali (spesso indicati come direzione orizzontale e elevazione) oltre che la misura della distanza inclinata. Le incertezze nella loro misura comportano errori nella

determinazione delle coordinate. L'accuratezza della misura della distanza è legata principalmente a due fattori, il primo funzione della precisione del dispositivo di misura, l'altro proporzionale alla distanza stessa in modo lineare, con valori che dipendono dalla tipologia di scanner. La risoluzione indica la capacità dello scanner di rilevare oggetti di dimensioni minime, è legata alla densità minima della nuvola di punti prodotta.

Due sono i fattori che influenzano la risoluzione di uno scanner: l'incremento angolare minimo degli organi di direzionamento e la dimensione dello spot laser. Lo *spot size* è la dimensione del raggio laser, la sua dimensione aumenta al crescere della distanza; questo parametro è strettamente connesso alla divergenza del raggio laser (*beam divergence*). Pertanto, più la dimensione dello *spot size* è contenuta e più la misura della posizione del punto considerato sarà precisa; lo strumento sarà in grado di descrivere maggiori dettagli dell'oggetto scansionato. Ogni sensore è caratterizzato da una distanza massima con cui può effettuare la misura. È chiaro che all'aumentare della distanza si ottiene una risoluzione e una accuratezza inferiori. Il valore massimo della portata dipende strettamente dalle caratteristiche del segnale emesso e quindi dal principio di funzionamento dello scanner.

Laser Scanner	Laser type	FOV (°)	Range (m)	Data rate (kHz)	Range precision	Range accuracy
SICK LMS 291	TOF	180(H) x 90(V)	80	40	10 mm @ 20 m	± 35 mm
MDL LMS511	TOF	190	40	36	//	± 10 @ 50 m
RIEGL VQ-450	TOF	360	800	550	5 mm @ 50 m	± 8 mm
Optech Lynx SG1	TOF	360	250	150-1200	5 mm @ 50 m	50 mm
Z +F PROFILE 9012	PS	360	119	1000	1 mm @ 50 m	1 mm
Faro Focus x330	PS	360(H) x 300(V)	330	976	1 mm @ 50 m	± 2 mm
Velodyne HD64	TOF	360(H) x 26,8(V)	120	1333	//	50 mm

Tabella 4.1 - Principali caratteristiche di alcuni sensori laser montati su piattaforme dinamiche.

Gli Scanner a misura di fase generalmente hanno una precisione elevata ma portate molto ridotte (<150m), al contrario gli scanner a tempo di volo sono caratterizzati da portate maggiori (>800m) e da una frequenza di acquisizione inferiore. Le velocità di acquisizione dipendono principalmente dal principio di funzionamento dello scanner e dagli organi meccanici che compongono il sistema. Il campo visivo (FOV, *Field Of View*) rappresenta il campo di acquisizione dello scanner; esistono degli scanner con limitato campo visivo, chiamati *Camera Scanner*, altri hanno un campo visivo quasi sferico e sono denominati *Panorama Scanner*. Quasi nella totalità dei casi i sistemi mobile montano scanner panoramici, in grado di acquisire un campo di 360°. I laser Scanner terrestri statici a “*Long Range*” sono quelli generalmente caratterizzati da sistemi *Camera Scanner*.

4.2.2 Sistema GNSS

Il *Global Navigation Satellite System* (GNSS) è un sistema che fornisce informazioni sulla posizione e sul tempo in un riferimento assoluto. L'informazione del tempo, detta anche *time stamp*, permette di sincronizzare tutte le informazioni provenienti dai differenti sensori così da ottenere un unico modello. A ogni istante temporale è associata una singola linea di scansione, gli spostamenti della piattaforma inerziale e la posizione assoluta rispetto a un riferimento esterno misurata con ricevitori GNSS.

Il GNSS è l'acronimo che definisce e racchiude i differenti sistemi di posizionamento globali basati su costellazioni di satelliti. Le costellazioni che interessano l'Italia e l'Europa sono la costellazione degli Stati Uniti (GPS, *Global Positioning System*) operativa dal 1995, la costellazione di satelliti Russa (GLONASS, *GLObal NAVigation Satellite System*) operativa anch'essa dal 1995 e quella italiana GALILEO, operativa dal 2016. Un sistema GNSS è composto da tre segmenti principali: un segmento spaziale rappresentato dalle costellazioni satellitari, un segmento di controllo costituito dalle stazioni a terra e centrali operative di controllo che tracciano i satelliti e ne determinano le orbite, cioè, la posizione che i satelliti assumono nel tempo e un segmento utenza che comprende i ricevitori GNSS e la strumentazione necessaria in grado di acquisire e elaborare i segnali.

I ricevitori utilizzati per queste applicazioni sono generalmente di tipo geodetico; permettono l'acquisizione di segnali da più costellazioni

differenti su doppia frequenza (L1 e L2). La tecnica di posizionamento adottata nei sistemi mobile è quella differenziale con trasmissione delle correzioni in tempo reale nRTK (*Network Real Time Kinematic*). Con questa tecnica è possibile effettuare la misura con un solo ricevitore, acquisendo la correzione RTK (codice e fase) distribuita da un centro di controllo che effettua il calcolo nRTK utilizzando contemporaneamente i dati di più stazioni permanenti.

4.2.3 Sensori Dinamici IMU e DMI

L'unità di misura inerziale IMU è costituito da un insieme di sensori inerziali, quali accelerometri e giroscopi aventi lo scopo di fornire l'assetto della piattaforma in movimento. Gli accelerometri misurano le componenti dell'accelerazione lungo i tre assi, i giroscopi forniscono informazioni sui relativi angoli di rollio, beccheggio e sbandamento. Le misure sono riportate con una frequenza che va dai 100Hz ai 2000Hz; la variabilità è funzione della velocità della piattaforma. Ogni sensore fornisce una misura con una certa precisione; queste informazioni sono fornite dalle case produttrici dei sensori, ad esempio i sistemi dinamici Riegl sono configurati con apparecchiatura Applanix. I sensori Applanix® POS LV 510 sono in grado di fornire una precisione di $0,005^\circ$ in rollio e beccheggio, e $0,015^\circ$ in sbandamento (1σ).

I sistemi IMU e DMI sono quasi sempre integrati con sistemi di posizionamento GNSS; informazioni sulla posizione unite ai parametri di assetto permettono di determinare la traiettoria completa della piattaforma. Il misuratore di distanza DMI è solidale a una delle ruote del veicolo e misura le rotazioni delle stesse stimando direttamente la distanza percorsa. Il sistema DMI integra i sistemi GNSS e IMU con ulteriori informazioni di posizionamento; ha un ruolo importante specialmente quando il veicolo viaggia in aree a bassa copertura satellitare o quando si hanno intermittenze del segnale GNSS. Inoltre, il DMI serve a ridurre duplicati di scansioni quando il veicolo è in sosta.

Per migliorare l'accuratezza del dato finale sono adottate procedure in post processing per la correzione della traiettoria e dell'orientamento della piattaforma mobile.

4.2.4 Camere Digitali

I punti misurati dagli scanner sono solitamente convertiti nel sistema di coordinate cartesiane X,Y,Z. A queste è aggiunta l'informazione dell'intensità, cioè, la potenza riflessa del laser. Le camere digitali hanno l'obiettivo di acquisire le immagini durante l'avanzamento della piattaforma mobile, in modo che sia possibile associare una terna RGB a ogni punto scansionato. La disposizione delle camere è differente per ogni sistema; si possono avere fotocamere anteriori, posteriori o/e laterali e camere panoramiche a 360°. Molti sistemi acquisiscono anche fotogrammi attraverso un video. Ciascun frame è georeferenziato mediante il sistema GNSS. L'utilizzo delle camere presuppone un processo di calibrazione con il resto del sistema.

5 Il ruolo della tecnica LiDAR nella gestione della Manutenzione Stradale

Il repentino deterioramento delle condizioni della rete infrastrutturale ha reso la conservazione e la gestione delle strade un compito complesso. Il problema è ulteriormente aggravato dalle limitate risorse disponibili per le operazioni di monitoraggio, di manutenzione e di riabilitazione. Nella maggior parte dei casi, a causa di fondi e personale limitato, il processo tradizionale di acquisizione dati è molto lento e costoso.

Il sistema di gestione delle pavimentazioni dovrebbe consentire di assumere tutte quelle decisioni tali da garantire il raggiungimento di adeguate condizioni funzionali in modo da assicurare certi livelli di sicurezza e confort a costi minimi, ottimizzando le risorse disponibili. Questo si realizza mediante l'applicazione di interventi di manutenzione adeguati, concretizzati al momento opportuno. Il processo decisionale necessita la definizione di alcuni aspetti chiave:

- Definizione degli interventi in funzione delle priorità su differenti tratti stradali;
- Valutazione delle risorse disponibili e ripartizione del *budget* di manutenzione;

- Definizione del fabbisogno futuro in termini di *budget*.

Per quanto concerne il primo aspetto è bene evidenziare che nella maggior parte dei casi, le operazioni di pianificazione non hanno l'obiettivo di realizzare un processo ottimale ma tendono a individuare il migliore compromesso tra *budget* disponibile e necessità imminenti.

La conoscenza dello stato superficiale della pavimentazione è essenziale per stimare le cause dei dissesti, per scegliere l'intervento idoneo ma principalmente per identificare tutte quelle tratte che necessitano interventi di urgenza e quindi caratterizzate da un'alta priorità di intervento. L'identificazione di tali tratte è necessaria per redigere il programma di primo intervento. Un degrado di tipo funzionale evidenzia criticità in termini di regolarità e aderenza; questi tipi di irregolarità rendono la marcia scomoda e poco sicura, i danni significativi risiedono maggiormente nel lungo termine.

I casi studio analizzati, insieme a un'analisi della letteratura, hanno permesso di individuare una sintesi dei principali degradi analizzabili con la tecnologia LSM, in funzione dell'accuratezza e la risoluzione del sistema.

In figura 5.1 è riportato un grafico che relaziona la densità (n° punti/dm²) al variare della velocità di acquisizione del LSM, insieme alla minima risoluzione ottenibile. Ogni curva è funzione della distanza d misurata a partire dalla traiettoria del sistema mobile (da 1m a 6m). In funzione della tipologia di degrado che si vuole indagare, a partire dal grafico è possibile stimare la velocità di percorrenza da rispettare e il raggio d'azione massimo che garantisce la risoluzione desiderata. Le soglie scelte per le differenti tipologie di degrado corrispondono a un livello di severità medio. Se si vogliono misurare delle fessure fino a una distanza di 3m dalla traiettoria LSM, bisogna assumere una velocità inferiore o uguale a 15km/h. Per ottenere una risoluzione media di 6mm, la velocità massima consentita sarà di 30km/h ma bisognerà effettuare più passaggi, dato che il raggio d'azione che garantisce la risoluzione desiderata è di circa 1m (la superficie totale sarà larga circa 2m).

Analizzando ancora il grafico in figura 5.1, la velocità massima che consente una risoluzione di 10mm è di 45km/h fino a una distanza massima di 3m. Per coprire distanze maggiori, a parità di risoluzione minima scelta (10mm), bisognerà ridurre la velocità a 35km/h per coprire

una distanza di 4m, a 20km/h per una distanza di 5m e a 15km/h per una distanza di 6m.

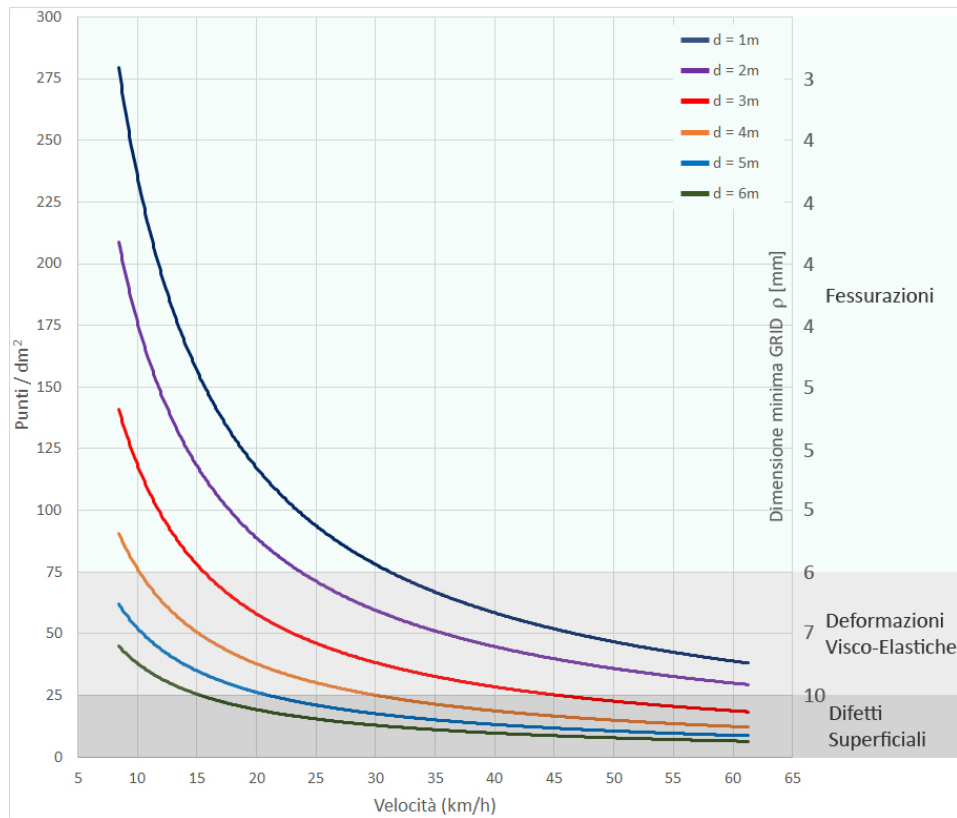


Figura 5.1 – Densità della nuvola di punti LSM (WMX-450) alle diverse velocità di percorrenza e risoluzioni ottenibili.

Per cui, in fase di progetto è indispensabile conoscere la tipologia di tratta da misurare e la risoluzione minima che si vuole garantire. La risoluzione sarà funzione della tipologia di degrado che si vuole indagare, la velocità di percorrenza sarà funzione della tipologia di strada da misurare. Per questo motivo nello sviluppo del lavoro, le analisi riguarderanno gli ammaloramenti le cui caratteristiche geometriche sono compatibili con l'accuratezza e le risoluzioni ottenibili con la tecnologia LiDAR.

L'ottimizzazione della programmazione è finalizzata alla ricerca delle strategie in grado di massimizzare i benefici a parità di *budget* disponibile; la tecnica LiDAR permette una misura celere, a velocità di

esercizio, in sicurezza e economica della pavimentazione e degli elementi al contorno, ideale per redigere un programma straordinario di primo intervento in tempi rapidi e a costi molto contenuti.

Uno studio è stato condotto dal *Washington State Department of Transportation* (WSDOT) sull'efficienza della tecnologia LiDAR applicata alla gestione delle infrastrutture [64]. L'obiettivo della ricerca era valutare la tecnica LSM per migliorare la sicurezza degli operatori, valutare i costi mediante un'analisi costi-benefici e le difficoltà tecniche derivanti dall'utilizzo di questa tecnologia. Oltre a valutare i vantaggi economici, lo studio fornisce un'analisi dell'accuratezza e della ripetibilità dei differenti sistemi che costituiscono il sistema mobile. In sei anni è stato stimato un risparmio di circa 6 milioni di dollari.

Le tecniche utilizzate per acquisire ed elaborare dati per costruire modelli 3D durante le varie fasi del progetto (pianificazione, rilievo, progettazione, costruzione e gestione patrimoniale) si stanno sviluppando rapidamente. Più della metà dei dipartimenti di trasporto statunitensi stanno studiando l'uso di modelli 3D per la caratterizzazione degli elementi costituenti l'infrastruttura, diversi hanno già sviluppato procedure convalidate. La *Federal Highway Administration* (FHWA) sta promuovendo l'uso della modellazione 3D attraverso l'iniziativa *Every Day Counts* (EDC); il progetto nasce per promuovere le innovazioni in grado di migliorare la sicurezza delle strade (degli operatori e degli utenti) e la protezione dell'ambiente

5.1 Analisi dei Costi

Le considerazioni economiche sono determinanti nella scelta delle strategie di intervento più efficaci per attuare una corretta pianificazione della manutenzione. I costi che deve sostenere l'Ente gestore per applicare una prefissata strategia manutentiva sono quelli relativi, in particolar modo, a tutti gli interventi di manutenzione; a questi si sommano quelli da capitalizzare per la conoscenza delle condizioni attuali (monitoraggio e ispezione) e quelli della collettività (costi incidentalità e costi utenza). In questo paragrafo si analizzeranno qualitativamente le entità che caratterizzano le variazioni di costo nell'applicazione di un sistema LSM, dato che un'analisi completa dei costi non è oggetto di questo studio.

Esistono differenti fattori che influenzano i costi di una misura LSM e di tutte le elaborazioni necessarie per ottenere il prodotto finale. Diversi aspetti vanno presi in considerazione; a esempio, una densità maggiore richiesta del dato comporterà una riduzione della velocità del veicolo strumentato, aumentando così i costi del carburante per chilometro e i tempi di misura, producendo un decremento della produttività.

La tabella 5.1 cerca di riassumere l'impatto che ogni unità ha sul costo dell'intera campagna [67]. In fase di acquisizione il traffico e la densità, come già evidenziato, impattano notevolmente sui tempi di misura e quindi sulla produttività per km. È necessaria la presenza di almeno 2 operatori: il guidatore del veicolo, per il quale non è richiesta una specifica competenza, e il tecnico specializzato con il compito di inizializzare il processo e avviare l'acquisizione. Per quest'ultimo è richiesta una specifica formazione che impatta sul costo finale.

La tecnologia MLS sta avanzando con ritmi molto veloci; nell'arco dei prossimi anni si avranno significativi progressi sia per quanto riguarda la parte hardware sia quella software. Per cui, analizzare i costi di eventuali aggiornamenti della strumentazione e dei software risulta molto complicato. Gli scanner disponibili sul mercato hanno diversi livelli di precisione e accuratezza che normalmente caratterizzano il costo del sensore. Un LSM è composto da più componenti che devono essere calibrati e controllati regolarmente. La maggior parte di questi sistemi richiede una cadenza annua di controllo, altri anche meno. Questi processi di calibrazione devono essere presi in considerazione nell'analisi dei costi.

Il post-processamento e l'editing dei dati sono gli step più dispendiosi e richiedono particolari competenze. Il costo dei software e dei tecnici esperti è quello che incide maggiormente. In particolare, i software di elaborazione base non incidono eccessivamente; quelli che incidono maggiormente sui costi delle licenze annue sono i pacchetti software adatti per elaborazioni più avanzate. In particolari casi sarebbe utile l'implementazione di software ad hoc; è chiaro che questo aspetto rientra nei costi di natura straordinaria. La produttività dell'estrazione dei parametri di interesse varia notevolmente a seconda del software utilizzato, del livello di abilità dei tecnici e della complessità del dato stesso.

Categoria	Componenti	Impatto sul Costo Tot./km
Equipaggiamento	Scanner (Accuratezza)	+++
	GNSS	++
	Manutenzione dei sistemi	+
Veicolo	Carburante	+++
	Manutenzione	+
Operatori	Guidatore	+
	Operatore Specializzato	++
Processamento Dati	Software Licensing	++
	Software Dedicati	+++
	Tecnici Specializzati	+++
	Potenza Calcolatore	+++
	Data Storage	++
Acquisizione	Sopralluogo	+
	Operazioni di Calibrazione	+
	Traffico (tempi)	+++
	Densità (tempi)	+++
+++ <i>Alto</i>	++ <i>Medio</i>	+ <i>Basso</i>

Tabella 5.1 – Impatto delle singole voci sul costo totale chilometrico.

5.2 Benefici non quantificabili

Esistono benefici che non sono direttamente quantificabili tramite costi e che potenzialmente potrebbero essere maggiori di quelli direttamente quantificabili.

L'utilizzo del sistema MLS riduce notevolmente l'esposizione degli operatori al traffico, all'inquinamento prodotto dalle automobili e ai rischi ambientali. Solo una piccola aliquota è realmente quantificabile: l'incremento della sicurezza degli operatori (dato che si trovano a bordo del veicolo e non più in strada) si traduce in una riduzione dei costi dovuti alle polizze assicurative che l'Ente gestore deve garantire per ogni operatore presente sul campo.

Altro importante aspetto più volte ribadito è che l'esercizio dell'infrastruttura non è disturbato. Di conseguenza non si realizza un rallentamento del traffico che ha come effetto l'aumento di emissioni di particolato e di anidride carbonica, emissioni dannose sia per gli utenti stessi sia per gli individui presenti nel contesto urbano.

Il sistema LSM può essere utilizzato per misure e documentazione *as-built* nelle diverse fasi di realizzazione. I dati provenienti dal rilievo di condutture, reti di drenaggio, reti fognarie e anche dei vari strati di una pavimentazione possono essere archiviati e utilizzati in futuro. Avere dati accurati e georeferenziati ridurrebbe la necessità in futuro di eventuali ricognizioni radar a terra e quindi costi aggiuntivi da tener in considerazione.

5.3 Priorità di intervento secondo il Comfort e la Sicurezza

Gli indicatori di stato necessari a descrivere le caratteristiche funzionali e strutturali della pavimentazione si basano sull'analisi di dati acquisiti con differenti tecnologie, caratterizzate da diversi livelli di prestazione e costi. Se si considerano gli standard di accuratezza richiesti per la misura degli indicatori [41], le attività di misura e di post-processamento si riducono esclusivamente a poche operazioni costose che necessitano, a loro volta, di strumentazione dedicata, limitando così la scelta solo a particolari tipi di sistemi standardizzati.

Questi indicatori sono utili, in particolar modo, per reti infrastrutturali caratterizzate da alte prestazioni: reti primarie o a alta velocità che spesso richiedono ingenti risorse economiche per le attività di indagine e di post-elaborazione. Di conseguenza, non si adattano all'imminente necessità di definizione delle priorità di scelta degli interventi; molti Enti gestori locali non possono implementare un sistema di gestione della pavimentazione di alto livello, ma hanno solo la necessità di gestire la propria rete stradale in modo da conservare il livello di sicurezza sopra una certa soglia, intervenendo solo in caso di alta priorità.

Molte ricerche si concentrano sulla relazione che intercorre tra incidenti stradali e le condizioni della pavimentazione [3-5], ad oggi, però, è stato fatto poco per inglobare il fattore sicurezza nei sistemi di gestione e di pianificazione. Secondo Tighe et al. [1], quando una pavimentazione viene valutata in termini di sicurezza, i parametri da indagare si basano sui criteri:

1. *Aderenza e tessitura superficiale;*
2. *Regolarità (IRI);*
3. *Dissesti superficiali (buche, dossi, fessurazioni, faulting, ecc.);*

4. *Condizioni ambientali e meteorologiche;*
5. *Geometria stradale;*
6. *Colore e riflettività della superficie;*
7. *Tipo di pavimentazione;*
8. *Segnaletica orizzontale e verticale.*

I primi tre criteri sono riferiti alle condizioni superficiali della pavimentazione, gli altri si basano principalmente sulle caratteristiche geometriche e funzionali della strada. La tabella 5.2 cerca di riassumere la sensibilità e la percezione dell'utente rispetto ai fattori caratteristici di una tratta [1]. Le priorità di indagine e quindi di intervento dovrebbero essere in linea con i livelli di percezione studiati e convalidati dalla letteratura.

Le considerazioni desumibili dalla tabella 5.2 consentono di individuare tutti quei fattori da non considerare durante il processo di pianificazione, nel quale si definiscono le priorità di intervento. Questo è utile quando il livello di qualità di una tratta decade a tal punto da scendere al di sotto della soglia di pericolo, avendo così la necessità di individuare solo le zone che richiedono interventi immediati.

La percezione del disagio e gli effetti sulla sicurezza sono direttamente proporzionali alle severità dei dissesti; la severità, è funzione delle dimensioni caratteristiche dell'ammaloramento [36]. A prescindere dalla tipologia di dissesto, quelli a bassa severità possono essere, quindi, trascurati se si conduce un'analisi in termini di sicurezza: se l'impatto sul comfort di marcia è minimo, di conseguenza sarà minima la percezione dell'utente.

Analizzando la letteratura è possibile classificare i differenti degradi in funzione dell'effetto che hanno sul confort di guida e sulla sicurezza degli utenti stessi (tabella 5.3) [86]. La tabella 5.2 fornisce solo un quadro generale dei fattori critici; a partire da quelli caratterizzati da un'alta percezione da parte dell'utente, è possibile classificare le diverse entità responsabili del decremento della sicurezza, così da scegliere la tecnica di indagine più efficace.

Fattori	Attributi o Indicatori	Percezione del Guida-tore
Tessitura Superficiale	▪ Aderenza	+
Regolarità	▪ IRI, RN	+++
	▪ Sollecitazioni (a_{RMS})	
	▪ Ormaiamenti	
Dissesti Superficiali	▪ Buche, Dossi, Fessurazioni	+++
	▪ Severità dei dissesti	
Condizioni Ambientali	▪ Igrometria	+++
	▪ Condizioni metereologiche	
Geometria	▪ Larghezza corsie	++
	▪ Pendenze	
	▪ Visibilità	
Elementi di arredo	▪ Segnaletica	+++
	▪ Colore della pavimentazione	
	▪ Dispositivi di Sicurezza	
Tipo di pavimentazione	▪ Materiali strato di usura	+
	▪ Tipologia	
Segnaletica	▪ Visibilità (diurna e notturna)	+++
	▪ Presenza	
+++ <i>Alta</i>	++ <i>Media</i>	+ <i>Bassa</i>

Tabella 5.2 – Fattori associati alla sicurezza e percezione da parte dell’utenza.

In tabella 5.3 ogni dissesto è classificato in termini di impatto sul comfort e sulla sicurezza, utilizzando una scala da 0 a 2 (0 rappresenta un basso impatto, 2 rappresenta invece l'impatto massimo). A questi giudizi dedotti dalla letteratura, sono state aggiunte informazioni relative alle risoluzioni caratteristiche dei differenti livelli di severità e la distanza media tra le linee di scansione LSM, stimata a differenti velocità di acquisizione; i valori sono riferiti ad un singolo sensore laser (i sistemi comunemente sono dotati di una coppia di scanner). L'obiettivo generale di questa tabella è fornire un quadro semplice e di ausilio alle attività di gestione stradale mediante una integrazione agli approcci tradizionali. La questione che emerge è che il comfort è scarsamente influenzato dalle fessurazioni, al contrario le deformazioni visco-elastiche e la presenza di altri tipi di difetti superficiali hanno un evidente effetto sulle condizioni di guida degli utenti. Inoltre, osservando le risoluzioni medie, i difetti della pavimentazione che inducono maggiori problematiche sono ben rappresentabili da elaborazioni provenienti da misure LSM.

	DEGRADI	SEVERITA'	RISOLUZIONE MINIMA [mm]	IMPATTO SULLA SICUREZZA	IMPATTO SUL CONFORT	Distanza linee di scansione LSM [mm]			
						Velocità di percorrenza			
						10 km/h	20 km/h	40 km/h	60 km/h
FESSURAZIONI	RAGNATELA	L	< 15	0	0	15	25	55	83
		M	< 25	0	1	15	25	55	83
		H	> 10	1	2	15	25	55	83
	A BLOCCHI	L	< 2	0	0	15	25	55	83
		M	< 10	0	1	15	25	55	83
		H	> 10	1	2	15	25	55	83
	DI GIUNTO	L	< 2	0	0	15	25	55	83
		M	> 10	0	0	15	25	55	83
		H	> 10	1	1	15	25	55	83
	LONGITUDINALI E TRASVERSALI	L	< 2	0	0	15	25	55	83
		M	> 10	0	1	15	25	55	83
		H	> 10	1	2	15	25	55	83
DA SCORRIMENTO	L	< 10	0	0	15	25	55	83	
	M	< 38	0	0	15	25	55	83	
	H	> 38	1	1	15	25	55	83	
DEFORMAZIONI VISCO-PLASTICHE	RISALTI E SACCHE	L	< 13	0	1	15	25	55	83
		M	< 25	0	1	15	25	55	83
		H	> 25	1	2	15	25	55	83
	DEPRESSIONI	L	< 25	0	0	15	25	55	83
		M	< 50	1	0	15	25	55	83
		H	> 50	2	1	15	25	55	83
	BUCHE	L	< 25	1	1	15	25	55	83
		M	< 50	1	1	15	25	55	83
		H	> 50	2	2	15	25	55	83
	ORMAIE	L	< 13	0	1	15	25	55	83
		M	< 25	0	1	15	25	55	83
		H	> 25	1	2	15	25	55	83
	RIGONFIAMENTI	L	< 13	0	0	15	25	55	83
		M	< 25	0	0	15	25	55	83
		H	> 25	1	2	15	25	55	83
	SCALINAMENTO CORSIA/BANCHINA	L	< 50	0	0	15	25	55	83
		M	< 100	1	0	15	25	55	83
		H	> 100	2	1	15	25	55	83
DIFETTI SUPERFICIALI	TOMBINI	L	< 13	1	1	15	25	55	83
		M	< 25	1	1	15	25	55	83
		H	> 25	2	2	15	25	55	83
	DISTACCO STRATO DI USURA	L	< 15	0	0	15	25	55	83
		M	< 30	0	0	15	25	55	83
		H	> 30	1	2	15	25	55	83
	SCAGLIATURA DELLA SUPERFICIE	L		1	0	15	25	55	83
		M		1	0	15	25	55	83
		H	< 15	2	2	15	25	55	83
	RAPPEZZI	L	< 13	0	0	15	25	55	83
		M	< 25	0	0	15	25	55	83
		H	> 25	1	1	15	25	55	83

Tabella 5.3 – Classificazione dei Dissesti in funzione della Sicurezza e del Comfort.

6 Caratterizzazione della Piattaforma Stradale

L'esigenza di istituire una cartografia stradale e di tenerla aggiornata nasce già nel 1929 con l'introduzione del Codice della Circolazione Stradale e dell'Automobile. La normativa è stata redatta principalmente per la difesa e la salvaguardia del patrimonio infrastrutturale.

Il Piano Nazionale della Sicurezza Stradale istituito nel 1999 (Legge 144/1999) nasce con l'obiettivo di ridurre il numero e gli effetti degli incidenti stradali; tra gli strumenti da utilizzare introduceva il monitoraggio puntuale delle infrastrutture e i registri cartografici digitali. L'articolo 13 *“Norme per la costruzione e la gestione delle strade del Nuovo Codice della Strada”* (D.L. n°285 1992) al comma 6 introduce esplicitamente l'obbligo di istituire e tenere aggiornato il catasto strade affermando che: *“Gli enti proprietari delle strade sono obbligati ad istituire e tenere aggiornati la cartografia, il catasto delle strade e le loro pertinenze secondo le modalità stabilite con apposito decreto che il Ministro delle infrastrutture e dei trasporti emana sentiti il Consiglio superiore dei lavori pubblici e il Consiglio nazionale delle ricerche. Nel catasto dovranno essere compresi anche gli impianti e i servizi permanenti connessi alle esigenze della circolazione stradale.”*

L'articolo 226 *“Organizzazione degli archivi e dell'anagrafe nazionale”*, al comma 2 sancisce che *“Nell'archivio nazionale, per ogni strada, devono essere indicati i dati relativi allo stato tecnico e giuridico della strada, al traffico veicolare, agli incidenti e allo stato di percorribilità...”*

Negli allegati al Decreto Ministeriale LLPP del 2001, nel comma 2, sono evidenziati gli elementi fondamentali da riportare, enunciando che: *“Il Catasto deve obbligatoriamente contenere gli elementi relativi alle caratteristiche geometriche delle strade e delle relative pertinenze nonché gli impianti ed i servizi permanenti connessi alle esigenze della circolazione”*.

Da tutto ciò si evince come è sempre esistita l'esigenza di avere un database e un catasto di tutti gli elementi costituenti l'infrastruttura, comprese le caratteristiche superficiali e di regolarità. La quasi totale inadempienza da parte della maggior parte degli enti gestori è dovuta

principalmente al fatto che le linee guida per la redazione di questi database sono troppo rigide e restrittive, oltre all'incapacità di misurare e monitorare grosse reti infrastrutturali con le tecniche tradizionali.

Le tecnologie non distruttive ad alto rendimento superano tali limiti; fra queste la tecnologia Laser Scanner Terrestre Mobile (LSM) è ideale per misurare lunghi tratti infrastrutturali, comprese le relative pertinenze e gli elementi al contorno non rilevabili con metodologie tradizionali. I dati ottenuti da una misura LST devono essere necessariamente sottoposti a processi di filtraggio per poter implementare le successive fasi di estrazione degli elementi e dei parametri geometrici di interesse. Nei paragrafi seguenti verranno evidenziate le problematiche principali e le metodologie proposte per ciò che riguarda la caratterizzazione della sede stradale e l'estrazione di alcuni parametri geometrici fondamentali, come la segnaletica orizzontale e l'andamento plano-altimetrico.

6.1 Estrazione della piattaforma Stradale

La nuvola di punti ottenuta da una misura laser scanner contiene tutti gli elementi presenti sulla scena; gli elementi possono appartenere alla superficie stradale e essere quindi punti a terra (GP, *Ground Points*) oppure non appartenere alla superficie stradale e classificati come punti non a terra (NGP, *No Ground Points*). Molti studi sono stati incentrati sulla classificazione e la suddivisione GP dai punti NGP, una base essenziale per le successive analisi [60].

L'ambiente stradale è molto complesso, in particolar modo in ambito urbano (figura 6.1). L'intera scena può essere suddivisa in tre grosse categorie a prescindere dalla complessità dell'ambiente circostante e dalla tipologia di strada: la superficie stradale pavimentata, gli elementi di arredo stradale (barriere di sicurezza, barriere spartitraffico, isole spartitraffico, illuminazione, opere di sostegno, segnaletica orizzontale, opere d'arte, verde) e tutti gli altri elementi che ne usufruiscono e non appartenenti all'infrastruttura in maniera continuativa (pedoni, auto, fabbricati, barriere/opere provvisorie, ostacoli). La caratterizzazione geometrica della piattaforma stradale presuppone l'estrazione della superficie pavimentata mediante l'applicazione di particolari processi di editing.



Figura 6.1 – Schema degli elementi costituenti l'ambiente stradale.

Le principali problematiche dei processi di editing riguardano la gestione di una grosse mole di dati “*Big Data*” e quindi l’ausilio di calcolatori con grosse capacità di calcolo. Uno dei principali obiettivi è individuare una metodologia in grado di estrarre i parametri di interesse in modo celere e evitare l’ausilio di grosse potenze di calcolo, accessibili solo a poche utenze. La maggior parte degli approcci e delle metodologie proposte sono state sviluppate per particolari condizioni, come a esempio la necessità di avere una differenza di quota notevole in corrispondenza delle zone di frontiera (la presenza di un cordolo o di un marciapiede) per rilevare i bordi della superficie carrabile. Anche la presenza di oggetti provvisori sulla superficie viaria limita molto questi metodi proposti. Poche sono le metodologie proposte laddove i bordi della superficie carrabile sono difficilmente individuabili, in particolare in ambito rurale.

In letteratura sono stati proposti differenti metodi di filtraggio e estrazione della superficie stradale, classificabili in due grosse categorie: processi che si basano sull’estrazione diretta della superficie pavimentata e processi che si basano sull’individuazione dei cigli della carreggiata. Yoon e Crane [87] individuano la superficie pavimentata calcolando le pendenze e le deviazioni standard dei valori di elevazione a partire dai singoli profili estratti. Smadja et al. [88] utilizzano una regressione polinomiale di secondo grado per interpolare i punti di una generica sezione trasversale. L’interpolazione è effettuata mediante l’applicazione dell’algoritmo RANSAC (*RANdom SAMple Consensus*), il quale stima i parametri del modello matematico mediante metodi iterativi. Pu et al. [61] estraggono i cigli della carreggiata a partire dalle linee di scansione estrapolate mediante l’analisi del tempo GPS; a ogni punto della nuvola di punti oltre al valore dell’intensità è associato anche il valore del tempo GPS, in questo modo è possibile avere informazioni sull’istante temporale di acquisizione di ogni singolo punto così da estrarli secondo

una sequenza temporale. Successivamente i cigli della carreggiata sono estratti utilizzando una finestra mobile di ricerca rettangolare; al suo interno sono definiti alcuni parametri utilizzati per la classificazione del bordo strada, in particolare la differenza di quota, la densità e la pendenza. Ibrahim et al. [89] suddividono i GP dai NGP mediante l'analisi della densità spaziale e le derivate della funzione Gaussiana. Kumar et al. [90] presentano un metodo che si basa sulla generazione di un raster 2D combinando i valori di elevazione, riflettanza e ampiezza dell'onda riflessa. Yadav et al. [91] propongono un metodo suddiviso in tre fasi: nella prima fase sono rimossi gli elementi e gli oggetti che si trovano sulla superficie stradale, suddividendo così i GP dai NGP; nella seconda fase è analizzata la topologia e la densità spaziale, insieme ai valori di intensità per estrarre la superficie pavimentata; infine nell'ultima fase sono analizzati e perfezionati i contorni della superficie individuata così da ottenere delle polilinee dei contorni della pavimentazione.

6.1.1 Il metodo RANSAC e MSAC (*M-estimator SAmple Consensus*)

Il RANSAC (*RANdom SAmple Consensus*) è un metodo iterativo e permette la stima dei parametri di un modello matematico parametrico a partire da una serie di dati osservati contenenti *outliers*. L'obiettivo principale del metodo è quello di suddividere l'intero campione di osservazioni in *inliers* e *outliers*. Per stimare i parametri r di un modello matematico $y = f(x;r)$ a partire da un set di dati S , nei quali sono contenuti *outliers*, l'algoritmo segue l'iter:

- Stima i parametri r del modello tramite un sottoinsieme causale n di S , $n \subseteq S$ (*randomly sampled subset*);
- Determina il set di punti *inliers* ipotetici ($S_{TST} \subseteq S$) aventi una certa distanza dp dal modello;
- Se il set S_{TST} è il sottoinsieme più grande, questo diventa il sottoinsieme di *inliers* $S_{IN} = S_{TST}$; di conseguenza i parametri ricercati $r = r_{TST}$ sono quelli determinati con il set S_{TST} ;
- Se $|S_{IN}| < T$ vanno ripetuti i tre step precedenti; T è il valore di soglia impostato, indica il numero di *inliers*;
- Il modello viene convalidato attraverso la stima dell'errore che si commette associando al modello matematico gli *inliers* ipotetici;

- Il ciclo termina dopo N iterazioni.

Si assume un rumore nei dati di tipo Gaussiano; il valore di soglia dovrebbe trovarsi nella regione di 2σ ; σ è il rumore atteso nel set di dati. Questa procedura viene ripetuta un numero fissato di volte N ; a ogni iterazione è prodotto un modello che viene scartato se contiene un basso numero di punti classificati come *inliers*. Generalmente il sottoinsieme causale n , che rappresenta il numero di campioni causali scelti, è il minimo numero di punti richiesti per stimare il modello matematico. Il numero massimo di iterazioni N è scelto in funzione della n -pla senza *outliers*. Se indichiamo con p ($p=0,99$) la probabilità desiderata di avere almeno una n -pla priva di valori anomali (*outliers*) e con w , invece, la probabilità di un punto causale di essere un *inlier*, il numero N di iterazioni è dato da:

$$N = \frac{\log(1-p)}{\log(1-w^n)}$$

Il numero di valori anomali non è noto a priori, di conseguenza non è nota la probabilità w e il numero N massimo di iterazioni. È perciò necessario utilizzare un modello di RANSAC che adatta il valore N durante il processo iterativo, noto anche come *Adaptive RANSAC*. La prima domanda che sorge spontanea è: *Quanti campioni dovrebbero essere utilizzati?* Idealmente ogni possibile sottocampione di dati dovrebbe essere considerato, questo però da un punto di vista computazionale non è attuabile. Di conseguenza la vera domanda che diventa importante è: *Quanti sottocampioni del set di dati (S) sono necessari per avere una significatività statistica?* Il numero n di campioni può essere scelto sufficientemente alto in modo da avere una probabilità Υ superiore al 95%.

$$\Upsilon = 1 - (1 - (1 - \varepsilon)^k)^n$$

dove ε è la frazione di dati contenenti *outliers* e k è il numero di parametri in ciascun campione.

M-estimator Sample Consensus (*MSAC*) è stato introdotto da Torr e Zisserman (2000) [92]; il metodo consiste in una stima robusta dove la soluzione scelta massimizza la probabilità piuttosto che il numero di *inliers*. Una delle problematiche principali del RANSAC è che la soglia T per considerare i punti appartenenti agli *inliers* è troppo alta, di conseguenza la stima può introdurre errori non trascurabili [93]. Con

MSAC gli *inliers* sono valutati sulla misura in cui si adattano ai dati. Impostando la soglia $T = 1.96\sigma$ verranno mantenuti solo il 96% dei dati presenti nel sottinsieme; gli outlier forniscono invece una penalità fissa.

6.1.2 Estrazione Semi-Automatica

Le metodologia proposta si basa sull'algorithm MSAC applicato sui dati provenienti da misure LSM. Tutto l'iter è stato implementato in ambiente *Matlab* e si divide nei seguenti punti:

1. Estrazione della Traiettorie LSM

A ogni punto della nuvola, acquisita con un sistema a scansione mobile, sono associati alcuni parametri caratteristici della geometria di scansione e del sistema di posizionamento. In particolare, attraverso l'analisi del vettore contenente i valori dell'angolo di scansione ($AS \in \mathbb{R}^{s,1}$, s è il numero totale di punti dell'intera nuvola), è possibile estrarre la matrice $P \in \mathbb{R}^{m,3}$ contenente i soli m punti appartenenti alla traiettoria della proiezione a terra del centro strumentale. Generalmente questi punti sono caratterizzati da un angolo di scansione nullo, valore che però può dipendere anche dalle operazioni di calibrazione. Lo step successivo consiste nel riordinare le righe della matrice P secondo il tempo GPS (tGPS). La striscia di punti ottenuta, contenuta nella matrice $P_{tGPS} \in \mathbb{R}^{m,3}$, è semplificata in una serie di punti che rappresenteranno i vertici della polilinea della traiettoria. Gli n vertici $V \in \mathbb{R}^{n,3}$ sono così ottenuti (figura 6.2):

- Le coordinate del primo vertice della polilinea sono gli elementi della prima riga dalla matrice $P_{tGPS} \in \mathbb{R}^{n,3}$;
- A partire dal primo vertice è costruita una circonferenza di raggio assegnato (Raggio $\sim L_{box}$);
- Il secondo vertice sarà il punto più lontano contenuto all'interno della circonferenza e con il tGPS maggiore;
- Il vertice appena individuato sarà il nuovo centro della circonferenza C ;
- Il ciclo termina quando la distanza maggiore calcolata nel cerchio è inferiore a un valore assegnato (ad es. 1m).

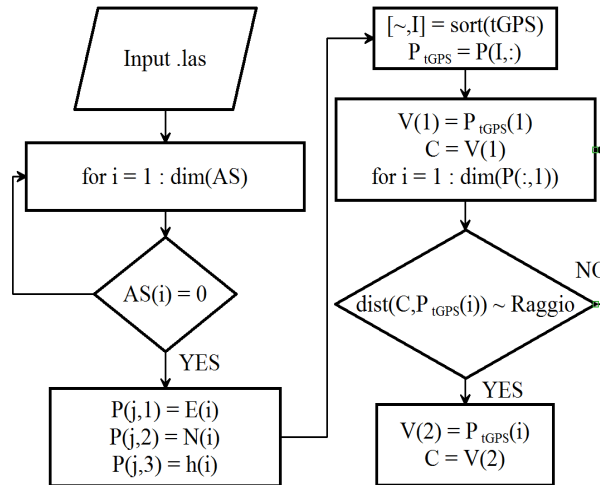


Figura 6.2 – Diagramma di flusso sintetico per l'estrazione della polilinea della traiettoria.

2. Taglio della Nuvola di Punti in Sub-Nuvole

Al fine di ottimizzare i processi computazionali, dall'intera nuvola di punti sono estratte delle sotto-nuvole (*Sub-Clouds*) tramite la costruzione di box trapezoidali. I box sono costruiti a partire dai vertici della polilinea individuata, mediante la realizzazione di un offset della stessa. La lunghezza dei box L_{box} è dettata dalle dimensioni dei segmenti della polilinea, la larghezza è funzione delle caratteristiche della sezione della piattaforma stradale. Può essere scelta una larghezza tale da avere un ampio margine di sicurezza (a esempio 10m). Nota la polilinea che descrive la traiettoria, composta dalla matrice $V \in \mathbb{R}^{n,3}$ contenente n vertici v ($v = 1, \dots, n$), si determinano i punti di offset nel seguente modo:

- È costruita la matrice riga $M \in \mathbb{R}^{1,n}$ contenente le coordinate planimetriche E_v, N_v (rispettivamente Est e Nord) di ogni singolo vertice v :

$$M = E_v + im \cdot N_v$$

Dove im è l'unità immaginaria espressa come:

$$im = 0,0000 + 1,0000 \cdot i$$

- Successivamente si determina la matrice riga $\Delta M \in \mathbb{R}^{1,n-1}$ contenente le differenze:

$$\Delta M = [(E_v + im \cdot N_v) - (E_{v-1} + im \cdot N_{v-1})]$$

- A partire da $\Delta M \in \mathbb{R}^{1,n-1}$ si costruisce la matrice riga $\Delta M'' \in \mathbb{R}^{1,n}$:

$$\Delta M'' = \left[\Delta M_1, \frac{(\Delta M_{1:n-1} + \Delta M_{2:n})}{2}, \Delta M_{n-1} \right]$$

- Per ogni coppia di coordinate planimetriche E_v, N_v del generico vertice v si ottengono le due coppie di coordinate di offset $E_o \in \mathbb{R}^{1,2}$, $N_o \in \mathbb{R}^{1,2}$ sottraendo e sommando lo scalare della parte reale o immaginaria della rispettiva riga della matrice $O \in \mathbb{R}^{1,n}$:

$$E_o = [E_v - \Re(O_v), E_v + \Re(O_v)]$$

$$N_o = [N_v - \Im(O_v), N_v + \Im(O_v)]$$

- La matrice riga $O \in \mathbb{R}^{1,n}$ è ottenuta dalla seguente relazione:

$$O = \frac{d \cdot \Delta M'' \cdot e^{-im \frac{\pi}{2}}}{|\Delta M''|}$$

d rappresenta il valore di offset impostato.

Le coordinate degli offset costituiscono i vertici dei quadrilateri (*box*) utilizzati per estrarre le porzioni di nuvole di punti (figura 6.3).

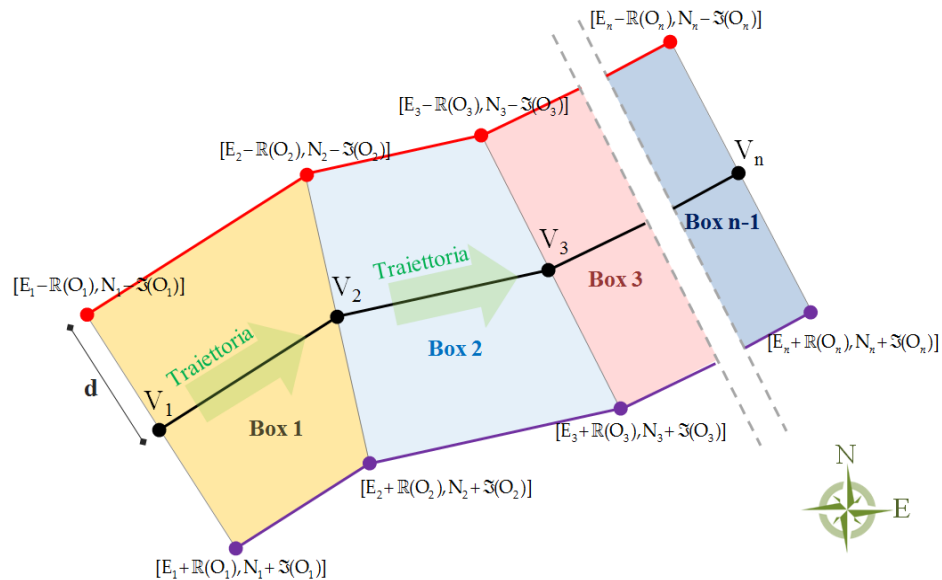


Figura 6.3 – Schema Creazione dei Box.

3. Creazione della Griglia di riferimento

Il passo successivo consiste nel creare una griglia 3D di nodi su ogni box estratto; ogni nodo sarà il centro di una sfera mobile di selezione necessaria per i successivi processi di editing. Dato il j -esimo box $_j$ (con $j=1, \dots, n-1$), noti i vertici $V \in \mathbb{R}^{n,3}$ della polilinea, la griglia a maglie quadre sarà costruita rispetto a un sistema di riferimento locale (\bar{x}, \bar{y}) avente centro nel punto di coordinate $[E_v + \mathbb{R}(O_v), E_v + \mathfrak{I}(O_v)]$ e asse \bar{y} passante per il vertice di coordinate $[E_v - \mathbb{R}(O_v), E_v - \mathfrak{I}(O_v)]$, con $v=1, \dots, n$ (figura 6.4). L'interasse della griglia ig sarà funzione delle caratteristiche della superficie stradale.

La generazione del grigliato 3D si basa sulla determinazione di tanti "bounding box", cubi di selezione con le dimensioni dei lati pari all'interasse del grigliato scelto (ig). Ad ogni vertice del cubo sarà associato un valore di elevazione ottenuto come media dei valori di elevazione dei punti più vicini al vertice stesso.

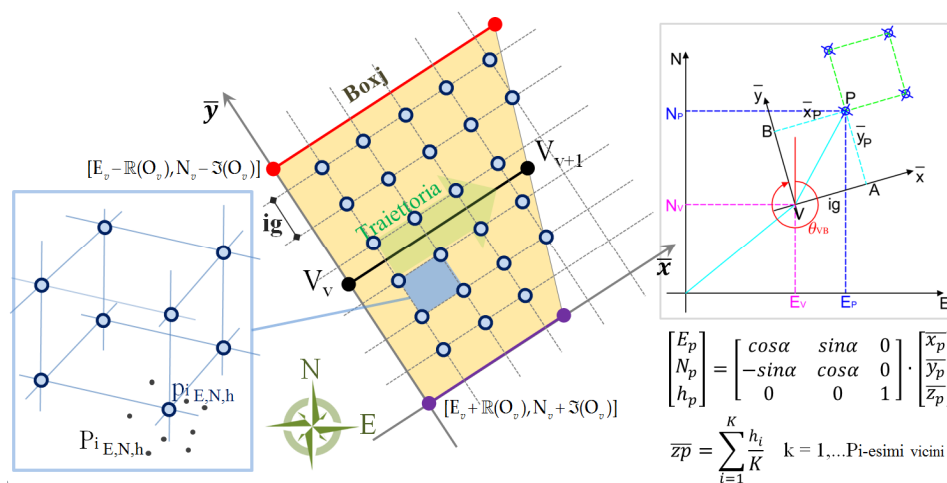


Figura 6.4 – Schema generazione Griglia di Nodi, vista planimetrica e stralcio di un “Bounding Box”.

Non tutti i punti della griglia verranno utilizzati per l'applicazione del metodo MSAC. Per ogni gruppo di nodi (costituito da almeno tre nodi) è stimato un piano con il metodo dei minimi quadrati e il valore della normale al piano. Verranno scartati tutti quei gruppi di nodi la cui configurazione determina un valore della componente uscente dal piano

inferiore all'unità, con un margine di errore pari a $5 \cdot 10^{-3}$. Così facendo si eliminano tutti quei nodi situati al di fuori della superficie pavimentata.

4. Editing della Nuvola di Punti

In corrispondenza di ogni nodo rimasto è costruita una sfera con un raggio pari a tre volte il passo del grigliato scelto; in questo modo si ha una buona sovrapposizione tra le differenti sfere. Nota la matrice $G \in \mathbb{R}^{u,3}$ contenente le coordinate 3D degli u punti dei nodi non scartati, l' i -esima sfera (con $i=1, \dots, u$) è costruita con la funzione *findNeighborsInRadius*, la quale restituisce gli indici dei soli R punti contenuti all'interno della sfera di raggio rs ($Roi \in \mathbb{R}^{R,3}$), con centro nel nodo $G(i,:)$. Gli R punti individuati sono interpolati con l'ausilio della funzione *pcfitplane*, la quale utilizza l'algoritmo MSAC per stimare i parametri del piano. I parametri da impostare sono:

- La distanza massima dp tra il modello planare e il generico punto r (con $r = 1, \dots, R$) affinché possa essere considerato un *inlier*;
- La direzione del vettore normale al piano $\mathcal{Y} = [0,0,1]$;
- La soglia massima dello scostamento angolare \mathcal{G} tra la normale al piano e la verticale.

Sulla base di questi vincoli impostati, l'algoritmo individua due gruppi di punti, un gruppo appartenente agli *inliers* $In \subseteq S_{IN}$ e un altro gruppo appartenente agli *outliers* $Ol \notin S_{IN}$.

Per superfici molto sconnesse è bene impostare una distanza dp congruente con l'andamento della superficie stradale. Questo aspetto comporta la non perfetta rimozione dei punti in prossimità di cordoli o di oggetti poggiati sulla sede stradale e zone d'ombra. L'effetto che si ottiene è mostrato in figura 6.5.

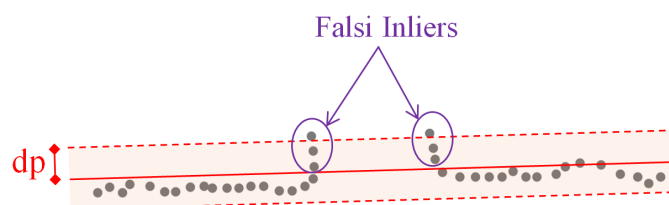


Figura 6.5 – Falsi Inliers.

Per risolvere questo problema si è implementando un algoritmo che serve a individuare i fori e/o i bordi della nuvola di punti, ne traccia i contorni tramite una polilinea e ripete l'intero ciclo di editing con centro sfera sui vertici della polilinea di contorno; questa volta la distanza utilizzata è pari a $0,25 \cdot dp$. L'algoritmo si sviluppa secondo i punti (figura 6.7):

- Viene generata una mesh 2D (*alphaShape*) nel piano E,N con gli *inliers* stimati S_{IN} ;
- A partire dalla mesh, la funzione *nearestNeighbor* permette l'individuazione dei punti di bordo e , $E \in \mathbb{R}^{e,3}$;
- Si crea una polilinea semplificata dei punti di bordo con la stessa metodologia applicata per l'estrazione della traiettoria (punto 1 §6.1.2); la lunghezza dei segmenti sarà proporzionale a *ig*. Così facendo si ottiene una matrice $PE \in \mathbb{R}^{f,3}$, contenente le coordinate degli f vertici.
- Si ripete il ciclo applicato per i nodi della griglia su ogni vertice f della polilinea $PE \in \mathbb{R}^{f,3}$ con $dp = 0,25 \cdot dp$.

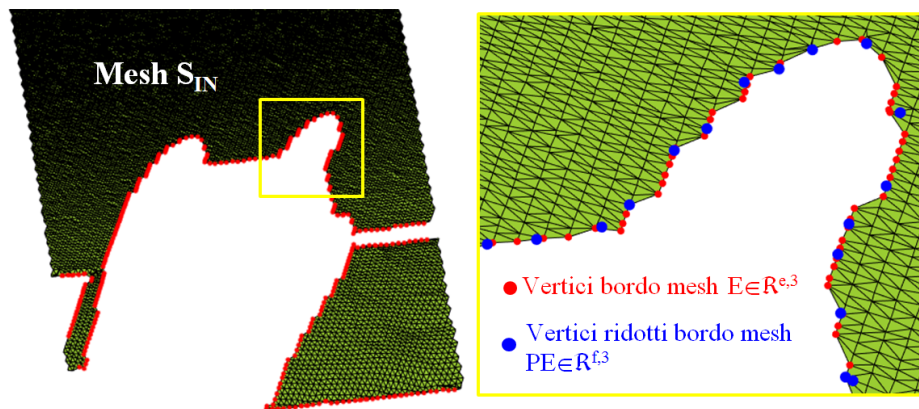


Figura 6.6 – Mesh 2D e individuazione dei vertici di bordo.

La figura 6.6 mostra uno stralcio di una mesh generata con gli *inliers* S_{IN} stimati, i contorni individuati delimitano la zona d'ombra creatasi per la presenza di un veicolo fermo a bordo strada.

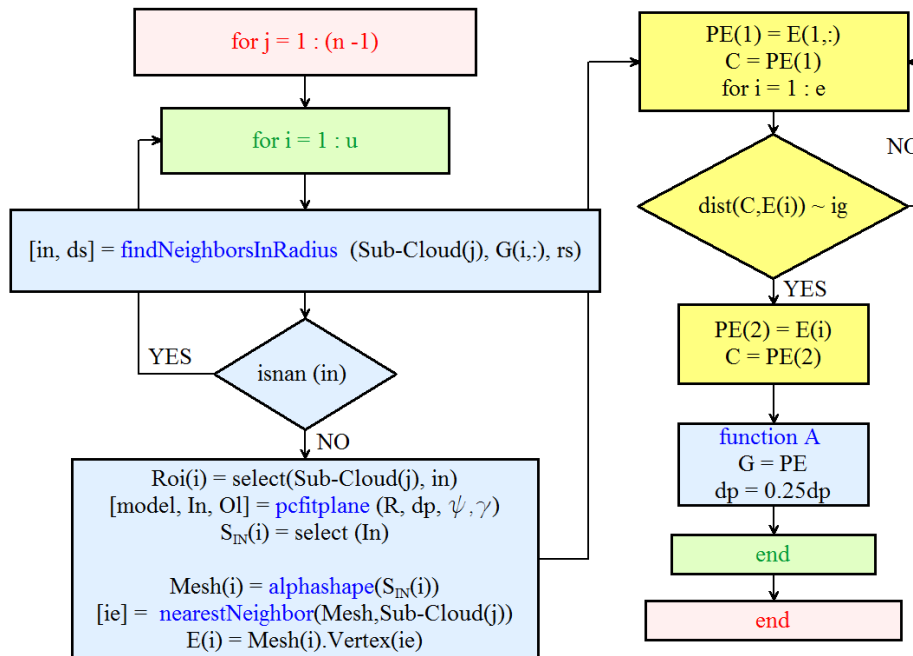


Figura 6.7 – Diagramma di flusso sintetico del processo di Editing.

6.1.3 Applicazione in ambito Urbano ed Extraurbano

Sono state esaminate due aree test in due differenti ambiti, urbano e extraurbano, per convalidare la metodologia proposta. L'ambito urbano è caratterizzato da molti più elementi eterogenei, la presenza di cordoli e marciapiedi può facilitare il processo di individuazione delle zone di frontiera, ma pedoni, traffico veicolare più lento, barriere provvisorie e differenti configurazioni geometriche lo complicano notevolmente. In ambito extraurbano lo sviluppo della piattaforma è molto più regolare ma l'individuazione dei bordi della pavimentazione può risultare più complesso quando non sono presenti cordoli o altri elementi che individuino univocamente il ciglio stradale

a) Ambito Urbano, Area Test 1.

L'area test è situata nel comune di Roma e consiste in un tronco stradale che si estende per 100m circa (figura 6.8a). La tratta è composta da un'unica carreggiata larga circa 11m a doppia corsia; ogni corsia è larga circa 3,50m, lo spazio restante ai lati è dedicato al parcheggio (4m) (figura 6.8c). Da un lato è presente un marciapiede, dall'altro è presente

un muro con alcuni accessi (figura 6.8b,c). Ai piedi del muro la pavimentazione è molto irregolare, la presenza di radici, manufatti provvisori, pozzetti di ispezione, pedoni e auto in sosta rende la scena molto complessa e articolata, ideale per scopi di validazione.

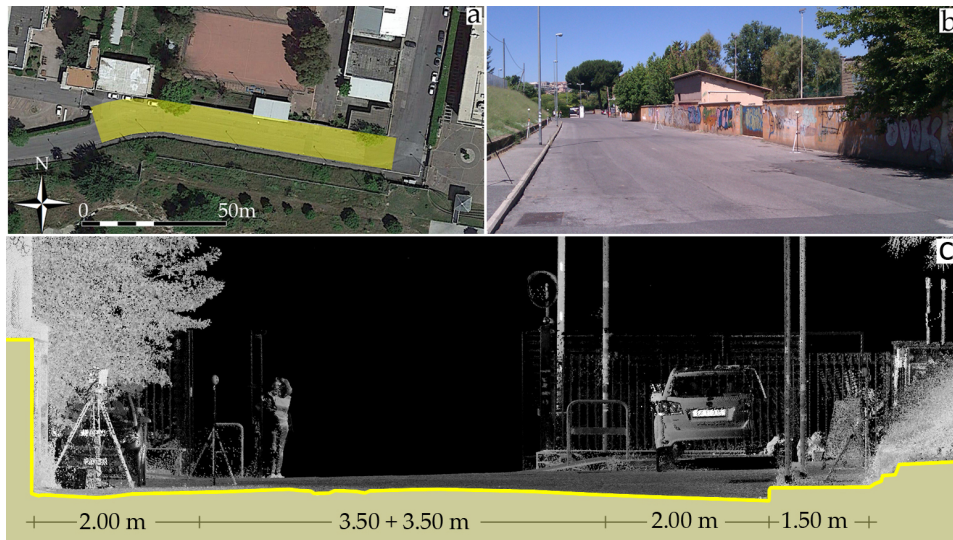


Figura 6.8 – a) Immagine satellitare con l’Area Test evidenziata, b) Foto della strada, c) Sezione Ovest-Est.

La misura è stata effettuata con un LSM *Riegl VMX-450* montato sul tetto di un’autovettura. Il sistema LSM è dotato di sensori di misura inerziale e GNSS, alloggiati sotto una calotta di protezione aerodinamica, per poter effettuare scansioni in movimento e georeferenziarle rispetto un sistema di riferimento esterno (*ETRF00*). Il sistema è costituito da due scanner laser *Riegl vQ-450* inclinati di 35° , ognuno con un campo visivo di 360° (tipo di configurazione chiamata “*Butterfly*”).

La misura è stata effettuata a differenti velocità medie di percorrenza e a parità di frequenza di acquisizione (550kHz); per ogni misura è stata impostata una differente velocità di percorrenza per valutare le principali differenze nei dati ottenuti nelle diverse configurazioni. Nella tabella 6.1 sono riportate le combinazioni effettuate.

Per tutte le combinazioni è stata calcolata la densità di punti per dm^2 per distanze da 1m a 6m dalla traiettoria, a intervalli di 1m (figura 6.9a,b,c). Inoltre, per le stesse combinazioni, sono state calcolate le distanze tra le linee di scansione (figura 6.9d).

		Velocità Impostata (km/h)		
		10	20	60
Velocità LSM (km/h)	10	A ₁₀	B ₁₀	C ₁₀
	20	A ₂₀	B ₂₀	C ₂₀
	40	A ₄₀	B ₄₀	C ₄₀
	60	A ₆₀	B ₆₀	C ₆₀

Tabella 6.1 – Matrice delle Combinazioni.

Dai grafici ottenuti (figura 6.9) è possibile notare come la sola velocità di percorrenza sia l'unico parametro che influenza la densità del dato. La velocità impostata V_i nel sistema influenza solo la velocità delle teste rotanti del laser, in particolare, per le combinazioni (A₂₀, A₄₀, A₆₀), (B₂₀, B₄₀, B₆₀) e (C₂₀, C₄₀, C₆₀) le distanze tra le linee di scansione non variano.

Per la validazione è stato utilizzata la nuvola di punti proveniente dalla combinazione A₁₀, che rappresenta la configurazione più sfavorevole data l'elevata densità superficiale. Teoricamente la percentuale di rumore presente in un dato è direttamente proporzionale alla densità del dato stesso, oltre al fatto che una nuvola di punti più densa è anche più risolta, composta quindi da maggiori dettagli che possono compromettere i processi e gli oneri computazionali.

La nuvola di punti selezionata ha una densità massima di circa 32544 punti/m², le linee di scansione sono distanti mediamente 1,2cm. La figura 6.10 mostra la mappa classificata della densità per m² della nuvola di punti.

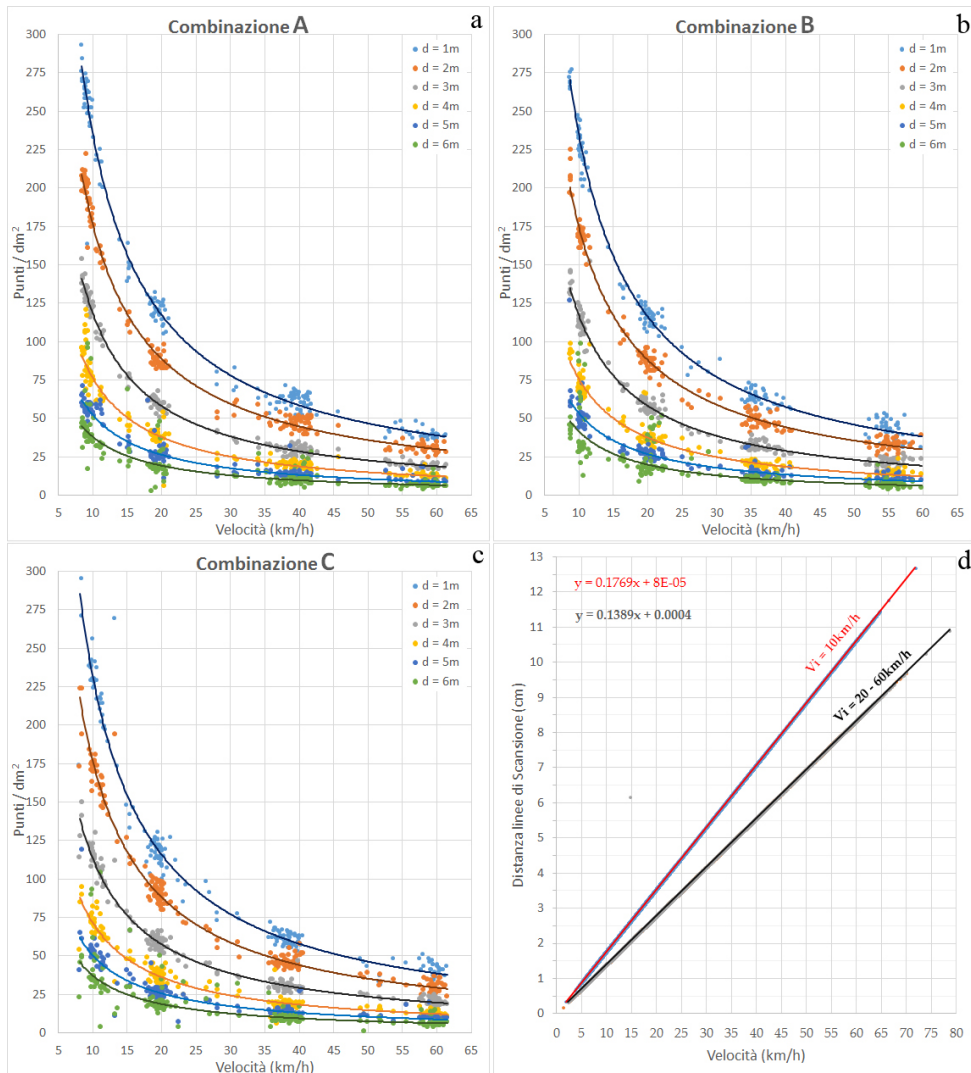


Figura 6.9 – a, b, c) Densità superficiale (Punti/dm²) per le differenti combinazioni e al variare della distanza dalla traiettoria; d) Distanza tra le linee di scansione per le diverse combinazioni.

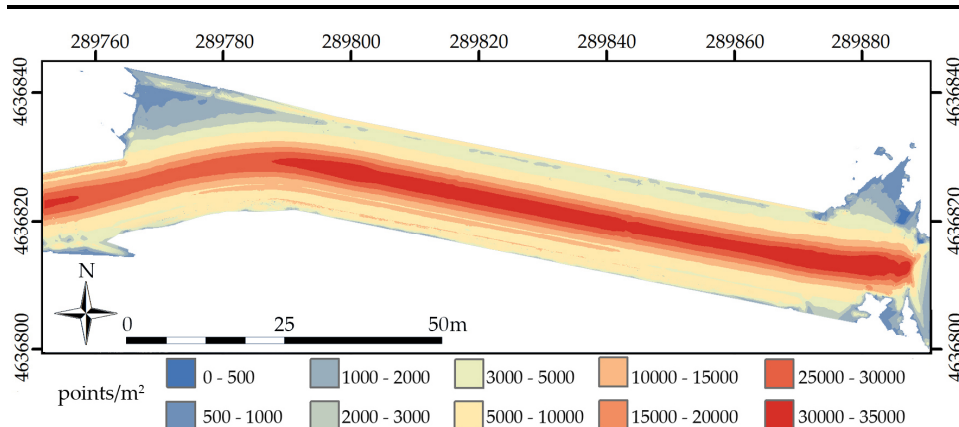


Figura 6.10 – Densità superficiale (punti/m²) della combinazione A₁₀.

Nella prima fase l'algoritmo (punto 2, §6.1.2) permette di scegliere il singolo box, o una serie di box, su cui effettuare il processo di estrazione (figura 6.11). Per la scelta dei parametri da utilizzare sono stati condotti differenti test su un box avente le condizioni più sfavorevoli. I parametri fondamentali da impostare sono (punto 4, §6.1.2):

- L'interasse della griglia ig ;
- La soglia massima dello scostamento angolare \mathcal{G} ;
- La massima distanza dp ;
- Il raggio della sfera di ricerca rs ; quest'ultimo è stato assunto funzione di ig , $rs = 3 \cdot ig$.

Sono stati effettuati due test; per ogni test sono stati determinati il numero di punti totale della *Sub-Cloud* estratta e il tempo di calcolo impiegato:

- I. Il primo test è stato fatto fissando lo scostamento angolare \mathcal{G} a 5° e variando l'interasse della griglia ig da 10cm a 35cm a intervalli di 5cm.
- II. Il secondo test è stato fatto in maniera analoga al primo ma fissando lo scostamento angolare \mathcal{G} a 10° .

Per entrambi i test la massima distanza dp è stata fissata a 2,5cm, il raggio di ricerca è stato assunto proporzionale a ig ($rs = 3 \cdot ig$). L_{box} è stato impostato pari a 5m, l'offset d è stato impostato pari a 10m.

La figura 6.12 mostra il grafico che riassume i risultati dei test effettuati; il numero di punti al variare dell'interasse ig segue un andamento parabolico (concavità verso l'alto) con il punto di massimo compreso tra $ig = 20\text{cm}$ e 25cm per entrambi gli angoli ϑ impostati. Assumendo un angolo ϑ maggiore il numero di punti aumenta; questo è evidente dato che aumentando lo scostamento angolare si diminuisce il vincolo di adattamento del modello, il quale tenderà a inclinarsi maggiormente e a inglobare più punti. All'aumentare di ig aumenta anche il numero di punti utilizzato per la stima del piano ($rs=3 \cdot ig$), di conseguenza il modello inizierà a risentire delle condizioni superficiali e al contorno, ragion per cui verranno scartati più punti a parità della distanza pd .

Il tempo di elaborazione decresce all'aumentare del passo ig , dato che all'aumentare dell'interasse della griglia diminuiscono i cicli di editing per ogni nodo. Il tempo è strettamente connesso alla potenza del calcolatore; il suo andamento era approssimativamente noto ma è stato comunque determinato per verifica.

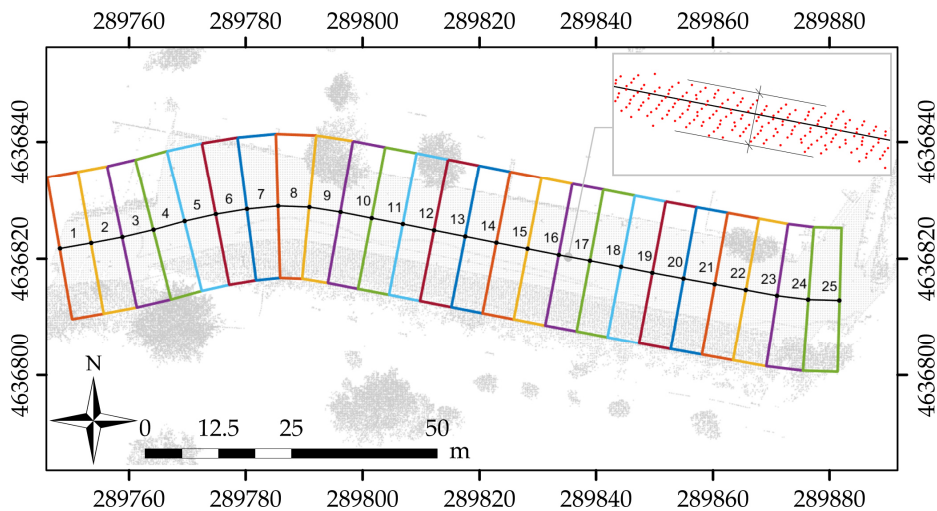


Figura 6.11 – Scelta dei box.

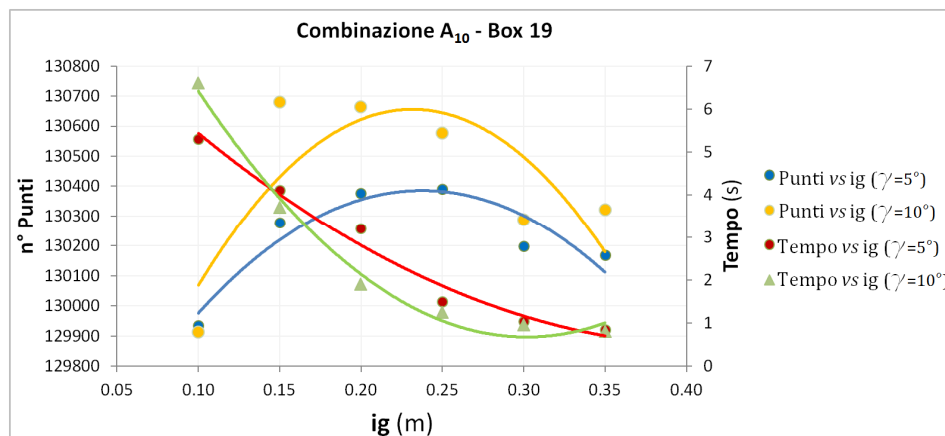


Figura 6.12 – Andamento del numero di punti della Sub-Cloud 19 al variare dei parametri impostati.

Sulla base dei test effettuati, i parametri scelti sono:

- $ig = 20\text{cm}$;
- $g = 10^\circ$;
- $dp = 2,5\text{cm}$.

Il processo è stato effettuato per l'intera Area Test, in particolare dal box 5 al 24.

Nella figura 6.13 è riportata un'immagine che mostra la nuvola di punti prima e dopo il processo di estrazione. Dalle immagini prospettiche (pannelli c, d, e) è possibile notare come tutti gli elementi non costituenti la carreggiata siano stati esclusi. Il pannello (d) evidenzia un target su bipede escluso; in particolare è stato eliminato tutto il rumore proveniente da un effetto di eccessiva saturazione prodotta dal materiale rifrangente posto ai piedi del bipede.

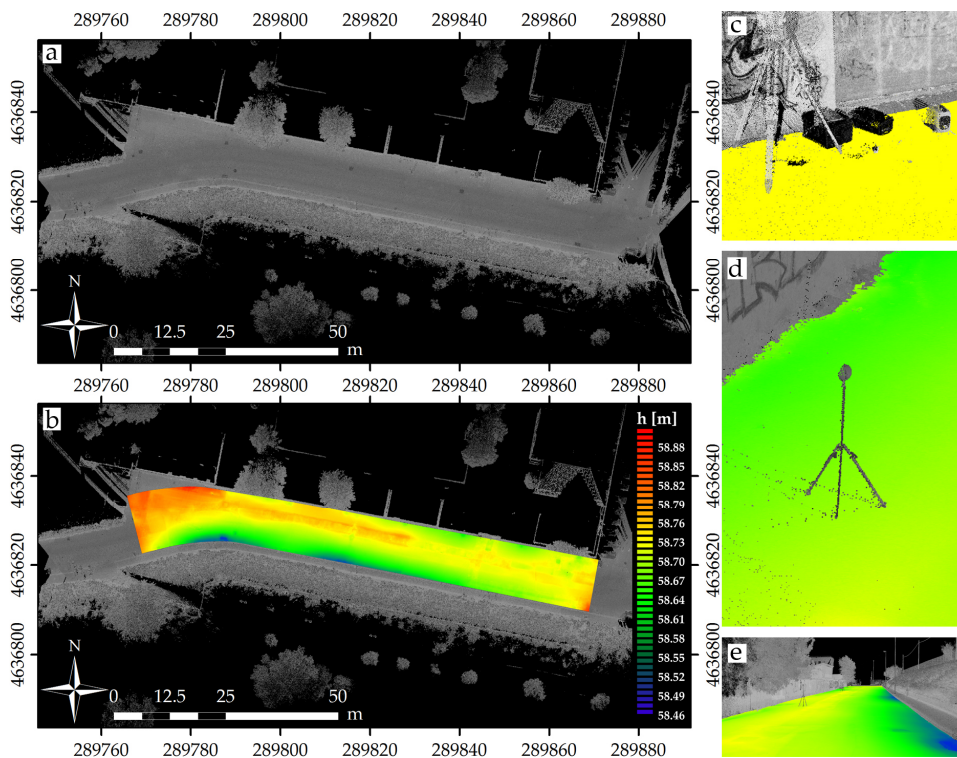


Figura 6.13 – a) Nuvola di punti in input colorata secondo l'Intensità; b) Carreggiata estratta e sovrapposta alla nuvola di punti in input, i colori sono proporzionali ai valori di elevazione; c, d, e) Alcuni zoom prospettici del pannello (b).

b. Ambito Extraurbano, Area Test 2.

L'area test in oggetto è situata anch'essa nel comune di Roma; comprende una tratta extraurbana che collega la città di Roma al nucleo centrale di Ostia. La tratta misurata si estende per circa 6km e la larghezza della carreggiata è variabile lungo il percorso. La misura è stata effettuata con lo stesso LSM dell'area test 1, a una velocità di percorrenza di circa 60km/h. La densità massima è di circa 5000punti/m², con linee di scansione distanti mediamente 7,5cm.

Le condizioni al contorno e la configurazione della carreggiata sono variabili lungo l'intera tratta; la maggior parte dei margini della carreggiata è composta da vegetazione non molto pronunciata, questo può

compromettere il processo di editing e produrre falsi *inliers*. Sono stati impostati i seguenti parametri:

- Interasse $ig = 50\text{cm}$;
- Soglia massima dello scostamento angolare $\vartheta = 10^\circ$;
- Massima distanza $dp = 2,5\text{cm}$

Uno sviluppo molto regolare della superficie permette l'utilizzo di un interasse ig abbastanza grande. Nelle figure 6.14 e 6.15 sono riportate le immagini di alcune tratte elaborate con il processo di estrazione.

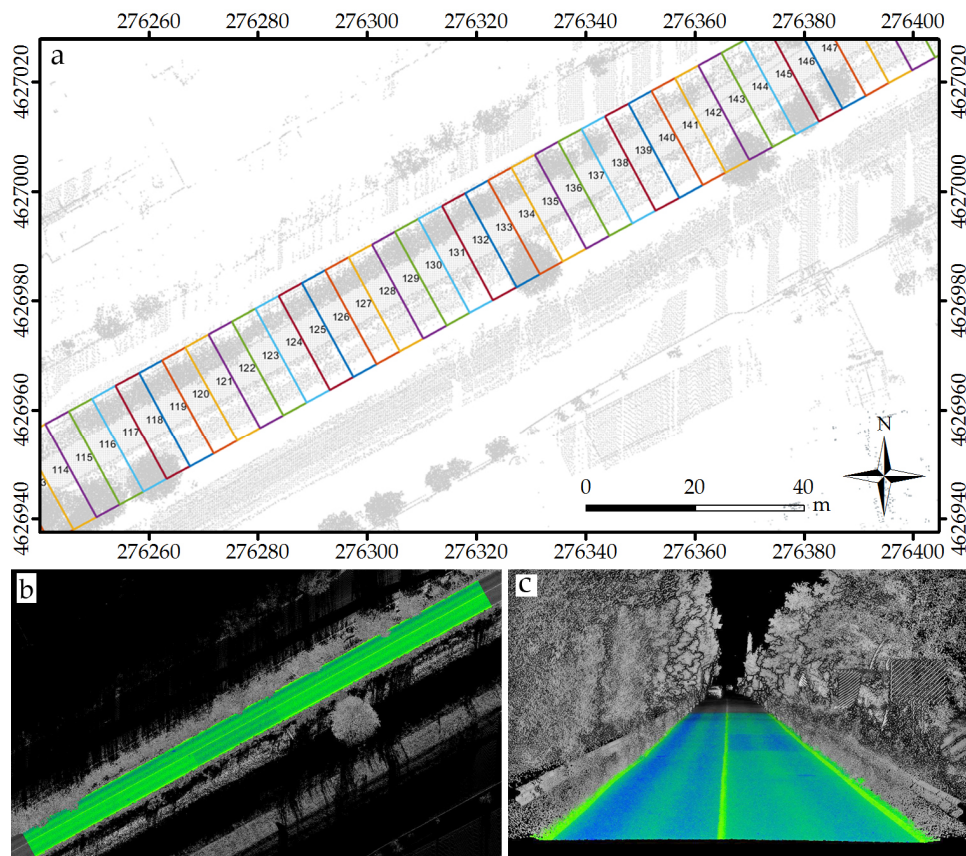


Figura 6.14 – a) Stralcio della schermata di scelta dei box; b) Carreggiata estratta dal box 120 al box 140 sovrapposta alla nuvola di input, la scala cromatica è proporzionale all'intensità (scala di grigi = nuvola di input, RGB = carreggiata estratta); c) Vista prospettica ovest-est.

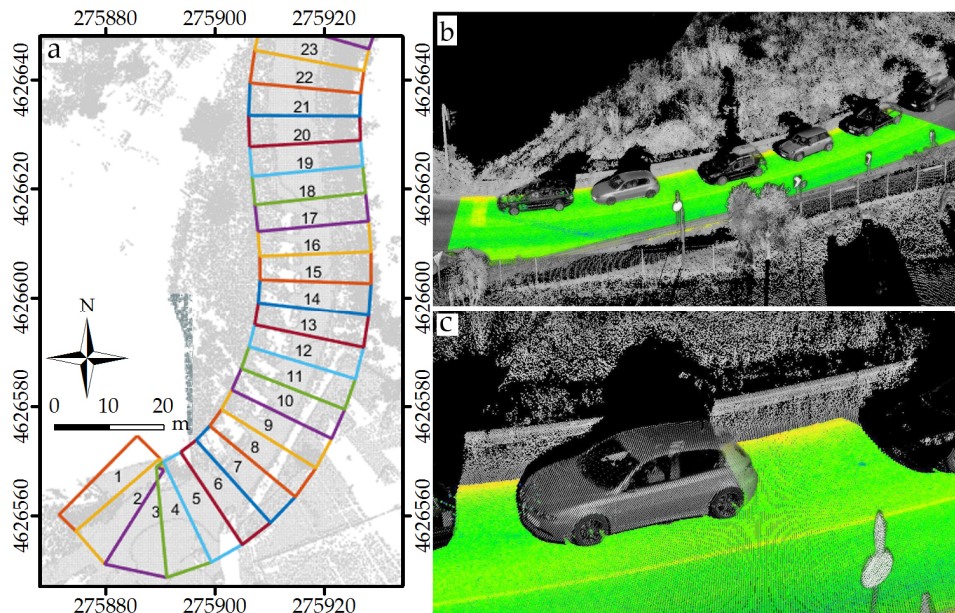


Figura 6.15 – a) Stralcio della schermata di scelta dei box; b, c) Viste prospettive della carreggiata estratta dal box 6 al box 13 sovrapposta alla nuvola di input, la scala cromatica è proporzionale all'intensità (scala di grigi = nuvola di input, RGB = carreggiata estratta).

6.2 Estrazione Segnaletica Orizzontale

La segnaletica ha un ruolo di notevole importanza, ha il compito di regolare la circolazione, fornendo prescrizioni e importanti indicazioni sui comportamenti da seguire al fine di garantire adeguati livelli di sicurezza in condizioni sia diurne, sia soprattutto notturne.

Numerosi studi di incidentalità hanno evidenziato come la realizzazione di una buona segnaletica orizzontale e le ispezioni periodiche della stessa possano ridurre drasticamente il numero di incidenti. Le soluzioni di indagine presenti oggi nel campo della sicurezza sono sempre più orientate verso sistemi a basso costo, la maggior parte dei sistemi però sono quasi del tutto inutilizzabili, specialmente in ambito urbano. I processi di controllo e di ispezione possono essere ottimizzati utilizzando i dati forniti dai sistemi LSM. Il segnale ricevuto dallo scanner RSSI (*Received Signal Strength Indication*) è memorizzato come valore di intensità. Con il termine intensità si indica l'ampiezza del segnale di ritorno; solitamente è restituita l'ampiezza di picco ma esistono anche

particolari sistemi all'avanguardia in grado di misurare l'intensità in un intervallo di tempo così da restituire la variazione dell'intensità nel tempo. I valori possono essere differenti a seconda del produttore del laser scanner. L'intensità può essere espressa tramite *floating point* (da 0 a 1), numeri interi a 8bit (da 0 a 255) o a 16bit (da 0 a 65535) [47].

Diversi studi sono stati condotti per estrarre la segnaletica orizzontale da una nuvola di punti prodotta con LSM, poiché essa è realizzata con una particolare vernice altamente retroriflettente caratterizzata da alti valori di intensità. I primi studi si basavano sull'analisi di immagini 2D provenienti dalla nuvola di punti 3D [94]. A queste immagini sono applicati particolari processi morfologici come *Hough Transform* e il *Multi-Scale Tensor Voting (MSTV)*. Altre metodologie si basano sulla segmentazione multipla, dato che l'intensità è funzione della distanza dallo scanner [95]; gli intervalli sono determinati in funzione della densità spaziale del dato per poi applicare particolari operatori morfologici a struttura lineare.

6.2.1 Correzione Empirica dell'Intensità

Le informazioni radiometriche provenienti da una misura laser scanner, possono essere utilizzate per estrarre e classificare alcuni elementi costituenti la sovrastruttura stradale. I valori di intensità sono però influenzati dalle caratteristiche chimico/fisiche dei materiali su cui impatta il raggio laser (target) e dalla geometria di acquisizione, in particolare dalla distanza "*range*" dal target e dall'angolo di incidenza del raggio.

La correzione dei valori di intensità dei dati provenienti da sistemi LSM è necessaria per ottenere valori uniformi e non dipendenti dalle variabili del sistema. Esistono quattro differenti livelli di correzione: si va dal livello 0 che rappresenta valori di intensità nativi dello scanner, privi quindi di qualsiasi manipolazione, al livello 3 in cui rientrano tutti quei dati che sono stati sottoposti a rigorose procedure di correzione e calibrazione radiometrica. Per i nostri scopi ci si soffermerà sulla correzione di livello 1, in cui viene effettuata una regolazione dei valori di intensità per ridurre le variazioni causate dalla geometria di scansione (distanza del bersaglio e angolo di incidenza). Questo processo è effettuato mediante un modello di correzione empirico, ottenendo valori cosiddetti di *pseudo-riflettanza* [47].

Il legame con l'angolo di incidenza tende a avere una influenza minore per le pavimentazioni stradali. Diversi studi hanno utilizzato le pavimentazioni in conglomerato bituminoso per effettuare processi rigorosi di calibrazione, dato che queste superfici tendono a avere un comportamento simile alle superfici Lambertiane, per cui tendono a riflettere l'energia incidente da una direzione in modo uguale in tutte le direzioni. Verrà valutata solo la dipendenza con la distanza, dato che risulta l'aliquota maggiore.

Teoricamente l'intensità è inversamente proporzionale alla distanza al quadrato ($1/r^2$) e al coseno dell'angolo di incidenza; questa dipendenza non è sempre vera e non può essere direttamente applicata ai dati provenienti da misure LSM. Per distanze inferiori ai 10÷15m, infatti, l'andamento dell'intensità non è inversamente proporzionale alla distanza, ma assume un andamento ben diverso. Per cui, vi è la necessità di utilizzare due funzioni differenti che approssimano l'andamento dei valori di intensità al variare della distanza dallo scanner; una per piccole distanze (*near-range*) e un'altra per distanze maggiori (*far-range*).

La frontiera delle due zone è stimata mediante l'individuazione del punto di massimo di una funzione quadratica f_q interpolata ai minimi quadrati [96]. Alcuni studi hanno evidenziato che il punto di separazione dei due andamenti è situato in un intervallo di distanza tra i 5m e i 15m.

Le funzioni interpolate per ogni zona sono:

$$\checkmark \text{ Near-range: } f_1(r) = a_0 + a_1 r + a_2 r^2 + a_3 r^3 \quad r \leq \text{Max}(f_q)$$

$$\checkmark \text{ Far-range: } f_2(r) = b_0 + b_1 \frac{1}{r} + b_2 \frac{1}{r^2} + b_3 \frac{1}{r^3} \quad r > \text{Max}(f_q)$$

Dove a e b sono i coefficienti delle funzioni e r è la distanza dallo scanner al target.

È bene sottolineare che non sempre è possibile individuare questa separazione; per carreggiate appartenenti a strade extraurbane secondarie o urbane di scorrimento aventi una corsia per senso di marcia, si arriva a una distanza di circa 9m, comprese le banchine. La figura 6.16 mostra tale situazione; la funzione quadratica interpolata ha un punto di massimo marginale (8,17m). In questo caso l'intera tratta è stata analizzata considerando solo la singola zona *near-range*; a questa è stata interpolata una funzione polinomiale di terzo grado per evitare un eccessivo adattamento della stessa [96], figura 6.17.

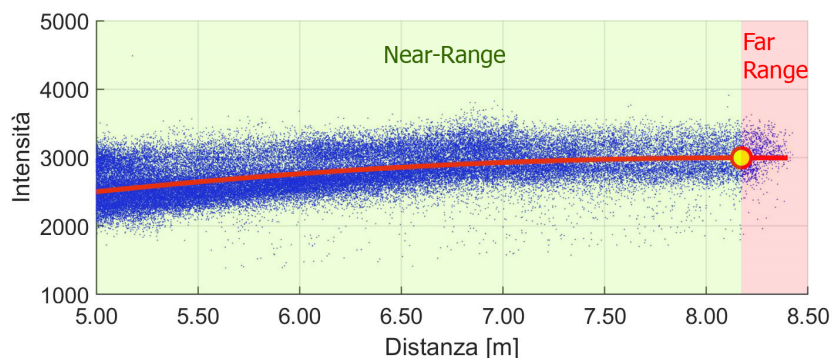


Figura 6.16 – Intensità I_o vs Distanza: in rosso la funzione quadratica interpolata, il punto giallo individua il massimo della funzione (Max = 8,17m).

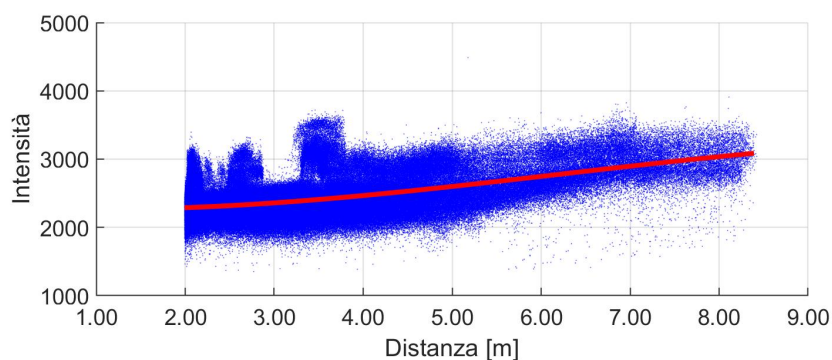


Figura 6.17 – Intensità I_o vs Distanza: in rosso la funzione polinomiale f_1 interpolata.

La correzione dei valori di intensità originale I_o è effettuata tramite la relazione:

$$I_c = \frac{I_o}{f_1(r)}$$

La distanza r è calcolata per ogni punto della linea di scansione estrapolata. Le linee di scansione sono estratte mediante l'analisi del tGPS, come detto nel punto 1 del §6.1.2. La figura 6.18 mostra il polinomio interpolato con i valori di intensità corretti; è possibile notare come il processo di correzione abbia eliminato il trend crescente.

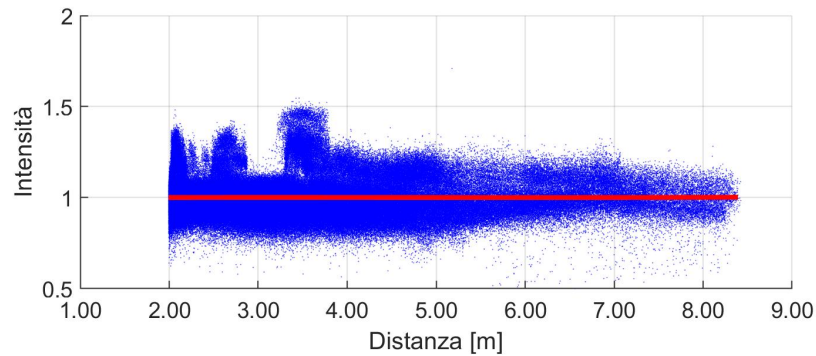


Figura 6.18 – Intensità corretta I_c vs Distanza: in rosso la funzione polinomiale f_1 interpolata.

In figura 6.19b è riportato uno stralcio della nuvola di punti dopo il processo di correzione; è possibile notare come la segnaletica del ciglio destro, completamente invisibile nella nuvola di punti con intensità nativa I_0 (figura 6.19a), sia ora ben evidente. Anche gli accessi sul ciglio destro hanno acquistato la stessa scala cromatica della pavimentazione.

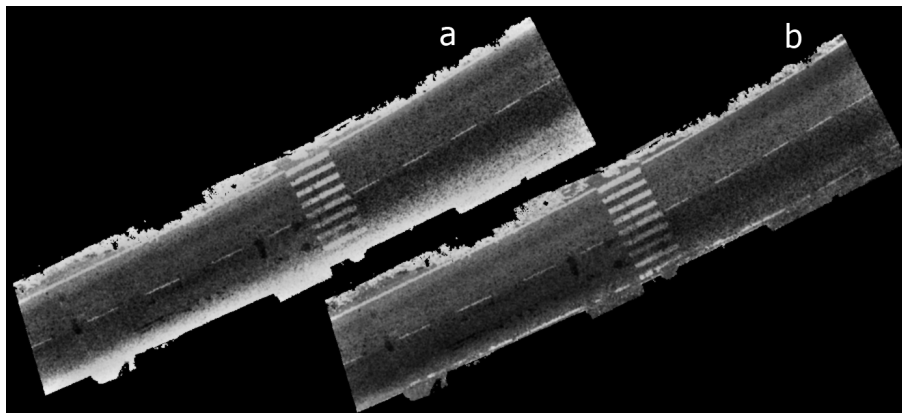


Figura 6.19 – Stralcio pavimentazione, la scala di grigi è proporzionale ai valori di intensità; a) Intensità I_0 originale; b) Intensità I_c corretta.

Nelle tratte dove sono presenti intersezioni e isole di traffico a raso o allargamenti della carreggiata, è possibile distinguere le due zone. La figura 6.20 mostra il punto di massimo della funzione quadratica interpolata f_q che individua la frontiera delle due zone (*near-range* e *far-range*). Anche in questo caso, Il punto di massimo individuato si trova nell'intervallo atteso [5m;15m], in particolare a una distanza di 7,08m

dallo scanner. Lo stralcio esaminato riguarda una tratta in corrispondenza di uno svincolo, così da avere una larghezza sufficiente della carreggiata.

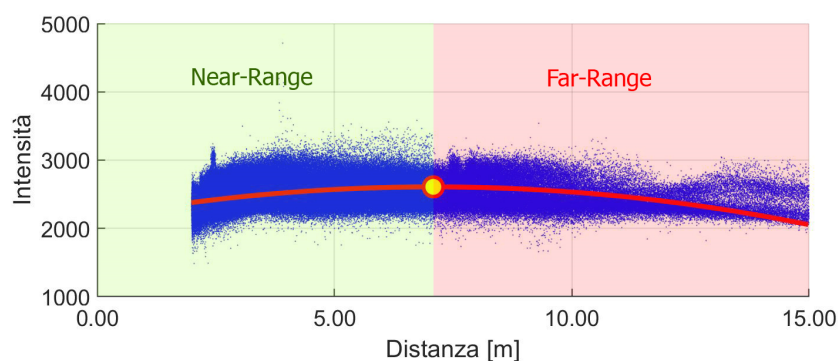


Figura 6.20 – Intensità I_0 vs Distanza: in rosso la funzione quadratica interpolata, il punto giallo individua il massimo della funzione ($Max = 7,08m$).

Per la zona di *near-range* è stata interpolata la funzione $f_1(r)$, per la zona di *far-range*, invece, è stata interpolata la funzione $f_2(r)$, entrambe con il metodo dei minimi quadrati. La figura 6.21a mostra le funzioni interpolate; in corrispondenza della frontiera è presente una discontinuità, eliminata utilizzando una *Smoothing Spline*, la quale raccorda le due curve in prossimità della discontinuità figura 6.21b.

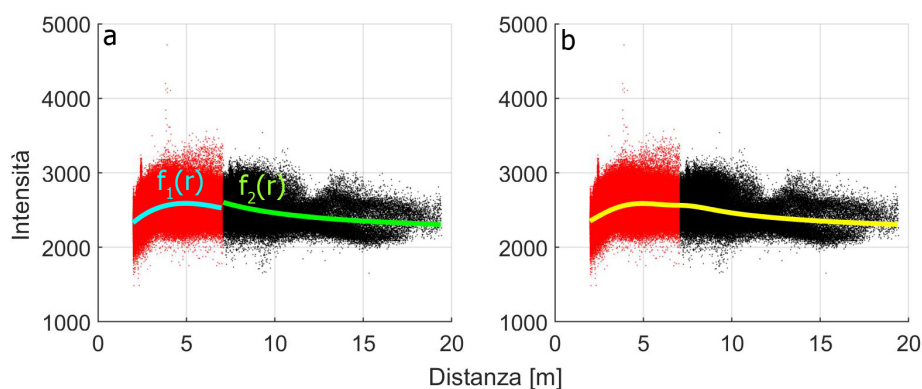


Figura 6.21 – Intensità I_0 vs Distanza; a) Suddivisione delle zone e interpolazione delle funzioni; b) Raccordo con la smoothing spline in corrispondenza della discontinuità.

I valori di intensità I_o sono stati corretti tenendo conto della zona di appartenenza; in particolare le relazioni utilizzate sono:

$$\forall r \leq \text{Max}(f_q) \Rightarrow I_c = \frac{I_o}{f_1(r)}$$
$$\forall r > \text{Max}(f_q) \Rightarrow I_c = \frac{I_o}{f_2(r)}$$

La Figura 6.22 mostra i valori di intensità corretti I_c con la riduzione del trend. Dal confronto è possibile notare come lo stralcio sottoposto a processo di correzione (Figura 6.23b) abbia subito una riduzione di rumore in corrispondenza della segnaletica appartenente alle isole di traffico. Inoltre, alcune aree ammalorate risultano maggiormente evidenziate.

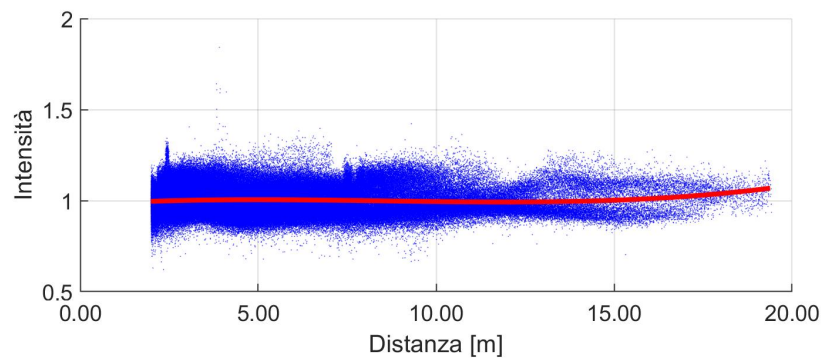


Figura 6.22 – Intensità corretta I_c vs Distanza: in rosso la funzione polinomiale interpolata.

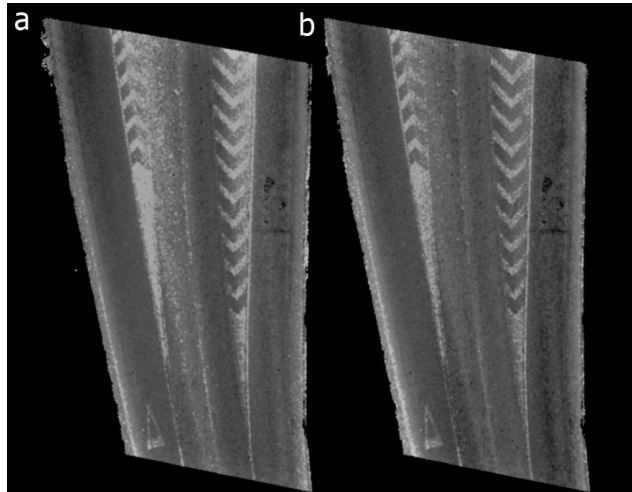


Figura 6.23 – Stralcio pavimentazione, la scala di grigi è proporzionale ai valori di intensità; a) Intensità I_o originale; b) Intensità I_c corretta.

6.2.2 Il metodo della soglia di Otsu

I metodi di estrazione che si basano sul criterio di Otsu prevedono generalmente una segmentazione multi segmento, ossia suddividono la pavimentazione stradale in differenti tratti longitudinali in funzione della densità del dato; per ogni tratto è applicato il criterio di Otsu [97]. Questo perché i valori di intensità, come noto, sono legati alla distanza dallo scanner e quindi devono essere analizzati separatamente se l'intensità è di livello 0. Il processo ideale consiste nell'applicare prima una correzione radiometrica dei valori di intensità e successivamente estrarre la segnaletica senza suddividere la nuvola di punti in tratti longitudinali; in realtà non esiste una netta frontiera di separazione per cui la metodologia del multi segmento nella maggior parte dei casi può portare a un cattivo riconoscimento della soglia limite.

Il metodo di Otsu individua la soglia ottimale k che minimizza la varianza intra classe $\sigma_w^2(t)$. La varianza intra classe è rappresentata dalla somma pesata delle varianze delle due classi:

$$\sigma_w^2(t) = \omega_1(t)\sigma_1^2(t) + \omega_2(t)\sigma_2^2(t)$$

dove $\omega_1(t)$ e $\omega_2(t)$ sono le probabilità di individuare la parte di pavimentazione con la segnaletica o la parte senza segnaletica

orizzontale. Otsu ha dimostrato che la minimizzazione della varianza intra classe equivale alla massimizzazione della varianza inter classe [98]:

$$\sigma_b^2(t) = \omega_1(t) \cdot \omega_2(t) \cdot [\mu_1(t) - \mu_2(t)]^2$$

dove $[\mu_1(t) - \mu_2(t)]$ sono i rispettivi livelli medi. Il valore di soglia ottimale k è determinato come:

$$K = \arg \max(\sigma_b^2(t)) \quad 0 \leq t \leq 255$$

Generalmente il metodo è applicato a immagini bidimensionali e presuppone che siano presenti solo due classi. Per estendere il metodo di Otsu su dati 3D bisogna prima normalizzare i valori di intensità nell'intervallo della scala dei grigi [0:255].

La Figura 6.24 mostra uno stralcio di pavimentazione sottoposta a segmentazione di Otsu. Il dato sottoposto al processo di correzione radiometrica (Figura 6.24, pannelli d,e,f) permette una migliore individuazione della soglia k ; infatti, è possibile notare come la parte della segnaletica zebra sia stata estratta con maggior successo dai dati di intensità corretta I_c , individuando una soglia limite pari a 50. I valori di intensità estratti sono quelli maggiori della soglia limite, $I_c > k$.

Viceversa, utilizzando i dati nativi di intensità I_o , la soglia individuata risulta maggiore della precedente ($k=61$) e, quindi, poco sensibile alle variazioni di intensità dovute agli incrementi della distanza dallo scanner (Figura 6.24, pannelli a,b,c). Il rumore presente su entrambi i dati è dovuto a picchi di intensità ottenuti per effetto degli inerti lisciati e per la presenza di elementi metallici. Questo generalmente è rimosso mediante filtri di densità.

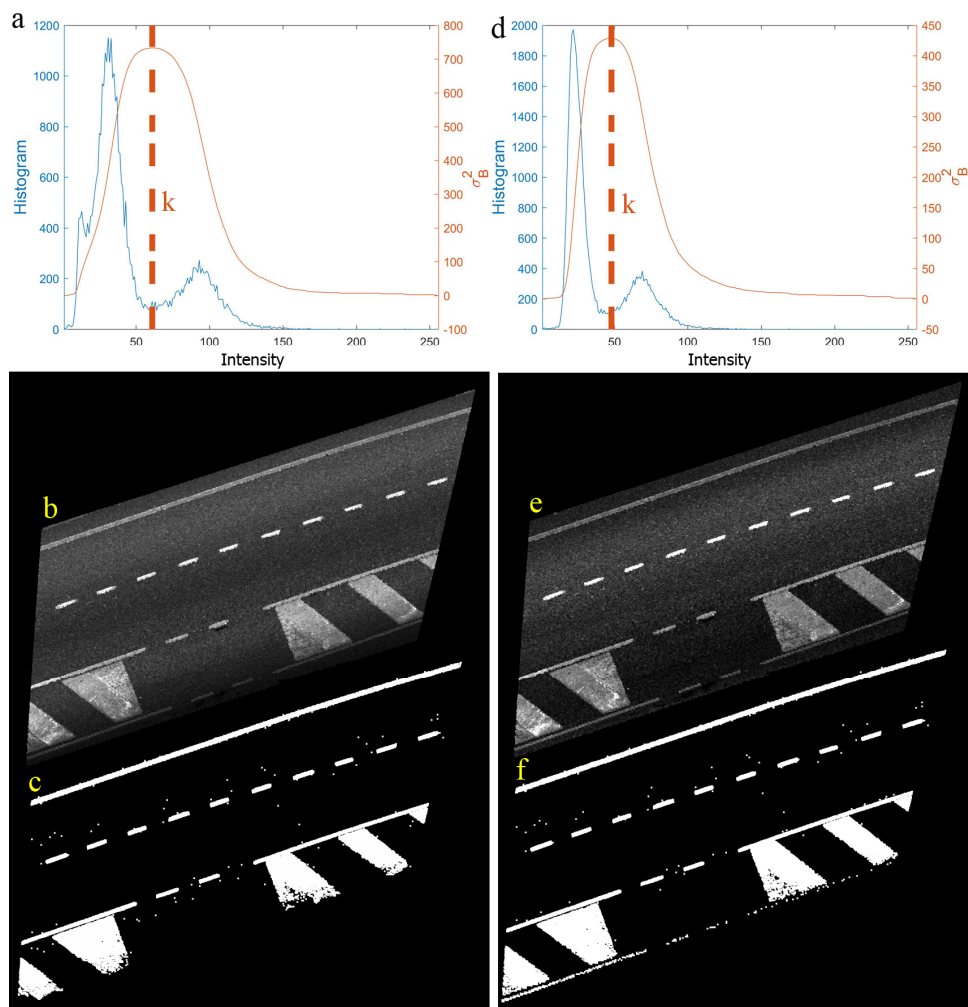


Figura 6.24 – Segmentazione di Otsu; a) Istogramma dei valori di intensità non corretti I_0 con individuazione della soglia limite k ; b) Stralcio di pavimentazione con Intensità I_0 non corretta; c) Segmentazione di Otsu dell’Intensità I_0 ; d) Istogramma dei valori di intensità corretti I_c con individuazione della soglia limite k ; e) Stralcio di pavimentazione con Intensità I_c corretta; f) Segmentazione di Otsu dell’Intensità I_c .

6.3 Estrazione Profili Longitudinali e Trasversali

Il particolare sviluppo plano-altimetrico del nastro stradale rende inefficaci i classici metodi utilizzati per l'estrazione dei modelli digitali di elevazione (*DEM, Digital Elevation Model*), su cui si basano la maggior parte dei software di modellazione. L'ottimizzazione e l'individuazione di metodologie ad hoc per la modellazione della superficie stradale è necessaria vista la complessità e le grosse moli di dati da trattare. Le classiche metodologie ricostruiscono l'andamento di una determinata variabile secondo una griglia regolare di nodi "grid" a partire dai valori discreti misurati e irregolarmente distribuiti. Questo avviene mediante tecniche di interpolazione con le quali si giunge a una superficie statistica, o deterministica, di solito in formato matriciale con risoluzione scelta dall'utente; a ogni elemento della matrice corrisponde un valore di elevazione. L'utilizzo del DEM a griglia è dovuto principalmente alla facilità con cui le matrici possono essere manipolate, anche in ambiente GIS, senza grossi oneri computazionali e alla struttura topologica di facile comprensione. Si intuisce, però, che una classica struttura a griglia, orientata secondo il reticolo cartografico, non risulta efficace per rappresentare lo sviluppo curvilineo di una piattaforma stradale.

6.3.1 Modello Digitale di Elevazione Curvilineo (*DEMc*)

Si introduce una metodologia in grado di generare un particolare modello digitale di elevazione studiato per pavimentazioni stradali, così da ottimizzare non solo gli oneri computazionali ma anche l'organizzazione e l'estrazione dei profili e l'analisi plano-altimetrica.

L'obiettivo è quello di costruire un modello curvilineo rappresentato da una matrice "Raster". La matrice $D \in \mathbb{R}^{n,c}$ contiene i valori di elevazione interpolati di ogni nodo; è composta da n righe, pari al numero di vertici della polilinea d'asse $S_o \in \mathbb{R}^{n,2}$ e da un numero di colonne c pari al numero di nodi costituenti la generica sezione trasversale. I vertici della polilinea $S_o \in \mathbb{R}^{n,2}$ appartengono all'asse stradale, individuato tramite l'estrazione della segnaletica orizzontale come al §6.2, e generati mediante il metodo proposto nel punto 1 del §6.1.2. I vertici sono equamente distanziati e la distanza è pari all'interasse longitudinale il della griglia curvilinea.

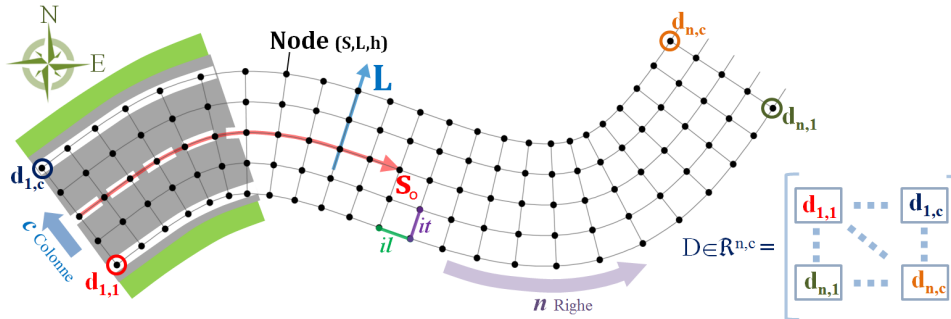


Figura 6.25 – Griglia ad ascissa curvilinea.

Ogni riga della matrice $D \in \mathbb{R}^{n,c}$ rappresenterà quindi la sezione trasversale L ortogonale alla polilinea d'asse a una certa progressiva. Viceversa, le colonne rappresenteranno i profili longitudinali (Figura 6.25). Un aspetto importante è la scelta degli interassi del grigliato (il e it); la dimensione della maglia deve essere relazionata alla densità del dato di partenza e alla sensibilità alla percezione delle irregolarità che influenzano il contatto strada-pneumatico. L'iter per la costruzione del DEM curvilineo consiste nei seguenti passi:

1. *Generazione della polilinea di Asse.*

La polilinea di asse $S_o \in \mathbb{R}^{n,2}$ ha, generalmente, uno sviluppo non regolare dato che è ottenuta mediante un processo che mira alla determinazione di una lunghezza costante dei segmenti e prescinde da un'analisi dell'andamento curvilineo della stessa. Per questo motivo, si costruisce una *B-spline* utilizzando come punti di controllo gli n vertici della polilinea $S_o \in \mathbb{R}^{n,2}$. Le curve *B-Spline* sono generalizzazioni delle curve di Bezièr; in altre parole permettono la rappresentazione di una curva mediante l'accoppiamento di più curve di Bèzier, così da ottenere un andamento curvilineo [99]. Esistono differenti tipi di *B-Spline*, in particolare quella che si presta meglio per la rappresentazione dell'asse stradale è la *B-Spline uniforme e cubica* [100,101]. Noti gli n punti di controllo P_i , rappresentati dai vertici della polilinea $S_o \in \mathbb{R}^{n,2}$, la *B-Spline* B_s è così definita:

$$B_s(t) = \sum_{i=0}^n B_{i,h}(t) P_i$$

Il grado della curva è h , $B_{i,h}$ sono i polinomi determinati con le equazioni di *de Boor*. Le funzioni base sono definite da una sequenza non

decescente di m nodi t , il vettore nodale è formato da una sequenza di valori nodali $t_0 \leq t_1 \leq t_m$.

$$B_{i,1}(t) = \begin{cases} 1 & \text{se verificato: } (t_i \leq t \leq t_{i+1}) \\ 0 & \text{se non verificato: } (t_i \leq t \leq t_{i+1}) \end{cases}$$

$$B_{i,1}(t) = \frac{t-t_i}{t_{i+h-1}-t_i} B_{i,h-1}(t) + \frac{t_{i+h}-t}{t_{i+h}-t_{i+1}} B_{i+1,h-1}(t)$$

2. Generazione della griglia curvilinea planimetrica

La fase successiva consiste nel generare la griglia di nodi planimetrica, nel piano Est, Nord, a partire dalla B-spline di asse $B_s \in \mathbb{R}^{n,2}$. Note la larghezza della carreggiata L_c e l'interasse trasversale it , si realizza un ciclo con un numero di istruzioni di offset "Loop" pari a:

$$Loop = \frac{\left(\frac{L_c}{2} \right)}{it}$$

La singola istruzione di offset è realizzata applicando la metodologia introdotta nel punto 2 del §6.1.2. Nella figura 6.26 è riportato un diagramma di flusso sintetico del ciclo di offset; all' i -esima iterazione sono determinate le matrici di offset $V_{dx_i} \in \mathbb{R}^{n,2}$ e $V_{sx_i} \in \mathbb{R}^{n,2}$ contenenti le coordinate planimetriche, nel sistema cartografico, dei nodi di offset.

È bene evidenziare che le ripetute sequenze di istruzioni generano numerose variabili aventi le stesse denominazioni; per tale motivo tutti gli output sono organizzati in *Structure Array*. In particolare le coordinate planimetriche dei nodi sono organizzate in *Multidimensional Arrays* $D \in \mathbb{R}^{n,(2 \cdot Loop+1),2}$, un'estensione di una matrice bidimensionale. Ogni elemento contiene la coppia di coordinate cartografiche (Est, Nord) del singolo nodo.

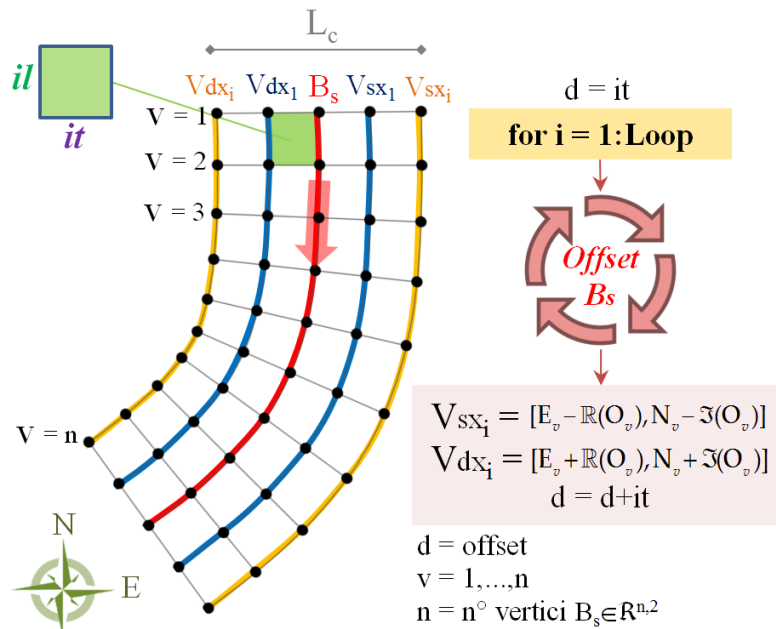


Figura 6.26 – Ciclo di Offset.

3. Stima dell'elevazione dei Nodi

Il valore di elevazione di ogni singolo nodo della griglia bidimensionale è stimato mediante processi di interpolazione spaziale. Il processo è stato implementato in maniera tale da ridurre il più possibile l'onere computazionale, vista la grossa mole di dati da elaborare.

I processi di interpolazione locale consistono nella stima dell'incognita a partire da un gruppo di valori noti all'interno di un certo raggio. Per individuare l'insieme dei punti contenuti nella sfera con centro nel nodo v_i è necessità di conoscere a priori la quota approssimata del nodo stesso. Si intuisce quindi che la problematica è duplice, cioè per poter stimare la quota del nodo bisogna prima conoscere la sua posizione approssimata nello spazio. Il metodo proposto è descritto nel seguente iter:

- La nuvola di punti di input PC è sottoposta ad un processo di sotto campionamento "downsample". La funzione `pcdownsample(PC, 'gridAverage', gridStep)` con l'opzione `gridAverage`, permette un sotto campionamento con un filtro a griglia. Il `gridStep` specifica la dimensione della cella 3D ed è assunto pari a:

$$GridStep = \frac{\left(\frac{il + it}{2} \right)}{3}$$

Il risultato è una nuvola di punti $PCd \in \mathbb{R}^{p,3}$ (con $p = n^\circ$ di punti totale) sotto campionata e organizzata secondo uno schema a celle;

- La nuvola di punti PCd viene proiettata su un piano orizzontale a quota nulla moltiplicando il vettore contenente i valori di elevazione a 0, si ottiene così la matrice $PCd0 \in \mathbb{R}^{p,3}$;
- Alla matrice bidimensionale $D \in \mathbb{R}^{n,(2 \cdot Loop+1),2}$, contenente le coordinate planimetriche dei nodi, è aggiunta la terza dimensione $Z \in \mathbb{R}^{n,(2 \cdot Loop+1)} = 0$, la matrice nulla.

Successivamente si realizzano k cicli ($k=Loop:1$); per il k -esimo ciclo si realizza una sequenza di istruzioni pari al numero di nodi n , cioè il numero di elementi contenuti nella k -esima colonna della matrice $D \in \mathbb{R}^{n,(2 \cdot Loop+1),2}$:

- Per l' i -esimo nodo N_i^{2D} la funzione *findNearestNeighbors* individua gli indici di riga della matrice $PCd0$ dei punti più vicini;
- Si selezionano i valori di quota della nuvola PCd utilizzando gli indici ottenuti e si mediano; così facendo si ottiene il valore di quota approssimato Z_i^{app} del nodo N_i^{3D} ;
- Si realizza una sfera di ricerca con la funzione *findNeighborsInRadius* nel nodo N_i^{3D} . Il raggio della sfera *KernelSize* sarà funzione del passo del grigliato e della densità del dato di input.
- Si applica il processo di interpolazione con i punti contenuti nella sfera di ricerca così da determinare il valore interpolato della quota del nodo Z_i^{corr} .

La doppia sequenza di istruzioni appena esposta è riportata nel diagramma di figura 6.27. A ogni ciclo i , i valori nulli della terza dimensione della matrice $D \in \mathbb{R}^{n,(2 \cdot Loop+1),3}$ sono sostituiti con quelli determinati Z_i^{corr} .

La scelta di proiettare la nuvola di punti su un piano orizzontale è derivata dal fatto che il processo di ricerca dei punti vicini al nodo N_i^{2D} è molto oneroso se condotto nello spazio 3D; limitare la ricerca nel solo spazio 2D abbatta notevolmente i tempi di elaborazione.

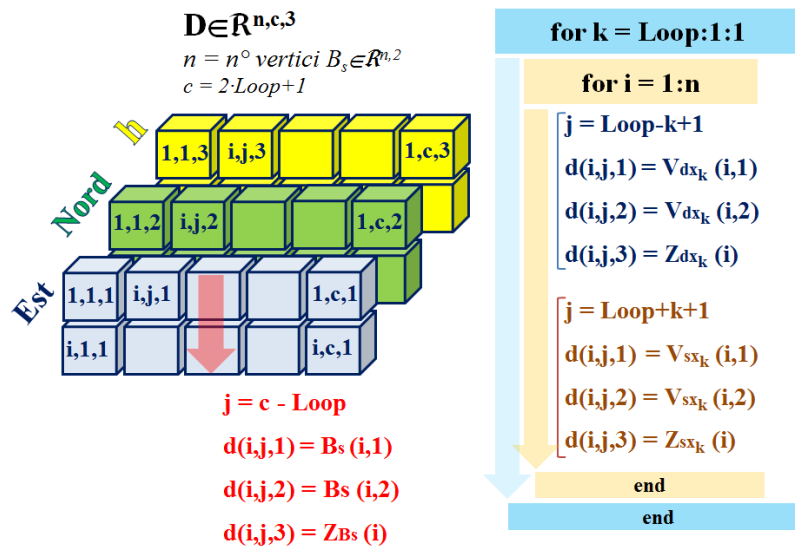


Figura 6.27 – Schema di costruzione della matrice $D \in \mathbb{R}^{n,c,3}$.

6.3.2 Organizzazione dei Profili

La matrice $D \in \mathbb{R}^{n,c,3}$ contiene sia le coordinate planimetriche della griglia di nodi sia il valore di altimetria di ogni singolo nodo. È una matrice multidimensionale gestibile esclusivamente nell'ambiente di programmazione dove è stata generata (*Matlab*). Per renderla esportabile e gestibile in altri software di analisi, vengono generati due file principali:

- Un file di testo (*.txt*) contenente solo i valori di elevazione;
- Un Polygon File Format (*.ply*), un file binario e non proprietario per la definizione del modello 3D generato, che contiene le coordinate 3D dei nodi del DEMc.

Il file di testo è organizzato in modo tale da estrarre i profili trasversali e quelli longitudinali rispetto ad un sistema locale. Ogni profilo trasversale è individuato dalle progressive dell'asse centrale $B_s \in \mathbb{R}^{n,2}$; l'origine delle progressive può essere di tipo locale (coincidente con l'origine del DEMc) o globale (coincidente con l'ettometrica o la chilometrica della

tratta analizzata). I profili longitudinali sono organizzati in funzione della distanza dall'asse $B_s \in \mathbb{R}^{n,2}$; in riferimento alla convenzione adottata, le distanze con segno positivo individuano i profili longitudinali a sinistra dell'asse e con verso di percorrenza congruente con il tempo GPS, le distanze con segno negativo, invece, individuano i profili longitudinali a destra dell'asse. La posizione L_i dell' i -esimo profilo longitudinale, è stimata secondo la relazione:

$$L_i = -\left(\frac{L_c}{2} - it \cdot (i-1)\right) \quad \text{con } i = 1, \dots, (2 \cdot \text{Loop}) + 1$$

La figura 6.28 mostra un esempio della convenzione adottata e della tabella di testo generata.

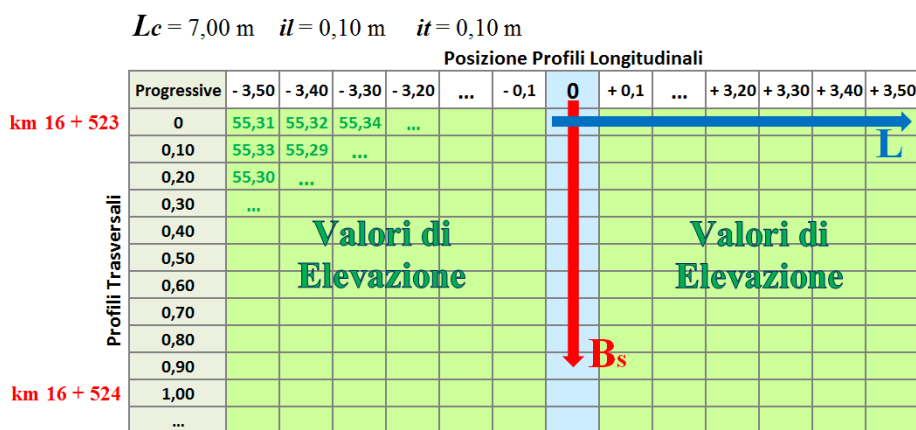


Figura 6.28 – Esempio struttura file di testo.

Il file binario *.ply* del modello 3D è generato mediante l'utilizzo della funzione *pcwrite* la quale prevede la costruzione di una matrice bidimensionale $M \in \mathbb{R}^{N,3}$, contenente le coordinate 3D di tutti i nodi N del DEMc. A tale fine, ogni sottomatrice della matrice a tre dimensioni $D \in \mathbb{R}^{n,c,3}$ è convertita in un vettore mediante l'ausilio della funzione *reshape*.

6.4 Stima della Geometria Altimetrica e Planimetrica

Uno dei requisiti necessari per garantire livelli di sicurezza adeguati è la conoscenza della geometria stradale, così da valutare il coordinamento piano-altimetrico, responsabile direttamente della regolarità di marcia.

La fase di progettazione geometrica di una strada consiste nello studio della piattaforma stradale, comprese le interconnessioni; per ragioni di tipo pratico, lo studio della geometria stradale è suddiviso nello studio dell'andamento *planimetrico*, detto anche tracciato orizzontale, e dell'andamento *altimetrico*, denominato profilo longitudinale di asse [102]. L'andamento planimetrico è la proiezione dell'asse stradale su un piano orizzontale, l'andamento altimetrico rappresenta, invece, la posizione dell'asse rispetto ad un riferimento altimetrico.

La generazione del modello digitale di elevazione della superficie pavimentata DEMc permette l'estrazione dei profili e quindi la caratterizzazione geometrica sia dell'andamento planimetrico che altimetrico. In particolare, sono state studiate delle metodologie in grado di individuare e quantificare i differenti elementi costituenti la geometria planimetrica (curve circolari, curve di transizione e rettifili) e quelli costituenti i raccordi verticali (sacche e dossi), a partire dal profilo di asse estratto dal DEMc. Infine è descritto il processo per la determinazione delle pendenze trasversali e l'individuazione dell'asse di rotazione, utile alla ricostruzione del profilo dei cigli.

6.4.1 Andamento Planimetrico e Altimetrico

La stima dell'andamento planimetrico si basa sulla determinazione della curvatura della polilinea di asse $B_s \in \mathbb{R}^{n,2}$. Noti i vertici B_i della curva $B_s \in \mathbb{R}^{n,2}$, la curvatura media k del generico arco passante per i due punti B_i e B_{i+1} è definita come:

$$k(\widehat{B_i, B_{i+1}}) = \frac{\vartheta}{l(\widehat{B_i, B_{i+1}})}$$

Dove ϑ è l'angolo tra le rette tangenti r_t nei punti B_i e B_{i+1} , figura 6.29.

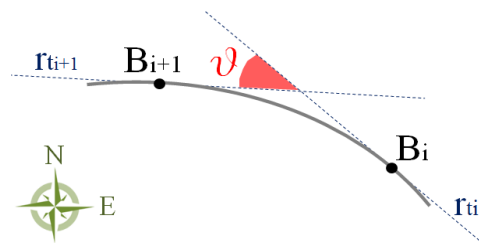


Figura 6.29 – Angolo ϑ .

I tratti in rettilineo hanno una curvatura nulla, dato che l'angolo α tende a un valore nullo. Nelle curve circolari, invece, la curvatura k è costante e risulta essere pari all'inverso del raggio R , dato che l'angolo α è pari proprio all'angolo compreso tra i raggi di due punti generici e appartenenti alla circonferenza:

$$k = \frac{1}{R}$$

Maggiore è il raggio della circonferenza R , minore sarà il valore della curvatura k ; facendo tendere il raggio all'infinito, l'arco di circonferenza tenderà ad una retta e la curvatura tenderà a zero. In corrispondenza delle curve di transito, la curvatura è variabile dato che il raggio del cerchio osculatore, passante per ogni coppia di punti adiacenti, sarà differente.

L'individuazione dei differenti elementi costituenti il tracciato planimetrico è realizzata mediante un processo iterativo, il quale analizza l'andamento del diagramma delle curvature. Nel diagramma delle curvature sulle ascisse sono riportate le progressive s della tratta esaminata e sulle ordinate i relativi valori della curvatura k .

Il processo è organizzato secondo le istruzioni:

- Data in input la matrice $B_s \in \mathbb{R}^{n,2}$ contenente i vertici della polilinea di asse (contenuti nel piano cartografico Est-Nord), si determina la curvatura; la curvatura è stimata a partire da un modello parabolico interpolato localmente;
- Si costruisce il diagramma delle curvature; sulle ascisse sono riportate le progressive, sulle ordinate sono riportati i valori della curvatura k ;
- Si stimano i punti di massimo e minimo relativo, così da individuare le zone a curvatura costante.

La fase successiva consiste nel classificare i valori appena individuati in punti appartenenti a curve circolari $P(s,k) \in C$ e punti appartenenti a rettilinei $P(s,k) \notin C$; se un massimo o minimo locale è prossimo allo zero ($|k| < 0,5 \cdot 10^{-4}$) che equivale ad una curva di raggio $R > 20\text{km}$, questo è classificato come punto appartenente all'elemento rettilineo, altrimenti è classificato come punto appartenente alla curva circolare. La figura 6.30 mostra un esempio della classificazione; il punto in verde (il minimo locale) è stato classificato come punto appartenente al tratto in rettilineo, i

due punti in rosso (massimi locali), invece, sono stati classificati come punti appartenenti alle curve circolari.

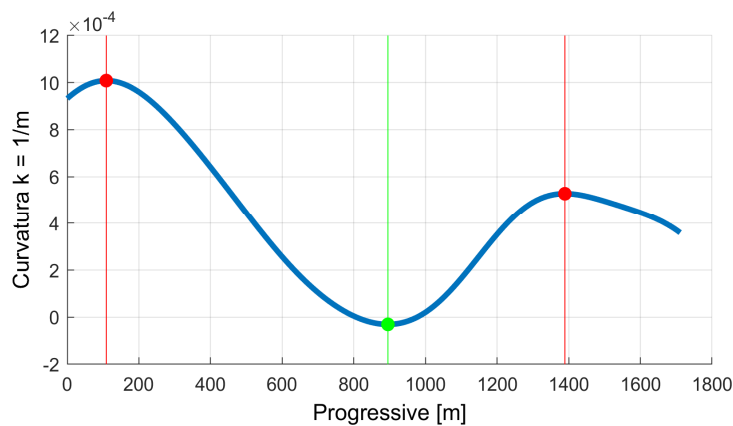


Figura 6.30 – Massimi e minimi locali.

L'obiettivo è quello di ricostruire un diagramma di curvatura teorico a partire da quello ottenuto per via analitica; a tale scopo si sono realizzati due processi iterativi:

1. Per i punti compresi nelle curve circolari $P(s,k) \subseteq C$:
 - Si estraggono i punti omologhi dalla matrice $B_s \in \mathbb{R}^{n,2}$ così da determinare le coordinate cartografiche nel piano Est-Nord dei nodi $N_c \in \mathbb{R}^{m,2}$, con $m=1, \dots, n^\circ$ di punti $P(s,k) \subseteq C$;
 - In corrispondenza di ogni nodo N_{ci} si realizza un ciclo che interpola ai minimi quadrati una circonferanza; nella prima iterazione la circonferanza passa per la coppia di punti vicini al nodo, ad ogni successiva iterazione si aggiunge il punto più vicino ai precedenti.
 - Per ogni interpolazione è stimato l'errore quadratico medio $RMSE$;
 - Il ciclo termina quando l' $RMSE$ supera la tolleranza impostata; in output sono date le coordinate planimetriche dei centri delle circonferenze e i raggi.
2. Per i punti appartenenti al tratto in rettilineo $P(s,k) \notin C$:

- Il processo è analogo al precedente, l'unica differenza risiede nel modello matematico utilizzato per l'interpolazione; i punti sono interpolati ai minimi quadrati con una retta.

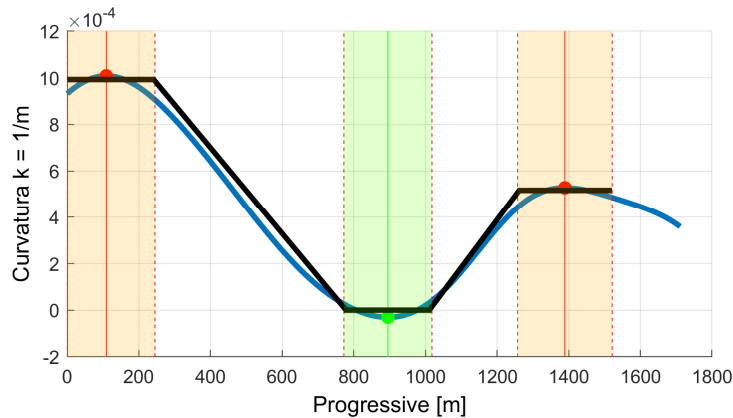


Figura 6.31 – Stima del Diagramma delle Curvature.

La figura 6.31 mostra un esempio della stima del diagramma di curvatura (linea nera) a partire dalla curvatura calcolata (curva in blu). Le fasce evidenziano le zone individuate dai processi iterativi; in rosso sono indicate le zone dove il tracciato si sviluppa secondo una curva circolare, in verde la zona che si sviluppa secondo un rettilineo. La tolleranza è stata assegnata pari a $t_{RMSE} = \pm 10\text{cm}$, dato che la polilinea di asse è stata ricavata dalla segnaletica orizzontale di asse, la quale è larga 20cm. Praticamente si è assunto che lo scarto dimensionale massimo ammissibile deve essere contenuto nella fascia della segnaletica orizzontale centrale.

La caratterizzazione dell'andamento altimetrico dell'asse si basa sulla stessa metodologia applicata per quello planimetrico. La differenza fondamentale è che sono utilizzati solo raccordi parabolici tra i differenti tratti rettilinei. I raccordi verticali sono detti convessi se presentano la concavità verso il basso (dossi), al contrario, se presentano la concavità verso l'alto sono detti concavi (sacche).

A partire dal diagramma delle curvature, sono stimati prima i tratti rettilinei con la metodologia appena esposta, successivamente i tratti rimanenti sono interpolati ai minimi quadrati con una funzione parabolica:

$$y = ax^2 + bx + c$$

Dove a , b e c sono i coefficienti stimati ai minimi quadrati.

6.4.2 Stima delle Pendenze Trasversali

La variazione di pendenza trasversale comporta una rotazione della carreggiata o parte di essa intorno a un asse, il quale generalmente non coincide con l'asse centrale materializzato dalla segnaletica orizzontale. Per individuare i diversi tratti a pendenza costante e costituenti la generica sezione trasversale, si è utilizzato un processo che si basa sul metodo RANSAC. Il modello matematico di cui sono stimati i parametri è rappresentato da una retta; l'intersezione tra le rette, individuate nella sezione trasversale, determina il punto che appartiene all'asse di rotazione.

Il metodo è descritto nel seguente iter:

- Dalla matrice tridimensionale $D \in \mathbb{R}^{n,c,3}$ è estratta la matrice che contiene i valori di elevazione $h \in \mathbb{R}^{n,c}$, figura 6.27 del §6.3.1;
- La generica sezione trasversale è rappresentata nel piano cartesiano; in ordinata sono riportate le elevazioni, in ascissa sono riportate le distanze parziali L_i , come mostrato nella figura 6.28 del §6.3.2.

Successivamente si realizza un ciclo di *While* che termina quando il vettore di *outliers* contiene un numero di punti insufficiente per la stima del modello matematico; il blocco di istruzioni si basa sulle seguenti condizioni:

- Si applica il metodo RANSAC a tutti i punti del profilo, dopo un numero N di iterazioni prestabilito si ottiene il vettore degli outlier $Ol \not\subseteq S_{IN}$ (figura 6.32(a));
- Si calcola la distanza tra gli outlier individuati $Ol \not\subseteq S_{IN}$ per isolare solo i punti raggruppati $Ol_r \subseteq Ol$; i punti isolati sono tutti quelli che sono distanti dagli altri di un valore maggiore due volte it ;
- Si applica nuovamente il metodo RANSAC per i soli punti raggruppati $Ol_r \subseteq Ol$, (figura 6.32(b));
- Il ciclo termina quando non esiste un numero sufficiente di punti necessario per la stima del modello matematico; teoricamente è 2

ma praticamente è fissato un valore tale da escludere un tratto inferiore a una certa lunghezza, ad esempio 50cm.

Per ogni blocco di istruzioni si ottengono i parametri della retta q e gli *inliers* $In \subseteq S_{IN}$. Le coordinate nel piano cartesiano dei punti di intersezione delle rette sono stimati mediante la funzione *polyxply*. Il punto individuato apparterrà all'asse di rotazione (figura 6.32(c)).

Nella figura 6.32 è riportato uno schema che raffigura il processo appena esposto.

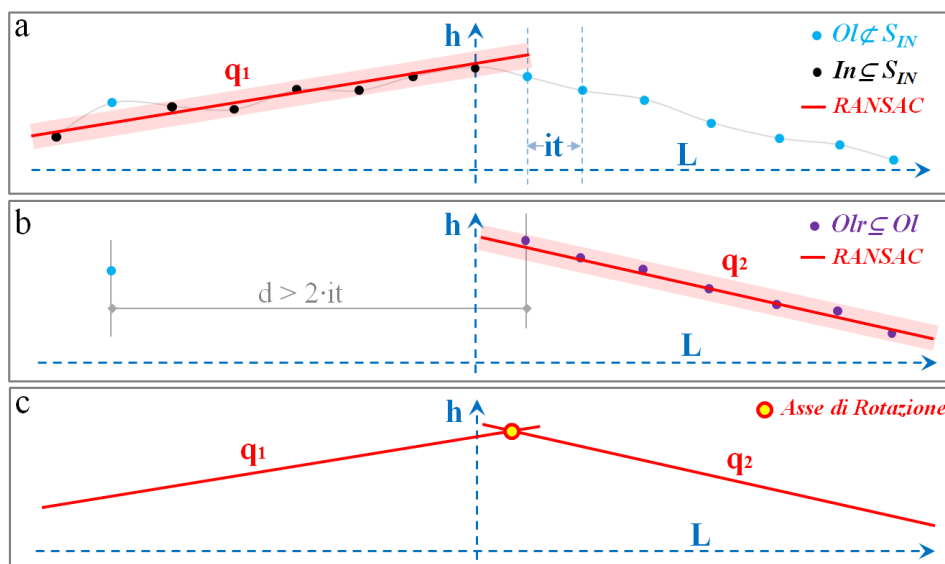


Figura 6.32 – Individuazione dei tratti a pendenza costante: a) RANSAC applicato a tutti i punti del profilo trasversale; b) RANSAC applicato agli outlier raggruppati $Ol_r \subseteq Ol$; c) Individuazione del punto appartenente all'asse di rotazione.

Le equazioni delle rette sono ricavate in forma implicita, ovvero:

$$ax + by + c = 0$$

I coefficienti a , b e c sono stimati tramite il metodo RANSAC. Le pendenze sono ricavate tramite il coefficiente angolare m deducibile dall'equazione della retta in forma esplicita:

$$q = mx + q_0$$

Dall'equazione in forma implicita, il coefficiente angolare è ricavato dalla seguente relazione:

$$m = -\frac{a}{b}$$

La pendenza è espressa in percentuale del valore assoluto del coefficiente angolare m .

6.4.3 Applicazione in ambito extraurbano

L'area test in oggetto comprende una tratta della nota strada statale Umbro-Laziale; è costituita da carreggiate separate, ognuna con due corsie per senso di marcia. La tratta misurata si estende per circa 2km, dal km 34+550 al km 36+263, ogni corsia è larga 3,50m.

La misura è stata effettuata con un *Lynx SG*; un LSM della casa costruttrice *Teledyne*, le caratteristiche principali dei sensori sono riportate nel §4.2.1. Il sistema LSM è costituito da due scanner laser inclinati di 35°, ognuno con un campo visivo di 360° (configurazione "Butterfly"). Il sistema di riferimento adottato è ETRF00. Nella tabella 6.2 sono riportate le caratteristiche principali della misura e della nuvola di punti ottenuta.

Frequenza di acquisizione	600kHz (1,2x10 ⁶ Punti/sec)
Velocità media di acquisizione	65km/h
Densità media su pavimentazione	1400 punti/m ²
Distanza media linee di scansione	4,00cm
Numero di punti	80·10 ⁶

Tabella 6.2 – Caratteristiche rilievo.

In figura 6.33 è riportato uno stralcio della mappa di densità superficiale (n° punti/m²) della nuvola di punti; sull'intera carreggiata la densità è pressoché costante.

La nuvola di punti è stata sottoposta al processo di estrazione della carreggiata e della segnaletica orizzontale, con i metodi introdotti nei §6.1 e §6.2.

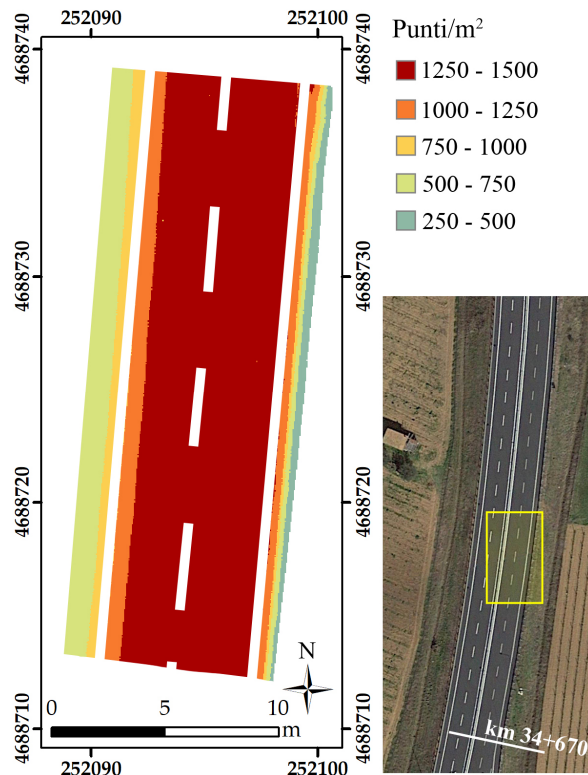


Figura 6.33 – Stralcio della mappa di Densità Superficiale della carreggiata.

L'estrazione del *DEMc* (§6.3.1) è stata effettuata con i seguenti parametri:

- Interasse Longitudinale $il = 10\text{cm}$;
- Interasse Trasversale $it = 10\text{cm}$;
- Raggio di ricerca interpolatore $r = 7\text{cm}$;

La risoluzione della griglia è legata, in questo caso, ad un concetto puramente cartografico; dovrà essere compresa all'interno di un intervallo di valori funzione di due parametri [103]:

- *Errore di graficismo*; è l'errore che si commette nel tracciare una linea con un segno grafico più sottile possibile, è tollerato un errore pari ad un quinto di millimetro (0,2mm);

- *Minima Delineazione Leggibile* (MLD); è funzione della scala di rappresentazione $1/SN$, rappresenta l'area più piccola che viene mappata:

$$MLD = SN^2 \cdot 0,000025$$

La risoluzione della griglia ρ , quindi, dovrà essere contenuta all'interno dell'intervallo:

$$SN \cdot 0,00025 \leq \rho \leq \frac{\sqrt{SN^2 \cdot 0,000025}}{2} = SN \cdot 0,0025$$

Il limite inferiore è dettato dall'errore di graficismo, il limite superiore, invece, è dettato dal valore dell'MLD; entrambi i valori sono funzione della scala di rappresentazione.

Per le sezioni tipo della sagoma stradale e della sovrastruttura si utilizza una scala $1/SN = 1:100$, per la planimetria di tracciamento, invece, si utilizza generalmente una scala $1/SN = 1:1000$. Utilizzando la scala di maggior dettaglio ($1/SN = 1:100$) si ottiene:

$$2,5cm \leq \rho \leq 25cm$$

Tenuto conto che la distanza media tra le linee di scansione è pari a 4cm, il limite inferiore è congruente anche con la relazione che lega le dimensioni della griglia con la distanza media delle linee di scansione:

$$\rho \geq \frac{\bar{d}_{i,j}}{2} \quad \text{con } \bar{d}_{i,j} \text{ distanza media tra linee di scansione}$$

Ovvero, la dimensione della griglia ρ deve essere maggiore della metà della distanza media tra due linee di scansioni contigue. In definitiva, si è scelta una risoluzione della griglia pari a 10cm, sia longitudinalmente che trasversalmente; questo valore risulta congruente anche adottando una scala della rappresentazione $1/SN = 1:50$.

Analizzando, invece, la relazione che lega la densità del dato alla risoluzione della griglia, se la distribuzione di punti è regolare, la risoluzione minima ρ può essere stimata con la seguente relazione:

$$\rho = 0,5 \cdot \sqrt{\frac{1m^2}{D}} \cong 1,5cm$$

Dove D è il numero di punti stimato in $1m^2$; nel nostro caso, in corrispondenza della carreggiata, il valore resta costante intorno ai

1500punti/m² (figura 6.33). È chiaro che da un punto di vista applicativo questa risoluzione così spinta non è necessaria, dato che si sta analizzando la sola geometria plano/altimetrica.

Il raggio di ricerca per l'interpolazione è stato assunto pari a:

$$r = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \rho \cong 7cm$$

In questo modo vengono inglobati tutti i punti contenuti all'interno della magia di dimensioni (*it·il*). La sovrapposizione delle sfere di ricerca è pari a:

$$\rho \cdot (\sqrt{2} - 1) \cong 4cm$$

Il processo di interpolazione spaziale è necessario per attribuire i valori di elevazione ad ogni singolo nodo della griglia planimetrica costruita come nel §6.3.1. In particolare, si utilizzano metodi di interpolazione locale, i quali stimano il valore di elevazione a partire dai punti contenuti all'interno della circonferenza di raggio r , con centro nel nodo interessato. Una delle principali motivazioni è dettata dalla Legge di Tobler il quale enuncia che “*Everything is related to everything else, but near things are more related than distant things*”, ovvero, tutto è correlato, ma gli oggetti vicini sono più correlati degli oggetti lontani.

Esistono differenti tipi di interpolatori, ognuno adatto per condizioni differenti; tra i più noti e implementati nel processo della creazione del DEMc ci sono:

- *Inverse Distance to a Power* : pesa il contributo di ciascun punto in funzione della sua distanza; il peso è l'inverso della distanza elevata della quantità k . L'elevazione dell' i -esimo nodo è data dalla relazione:

$$h_{NODO_i} = \frac{\sum_{j=1}^{nr} h_j(E_{pj}, N_{pj}) \cdot d^{-k}}{\sum_{j=1}^{nr} d^{-k}}$$

con $j=1, \dots, nr$ n° di nodi contenuti nella sfera di raggio r

- *Local Polynomial*: consiste nell'approssimare i dati con un polinomio o una superficie polinomiale, il polinomio può essere di grado n ; per $n=1$ si ha una retta/piano, per $n=2$, invece, una parabola/superficie parabolica:

$$n=2 \Rightarrow h_{NODO_i} = a_{00} + a_{10} \cdot E_{pj} + a_{01} \cdot N_{pj} + a_{11} \cdot E_{pj} \cdot N_{pj} + a_{20} \cdot E_{pj}^2 + a_{02} \cdot N_{pj}^2$$

con $a_{n,m}$ coefficienti polinomiali

- *Moving average*: Il valore è stimato a partire dalla media dei valori nell'intorno del nodo:

$$h_{NODO_i} = \frac{1}{nr} \sum_{j=1}^n h_j(E_{pj}, N_{pj})$$

- *Kriging*: il parametro che si intende interpolare è trattato come una variabile regionale; tra i dati vicini esiste una certa correlazione spaziale, al contrario, tra punti distanti esiste una indipendenza statistica.
- *Nearest Neighbour*: assegna ad ogni nodo il valore del punto campionato più vicino; si basa sulla tassellazione mediante la quale vengono tracciate delle regioni a valori di elevazione costanti.

Per valutare la tipologia di interpolatore da utilizzare, sono stati calcolati e confrontati i residui ottenuti dai processi di interpolazione implementati (tabella 6.3). Le analisi sono state effettuate sullo stralcio riportato in figura 6.33, scelto in modo tale che presentasse condizioni di irregolarità pronunciate; l'IDW è stato calcolato con valori di k compresi da 1 a 3.

[mm]	IDW k=1	IDW k=2	IDW k=3	Kriging	Nearest Neighbor	Local Polynomial n=2	Moving Average
Minimo	-2.77	-2.29	-2.19	-1.99	-4.58	-26.77	-3.84
Massimo	3.54	2.37	1.97	1.82	4.59	24.98	4.31
Media	-0.03	-0.01	-0.01	-0.01	-0.02	0.06	-0.05
Deviazione Standard	0.81	0.51	0.48	0.40	0.98	2.52	1.14

Tabella 6.3 – Statistica dei Residui.

La figura 6.34 mostra graficamente l'andamento delle quantità calcolate.

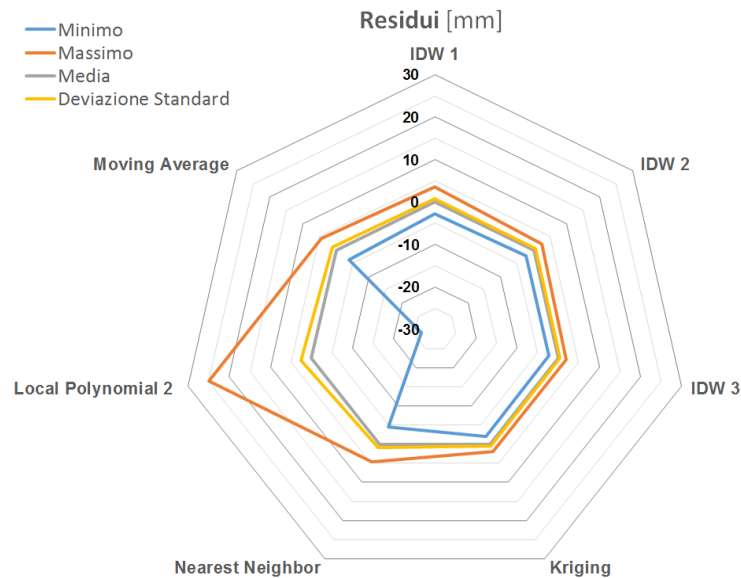


Figura 6.34 – Statistica dei Residui.

I residui sono comparabili con l'accuratezza massima raggiungibile dal sensore di acquisizione (tabella 6.3); in particolare l'IDW², l'IDW³ e il Kriging sono quelli che meglio si adattano alla configurazione dei dati.

L'interpolazione polinomiale è quella che da risultati peggiori (figura 6.34 e tabella 6.3), questo perché la funzione parabolica risulta troppo rigida rispetto all'andamento dei dati di input; la scelta di $n=2$ è motivata dal fatto che nell'utilizzare polinomi con un ordine più alto si rischia un eccessivo adattamento della funzione e la formazione di cuspidi.

La media mobile, invece, è fortemente influenzata dalle dimensioni della sfera di ricerca; finestre troppo grandi riducono eccessivamente le alte frequenze (*smoothing*).

L'interpolatore scelto è l'IDW² dato che è ideale per dati aventi una configurazione isotropa e superfici caratterizzate da un andamento regolare rispetto ad un terreno. La scelta del $k=2$ è motivata dal fatto che maggiore è il valore della potenza e minore è il peso dei punti più lontani dal nodo. L'IDW si comporta come un interpolatore esatto [104].

Inoltre, è molto più leggero da un punto di vista computazionale rispetto al Kriging; si abbattano notevolmente i tempi di elaborazione ottenendo risultati, in questo caso, praticamente equivalenti (tabella 6.3). Il Kriging

è uno stimatore molto più robusto e preciso ma necessita la rimozione dei trend e la scelta di una funzione di covarianza, oltre al fatto che è molto pesante da un punto di vista computazionale.

Lo studio della geometria Planimetrica e Altimetrica è stata effettuata secondo la metodologia proposta nel §6.4.1, assegnando una tolleranza pari al passo del grigliato, ovvero, $t_{RMSE} = \pm 10\text{cm}$.

In figura 6.35a è riportato uno schema della planimetria di asse suddivisa secondo le differenti configurazioni geometriche individuate, inoltre è riportato il profilo longitudinale figura 6.35b e il diagramma delle curvature figura 6.35c, entrambi relativi all'asse.

Data la lunghezza modesta della tratta analizzata (circa 1,7km), nel profilo longitudinale non è stato possibile individuare elementi di raccordo parabolici; il processo automatizzato ha individuato un unico tratto rettilineo a pendenza costante.

Il processo introdotto nel §6.4.2 prevede la caratterizzazione di tutte le sezioni trasversali costituenti il DEMc. In figura 6.36 è riportato uno schema contenente le sezioni trasversali estratte in corrispondenza delle tratte a curvatura costante. In corrispondenza del rettifilo è possibile osservare la presenza di una pendenza non sufficiente al corretto smaltimento delle acque meteoriche; nelle curve a raggio costante, invece, le pendenze sono tali da permettere l'allontanamento delle acque. Per le sezioni riportate l'asse di rotazione è esterno alla carreggiata.

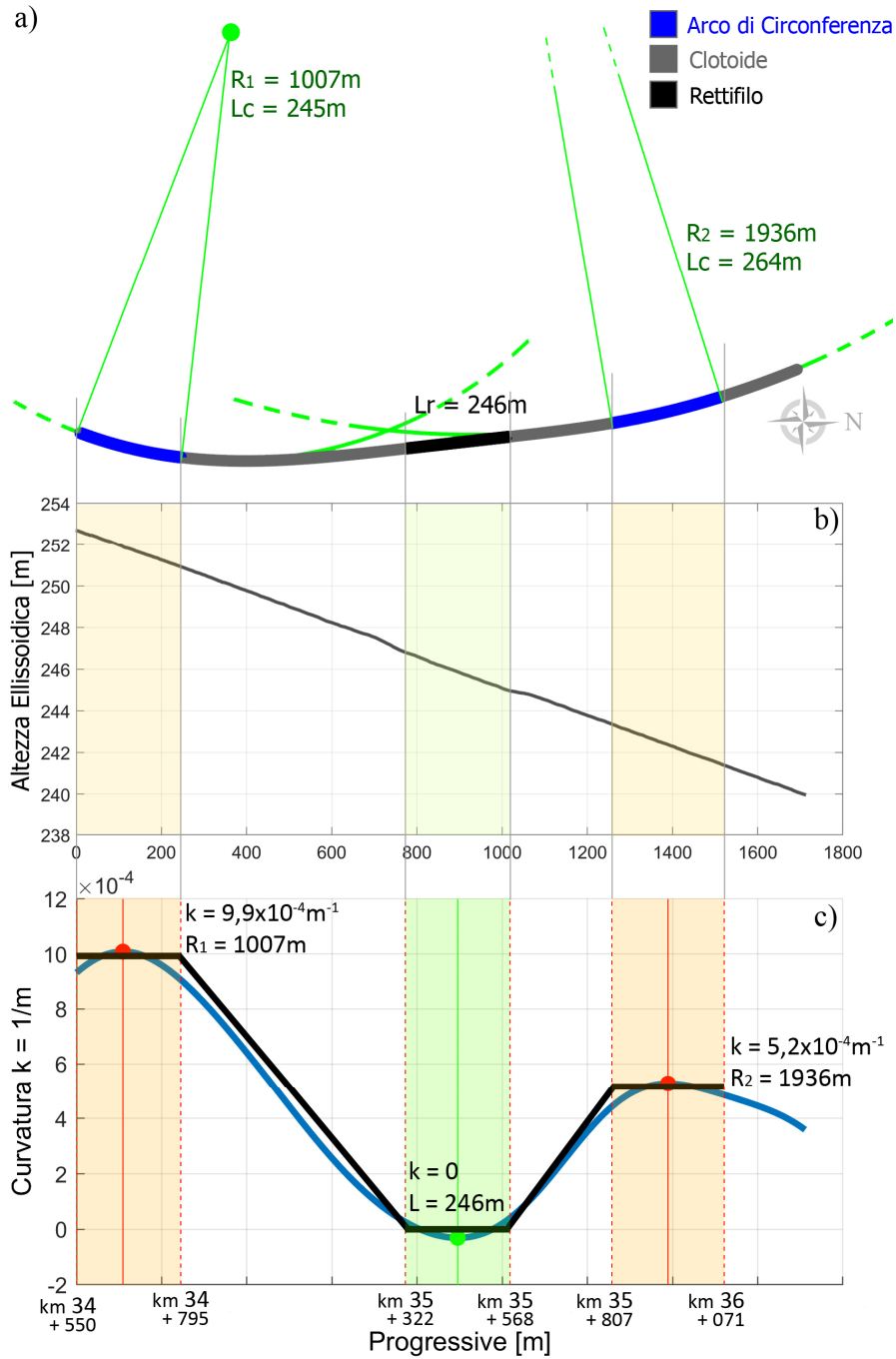
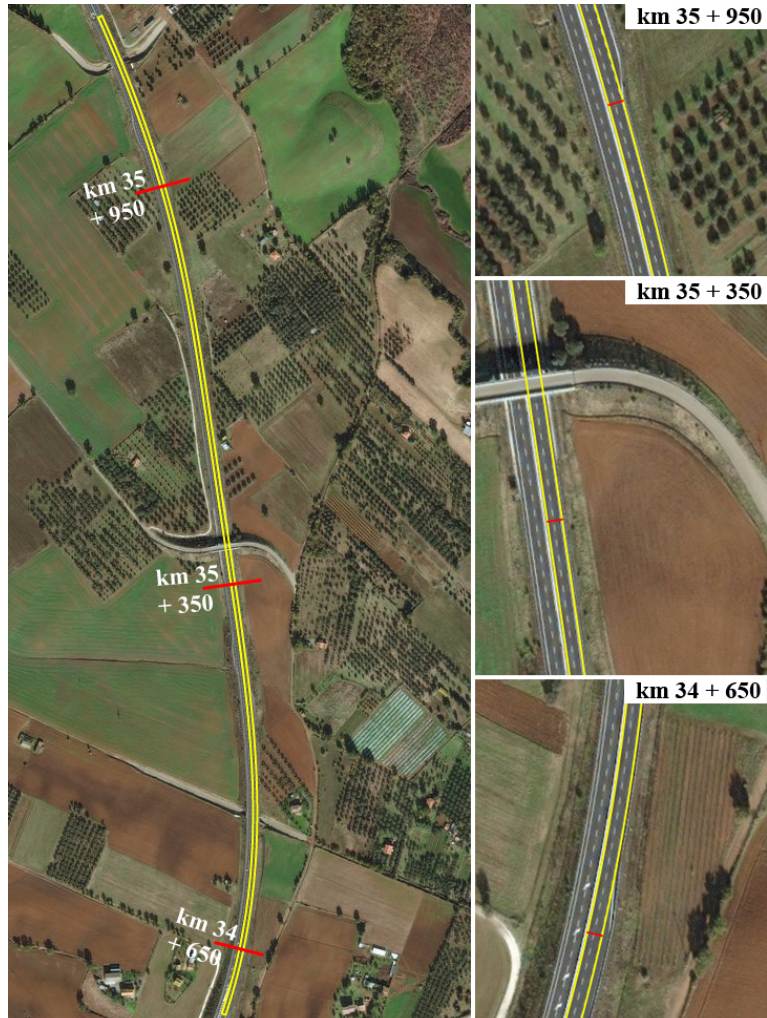


Figura 6.35 – Andamento Plano-Altmetrico; a) Planimetria; b) Profilo Altmetrico; c) Diagramma delle curvature.



Sezioni

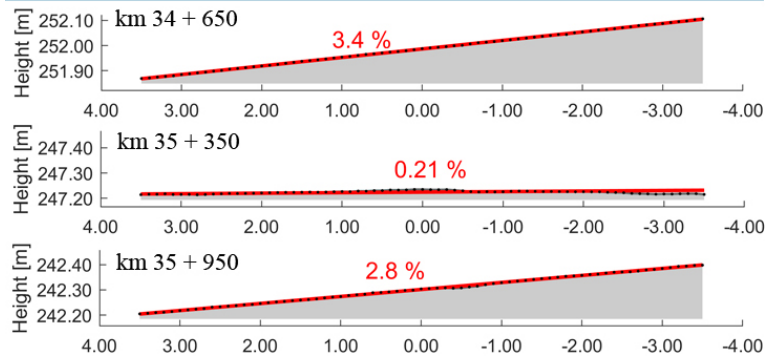


Figura 6.36 – Sezioni Trasversali e Pendenze.

7 Valutazione della Regolarità Superficiale

L'importanza della valutazione della regolarità della superficie stradale è stata già trattata nei capitoli precedenti, in particolare nel secondo capitolo, insieme alle criticità delle tecniche tradizionali standardizzate, discusse nel terzo capitolo.

In questo capitolo si valutano le problematiche inerenti la stima delle irregolarità della superficie stradale rilevata con la tecnica di scansione laser. Si descrivono alcune metodologie di elaborazione specifiche applicate su alcune aree test che mirano principalmente ad una ottimizzazione dell'estrazione delle caratteristiche intrinseche: la regolarità longitudinale e trasversale, la valutazione dei degradi superficiali e la stima indiretta dell'aderenza e della percezione del confort tramite simulazione "*Full Car*".

Le metodologie studiate per l'estrazione del modello digitale di elevazione dedicato (DEMc), insieme all'estrazione della carreggiata e della segnaletica orizzontale, sono applicate a differenti casi studio. Inoltre, a seconda delle finalità, si evidenziano gli aspetti principali e i parametri da adottare per la modellazione della superficie stradale.

Di particolare interesse risulta la valutazione della regolarità con la tecnica LSM; uno degli obiettivi è valutare la sensibilità e l'incidenza della velocità di percorrenza del mezzo mobile sulla stima della regolarità in modo tale da stabilire intervalli congruenti e specifici per i diversi tipi di applicazioni.

Sarà affrontata anche la problematica del *faulting* su pavimentazioni in calcestruzzo in ambito aeroportuale; in questo caso l'obiettivo mira a fornire informazioni di ausilio alle tecniche tradizionali, con lo scopo di minimizzare le interferenze con l'esercizio della sovrastruttura.

7.1 Regolarità Longitudinale

I criteri sulla stima del confort di guida e sulla sicurezza delle utenze mirano prevalentemente alla caratterizzazione della regolarità longitudinale, nella direzione del flusso veicolare. La regolarità è stimata a partire dai profili longitudinali i quali possono discostarsi o meno da

condizioni geometriche ideali. Un profilo ideale è rappresentato da un andamento rettilineo; gli scostamenti dalla configurazione ideale possono essere valutati sia geometricamente, mediante l'analisi delle variazioni di elevazione rispetto alla condizione ideale, che in modo dinamico, mediante l'analisi degli effetti dinamici dovuti alle variazioni di elevazione. Nello specifico, in questo studio gli algoritmi implementati in ambiente *Matlab* analizzano direttamente il modello DEMc creato ad hoc per estendere le analisi sull'intera superficie pavimentata.

7.1.1 Algoritmo ASTM IRI

In questo paragrafo viene fornito un approfondimento sulla metodologia di calcolo dell'*International Roughness Index (IRI)* introdotta da Sayers [105] e sul codice implementato in linguaggio *FORTRAN* introdotto dallo standard ASTM E1926 [106], tradotto e modificato in linguaggio *Matlab*, per adattarlo al modello superficiale generato.

Il modello *Quarter-Car* è rappresentato da un sistema di quattro equazioni differenziali del primo ordine, in forma matriciale risulta:

$$\dot{x} = Ax + Bh_{ps}$$

Il vettore x contiene gli spostamenti verticali e le velocità delle masse costituenti il modello meccanico. La matrice A e il vettore B contengono i parametri meccanici della *Golden Car*:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -k_2 & -c & k_2 & c \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \frac{k_2}{\mu} & \frac{c}{\mu} & -\frac{k_1}{k_2} & -\frac{c}{\mu} \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{k_1}{\mu} \end{bmatrix} \quad x = \begin{bmatrix} x_s \\ \dot{x}_s \\ x_u \\ \dot{x}_u \end{bmatrix}$$

I pedici s e u rappresentano rispettivamente la massa sospesa (*Sprung mass*) e la massa non sospesa (*Unsprung mass*). Gli elementi della matrice A e B sono i parametri meccanici della *Golden Car* normalizzati rispetto alla massa sospesa m_s :

$$c = \frac{c_s}{m_s} = 6 \quad k_1 = \frac{k_1}{m_s} = 653 \quad k_2 = \frac{k_s}{m_s} = 63,3 \quad \mu = \frac{m_u}{m_s} = 0,15$$

Il sistema di ammortizzazione è schematizzato tramite l'ausilio di una molla, con una rigidità pari a k_s , e di uno smorzatore viscoso, con una

costante viscosa pari a c_s , disposti in parallelo. Lo pneumatico è rappresentato anch'esso da una molla con una rigidità pari a ks , la massa del *quarter-car* è pari a m_s e la massa del sistema sospensioni/pneumatico è pari a m_u .

Secondo Sayers [105], per il generico punto i appartenente al profilo longitudinale, la risposta totale del modello è data dalla somma di una risposta libera (soluzione omogenea) al punto precedente $i-1$ con una risposta forzata (soluzione particolare) riferita alla pendenza tra il punto i ed il punto $i-1$.

Ipotizzando che l'input del sistema sia costante, la soluzione in forma chiusa è data dalla seguente relazione:

$$x_i = e^{A\Delta/V} x_{i-1} + A^{-1}(e^{A\Delta/V} - I)Bu$$

dove:

- Δ è l'intervallo di campionamento del profilo longitudinale (il);
- V è la velocità di simulazione del modello *Quarter Car* (80km/h);
- I è la matrice di identità $I \in \mathbb{R}^{4,4}$;
- u è la pendenza dell'intervallo $i-1$ e i .

La matrice dello stato di transizione $e^{A\Delta/V} \in \mathbb{R}^{4,4}$ definisce la risposta libera come la combinazione lineare delle quattro variabili contenute nel vettore x ai punti $i-1$. La risposta forzata, invece, è rappresentata dalla matrice $A^{-1}(e^{A\Delta/V} - I)B \in \mathbb{R}^{4,1}$, funzione lineare di u .

La quantità $e^{A\Delta/V}$ può essere risolta mediante uno sviluppo in serie di Taylor:

$$e^{A\Delta/V} = I + \sum_{i=1}^N \frac{A^i (\Delta V)^i}{i!}$$

Nella risposta del modello *Quarter Car* esistono errori derivati dalla necessaria fase di inizializzazione; per la risoluzione delle equazioni differenziali bisogna conoscere le variabili di stato nell'istante iniziale. Considerando la velocità di simulazione pari a 80km/h, l'incidenza dell'errore è solo per i primi 20m circa. Per ridurre l'effetto di inizializzazione, le posizioni iniziali delle masse (x_s e x_u) dovrebbero assumere un valore pari alla quota del profilo stimata alla distanza percorsa dopo 0,5s (circa 11m). Per le stesse grandezze derivate rispetto

al tempo (\dot{x}_s e \dot{x}_u) si dovrebbe considerare la pendenza media del profilo stimata alla stessa distanza, cioè dopo 0,5s [105].

Il profilo longitudinale e le condizioni iniziali sono introdotte in termini di pendenza, infatti il termine h_{ps} contenuto nell'equazione differenziale $\dot{x} = Ax + Bh_{ps}$ rappresenta il vettore $h_{ps} \in \mathbb{R}^{n-k,1}$ (con $n=1, \dots, n^\circ$ di punti del profilo) contenente le pendenze di ogni singolo tratto e calcolate nell'intervallo $k \cdot \Delta$:

$$h_{ps,i} = \frac{h_{p,i+k} - h_{p,i}}{k\Delta}$$

dove:

- k è una costante funzione del filtro a media mobile;
- Δ è l'intervallo di campionamento del profilo longitudinale (il);
- h_p è il vettore contenente i valori di elevazione del profilo $h_{ps} \in \mathbb{R}^{n,1}$

La costante k è determinata con la seguente espressione:

$$k = \max\left(\text{int}\left(\frac{L_B}{\Delta} + 0,5\right); 1\right)$$

La pendenza di ogni tratto, compreso tra l' i -esimo punto e il successivo, è determinata su una distanza ottenuta dal prodotto dell'intervallo di campionamento del profilo Δ e k . L_B rappresenta la base del filtro a media mobile, che viene utilizzato per simulare l'impronta dello pneumatico e per ridurre l'influenza del passo di campionamento; la base del filtro è pari a $L_B=250\text{mm}$, che coincide proprio con il diametro dell'impronta di uno pneumatico di dimensioni standard.

Le condizioni iniziali, dunque, sono impostate in termini di pendenza e in corrispondenza della distanza percorsa dopo 0,5s; l'indice riga di tale distanza è determinato come:

$$i_{11} = \min\left(\text{int}\left(\frac{L_B}{\Delta} + 0,5\right); n_{smp}\right)$$

n_{smp} è il numero di elementi del vettore $h_{ps} \in \mathbb{R}^{n,1}$.

Noto l'indice di riga, contenente il valore di elevazione a una distanza di circa 11m, si determina la pendenza da imporre alle masse (m_u e m_s), alla condizione iniziale $t=0s$:

$$x_{u0} = x_{s0} = \frac{h_{p,i_{11}} - h_{p,1}}{i_{11}\Delta}$$

Sayers [105] suggerisce di imporre le velocità \dot{x}_s e \dot{x}_u pari a zero nelle condizioni iniziali; pertanto, il vettore x , nella condizione iniziale, acquista la seguente configurazione:

$$x_0 = \begin{bmatrix} \frac{h_{p,i_{11}} - h_{p,i_1}}{i_{11}\Delta} \\ 0 \\ \frac{h_{p,i_{11}} - h_{p,i_1}}{i_{11}\Delta} \\ 0 \end{bmatrix}$$

Il codice implementato nel linguaggio *FORTRAN* suggerisce di convertire il profilo di elevazione tramite la variabile principale denominata *UNITSC*; questa è determinata come il prodotto tra l'unità di misura scelta per l'output (ad esempio m/km) e il rapporto tra l'unità di misura delle elevazioni del profilo e i valori di elevazione:

$$UNITSC = \left(\frac{m}{profileHeight} \right) \left(\frac{1000m}{1km} \right)$$

Successivamente, il vettore contenente le pendenze è determinato come segue:

$$h_{ps,i} = \left(\frac{UNITSC}{k\Delta} \right) (h_{p,1+k} - h_{p,i})$$

h_{ps} rappresenta, quindi, la pendenza del profilo filtrato con il filtro a media mobile. L'applicazione del filtro a media mobile e la conversione del profilo di elevazione in un profilo di pendenza, riducono il numero di elementi del vettore $h_{ps} \in \mathbb{R}^{n-k,1}$ di una quantità pari a:

$$n_{samp} = n_{samp} - k$$

In definitiva, impostate le condizioni iniziali dell'equazione differenziale, è possibile calcolare il valore dell'IRI con la seguente relazione:

$$IRI = \frac{\sum_{i=1}^{n_{samp}} |x_{u_i} - x_{s_i}|}{n_{samp}}$$

7.1.2 Deviazione Standard σ dei valori di elevazione

Un approccio per la stima della regolarità longitudinale che prescinde dalla dinamica del veicolo è condotta tramite il calcolo dell'indice σ [31]. La deviazione standard σ dei valori di elevazione è determinata rispetto ad una retta che simula un'asta rigida "Straightedge" avente una lunghezza standardizzata che va dai 3m ai 5m, chiamata base L_b [12].

Dato un generico profilo longitudinale discreto e caratterizzato da n valori di elevazione h , la differenza di elevazione d_i nell' i -esimo punto h_i , rispetto alla retta di riferimento, è determinata secondo la relazione:

$$d_i = h_i - \frac{(h_{i-k} + h_{i+k})}{2}$$

I valori di elevazione h_{i-k} e h_{i+k} , per i quali passa la retta di riferimento, sono distanti di un valore pari alla base L_b scelta. L'indice k è determinato secondo la relazione:

$$k = i + \frac{\left(\frac{L_b}{2}\right)}{\Delta}$$

dove Δ è l'intervallo di campionamento (il) e i è l'indice dell' i -esimo punto di elevazione h_i in corrispondenza del quale si sta calcolando la distanza d_i . Nella figura 7.2 è riportato lo schema grafico della configurazione esposta.

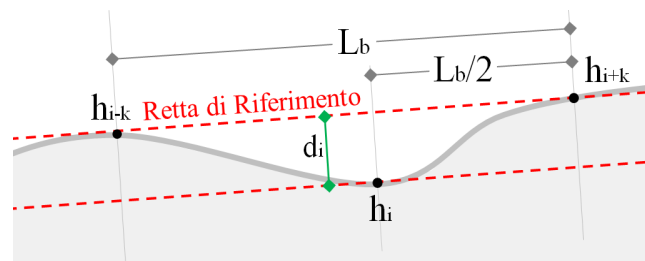


Figura 7.2 – Calcolo della distanza d_i .

L'indice di regolarità σ è espresso in millimetri ed è stimato con la seguente relazione:

$$\sigma = \sqrt{\frac{n \sum d_i^2 - (\sum d_i)^2}{n(n-1)}}$$

Generalmente l'indice σ è stimato su tratte che vanno da un minimo di 100m ad un massimo di 150m [31]. È chiaro che utilizzando intervalli di calcolo inferiori ai 100m si evidenziano anche le irregolarità localizzate.

La lunghezza della base L_b è una variabile importante; alcuni studi dimostrano come lunghezze comprese tra 1m e 3,5m producano valori di σ tali da avere una alta correlazione con l'indice IRI ($R^2=0,96$) [31].

7.1.3 Valutazione del Confort di Guida

Gli effetti delle vibrazioni differiscono per ogni singolo soggetto e possono provocare condizioni di malessere, influenzando le capacità prestazionali degli utenti e risultare un rischio per la salute e la sicurezza [20]. Le vibrazioni sono oscillazioni meccaniche; i rischi connessi dipendono principalmente dalla frequenza, dalla direzione di propagazione e dal tempo di esposizione. Lo studio incentrato sulle vibrazioni relative all'intero corpo umano è noto anche come *Whole Body Vibration*.

In funzione della frequenza, la risposta del corpo umana è differente; vibrazioni a bassa frequenza incidono meno sul benessere dell'utente dato che il corpo risponde in maniera uniforme tramite la muscolatura che riesce a contrastare le sollecitazioni indotte. Con frequenze elevate, invece, il corpo umano risponde in maniera disuniforme; l'apparato muscolare non riesce a contrastare completamente le sollecitazioni indotte da un movimento oscillatorio più rapido, per cui il moto si smorza all'interno del corpo e in particolari zone nelle quali possono sorgere dei problemi di salute con esposizioni elevate nel tempo. Particolare importanza acquista la frequenza di risonanza; se la forzante esterna ha una frequenza coincidente con quella del sistema sollecitato si instaura una condizione di risonanza, la quale produce un'amplificazione dell'ampiezza del modo vibratorio. Frequenze tra i 3Hz e i 15Hz possono instaurare fenomeni di risonanza nella colonna vertebrale, comportando lesioni all'apparato muscolo-scheletrico. Dolori al torace sono prodotti da gamme di frequenze che vanno dai 4Hz ai 10Hz, dolori alla schiena sorgono intorno ai 12 Hz. Affaticamento dell'apparato visivo, dolori cervicali e irritazioni della vescica sono associati a frequenze comprese tra i 10Hz e i 20Hz. La maggior parte degli utenti seduti percepiscono vibrazioni indesiderate al basso addome intorno ai 2Hz, che si spostano verso la parte superiore dell'addome per frequenze superiori ai 4Hz [107].

Nella stima delle vibrazioni il parametro significativo è l'accelerazione verticale; la norma UNI ISO 2631-1 [23] "Vibrazioni meccaniche e urti – Valutazione dell'esposizione dell'uomo alle vibrazioni trasmesse al corpo intero - Parte 1: Requisiti generali" specifica che la misura dell'accelerazione trasmessa deve essere ponderata in frequenza, dato che esistono differenti risposte e sensibilità alle varie frequenze e nelle differenti zone del corpo. In particolare, definisce dei metodi per stimare le vibrazioni che possono influire sul benessere degli utenti e l'incidenza del male dei trasporti. L'accelerazione quadratica media ponderata in frequenza a_{wz} è determinata a partire dall'accelerazione verticale nel dominio del tempo, l'iter è riassunto nei seguenti punti:

1. Determinazione dell'accelerazione quadratica media a_{iz}^{RMS} mediante la densità spettrale di potenza, in bande di 1/3 di ottava.
2. L'accelerazione a_{iz}^{RMS} è moltiplicata al relativo peso W_k corrispondente alle diverse bande di frequenza. Il peso W_k è il cosiddetto filtro di ponderazione; riguardo al confort e relativo all'asse z è denominato W_k , per il "male dei trasporti" è denominato W_f .
3. Si calcola, infine, l'accelerazione quadratica media ponderata in frequenza a_{wz} :

$$a_{wz} = \left[\sum W_{k,i} \cdot a_{iz}^{RMS} \right]^2$$

Nella tabella 7.1 sono riportati le soglie dei valori di accelerazione a_{wz} proposti dalla ISO 2631-1 relativi al male dei trasporti.

a_{wz} [m/s ²]	Livello di Confort
< 0,315	Comodo
0,315 – 0,63	Leggermente Scomodo
0,50 – 1,00	Abbastanza Scomodo
0,80 – 1,60	Scomodo
1,25 – 2,50	Molto Scomodo
> 2,00	Estremamente Scomodo

Tabella 7.1 – Livello di Confort [23].

7.1.4 Confronto tra LST e LSM

La sperimentazione è stata effettuata sull'area test della tratta urbana introdotta nel §6.1.3 (*Area Test I*). La misura è stata effettuata con un LST statico e con un LSM, in modo da analizzarne le prestazioni e confrontare i risultati. La regolarità è stata stimata sulle superfici generate mediante il calcolo dell'IRI, la stima del confort di marcia, invece, mediante simulazione dinamica "*Full Car*"; nel caso del LSM la stima della regolarità e del confort è avvenuta sui *DEMc* estratti dalle nuvole di punti acquisite a differenti velocità, così da valutare le differenze rispetto alla superficie LST, più accurata.

La misura con LST è stata fatta con un ILRIS 3₆D della casa costruttrice *Teledyne Optech* (figura 7.3a). Lo strumento utilizzato si basa sul principio di funzionamento "a tempo di volo"; in tabella 7.2 sono riportate le caratteristiche principali del sensore e i parametri impostati. Per aumentare l'angolo di acquisizione, è stata utilizzata una base rotante (*pan/tilt*) in modo da avere una visuale compresa tra -180° e +180°.

Caratteristiche Principali ILRIS 3₆D	
Frequenza di acquisizione	10kHz
Accuratezza nella distanza	4mm @ 100m
Accuratezza Angolare	80 μ rad (8mm @ 100m)
FOV (<i>Field of View</i>)	40° x 40°
Intervallo Angolare Minimo	0,001146° (20 μ rad)
Divergenza Raggio Laser	19mm @ 100m
Parametri Impostati	
Risoluzione Angolare	0,00115° (20 μ rad)

Tabella 7.2 – Caratteristiche ILRIS 3₆D e Parametri Impostati.

Il LST acquisisce le coordinate polari dei punti rispetto al centro strumentale; le scansioni devono essere sottoposte prima al processo di co-registrazione e allineamento, successivamente l'intera nube ottenuta sarà georeferenziata rispetto al sistema di riferimento prescelto (UTM/ETRF00). A tale scopo, sull'area test sono stati posizionati 6 target sferici, in materiale polimerico ad alta riflettanza, aventi un diametro di 15cm (figura 7.3c). Ogni target è avvitato su un'asta dotata di livella sferica per garantirne la verticalità. I target sono stati messi in stazione su chiodi topografici precedentemente infissi sulla

pavimentazione. La distribuzione spaziale dei target deve essere omogenea perché assumono duplice funzione:

- Sono utilizzati per allineare le scansioni, per cui, devono essere posizionati in maniera tale da avere almeno tre target visibili per ogni scansione;
- Sono utilizzati per georeferenziare l'intera nuvola di punti allineata e devono quindi essere misurati con apparati GNSS; per tale motivo devono essere disposti in zone scoperte e lontane da paramenti alti, per garantire una buona visibilità satellitare e evitare fenomeni di *multipath*.

La disposizione dei punti di stazione LST va studiata in modo da:

- Ridurre al minimo ombre e occlusioni;
- Avere una buona sovrapposizione tra le scansioni per il processo di allineamento;
- Minimizzare l'angolo di incidenza con la superficie scansionata; in questo caso l'altezza del treppiede gioca un ruolo di notevole importanza;
- La distanza tra gli stessi deve essere tale da garantire un'omogenea densità spaziale dei punti.

In accordo con le suddette considerazioni, sono state realizzate in totale 3 stazioni LST, posizionando lo strumento sul treppiede a una altezza strumentale pari a 2,00m (figura 7.3a,b).

Le misure di appoggio sono state effettuate con il sistema GNSS *GeoMax Zenith 25*. Si è misurato in modalità statico-rapida una rete GPS costituita da 6 vertici e inquadrati nel sistema di riferimento ETRF00 mediante connessione a tre stazioni permanenti (MOSE, ROAN, INGR) e a una stazione *master* materializzata in prossimità dei 6 punti dove è stato tenuto fisso un ricevitore per una sessione di 6h e 30'. Dopo la misura LST, al target viene sostituita l'antenna GPS, in modo da acquisire sulla loro posizione.

La misura con LSM è stata fatta con il sistema Riegl VMX-450 costituito da due scanner laser Riegl vQ-450 inclinati di 35°, ognuno con un campo visivo di 360° (tipo di configurazione chiamata "Butterfly") (figura 7.3d-e). Il sistema di riferimento cartografico scelto è UTM/ETRF00. La

misura è stata effettuata con la massima frequenza impostabile (550kHz) e a differenti velocità di acquisizione, come descritto nel §6.1.3.

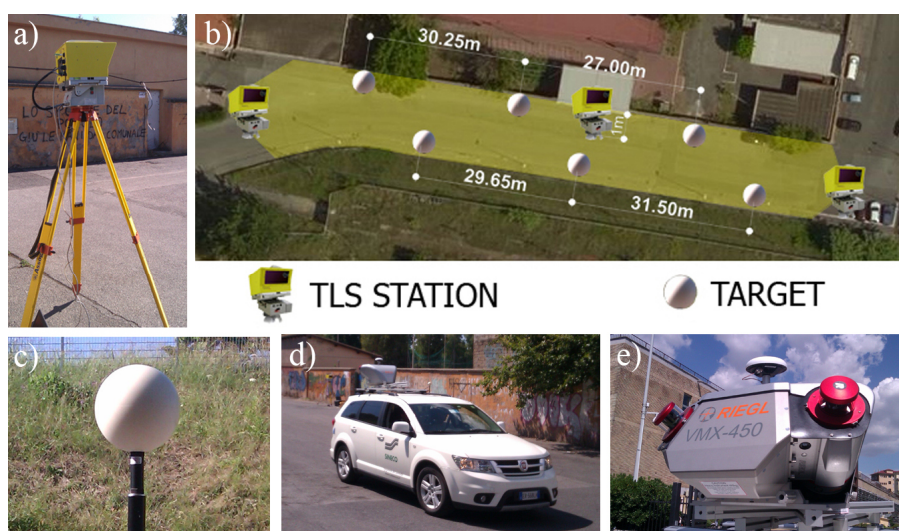


Figura 7.3 – Progetto Rilievo; a) LST Iliris 3D; b) Disposizione Target e Stazioni LST; c) Target Sferico; d-e) LSM Riegl VMX-450.

Nella figura 7.4 è riportata la mappa della densità superficiale della nuvola di punti LST, allineata e georeferenziata. Nella figura 7.5 sono riportate le mappe di densità delle nuvole di punti ottenute dalle misure LSM, relative alle velocità medie di percorrenza utilizzate per il calcolo dell'IRI (10km/h, 40km/h, 60km/h).

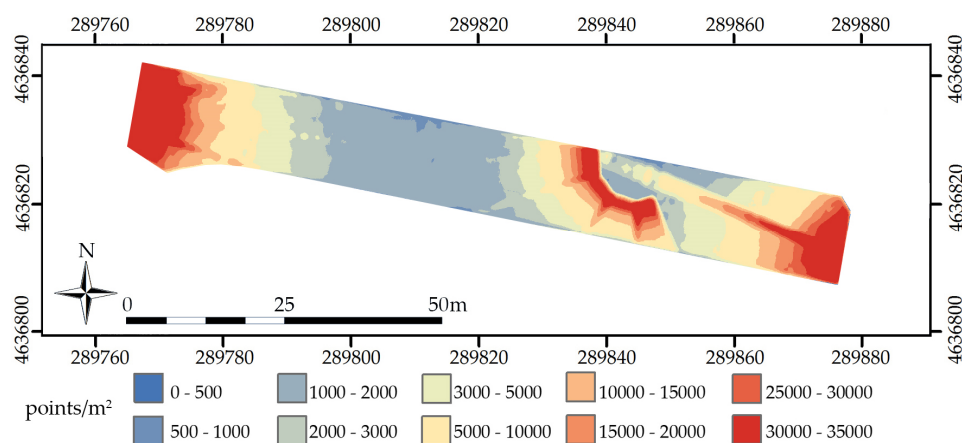


Figura 7.4 – Mappa di Densità LST.

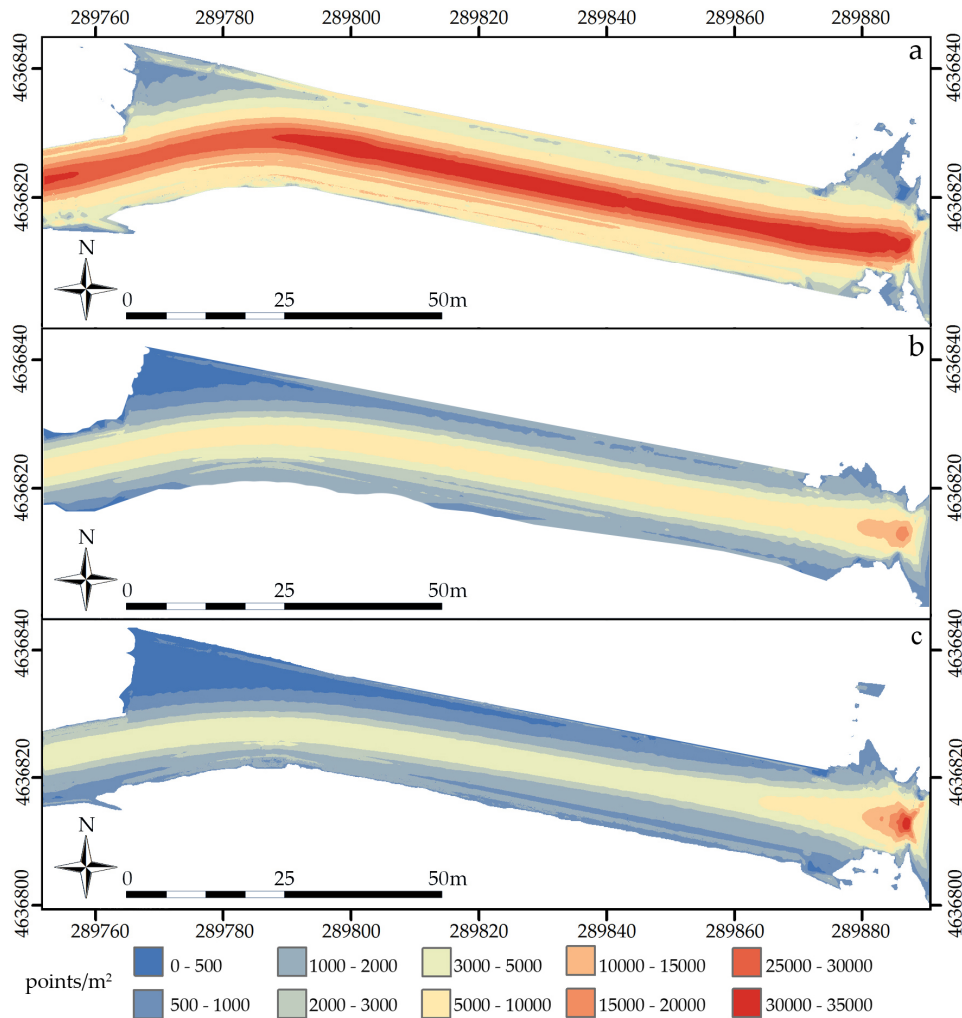


Figura 7.5 – Mappe di Densità LSM alle diverse velocità medie di passaggio; a) 10km/h; b) 40km/h; c) 60km/h.

Nella mappa di densità LST è possibile notare come la stessa decresca man mano che ci si allontana dai punti di stazione, inoltre sono presenti delle fasce a densità maggiore (figura 7.5); queste sono le zone di sovrapposizione dei diversi task prodotte durante la fase di allineamento. La densità delle nuvole di punti LSM è più omogenea rispetto a quella derivata dalla nuvola LST (figura 7.6), come noto, la densità è inversamente proporzionale alla velocità del veicolo strumentato. Le aree

aventi una densità localizzata elevata rappresentano le posizioni di arresto del veicolo; successivamente eliminate.

La metodologia introdotta per l'estrazione di un modello digitale di elevazione ad hoc per pavimentazioni stradali richiede una accurata scelta dei parametri, in particolare le dimensioni degli interassi del grigliato, l'interpolatore e le dimensioni del raggio di ricerca. Le dimensioni della griglia influenza non poco i risultati finali, la scelta è avvenuta studiando sia la distribuzione spaziale dei punti sull'area pavimentata, sia le relazioni che intercorrono nell'interazione pneumatico-superficie stradale. Il raggio di ricerca è stato dedotto in maniera tale da non avere una eccessiva sovrapposizione; i dati, prima di essere sottoposti al processo di estrazione, sono stati sottoposti ai processi di rimozione degli *outliers* §6.1.

L'estrazione del *DEM_c* (§6.3.1) è stata effettuata in funzione di una traiettoria data in input, in mancanza della segnaletica orizzontale. I parametri utilizzati sono:

- Interasse Longitudinale $il = 5\text{cm}$;
- Interasse Trasversale $it = 5\text{cm}$;
- Raggio di ricerca interpolatore $r = 3,6\text{cm}$;

L'interasse del grigliato a maglie quadre ρ è stato scelto in base a due criteri:

- a) **Geometrico**: Funzione della distribuzione spaziale dei punti, in particolare della densità superficiale e della distanza media tra le linee di scansione;
- b) **Dinamico**: Funzione della sensibilità dell'indice IRI rispetto al passo di campionamento.

In merito al criterio **a)**: è stata analizzata la relazione funzione della densità superficiale dei punti; per la distribuzione superficiale regolare dei punti sulla pavimentazione, la relazione vale [103]:

$$\rho = 0,5 \cdot \sqrt{\frac{1\text{m}^2}{D}}$$

Dove D il numero di punti stimato in 1m^2 . La densità superficiale da prendere in riferimento è quella minima; in questo caso la nuvola di punti che risulta avere una densità inferiore è quella ottenuta con la misura

LSM ad una velocità di 60km/h; in particolare, nelle aree di bordo carreggiata la densità si attesta intorno ai 2000punti/m² (figura 7.5c), compatibile anche con le zone a densità minore della nuvola LST (figura 7.4). La dimensione minima che potrà assumere l'interasse del grigliato, secondo l'analisi della densità superficiale, è pari a:

$$\rho = 0,5 \cdot \sqrt{\frac{1m^2}{D}} \cong 1,2cm$$

In merito al criterio **b)**: l'incertezza del calcolo dell'IRI è legata al passo di campionamento del profilo longitudinale; il picco massimo dell'errore si attesta intorno ai 167mm, l'intervallo di campionamento massimo ammissibile si attesta intorno ai 300mm [17]. Tra due punti consecutivi, l'andamento del profilo può essere schematizzato come: una funzione lineare, una funzione quadratica o una funzione a pendenza nulla (retta orizzontale). Per intervalli inferiori o uguali a 50mm, la differenza tra i modelli locali non è significativa, lo è invece per intervalli maggiori [105]. Secondo alcuni test, il modello locale che meglio approssima l'intervallo è la funzione lineare (una linea retta che connette i punti del profilo), a patto che non vengano superati i 300mm di interasse per misure accurate e i 600mm per misure meno accurate [105].

Il limite superiore di 50mm è dettato, quindi, dal criterio **b)** dato che l'obiettivo è quello di valutare la sensibilità nella stima della regolarità al variare della velocità di percorrenza del LSM; l'intervallo di 50mm, quindi, permette l'assunzione di un modello locale lineare, tra una coppia di punti, senza produrre errori significativi dovuti all'approssimazione del modello locale lineare.

Tenuto conto che la distanza media tra le linee di scansione, della nuvola avente densità minore (LSM 60km/h), è pari a 8cm (figura 6.9d, §6.1.3), le dimensioni adottate sono congruenti anche con la relazione semplificata funzione della distanza media delle linee di scansione [103]:

$$\rho \geq \frac{\bar{d}_{i,j}}{2} = 4cm \quad \text{con } \bar{d}_{i,j} \text{ distanza media tra linee di scansione}$$

La dimensione della griglia ρ deve dunque essere maggiore della metà della distanza media tra due linee di scansioni contigue.

Dalle considerazioni effettuate è possibile notare come la scelta delle dimensioni della griglia del *DEM_c* non è banale, bisogna tener conto

delle finalità per le quali si sta costruendo il modello della superficie. Assunto $\rho=5\text{cm}$, il raggio di ricerca per l'interpolazione risulta pari a:

$$r = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \rho \cong 4\text{cm}$$

In questo modo vengono inglobati tutti i punti contenuti all'interno della maglia di dimensioni ($\rho=it=il$). La sovrapposizione delle sfere di ricerca è pari a:

$$\rho \cdot (\sqrt{2} - 1) \cong 2\text{cm}$$

L'interpolatore utilizzato è l'IDW^k con potenza $k = 2$; le motivazioni sono le stesse introdotte nel §6.4.3. In tabella 7.3 sono riportati alcuni parametri statistici dei residui, relativa a tutte le superfici generate.

[mm]	LST	LSM (10km/h)	LSM (40km/h)	LSM (60km/h)
Minimo	-13,0	-12,0	-12,0	-13,0
Massimo	12,0	15,0	16,0	20,0
Media	$8,6 \cdot 10^{-2}$	$4,9 \cdot 10^{-2}$	$8,5 \cdot 10^{-2}$	$6,6 \cdot 10^{-2}$
Deviazione Standard	4,5	1,0	1,2	1,5

Tabella 7.3 – Statistica dei Residui.

Ricordando che la zona carrabile è larga 7m e che ogni corsia è larga 3,50m (§6.1.3), adottando un interasse trasversale it di 5cm, la superficie generata sarà costituita da 141 profili longitudinali, 70 nella corsia a e 70 nella corsia b ; il profilo 71 è quello di asse. La disposizione dei profili è mostrata in figura 7.6.

I profili sono estratti a partire dal modello digitale di elevazione DEMc e organizzati come descritto nel §6.3.2.

L'IRI è stato calcolato su ogni profilo longitudinale e per l'intera tratta, lunga circa 100m. Il calcolo è stato effettuato secondo il processo introdotto nel §7.1.1.

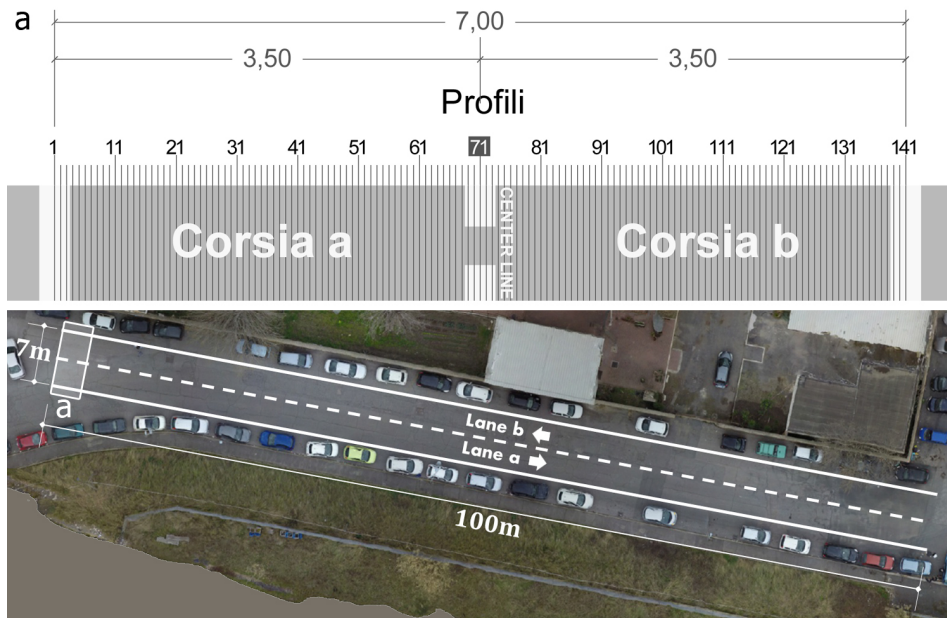


Figura 7.6 – Disposizione Profili Longitudinali.

In figura 7.7 si riportano i risultati relativi alle superfici indagate. I valori di IRI, pur derivando da misure prodotte da strumenti differenti, con velocità differenti e di conseguenza con accuratezze differenti, mostrano andamenti simili e comparabili. Per una più chiara interpretazione, in tabella 7.4 si riportano alcuni parametri statistici di sintesi suddivisi per singole corsie (*Corsia a* e *Corsia b*).

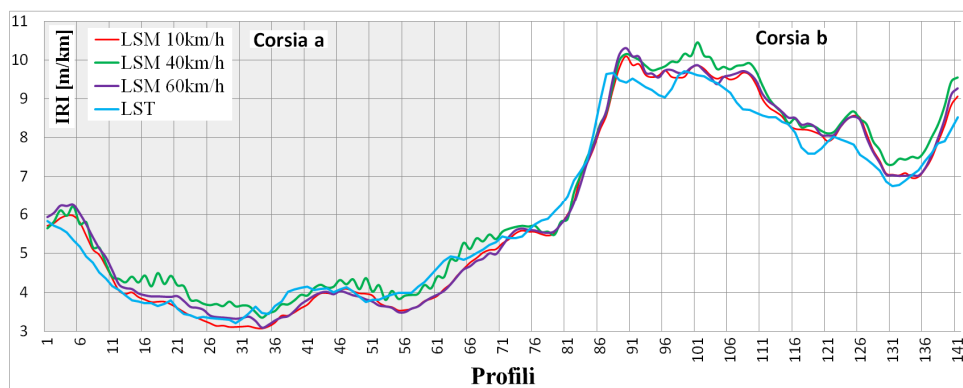


Figura 7.7 – Valori di IRI per ogni profilo.

Corsia a	LST	LSM (10km/h)	LSM (40km/h)	LSM (60km/h)
Media	4,17	4,05	4,39	4,13
Deviazione Standard	0,68	0,80	0,73	0,82
Massimo	5,83	5,97	6,21	6,25
Minimo	3,21	3,07	3,35	3,10
Corsia b	LST	LSM (10km/h)	LSM (40km/h)	LSM (60km/h)
Media	7,96	8,12	8,35	8,18
Deviazione Standard	1,28	1,44	1,49	1,48
Massimo	9,72	10,10	10,46	10,31
Minimo	5,39	5,26	5,48	5,20

Tabella 7.4 – Statistica IRI per singole corsie.

Dalla figura 7.8 è possibile notare come i valori medi per corsia, derivanti dai differenti modelli della superficie estratti, siano comparabili e contenuti nelle stesse classi di giudizio dettate dallo standard ASTM-E 1926 [106]. L'errore percentuale dei valori medi, rispetto alla misura LST, è contenuto nel 5%. I giudizi secondo normativa per le singole corsie sono:

- La *Corsia a* è classificata come pavimentazione usurata, “*Old Pavement*”, caratterizzata da depressioni frequenti a basso grado di severità, “*Frequent Minor Depressions*”; è possibile transitare fino ad una velocità compresa tra gli 80km/h e i 100km/h senza particolari problemi di confort, a fronte di modeste vibrazioni.
- La *Corsia b* è classificata come una pavimentazione avente quasi le caratteristiche di una strada sterrata, “*Maintained Unpaved Roads*”, caratterizzata da frequenti depressioni superficiali e buche, “*Frequent Shallow, Moderate Depressions or Shallow Patholes*”; è possibile guidare agevolmente fino ad una velocità di 70km/h, a fronte di evidenti spostamenti e rimbalzi del veicolo.

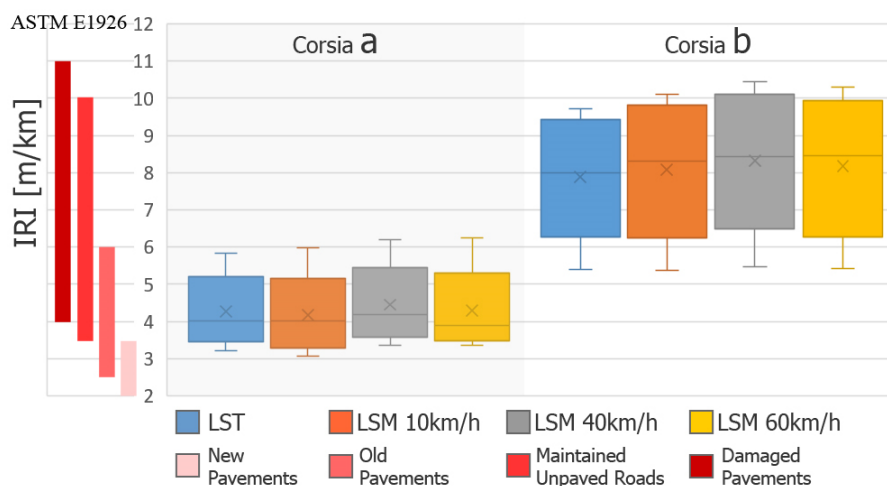


Figura 7.8 – Valori di IRI e giudizi secondo ASTM-E1926.

I giudizi introdotti dalla normativa sono stati dedotti sulla base di diverse esperienze e su tratte con una lunghezza standard di 320m. Una diversa interpretazione è effettuata mediante la stima delle sollecitazioni dinamiche dedotte con un modello completo “*Full Car*” [29].

Le sollecitazioni sono state determinate con il software di simulazione *CarSim 2016*, sviluppato dalla *Mechanical Simulation Corporation*. Il veicolo implementato in ambiente di simulazione è caratterizzato da dimensioni e prestazioni in linea con le prestazioni di un’utilitaria, così da generalizzare i risultati e apprezzare gli effetti dei degradi superficiali.

I test sono stati eseguiti impostando 9 livelli di velocità di marcia costante; l’intervallo è compreso tra i 20 e i 100 km/h, ad intervalli di 10 km/h (figura 7.9a). Tali velocità derivano dall’esigenza di simulare le condizioni di moto che potenzialmente sussistono sull’area test. La traiettoria del veicolo in simulazione è stata impostata in modo tale che il veicolo transitasse al centro di ogni corsia.

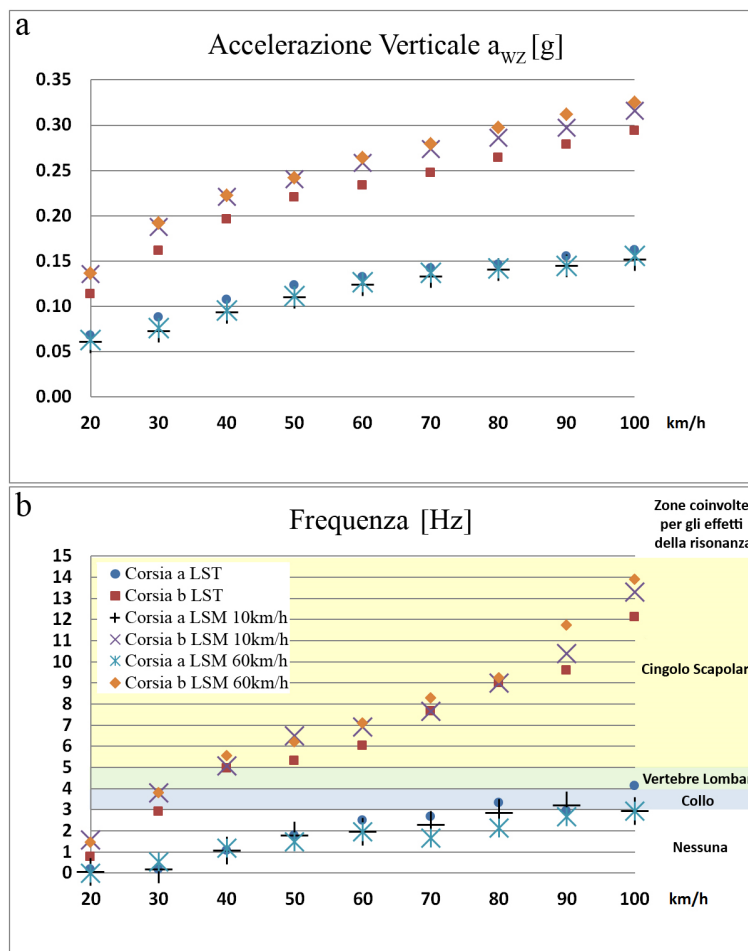


Figura 7.9 – Sollecitazioni “Full Car”; a) Accelerazione quadratica media Verticale; b) Frequenza.

La figura 7.9a mostra le accelerazioni quadratiche medie verticali relative alle differenti superfici generate e per le singole corsie. In figura 7.9b sono riportate le frequenze di superamento della soglia limite di percezione del disagio delle accelerazioni verticali (0,039g). La classificazione degli effetti subiti dall’utente al variare della frequenza è stata proposta da Katu et al. [108].

Osservando i valori in figura 7.9 si nota come le differenze siano poco significative; confermano i risultati dettati dall’IRI, i quali collocavano le differenti superfici nelle stesse classi di giudizio. Al contrario, i giudizi

sul confort di marcia dettati dall'IRI, sono poco significativi; per la corsia *b*, più irregolare, sia le accelerazioni che le frequenze di superamento della soglia limite aumentano considerevolmente per ogni intervallo di velocità assunto. L'accelerazione verticale quadratica media risente maggiormente dei picchi di accelerazione registrati istante per istante durante la simulazione, per cui risulta essere una misura più sensibile per la stima del confort di marcia rispetto all'IRI.

I risultati riportati in figura 7.9a mettono in risalto ulteriori questioni:

- nella *Corsia a*, Il valore massimo dello scarto tra le accelerazioni dedotte sulla superficie LST e sulle superfici LSM è pari a 0,010g; questo valore è inferiore alla sensibilità di percezione derivante da analisi fisiologiche [109], per accelerazioni verticali il valore limite di percezione si attesta intorno ai 0,039g. Se una superficie non presenta forti irregolarità, le sollecitazioni prescindono dall'accuratezza della superficie. Le sollecitazioni percepite sulla superficie LSM 60km/h sono praticamente le stesse di quelle percepite sulla superficie derivata da LST.
- Nella *Corsia b*, Il valore massimo dello scarto tra le accelerazioni dedotte sulla superficie LST e sulle superfici LSM è pari a 0,025g; è più alto rispetto alla *Corsia a*, ma comunque inferiore al limite percepibile dall'utente medio [109].

7.1.5 Confronto tra LSM e tecniche standardizzate

Si vogliono confrontare misure di regolarità effettuate tramite tecniche normalizzate con misure provenienti da LSM. Saranno analizzati e giustificati i parametri scelti per la creazione del modello digitale, inoltre sarà effettuata una stima del confort di marcia e confrontato con i giudizi dedotti dall'IRI e dall'indice geometrico σ .

L'area test consiste in una tratta di una strada extraurbana secondaria che si estende per circa 4km, dal km 10+000 al km 13+900. È formata da una unica carreggiata con due corsie, ognuna per senso di marcia e larga 3,60m. È situata in prossimità di un grosso nucleo industriale, ragion per cui su di essa sono presenti differenti livelli di irregolarità prodotti dai veicoli industriali.

La misura è stata effettuata con lo stesso sistema LSM introdotto nel §6.1.3, il sistema di riferimento cartografico scelto è UTM/ETRF00.

Nella tabella 7.5 sono riportate le caratteristiche principali della misura e della nuvola di punti ottenuta.

Frequenza di acquisizione	550kHz ($1,1 \times 10^6$ Punti/sec)
Velocità media di acquisizione	55km/h
Densità media per corsia	4000 punti/m ²
Distanza media linee di scansione	7,00cm
Numero di punti	$150 \cdot 10^6$

Tabella 7.5 – Caratteristiche rilievo.

Il rilievo è stato effettuato per la corsia Nord, nella figura 7.10 è riportata la mappa della densità superficiale (n° di punti/m²) di uno stralcio della tratta misurata.

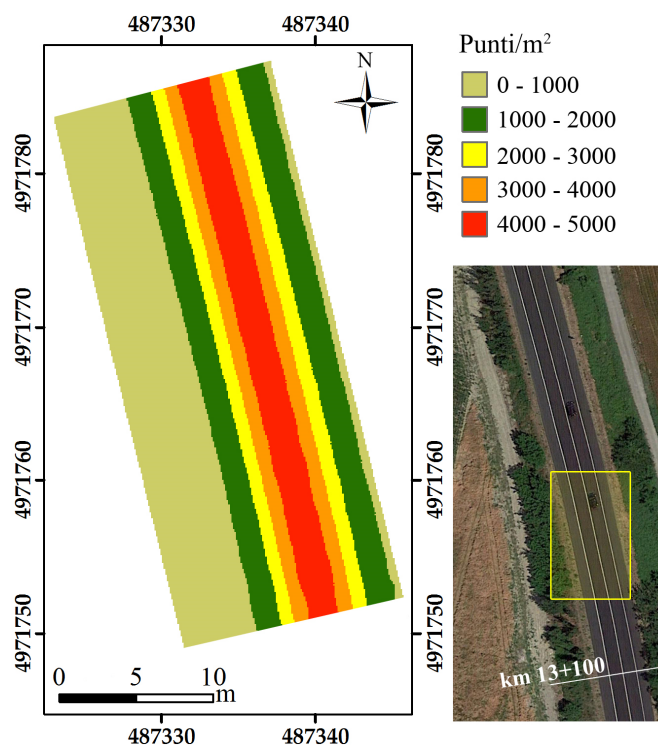


Figura 7.10 – Stralcio della mappa di Densità Superficiale della carreggiata.

La nuvola di punti è stata sottoposta al processo di estrazione della carreggiata e della segnaletica orizzontale, secondo i metodi descritti nei §6.1 e §6.2.

L'estrazione del *DEMc* (§6.3.1) è stata effettuata con i seguenti parametri:

- Interasse Longitudinale $il = 10\text{cm}$;
- Interasse Trasversale $it = 10\text{cm}$;
- Raggio di ricerca interpolatore $r = 7\text{cm}$;

Anche in questo caso studio, la risoluzione della griglia ρ è stata scelta in base a due criteri:

- c) **Geometrico**: mediante l'analisi della densità superficiale e della distanza media tra le linee di scansione;
- d) **Dinamico**: tenendo in considerazione la sensibilità dell'indice IRI rispetto al passo di campionamento.

In merito al criterio **a**) è stata utilizzata la relazione funzione della densità superficiale dei punti, come nel §7.1.4. La densità superficiale minima sulla corsia (bordo corsia) è pari a 1000punti/m^2 (figura 7.10), per cui la dimensione minima che potrà assumere la griglia è pari a [103]:

$$\rho = 0,5 \cdot \sqrt{\frac{1\text{m}^2}{D}} \cong 1,6\text{cm}$$

In merito al criterio **b**): come già evidenziato nel §7.1.4, l'incertezza del calcolo dell'IRI è legata al passo di campionamento. Chin e Olsen (2012) [49] hanno individuato un passo di campionamento ottimale per dati provenienti da LST; l'intervallo di campionamento compreso tra i 100mm e i 300mm forniscono valori di IRI comparabili (con una tolleranza del $\pm 5\%$) con quelli dedotti tramite le tecniche standardizzate di alta precisione (Stadia e livello) e con profilometro inerziale.

Il limite inferiore di 100mm è dettato, anche in questo caso, dal criterio **b**); adottando intervalli di campionamento inferiori si rischia di ottenere valori di IRI non confrontabili con quelli deducibili dalle tecniche tradizionali. Il limite superiore è dettato, invece, dalla risposta dinamica del sistema; adottando valori maggiori di 100mm si attenua la risposta dinamica del sistema in termini di frequenze, intorno ai 150mm la risposta è comunque soddisfacente.

Assunto $\rho = 10\text{cm}$, il raggio di ricerca per l'interpolazione risulta pari a:

$$r = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \rho \cong 7\text{cm}$$

La sovrapposizione delle sfere di ricerca è pari a:

$$\rho \cdot (\sqrt{2} - 1) \cong 4\text{cm}$$

L'interpolatore utilizzato è l' IDW^k con potenza $k = 2$. In tabella 7.6 sono riportati i principali parametri statistici dei residui.

	[mm]	LSM
Minimo		-13,0
Massimo		11,0
Media		6,0
Deviazione Standard		2,0

Tabella 7.6 – Statistica dei Residui.

in figura 7.11 è mostrato uno stralcio del *DEMc* sovrapposto alla nuvola di punti.

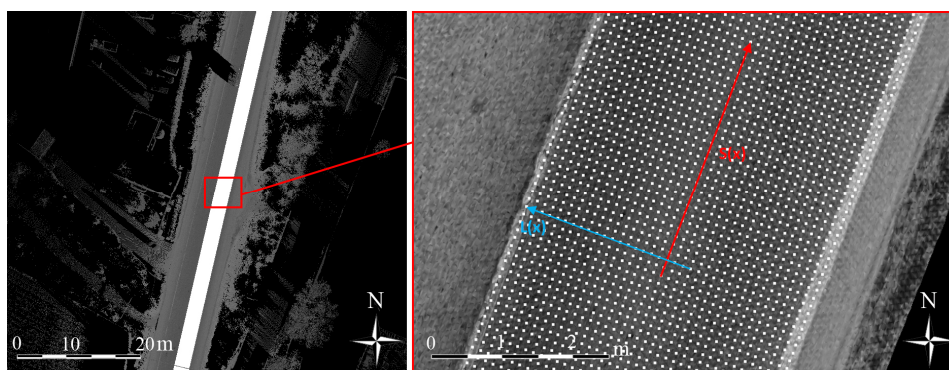


Figura 7.11 – *DEMc* della corsia Nord sovrapposto alla nuvola di punti.

Per il confronto è stata effettuata una misura di regolarità con un profilometro inerziale ad alta velocità. La barra profilometrica, installata sulla parte anteriore del veicolo strumentato, è costituita da due laser distanti circa 2m; l'acquisizione dei valori di elevazione è avvenuta a intervalli longitudinali di 100mm, la frequenza impostata è pari a

62,5kHz. Il profilometro è dotato di un sistema di posizionamento GNSS così da misurare la traiettoria dello stesso.

La misura profilometrica è stata fatta dal km 10+300 al km 13+800. I valori di IRI sono stati calcolati su tratte lunghe 100m, cioè suddividendo la tratta in 35 sub-sezioni; l'IRI così valutato permette l'individuazione di eventuali effetti localizzati. In tabella 7.7 si riportano i parametri principali della misura profilometrica.

Strumento	Profilometro
Velocità media di acquisizione	55km/h
n° Laser	2
Frequenza di acquisizione	62,5kHz
Distanza Laser	2m
Sistema di posizionamento	GNSS Monofrequenza

Tabella 7.7 – Misure Profilometriche.

Per poter effettuare il confronto, il DEMc è stato costruito in modo tale che l'ascissa curvilinea del suo asse seguisse la traccia da GNSS del profilometro. Ricordando, inoltre, che la corsia è larga 3,60m e che gli intervalli longitudinale *il* e trasversale *it* sono stati assunti pari a 10cm, in totale si ottengono 37 profili longitudinali, disposti come in figura 7.12.

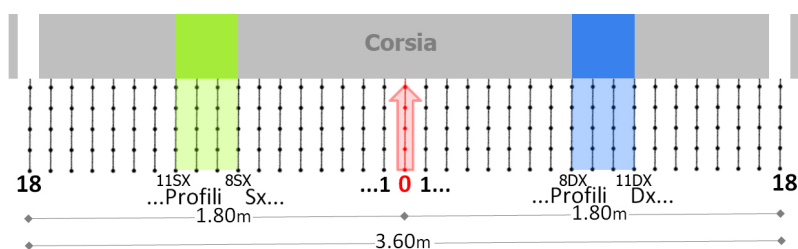


Figura 7.12 – Scema dei Profili estratti e analizzati.

Sono stati analizzati i valori di IRI calcolati in corrispondenza delle tracce dei dispositivi laser del profilometro. Dall'analisi della configurazione geometrica della barra profilometrica e della traiettoria individuata a partire dai dati GNSS, le fasce interessate risultano essere comprese tra (figura 7.12):

- Il profilo 8DX e il profilo 11DX per la traccia destra;

- Il profilo 8SX e il profilo 11SX per la traccia sinistra.

I valori di IRI sono stati determinati sui profili del *DEM_c*. Inoltre, in corrispondenza delle stesse tracce, sono stati determinati i valori di σ assumendo una base L_b pari a 3,5m. In figura 7.13 sono riportati i valori di IRI [m/km] e in figura 7.14 quelli di σ [mm] per le singole tracce e per le singole sub-sezioni di 100m.

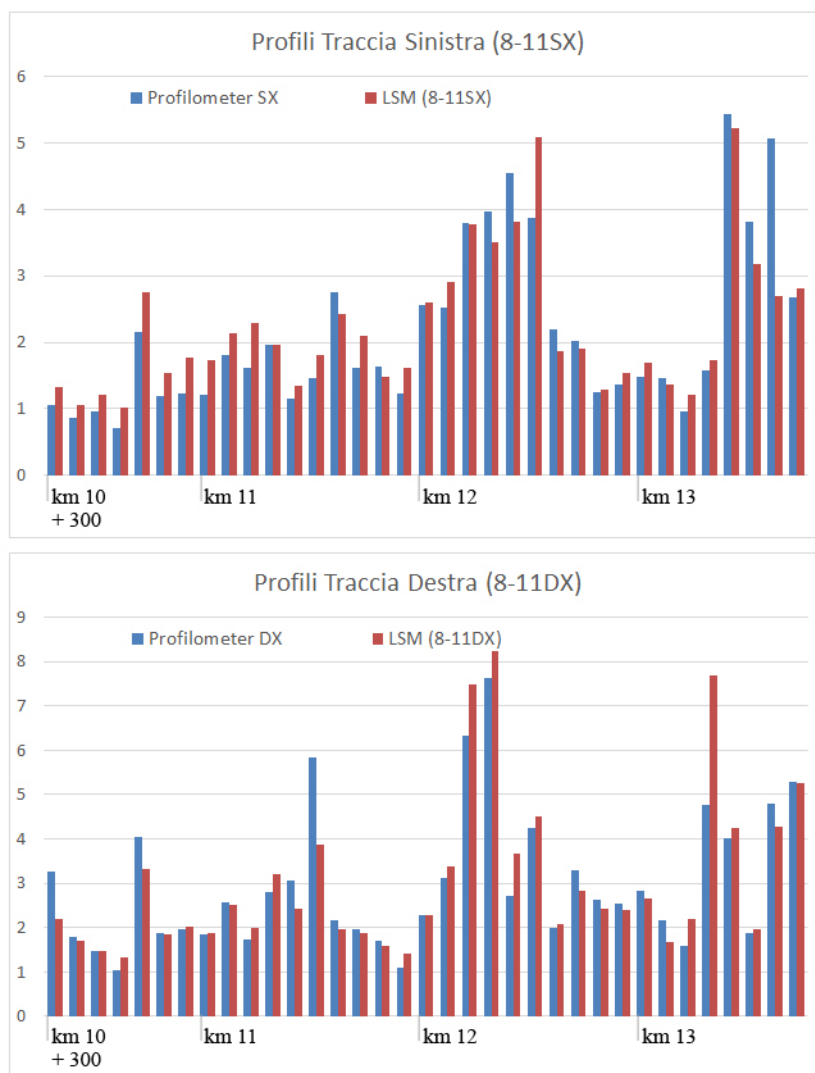


Figura 7.13 – IRI *DEM_c* vs IRI profilometro.

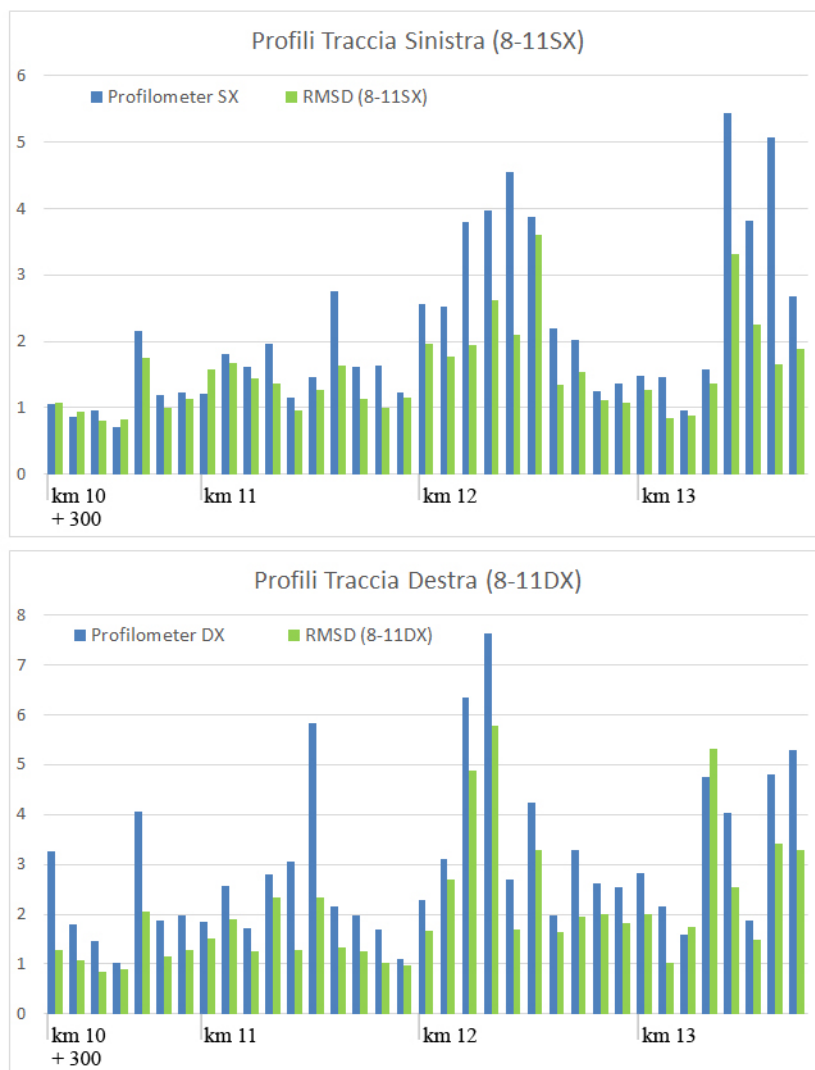


Figura 7.14 – σ vs IRI profilometro.

Dal confronto è possibile notare come gli andamenti seguano gli stessi trend; alcuni valori sono pressoché uguali (con un errore percentuale inferiore al 5% rispetto ai valori ricavati da profilometro), altri pur producendo un errore percentuale maggiore del 5%, rientrano nelle stesse classi di giudizio dettate dallo standard ASTM-E1926 [106]. I valori di σ , come già noto in letteratura, sono anch'essi correlati ai valori di IRI [31].



Figura 7.15 – Diagrammi di correlazione.

Dai grafici di correlazione (figura 7.15) si nota come i valori ottenuti da LSM siano ben correlati con quelli calcolati con il metodo standardizzato. Si nota la presenza di alcuni outliers, come a esempio, in corrispondenza del km 13+700, in corrispondenza della traccia sinistra, e al km 13+400, in corrispondenza della traccia destra. I motivi della loro presenza possono essere:

- Il veicolo con la barra profilometrica subisce delle oscillazioni trasversali durante il moto, dato che l'operatore non è in grado di mantenere una traiettoria ben definita; variazioni della posizione laterale provocano significative variazioni nella misura dei profili, principalmente quando la tratta è molto ammalorata. Osservando la figura 7.13 è possibile notare come i dati con maggior differenze sono quelli appartenenti alla traccia

più irregolare (*Profili 8DX-11DX*), rispetto alla traccia sinistra più regolare (*Profili 8SX-11SX*).

- La scarsa precisione nella misura della traiettoria dovuta a errori di posizionamento dei ricevitori GNSS a singola frequenza e la non perfetta conoscenza degli offset tra traiettoria e barra profilometrica non permettono una determinazione accurata delle tracce dei profilometri laser.
- La velocità di acquisizione è variabile; la minima è di circa 30km/h, la massima intorno ai 60km/h. Forti variazioni di accelerazione comportano errori nella misura dei profili.

Avendo a disposizione l'intera superficie e tenendo in conto una probabile dispersione delle traiettorie del generico veicolo, la stima del confort di marcia è stata effettuata per due configurazioni riportate in figura 7.16 sul DEMc generato a partire dall'asse della corsia e dal km 11+000 al km 12+800. Per la stima delle sollecitazioni è stato usato il software di simulazione CarSim 2016. Il veicolo implementato in ambiente di simulazione è caratterizzato da dimensioni e prestazioni tipiche di un'utilitaria. Le configurazioni adottate sono:

- Una *configurazione Simmetrica* (figura 7.16a); il baricentro del veicolo simulato passa per l'asse centrale della corsia.
- Una *configurazione Eccentrica* (figura 7.16b); dall'analisi della traiettoria del profilometro si è riscontrato che il veicolo durante la misura tendeva a spostarsi verso il ciglio destro. Probabilmente durante il passaggio di mezzi pesanti il veicolo strumentato si spostava sulla destra per consentire la manovra del sorpasso in sicurezza. Questa configurazione coinvolge i profili a destra dell'asse corsia; la traccia sinistra ricade all'interno della fascia compresa dal profilo 0 al profilo 3DX, la traccia destra, invece, ricade all'interno della fascia compresa dal profilo 14DX al profilo 17DX.

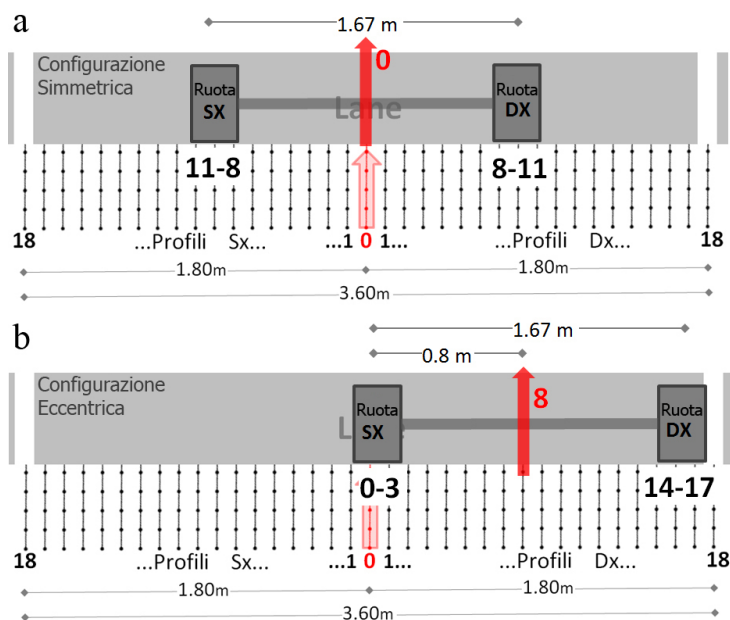


Figura 7.16 – Configurazioni; a) Simmetrica; b) Eccentrica.

I test sono stati eseguiti impostando 8 livelli di velocità di marcia costante; l'intervallo è compreso tra i 30 e i 100 km/h, ad intervalli di 10 km/h. Anche in questo caso, le velocità scelte derivano dall'esigenza di simulare le condizioni di moto che potenzialmente sussistono sulla tratta in esame. Nella configurazione simmetrica il baricentro del veicolo segue l'asse centrale della corsia, nella configurazione eccentrica il baricentro del veicolo segue il profilo 8DX.

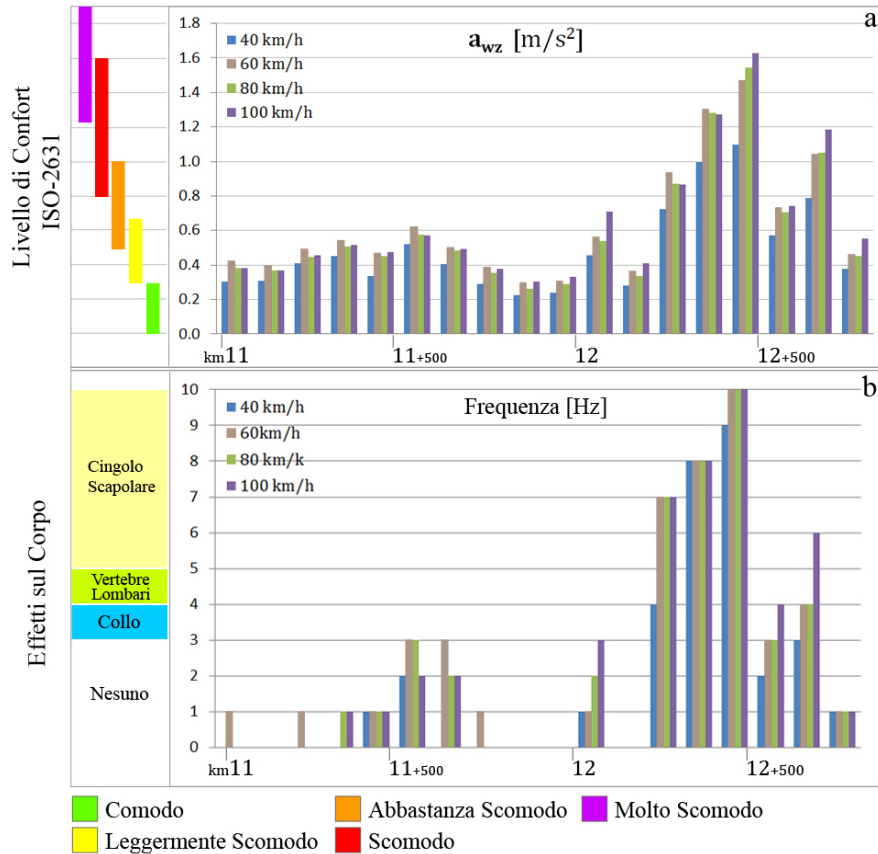


Figura 7.17 – Sollecitazioni Configurazione Simmetrica; a) Accelerazione quadratica media verticale, b) Frequenza di superamento soglia limite.

In figura 7.17 sono riportati i valori delle accelerazioni quadratiche medie verticali e le frequenze di superamento della soglia limite (§7.1.3) per la configurazione simmetrica, a velocità di simulazione 40km/h, 60km/h, 80km/h e 100km/h. In figura 7.18 sono riportati i valori delle accelerazioni quadratiche medie verticali e le frequenze di superamento della soglia limite per la configurazione eccentrica. Per entrambe le configurazioni, i valori delle accelerazioni sono mediati sulle sub-sezioni di 100m. I valori delle accelerazioni verticali nel dominio del tempo sono stimate ogni 0,025s.

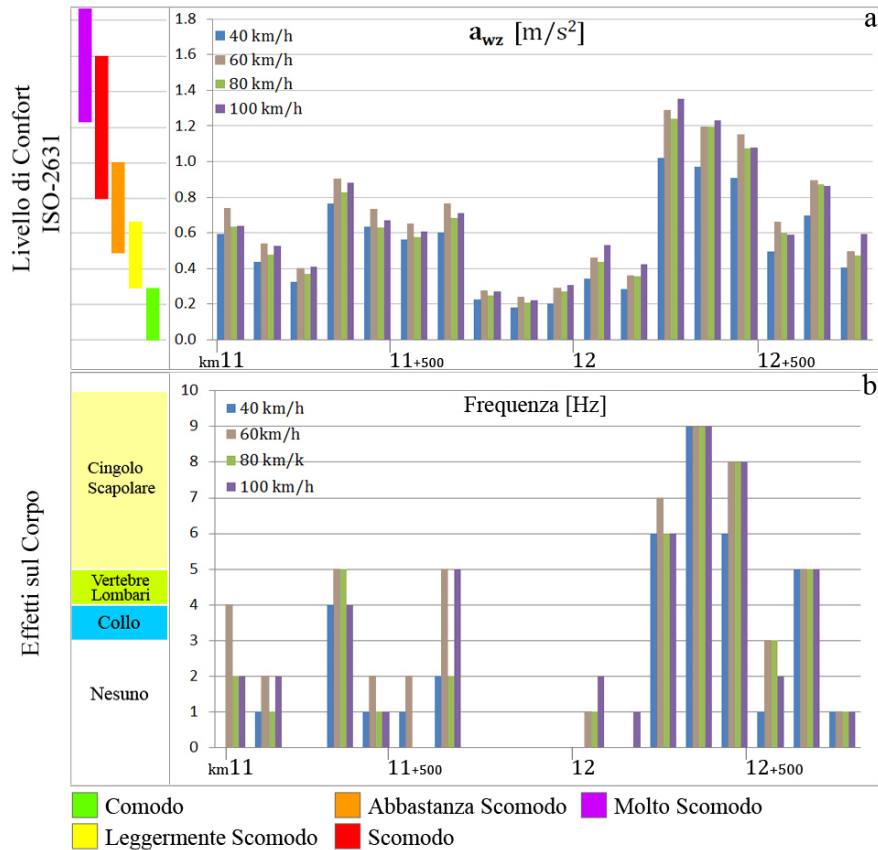


Figura 7.18 – Sollecitazioni Configurazione Eccentrica; a) Accelerazione quadratica media verticale, b) Frequenza di superamento soglia limite.

Osservando i risultati derivanti dalle diverse configurazioni riportati in figura 7.17 e in figura 7.18, è possibile notare come il controllo delle vibrazioni e delle frequenze di risonanza siano strumenti utili, fornendo informazioni più dettagliate rispetto ai classici indici. Oltre a una stima della regolarità longitudinale è possibile stimare gli effetti sul confort di guida che potenzialmente possono sussistere sul modello digitale di pavimentazione generato e quindi sulla pavimentazione stessa.

7.2 Regolarità Trasversale

La regolarità trasversale è anch'essa un fattore importante per la sicurezza. Le ormaie hanno una particolare configurazione tale da raccogliere le acque meteoriche favorendo così i fenomeni di acquaplaning [110]. L'altra questione importante riguarda il repentino avanzamento del processo di degrado in corrispondenza delle depressioni trasversali, per effetto della concentrazione dei carichi lungo queste traiettorie [111]. Diversi studi evidenziano come la profondità delle ormaie influisce in modo significativo sui tassi incidentali [112]; i risultati hanno indicato che il tasso incidentale tende ad aumentare quando le profondità delle depressioni trasversali superano gli 8mm.

La misura della depressione trasversale "*rut dept*" è effettuata tradizionalmente rispetto ad un'asta rigida "*Straightedge*". L'asta utilizzata può avere lunghezze differenti, a seconda dello standard di riferimento; negli Stati Uniti, in particolare l'AASHTO, si basa su un'asta rettilinea lunga 1,2m, l'ASTM, invece, suggerisce lunghezze comprese nell'intervallo tra 1,83m e 3,66m [33]. Generalmente si utilizza una lunghezza di 2m, in modo tale da coprire la zona centrale della corsia. L'SHRP (*Strategic Highway Research Program*), utilizza, invece, una lunghezza dell'asta pari alla larghezza della corsia, insieme alla Svezia e alla Cina. In Giappone si utilizza un filo tenuto in trazione "*flexible wire*" invece di un riferimento rigido.

La pavimentazione è affetta da deformazioni trasversali di bassa severità quando la profondità delle stesse è compresa tra i 10mm e i 15mm; al di sopra dei 15mm la deformazione è considerata ad alto livello di severità [113]. Questi valori sono confrontabili con le accuratezze ottenibili con i sistemi LSM, per cui il vantaggio diventa duplice:

- È possibile definire le priorità di intervento mediante la realizzazione di scale gerarchiche di intervento, in funzione dei livelli di severità, in modo da integrare eventualmente la misura con tecniche tradizionali;
- È possibile avere già una stima accurata della profondità e, in funzione dei differenti casi, prescindere da una misura standardizzata.

L'obiettivo principale degli enti manutentori è stato sempre quello di quantificare le irregolarità trasversali in piena sicurezza ed efficienza

[114]; come già evidenziato, con le tecniche tradizionali questo risulta complesso e in alcuni casi del tutto irrealizzabile. La particolare configurazione del modello digitale elaborato (§6.3.1) permette l'analisi dell'evoluzione superficiale di questa tipologia di irregolarità, dato che la caratterizzazione geometrica avviene su tutti i profili trasversali del modello digitale curvilineo (DEMc).

7.2.1 Straight Edge Algorithm

L'algoritmo implementato si basa sull'algoritmo “*straight-edge rut depth algorithm*” del Strategic Highway Research Program (SHRP) di Hadley and Myers [115], modificato per adattarlo al modello digitale costruito.

La generica sezione trasversale è rappresentata nel piano cartesiano; in ordinata sono riportate i valori di elevazione contenuti nella matrice $h \in \mathbb{R}^{n,c}$, in ascissa sono riportate le distanze parziali L_i , come mostrato nella figura 6.28 del §6.3.2.

Il parametri principali da impostare sono due, in particolare:

- La lunghezza minima dell'asta $L_{a,MIN}$;
- La lunghezza massima dell'asta $L_{a,MAX}$;

Il processo è implementato per ogni riga della matrice $h \in \mathbb{R}^{n,c}$ (figura 6.28 §6.3.2); indicato con $P_i(L_i, h_i)$ in generico nodo i , l'iter si basa sui seguenti passi:

- A partire dal primo nodo $P_{START}(L_{i=1}, h_{i=1})$, con $START = 1$, si calcola l'angolo di direzione $\vartheta_{START,i}$ e la distanza d_i per ogni tratto compreso tra h_{START} e h_i (figura 7.19a):

$$\vartheta_{START,i} = \pi \pm \arctan \left| \frac{L_i - L_{START}}{h_i - h_{START}} \right| \quad d_i = \sqrt{(L_i - L_{START})^2 + (h_i - h_{START})^2}$$

Il ciclo termina quando:

$$d_i > L_{a,MAX}$$

- Successivamente è selezionato il nodo P_i avente una elevazione h_i che determina un angolo di direzione $\vartheta_{START,i}$ minore, questo è denominato $P_{STOP}(L_i, h_i)$ (figura 7.19a);
- Un ciclo di *istruzioni condizionali* analizza le seguenti condizioni:

- a) Se la distanza tra P_{START} e P_{STOP} è inferiore alla lunghezza minima impostata $L_{a,MIN}$, il ciclo si ripete a partire dall'ultimo nodo individuato (figura 7.19b), e cioè:

$$\text{if } d_{START,STOP} = \sqrt{(L_{STOP} - L_{START})^2 + (h_{STOP} - h_{START})^2} < L_{a,MIN} \Rightarrow P_{START}(L, h) = P_{STOP}$$

- b) Se la distanza tra P_{START} e P_{STOP} è compresa tra le due distanze impostate ($L_{a,MIN}$ e $L_{a,MAX}$), si costruisce una retta r passante per i due nodi così da simulare l'asta rigida poggiata (figura 7.19c):

$$\text{if } L_{a,MIN} \leq d_{START,STOP} \leq L_{a,MAX} \Rightarrow \frac{L_r - L_{START}}{L_{STOP} - L_{START}} = \frac{h_r - h_{START}}{h_{STOP} - h_{START}}$$

$$d(P, r) = \frac{|aL_j + bh_j + c|}{\sqrt{a^2 + b^2}} \text{ con } j = j\text{-esimo punto nell'intervallo } [P_{START}; P_{STOP}]$$

La matrice riga $d \in \mathbb{R}^{j,1}$ contiene le distanze tra la retta costruita e il j -esimo punto all'interno dell'intervallo $[P_{START}; P_{STOP}]$. La profondità della depressione, relativa al tratto individuato, sarà pari alla distanza massima:

$$RutDepth_t = \max\{d \in \mathbb{R}^{j,1}\}$$

L'intero ciclo si ripete a partire dall'ultimo nodo individuato:

$$P_{START}(L, h) = P_{STOP}$$

L'intero processo iterativo termina quando il generico indice i coincide con il numero di colonne della matrice $h \in \mathbb{R}^{n,c}$, ovvero $i=c$.

L'algoritmo organizza gli output in *Structure Array*; ogni profilo avrà un numero di *Structure Array* pari al numero t di aste individuate, negli Array saranno compresi:

- La matrice delle distanze $d \in \mathbb{R}^{j,1}$;
- L'angolo di direzione $\vartheta_{START,i}$;
- Il valore della profondità massima calcolata $RutDepth$;
- La distanza tra i due punti (P_{START}, P_{STOP}) su cui poggia l'asta;
- Le coordinate Cartografiche dei punti P_{START} e P_{STOP} ;
- I parametri della retta r stimata.

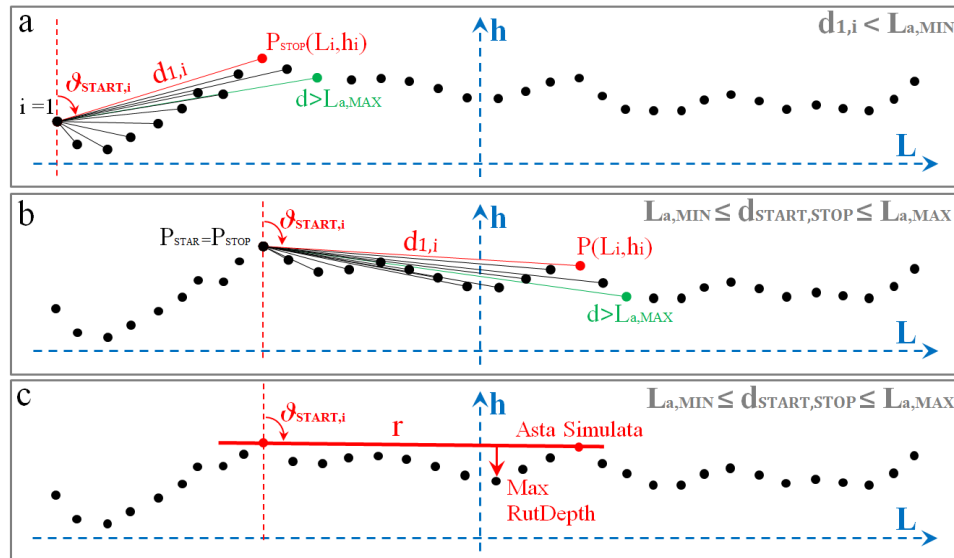


Figura 7.19 – Algoritmo “Straight Edge”.

L’algoritmo implementato, inoltre, permette di associare ogni valore di profondità dedotto, contenuto nella matrice $d \in \mathbb{R}^{j,1}$, al relativo nodo omologo appartenente al DEMc. Così facendo, viene aggiunta una quarta dimensione alla matrice dimensionale $D \in \mathbb{R}^{n,c,3}$ contenente i valori di profondità d .

7.2.2 Validazione dell’algoritmo

L’area test è la stessa introdotta nel §7.1.5. La tratta presenta differenti livelli di deformazioni trasversali dovute ai grossi carichi che transitano nell’area industriale. In particolare, il segmento compreso dal km 12+200 al km 12+800 presenta condizioni di irregolarità molto accentuate e variabili trasversalmente, come evidenziato dalla doppia configurazione esaminata nel §7.1.5. Per tali motivi, l’area oggetto di studio, risulta ideale per tarare e verificare il processo metodologico descritto nel §7.2.1.

Il modello digitale della superficie analizzato è quello estratto nel §7.1.5, caratterizzato da un intervallo trasversale pari a 10cm.

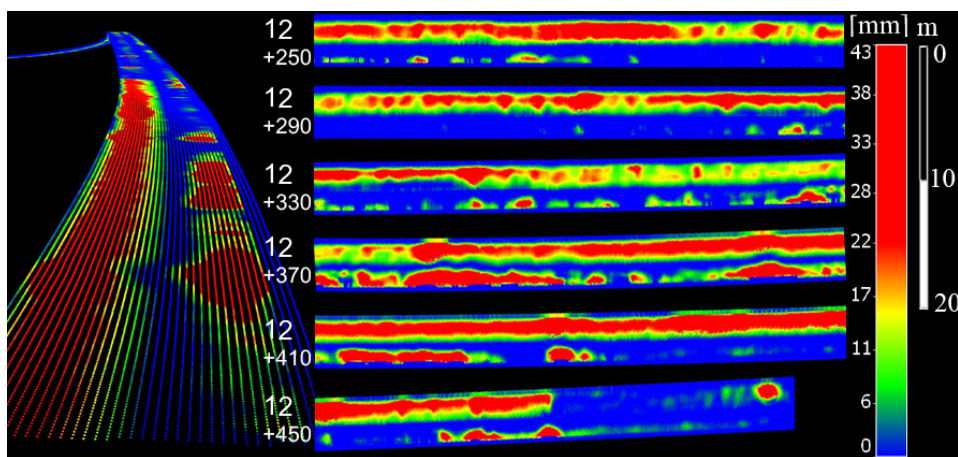


Figura 7.20 – DEMc con i valori delle profondità “Rut Depth”.

Le analisi di regolarità longitudinale e relative alla stima del confort di marcia hanno evidenziato forti picchi di irregolarità, sia nella configurazione simmetrica sia in quella eccentrica, in particolare dal km 12+300 al km 12+500. In figura 7.20 è riportato lo stralcio del DEMc della tratta in esame con la scala cromatica funzione della profondità delle depressioni.

Dalla figura è possibile notare le forti depressioni trasversali, maggiori di 20mm, il valore massimo si attesta intorno ai 43mm; le tracce dei veicoli sono ampiamente marcate e continue lungo tutta la tratta. Si intuisce, quindi, che i picchi di frequenza rappresentati in figura 7.17 e in figura 7.18 sono dovuti principalmente alla presenza di deformazioni trasversali che si verificano ad intermittenza sulla traccia destra. In pratica, quando il veicolo incontra situazioni di regolarità e irregolarità ad intervalli brevi, questo subisce delle forti variazioni in termini di accelerazione verticale.

7.3 Degradi Localizzati

La letteratura evidenzia la possibilità di stimare lo stato di degrado delle pavimentazioni mediante l'ausilio di specifici indicatori. Questi possono essere gli indici prestazionali specifici, nei quali sono compresi quelli già trattati, come quelli di stima della regolarità longitudinale o trasversale oppure possono essere di tipo composito, cioè, combinazioni di più indici individuali. Questi tipi di indicatori servono principalmente per dare una informazione sintetica sullo stato di degrado, di ausilio alla pianificazione, così da scaglionare gli interventi in funzione dei differenti giudizi ottenuti sulle differenti tratte analizzate. Il loro compito, quindi, è di effettuare una prima valutazione generale a livello globale.

Un degrado può essere di tipo funzionale se la sovrastruttura è ancora efficiente ma presenta delle criticità in termini di regolarità e aderenza. Questi tipi di irregolarità possono rendere la marcia scomoda e poco sicura, producendo danni significativi nel lungo termine. Il degrado è denominato di tipo strutturale se le pavimentazioni presentano rotture per effetto dei carichi ciclici, quindi per invecchiamento, o per effetto di una cattiva progettazione o manutenzione; di questi fanno parte i così detti degradi localizzati.

Il degrado di tipo strutturale riduce notevolmente la sicurezza su strada e i degradi che incidono maggiormente sulla sicurezza e sul confort di marcia sono quelli localizzati; una tratta molto regolare ma con la presenza sporadica di dossi e profonde buche favorisce maggiormente eventi incidentali rispetto a una tratta molto più irregolare ma priva di degradi localizzati particolarmente pronunciati.

Data la complessità dell'evoluzione e del degrado stesso, difficilmente si individuano dissesti singoli e isolati come mostrato sui cataloghi. La suddivisione delle irregolarità in longitudinali e trasversali deriva da un approccio vecchio e poco realistico, data la vera complessità del problema. La tecnica del laser scanner in questo ci aiuta, poiché permette la modellazione tridimensionale della superficie pavimentata; si vogliono introdurre nuove metodologie per la quantificazione dei principali degradi localizzati che incidono maggiormente sulla sicurezza e sul confort degli utenti, analizzati in ambito 3D, comprese le criticità e le problematiche riscontrate nelle applicazioni.

7.3.1 Valutazione dei degradi

La valutazione dei degradi localizzati nello spazio 3D è piuttosto complessa; non esiste una configurazione o un riferimento esatto rispetto al quale è possibile stimare eventuali anomalie presenti. Si potrebbe utilizzare un piano per caratterizzare una singola corsia e determinare le variazioni di elevazione della superficie stradale rispetto a questo [79]. Le problematiche principali di questi modelli recentemente suggeriti in letteratura sono essenzialmente due:

- Esistono grosse perplessità sulle dimensioni longitudinali che il piano di riferimento deve assumere;
- I lati di due piani contigui dovrebbero essere solidali tra di loro; questo è un vincolo molto rigido e nella maggior parte dei casi irrealizzabile.

Per tali motivi si è scelto di utilizzare un piano di riferimento locale, costruito in corrispondenza di ogni singolo punto appartenente alla superficie stradale. Il processo proposto consiste nei seguenti passi:

- Per ogni punto della nuvola di punti, si genera una sfera di ricerca con origine nel punto stesso e con raggio assegnato (*KernelSize*);
- Tutti i punti ricadenti all'interno della sfera di ricerca sono interpolati con un metodo ai minimi quadrati robusto che minimizza la somma dei quadrati pesata "*Bisquare Weights*"; il peso attribuito a ciascun punto dipende dalla distanza del punto dal piano interpolato.
- Ottenuto il piano di riferimento locale, si calcola la distanza Δh tra il piano e il punto utilizzato come centro sfera. Valori positivi di Δh sono attribuiti alle depressioni o buche, valori negativi, invece, sono attribuiti ai rigonfiamenti.

La figura 7.21 mostra la costruzione appena introdotta. Il metodo robusto ai minimi quadrati permette l'individuazione di un piano di riferimento che meglio si adatta alle condizioni planari; il piano così interpolato si sposterà maggiormente verso una configurazione planare, dato che tende a ridurre al minimo l'effetto dei valori anomali.

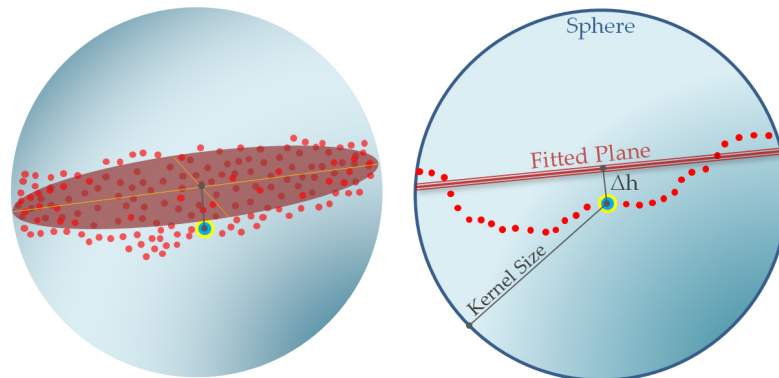


Figura 7.21 – Piano Locale e calcolo Δh .

Il processo implementato si basa su una struttura di controllo iterativa; il numero delle iterazioni sarà pari al numero di punti della superficie stradale analizzata. Alla fine del processo si otterrà una nuvola di punti; a ogni punto sarà associato un valore di Δh .

Oltre al calcolo del Δh , l'algoritmo determina il valore dell'RMSE (*Root Mean Square Error*), il quale fornisce una stima sulla bontà dell'interpolazione; i valori conservano l'unità di misura utilizzata per il calcolo del Δh . Il valore di RMSE sarà associato anch'esso a ogni punto utilizzato come centro sfera; in questo modo potrà essere graficato e contribuire a un'ulteriore stima delle condizioni superficiali.

7.3.2 Segmentazione e Classificazione dei Degradati

La classificazione e la quantificazione delle anomalie presenti sulla superficie è effettuato mediante algoritmi di analisi immagine. L'immagine analizzata è di tipo *raster*; è composta da una matrice di punti, ogni punto rappresenta un pixel.

La matrice multidimensionale $D \in \mathbb{R}^{n,c,3}$ derivante dalla costruzione del DEMc, per la sua particolare natura, può essere sottoposta a algoritmi di analisi immagine, dato che è la rappresentazione matriciale dello sviluppo curvilineo del nastro stradale.

In questo caso, la matrice $D \in \mathbb{R}^{n,c,3}$, oltre ad avere la terza dimensione costituita dai valori interpolati di elevazione, sarà caratterizzata da una quarta dimensione in cui sono riportati i valori interpolati di Δh e da una quinta dimensione contenente i valori di RMSE. In definitiva la matrice $D \in \mathbb{R}^{n,c,5}$, sarà un raster a cinque livelli; i primi tre livelli rappresenteranno

il modello digitale nello spazio (E,N,h), il quarto e il quinto livello conterranno le informazioni relative alle condizioni superficiali rispetto alla configurazione ideale (figura 7.22). La risoluzione spaziale del DEMc sarà funzione principalmente della densità della nuvola di punti.

La quantificazione e la classificazione delle differenti anomalie presenti sulla superficie stradale, è effettuata mediante processi di segmentazione; la segmentazione di un'immagine consiste nella classificazione della stessa in differenti regioni, i pixel vengono raggruppati secondo specifiche condizioni. Le condizioni sono imposte in funzione del tipo di ammaloramento che si vuole analizzare; con il metodo esposto nel §7.3.1 si analizzano i dissesti raggruppati nelle due grosse categorie:

- Le buche e le depressioni: caratterizzate da valori di Δh positivi;
- I rigonfiamenti, i rattoppi e le ondulazioni: deformazioni caratterizzate da Δh negativi.

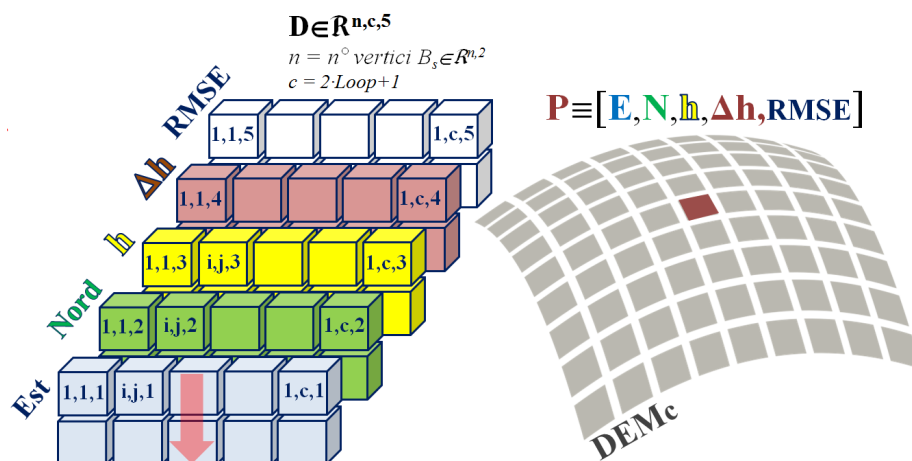


Figura 7.22 – Matrice $D \in \mathbb{R}^{n,c,5}$ del DEMc con scalari Δh e RMSE.

Il primo passo implementato consiste nel creare un'immagine binaria $I_b \in \mathbb{R}^{n,c}$ a partire dalla matrice contenente i valori di $\Delta h \in \mathbb{R}^{n,c}$, corrispondente alla quarta dimensione della matrice $D \in \mathbb{R}^{n,c,4}$. Nelle immagini binarie ogni pixel può assumere solo un valore binario (0-1), esistono quindi solo due valori di intensità (rispettivamente nero e bianco); in particolare, se si sceglie di analizzare solo le depressioni, i valori unitari (pixel bianchi) saranno associati ai soli Δh positivi; al

contrario se si vogliono analizzare i rigonfiamenti i valori unitari saranno associati ai soli Δh negativi.

Il secondo passo importante consiste nell'implementazione degli operatori morfologici utili ad eliminare o raggruppare regioni di pixel unitari (pixel bianchi) aventi determinate caratteristiche; questo rappresenta la vera e propria fase di segmentazione. I parametri imposti sono di tipo geometrico e si basano sugli standard dettati dalla ASTM-D6433 [36]; i parametri geometrici calcolati o analizzati per ogni regione della matrice binaria sono:

- *Valori di Δh* : le regioni verranno suddivise in base al livello di severità, funzione a sua volta delle profondità o delle altezze dei degradi.
- *Area*: Il livello di severità di un dissesto è funzione non solo delle sue dimensioni in elevazione ma anche della sua estensione in planimetria. L'area di ogni regione è determinata come:

$$A = \sum_{j=1}^{npx} \Delta i_j \cdot \Delta j_j \quad \text{con } \Delta i_j \text{ dimensione del pixel e } npx \text{ numero di pixel}$$

- *Lunghezza degli assi dell'ellisse inscritto*: oltre all'estensione che un dissesto può presentare, gli altri parametri che influiscono sui livelli di severità sono il diametro medio e l'orientamento rispetto al verso di percorrenza; a esempio, per le buche le restrizioni sono in termini di forma (diametro medio, area e orientamento). La funzione "*regionprops*", implementata in Matlab, permette di calcolare gli assi principali dell'ellisse in cui è inscritta ogni regione di pixel bianchi.

I parametri geometrici appena esposti sono combinati e analizzati a seconda del tipo di degrado che si vuole caratterizzare. La rimozione delle regioni che non rispettano i requisiti imposti si basa su di un ciclo di istruzioni condizionali, implementato con l'ausilio della funzione "*RemoveMask*". Operazioni di dilatazione e erosione per aggiungere o rimuovere pixel alle regioni ottenute, sono necessarie al fine di ottenere una forma regolare dei bordi; per tale scopo sono state implementate le funzioni morfologiche "*strel*" e "*imfill*". I contorni delle regioni sono identificate utilizzando la funzione "*bwboundaries*", basata sull'algoritmo di tracciamento *Moore-Neighbor*.

Per ogni regione ottenuta, sono calcolati ulteriori parametri geometrici, in particolare:

- Il *Perimetro*: note le coordinate x_{pk} e y_{pk} degli n vertici p dei contorni di ogni singola regione individuata, il perimetro è determinato come (figura 7.23a):

$$P = \sum_{k=1}^{nv} \sqrt{(x_{pk+1} - x_{pk})^2 + (y_{pk+1} - y_{pk})^2}$$

- Il *Volume* di ogni regione è determinato come (figura 7.23b):

$$V = \sum_{j=1}^{npx} \Delta i_j \cdot \Delta i_j \cdot \Delta h_j$$

con Δi_j dimensione del pixel;

npx numero di pixel;

Δh_j profondità associata ad ogni pixel ($\Delta h \in \mathbb{R}^{n,c,1}$).

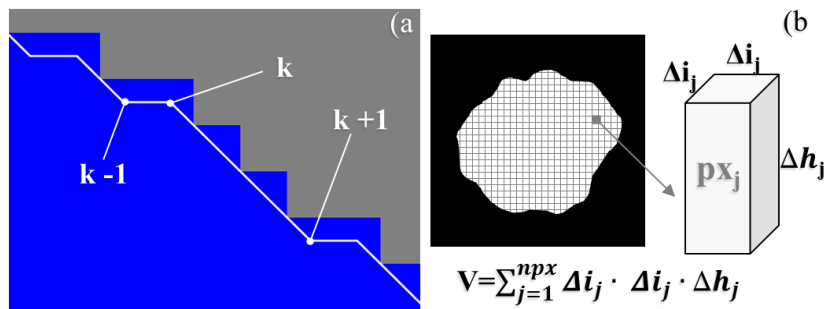


Figura 7.23 – Calcolo Parametri Geometrici; a) Perimetro; b) Volume.

La figura 7.24 mostra un esempio del processo di segmentazione sull'immagine binaria I_b . Impostato l'intervallo di valori di Δh da analizzare, si ottiene una immagine binaria come in figura 7.24a; i pixel bianchi sono tutti quelli caratterizzati dall'intervallo Δh assegnato. Successivamente, il processo di segmentazione andrà a eliminare tutte quelle regioni che non rispettano le condizioni geometriche imposte (in termini di area, dimensioni e orientamento); le funzioni morfologiche, invece, correggeranno i piccoli difetti di forma; il risultato finale è mostrato in figura 7.24b.

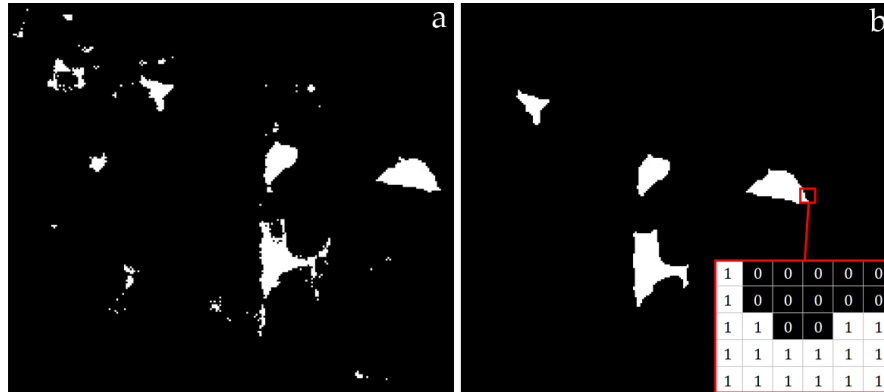


Figura 7.24 – Processo di Segmentazione; a) Immagine binaria I_b con pixel a Δh assegnati (pixel bianchi); b) Immagine binaria dopo la segmentazione.

7.3.3 Validazione dell'algoritmo

La sperimentazione è stata effettuata sull'area test della tratta urbana introdotta nel paragrafo §6.1.3 (*Area Test I*). La tratta è caratterizzata da differenti tipi di degradi, a differenti livelli di severità; per cui risulta ideale per testare e convalidare il metodo proposto nei paragrafi precedenti.

La nuvola di punti esaminata è quella proveniente dalla misura LSM con una velocità media di percorrenza pari a 10km/h. La distribuzione spaziale dei punti, in termini di densità, è riportata in figura 7.5 §7.1.4; la densità massima è pari a circa 35000punti/m², ai bordi della carreggiata la densità si attesta intorno ai 4000 punti/m². Analizzando i grafici riportati in figura 6.9 §6.1.3, è possibile stimare la densità per dm²; in particolare a 1m dalla traiettoria del veicolo la densità è circa 250punti/dm², a 6m dalla traiettoria, invece, la densità scende a circa 45punti/dm².

La risoluzione del *DEM_c* (§6.3.1) è stata scelta in funzione della distribuzione spaziale dei punti, in particolare della densità superficiale minima e della distanza media tra le linee di scansione. La relazione funzione della densità superficiale di una distribuzione superficiale regolare di punti è pari a [103]:

$$\rho = 0,5 \cdot \sqrt{\frac{1m^2}{D}}$$

Dove D il numero di punti stimato in $1m^2$. Sulla base dei valori di densità introdotti precedentemente si ottiene:

$$\rho = 0,5 \cdot \sqrt{\frac{1m^2}{D}} = 0,5 \cdot \sqrt{\frac{1m^2}{4000punti / m^2}} \cong 8mm$$

$$\rho = 0,5 \cdot \sqrt{\frac{1dm^2}{D}} = 0,5 \cdot \sqrt{\frac{1dm^2}{45punti / dm^2}} \cong 8mm$$

Valutando sia la densità per m^2 che quella per dm^2 si osserva come il risultato sia praticamente lo stesso; questo evidenzia il *pattern* regolare, ovvero, la regolare distribuzione superficiale dei punti. Analizzando la relazione semplificata che lega la distanza medie tra due linee di scansione contigue con le dimensioni della griglia [103], si ottiene:

$$\rho \geq \frac{\bar{d}_{i,j}}{2} = 1,1cm \quad \text{con } \bar{d}_{i,j} \text{ distanza media tra linee di scansione}$$

La dimensione della griglia ρ deve essere maggiore della metà della distanza media tra due linee di scansioni contigue. Sulla base delle considerazioni effettuate, si è scelto di utilizzare una risoluzione pari a $\rho=1,5cm$.

Assunto $\rho = 1,5cm$, il raggio di ricerca per l'interpolazione risulterà pari a:

$$r = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \rho \cong 2cm$$

In questo modo vengono inglobati tutti i punti contenuti all'interno della maglia di dimensioni ($\rho=it=il$) senza una eccessiva sovrapposizione delle sfere di ricerca, la sovrapposizione sarà pari a:

$$\rho \cdot (\sqrt{2} - 1) \cong 7mm$$

La fase precedente all'estrazione del DEMc prevede la determinazione delle differenze di elevazione di ogni singolo punto appartenente alla nuvola di punti rispetto alle superfici di riferimento, costruite come descritto nel §7.3.1. Data in input la nuvola di punti sottoposta a processo di estrazione §6.1, l'algoritmo determina i valori di Δh costruendo il modello planare con i punti contenuti nella sfera di raggio *KernelSize*. L'unico parametro da impostare risulta quindi il raggio della sfera di

ricerca (*KernelSize*); anche in questo caso la scelta può essere governata da due criteri differenti:

- *Dinamico*: analizzando le risposte dinamiche di un veicolo, le lunghezze d'onda critiche sono quelle comprese nell'intervallo tra 1m e 30m;
- *Geometrico*: analizzando, invece, le dimensioni dei principali dissesti riportati nei cataloghi (ad esempio depressioni e buche), le dimensioni massime associate sono all'incirca pari a 1m.

Le considerazioni appena esposte risultano comunque troppo restrittive; più avanti si discuterà in modo più approfondito sulla scelta del *KernelSize*. È stato assunto, quindi, un *kernelSize* pari a 60cm. In figura 7.25 è riportata la nuvola di punti di output del processo di calcolo. La scala di grigi è proporzionale ai valori di Δh ; valori positivi caratterizzano i punti al di sotto del piano di riferimento locale, valori negativi, invece, caratterizzano i punti al di sopra del piano di riferimento.

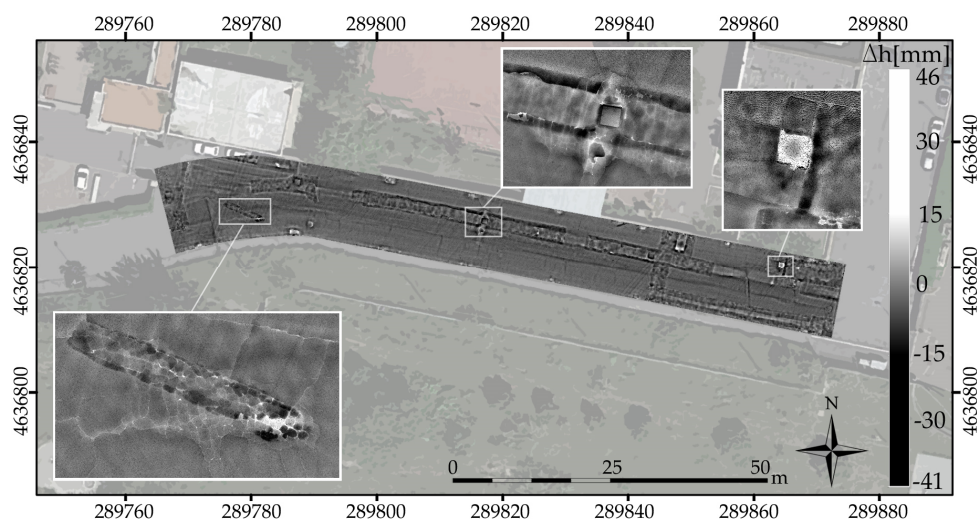


Figura 7.25 – Determinazione del Δh con *KernelSize* 60cm.

In figura 7.26 è riportata la nuvola con i valori di RMSE associati. Valori bassi indicano aree della pavimentazione con caratteristiche regolari e prossime a una configurazione planare; valori alti indicano, al contrario, aree con condizioni di irregolarità pronunciate, che si discostano dal modello planare locale. La mappa riportata in figura 7.26 teoricamente

potrebbe già essere utilizzata per una prima classificazione generale delle condizioni della pavimentazione [79].

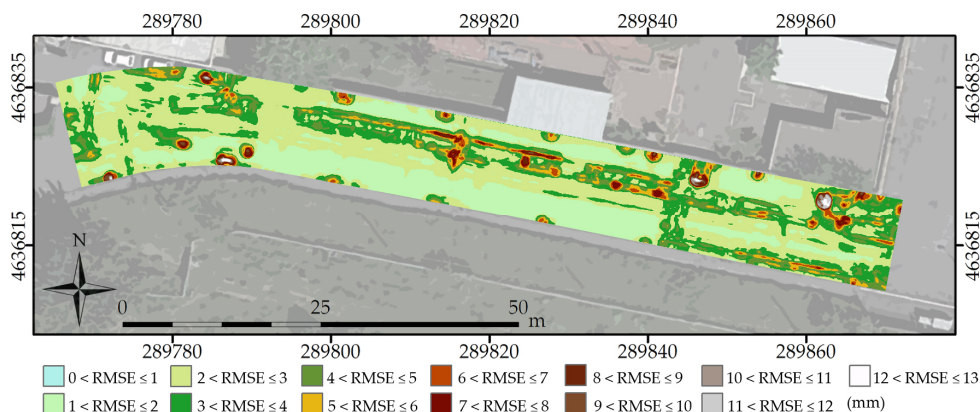


Figura 7.26 – Valori di RMSE con KernelSize 60cm.

La nuvola di punti è interpolata su grigliato con la risoluzione stabilita precedentemente, l'interpolatore utilizzato è l'IDW con potenza quadra. Saranno interpolati sia i valori di elevazione sia i valori di Δh associati a ogni singolo punto della nube.

La fase successiva riguarda la segmentazione per l'estrazione e la catalogazione dei differenti difetti superficiali, in funzione dei livelli di severità introdotti dalla normativa [36]. I degradi stimabili sono stati suddivisi in due grosse categorie; i parametri che verranno imposti durante il processo di segmentazione derivano dalla combinazione delle caratteristiche dei degradi raggruppati. I due gruppi sono:

1. *Buche*: di questo macro-gruppo fanno parte le depressioni, le buche, le fessurazioni da scorrimento, i tombini in depressione, i rappezzi in depressione;
2. *Rigonfiamenti*: di questo macro-gruppo fanno parte: gli scorrimenti, i rigonfiamenti, i dossi, i rappezzi in rigonfiamento.

I parametri impostati nel processo di segmentazione sono riportati in tabella 7.8; come già evidenziato, derivano dalla combinazione dei parametri caratteristici dei vari dissesti presenti nei macro-gruppi individuati e sono legati ai loro livelli minimi di severità. Questi parametri servono solo per estrarre le regioni di interesse, cioè, le regioni

che posseggono i requisiti minimi per poter essere classificati come dissesti.

Ottenute le regioni con i requisiti minimi, queste sono classificate automaticamente in funzione dei livelli di severità riportati in tabella 7.9.

Parametri impostati	Buche	Rigonfiamenti
Δh [mm]	≥ 13	≤ -5
Area [dm ²]	≥ 1	≥ 1
Asse minore ellisse [mm]	≥ 100	//

Tabella 7.8 – Parametri Geometrici impostati per la segmentazione.

Buche			
[mm]	Diametro medio d		
Profondità	$100 \leq d \leq 200$	$200 \leq d \leq 450$	$450 \leq d \leq 750$
$13 \leq \Delta h \leq 25$	L	L	M
$25 \leq \Delta h \leq 50$	L	M	H
$50 \leq \Delta h $	M	M	H
Rigonfiamenti			
[mm]	Diametro medio d		
Profondità	$100 \leq d \leq 200$	$200 \leq d \leq 450$	$450 \leq d$
$5 \leq \Delta h \leq 19$	L	L	L
$19 \leq \Delta h \leq 38$	M	M	M
$38 \leq \Delta h $	H	H	H

L = Basso M = Medio H = Alto

Tabella 7.9 – Livelli di Severità.

In figura 7.27 è riportata la mappa contenente le regioni segmentate e classificate come Buche, in totale sono state segmentate 29 regioni. In figura 7.28 sono, invece, riportate le regioni estratte e classificate come rigonfiamenti, in totale sono state segmentate 98 regioni. Le figure sono complete di abachi contenenti gli zoom delle regioni segmentate. La tabella 7.10 e la tabella 7.11 riportano i principali parametri geometrici calcolati per ogni regione ottenuta, insieme alla classificazione in funzione dei livelli di severità impostati.

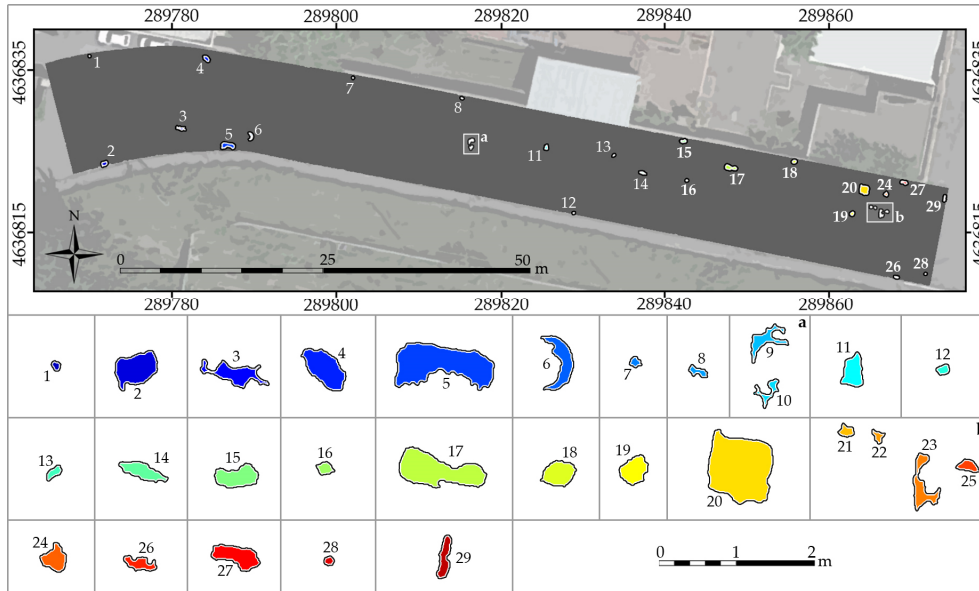


Figura 7.27 – Buche.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Δh_{MAX} (cm)	1.7	3.4	3.1	3.1	3.3	4.2	2.3	2.8	2.8	2.9	3.1	2.3
P (dm)	4.1	21.1	30.6	20.9	44.4	26.0	5.2	7.9	24.7	17.0	14.3	5.3
A (dm ²)	1.2	22.9	15.4	23.2	62.8	14.9	1.6	2.3	8.5	3.8	10.6	1.9
V (dm ³)	0.2	3.8	2.5	4.3	11.1	2.9	0.2	0.3	1.3	0.6	2.6	0.3
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Δh_{MAX} (cm)	2.5	3.8	2.6	3.0	3.1	2.8	2.2	3.2	3.1	2.6	4.2	2.5
P (dm)	6.7	17.5	17.7	7.2	35.3	14.8	14.2	37.0	6.8	6.2	26.8	13.1
A (dm ²)	2.4	10.6	14.8	3.0	42.6	13.1	11.7	76.6	2.6	1.7	11.5	9.3
V (dm ³)	0.4	2.2	2.2	0.6	7.8	2.1	1.8	14.3	0.4	0.3	2.1	1.6
	25	26	27	28	29							
Δh_{MAX} (cm)	3.8	2.6	2.3	2.0	2.6							
P (dm)	8.5	14.1	19.0	4.2	15.5							
A (dm ²)	3.6	5.9	15.7	1.3	7.3							
V (dm ³)	0.9	0.8	2.2	0.2	1.1							

Severità

■ **Bassa**

■ **Media**

■ **Alta**

Tabella 7.10 – Parametri geometrici delle Buche.

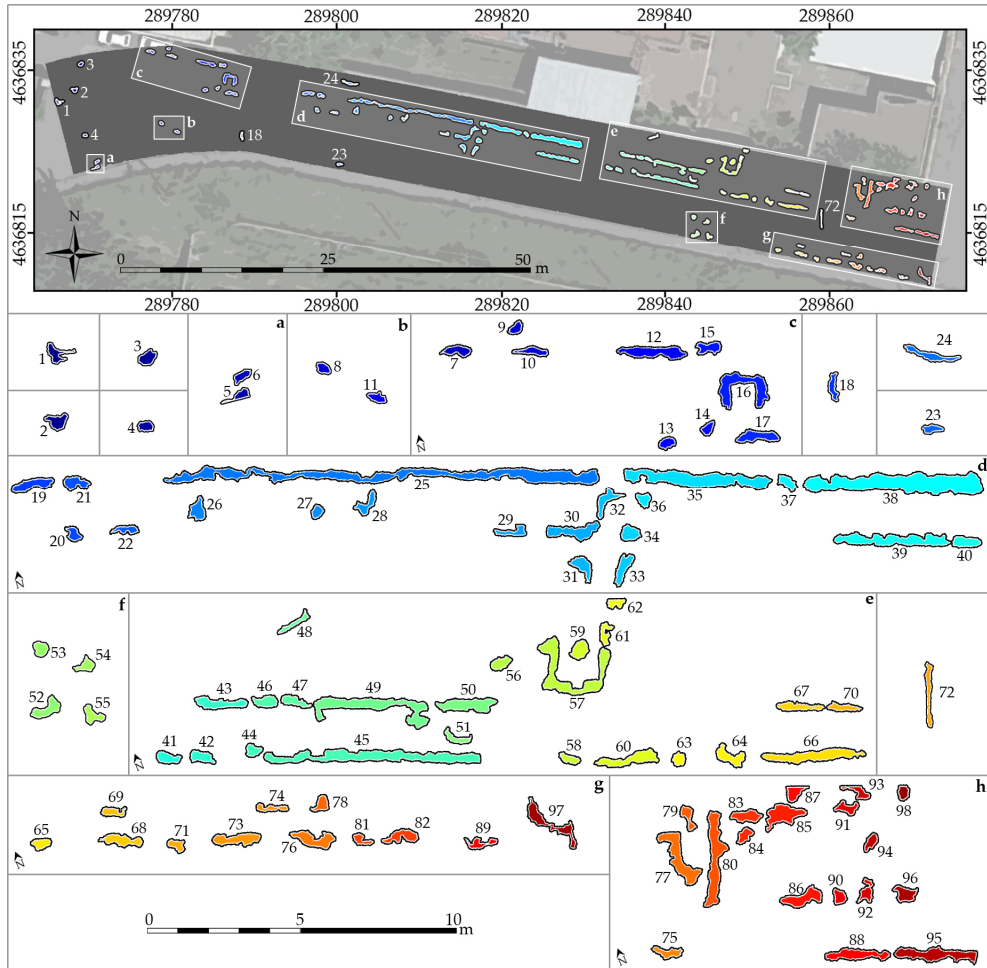


Figura 7.28 – Rigonfiamenti.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Δh_{MAX} (cm)	1.6	0.9	0.9	1.1	2.3	1.0	1.4	1.1	1.2	1.4	1.6	1.3	1.2	1.1
P (dm)	34.4	24.1	19.0	16.1	24.6	18.3	25.5	14.2	15.6	27.1	17.7	54.5	16.2	15.5
A (dm ²)	22.2	23.6	19.6	13.2	13.7	14.0	21.9	12.0	11.8	18.9	13.5	60.3	14.2	11.7
V (dm ³)	1.5	1.3	1.2	0.8	1.4	0.9	1.5	0.8	0.8	1.3	1.2	4.0	0.9	0.8
	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
Δh_{MAX} (cm)	1.1	1.5	1.3	1.1	1.2	1.1	1.4	1.0	0.9	1.1	1.9	1.0	1.0	0.9
P (dm)	25.3	73.5	35.1	25.6	35.0	18.4	26.4	24.5	18.1	44.1	348.5	25.0	14.0	28.6
A (dm ²)	21.8	81.5	36.1	17.0	36.8	14.6	25.1	15.1	13.1	30.6	351.5	24.6	11.8	21.0
V (dm ³)	1.3	5.6	2.4	1.0	2.5	0.9	1.6	0.9	0.7	1.8	30.6	1.4	0.8	1.2
	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42
Δh_{MAX} (cm)	1.2	1.8	1.2	2.1	1.2	1.3	1.5	1.0	1.2	1.6	1.3	1.5	1.3	1.3
P (dm)	28.6	47.4	29.0	34.9	32.0	20.0	123.1	17.1	21.2	148.0	97.7	23.6	21.5	23.3
A (dm ²)	18.6	51.9	27.1	26.3	29.1	22.7	167.3	14.0	16.8	289.9	101.4	25.1	20.5	21.0
V (dm ³)	1.3	4.3	1.7	2.2	1.7	1.7	12.6	0.8	1.0	21.7	6.5	2.1	1.4	1.5
	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56
Δh_{MAX} (cm)	1.4	1.1	1.6	1.1	1.0	1.6	1.3	1.3	1.5	1.2	1.4	1.2	1.1	1.3
P (dm)	42.2	16.8	170.7	22.6	26.1	29.6	119.7	51.8	28.1	30.2	16.8	21.5	24.0	19.5
A (dm ²)	40.5	14.1	181.2	22.3	20.3	15.5	128.6	59.6	16.0	30.6	17.1	16.3	21.0	19.2
V (dm ³)	2.8	0.9	14.6	1.3	1.2	1.1	8.6	4.0	1.1	2.1	1.4	1.1	1.4	1.4
	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
Δh_{MAX} (cm)	1.9	1.0	1.3	1.2	1.0	1.4	1.0	1.0	1.0	1.3	0.9	1.0	1.1	1.0
P (dm)	113.3	18.7	20.4	52.5	26.6	17.7	15.4	33.2	17.4	80.4	37.7	36.9	24.3	27.4
A (dm ²)	122.9	13.9	24.5	52.3	16.5	12.6	13.5	30.6	15.4	83.3	27.8	32.9	15.7	18.2
V (dm ³)	13.2	0.8	1.8	3.3	1.0	0.9	0.8	1.7	0.9	5.5	1.5	2.0	0.9	1.0
	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84
Δh_{MAX} (cm)	1.1	1.4	1.2	0.9	1.2	1.0	1.5	1.1	1.1	2.0	0.9	1.0	1.5	1.1
P (dm)	17.7	48.9	40.6	26.9	27.6	41.7	63.2	20.2	24.9	80.3	20.0	33.4	27.6	18.5
A (dm ²)	13.9	27.2	42.0	14.6	20.0	43.9	75.9	16.3	17.8	100.0	12.6	29.2	27.8	15.5
V (dm ³)	0.9	1.7	2.7	0.8	1.2	2.6	5.6	1.1	1.1	9.3	0.8	1.8	2.0	1.0
	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98
Δh_{MAX} (cm)	1.5	1.5	1.5	1.2	1.4	1.1	1.3	1.2	1.2	1.2	1.5	1.2	1.2	1.2
P (dm)	44.9	37.9	22.8	54.1	31.6	16.3	24.0	29.8	27.2	17.5	70.1	25.4	66.1	14.9
A (dm ²)	55.3	43.2	19.4	49.9	17.7	14.8	18.5	19.5	16.8	14.4	75.5	25.1	48.5	13.1
V (dm ³)	4.0	3.3	1.2	2.9	1.3	1.0	1.3	1.1	1.1	0.9	5.3	1.7	3.2	1.0

Tabella 7.11 – Parametri geometrici dei Rigonfiamenti.

I risultati ottenuti con la metodologia proposta dipendono in parte dalla scelta dei parametri dati in input al software di calcolo. La scelta di alcuni di essi è basata su considerazioni legate alla natura del dato di input; la risoluzione del DEMc, a esempio, è legata alle caratteristiche della nuvola di punti, caratterizzata da una certa densità e accuratezza. Gli altri parametri sono dettati, invece, dalla tipologia di degrado da segmentare. L'unico parametro che può influenzare il risultato è la dimensione del raggio di ricerca per l'interpolazione del piano locale, il *KernelSize*.

La scelta del *KernelSize* ha conseguenze rilevanti, è fortemente condizionante per il risultato finale in quanto assume significato quando il riferimento piano del sistema locale ha dimensioni maggiori rispetto allo sviluppo planimetrico del degrado. D'altra parte, se assunto troppo grande, può risentire eccessivamente delle condizioni al contorno. Per analizzare l'influenza del *KernelSize*, è stata elaborata una porzione di superficie (larga quanto l'intera carreggiata e lunga 5m) variando il raggio di ricerca da 10cm a 100cm, ad intervalli di 10cm (figura 7.29).

Dalla figura 7.29 è possibile notare come all'aumentare del *KernelSize* le regioni rigonfiate tendano ad allargarsi; in particolare con un *KernelSize* di 10cm non viene evidenziato nulla, il piano locale è troppo piccolo e segue l'andamento della superficie stradale. Con un raggio di 20cm appare la regione caratterizzata da valori di Δh positivi, questa area si stabilizza dai 60cm in poi, quando le sue dimensioni rientrano completamente nella sfera di ricerca.

La sensibilità con cui variano i parametri geometrici delle regioni individuate, al variare del *KernelSize*, non permette una facile e giustificata scelta di quest'ultimo. Una migliore valutazione può avvenire prescindendo dall'analisi delle variazioni dei parametri geometrici e valutando le variazioni dei livelli di severità. In figura 7.30 sono riportate le variazioni del livello di severità di alcune regioni al variare del raggio di ricerca. Le zone sono state scelte in modo da avere configurazioni superficiali differenti. In particolare, in figura 7.30a sono riportate le regioni classificate come buche, nella figura 7.30b quelle classificate come rigonfiamenti. Tutti i rigonfiamenti analizzati, da un *KernelSize* di 60cm in poi, conservano lo stesso livello di severità. Le buche hanno maggiori variazioni del livello di severità ma comunque dai 60cm in poi tendono a stabilizzarsi.

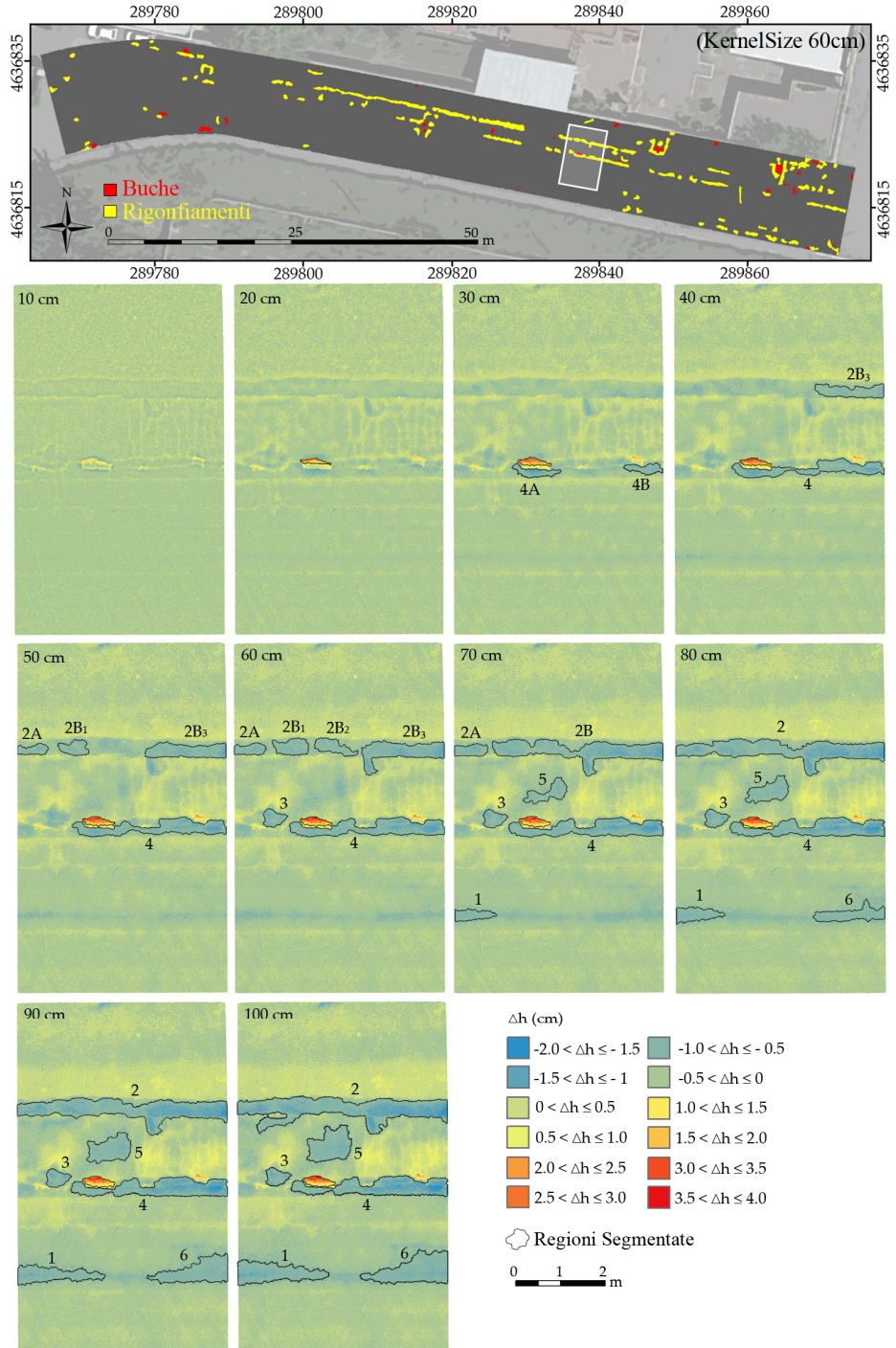


Figura 7.29 – Segmentazione a differenti KernelSize.

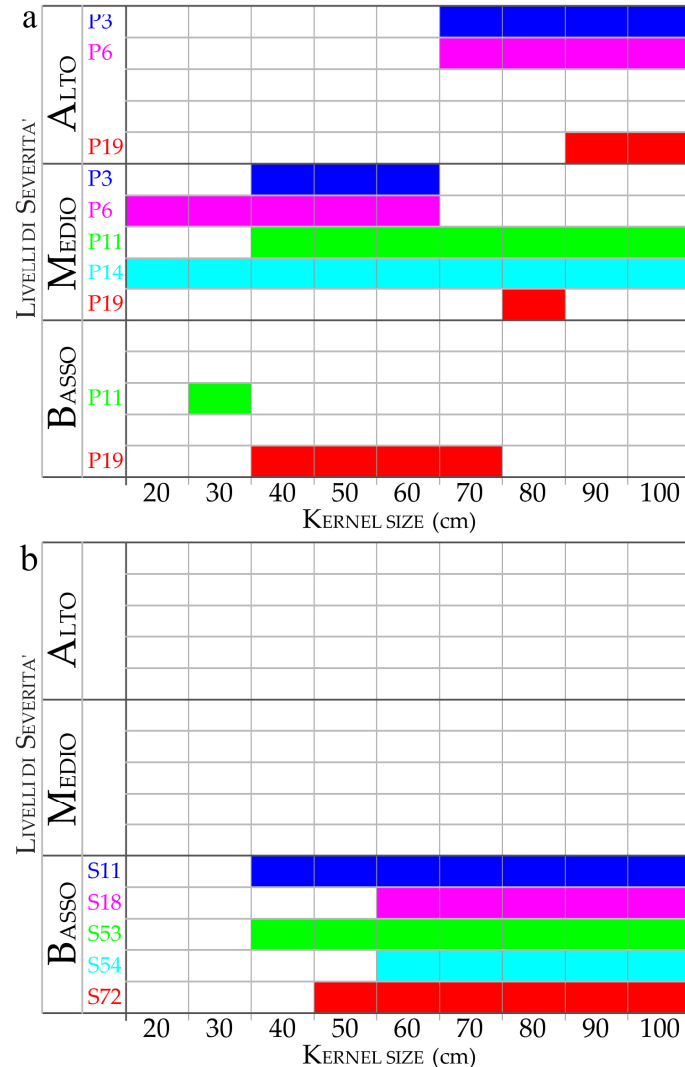


Figura 7.30 – KernelSize e Livelli di Severità; a) Buche; b) Rigonfiamenti.

Un altro particolare aspetto critico riguarda il così detto effetto di bordo. Durante il processo di calcolo del Δh , nelle fasce perimetrali della nuvola di punti e larghe quanto il *KernelSize*, la sfera di ricerca fuoriesce dalla carreggiata stradale; di conseguenza il numero di punti diminuisce man mano che ci si avvicina al bordo, fino a ridursi a circa metà sfera se i punti esaminati sono collocati proprio sul bordo della nuvola di punti. Di conseguenza, i valori di Δh contenuti nelle fasce perimetrali vanno

considerati meno attendibili. L'attendibilità è stata valutata simulando l'effetto di bordo su una porzione di nuvola in mezzeria (figura 7.31).

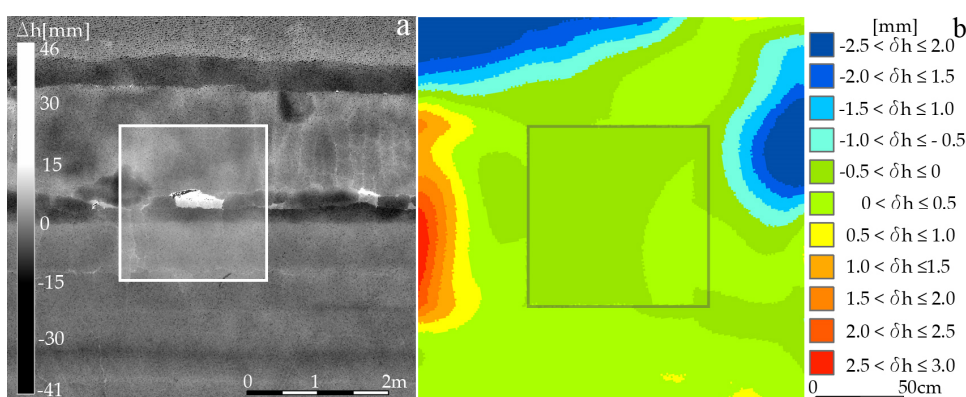


Figura 7.31 – Effetto Bordo; a) Nuvola di punti; b) Residui δh .

In figura 7.31a è riportato uno stralcio della nuvola di punti, la scala di grigio è proporzionale ai valori di Δh , determinati con un *KernelSize* di 60cm. La figura 7.31b contiene i valori dei residui δh , calcolati come:

$$\delta h = \Delta h_{NEB} - \Delta h_{EB}$$

Dove, Δh_{NEB} sono i valori determinati sull'intera nuvola di punti (nella zona centrale e privi dell'effetto di bordo), Δh_{EB} sono i valori determinati sulla porzione della nuvola di punti ritagliata come il riquadro bianco, raffigurato in figura 7.31a (caratterizzati, quindi, dall'effetto di bordo). In figura 7.31b è riportata la mappa classificata dei residui δh , il riquadro scuro rappresenta, invece, il confine della fascia dello spessore pari al *KernelSize*. L'effetto di bordo, sulle fasce laterali, determina valori inaccettabili; i valori massimi si attestano intorno ai 3mm in valore assoluto. L'analisi, quindi, suggerisce di non tener conto dei valori contenuti all'interno della fascia perimetrale, di spessore pari al *KernelSize*, dato che questi risultano poco attendibili e affetti da un errore non trascurabile.

Lo studio effettuato vuole mettere in evidenza una metodologia alternativa per l'analisi della regolarità superficiale con l'ausilio delle nuove tecnologie di rilevamento; non è solo un'alternativa ma anche un complemento e un approfondimento alle metodologie tradizionali che molto spesso ostacolano il corretto esercizio della sovrastruttura e non risultano essere abbastanza celeri.

7.4 Faulting

Il *Faulting* è uno degli ammaloramenti più frequenti su pavimentazione rigida. Il cedimento lungo i giunti comporta una differenza di quota tra i bordi delle piastre adiacenti; questo è dovuto principalmente a cedimenti differenziali del piano di posa o per effetto dei fenomeni di erosione sotto la lastra, il così detto fenomeno di *pumping*, il quale favorisce la risalita di acqua attraverso i giunti portando con sé materiale fino e creando in questo modo delle cavità al di sotto. La lastra si deforma per effetto dei carichi ciclici e per effetto dei carichi termici; queste sollecitazioni si concentrano lungo i bordi rialzati determinando così la rottura del bordo lastra.

La differenza di elevazione tra due lastre adiacenti, oltre che essere un campanello di allarme per i successivi fenomeni di rottura, incide anche sulla dinamica del veicolo; durante la marcia il veicolo subisce degli sbalzi per effetto di questi gradini. Queste sollecitazioni possono essere fastidiose, principalmente se riprodotte con una cadenza costante, provocando disagi e malessere in caso di esposizione a lungo termine.

Differenti metodi sono proposti in letteratura per la determinazione del *faulting*; recentemente sono stati sviluppate metodologie automatizzate che si basano su misure profilometriche e camere 3D [116], altri si basano su metodi tradizionali. Il metodo tradizionale consiste in un metodo manuale condotto tramite il *Georgia Faultmeter* [117]; questo dispositivo, introdotto dal *Georgia Department of Transportation* (GDOT), permette di misurare il dislivello tra due lastre contigue mediante un trasduttore laser alloggiato su un supporto portatile di dimensioni standardizzate.

In ambito aeroportuale o laddove è richiesta una misura senza compromettere l'esercizio dell'infrastruttura, difficilmente si riesce a applicare metodologie tradizionali in piena sicurezza. Le difficoltà aumentano se le zone da indagare sono molto estese. Per tali motivi, si vuole introdurre una metodologia in grado di stimare la giacitura delle lastre così da individuare automaticamente tutte quelle aree che presentano maggiori problematiche e che necessitano un pronto intervento. Con l'ausilio di scansioni laser è possibile effettuare misure a distanze tali da evitare interferenze con il traffico. Il metodo non solo permette una stima diretta del *faulting*, ma risulta di ausilio alle tecniche tradizionali tramite l'individuazione delle aree critiche su cui,

eventualmente, si può approfondire l'indagine utilizzando tecniche standardizzate. Insieme al metodo, verranno descritte le criticità incontrate durante l'applicazione su un'area test. L'analisi 3D della giacitura delle lastre è utile anche per eventuali processi di consolidamento del sottofondo, realizzato per ottenere un livellamento delle lastre cedute, informazioni che le sole tecniche tradizionali non sono in grado di fornire [118].

7.4.1 Determinazione dell'assetto delle lastre.

La giacitura delle lastre è valutata mediante l'ausilio di un sistema locale planare, denominato "*Piano Generale*"; la posizione di ogni singola lastra sarà, quindi, determinata rispetto a questo piano generale. Il piano generale rappresenta la configurazione ideale che la pavimentazione dovrebbe avere; l'ideale sarebbe realizzare delle pavimentazioni prive di giunti, ma da un punto di vista pratico questo è inattuabile dato che i giunti svolgono un ruolo essenziale durante i fenomeni deformativi. I sistemi di riferimento adottati nella determinazione dei parametri di assetto consistono sono:

- Il sistema di riferimento assoluto: le nuvole di punti sono georeferenziate rispetto ad un sistema cartografico (E,N,h);
- Il sistema di riferimento del piano generale: è adottato un sistema di riferimento cartesiano (X,Y,Z), il piano generale è contenuto nel piano (X,Y), di conseguenza, l'asse Z sarà parallelo alla normale N_{GP} al piano generale.
- Il sistema di riferimento locale di ogni singola lastra: è adottato un sistema di riferimento cartesiano (x_i, y_i, z_i) relativo all'i-esima lastra. Anche in questo caso, il piano rappresentativo della lastra sarà contenuto nel piano (x,y) e l'asse z sarà parallelo alla normale n_{slab} della generica lastra.

In figura 7.32 è riportato uno schema dei differenti sistemi di riferimento adottati.

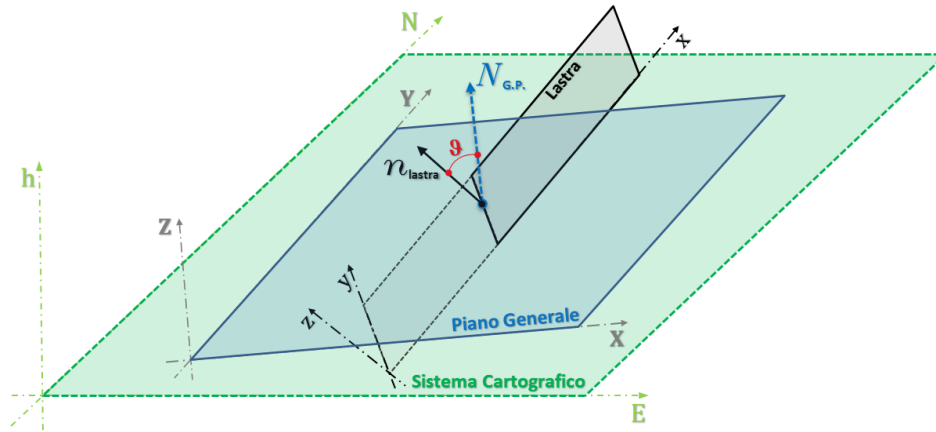


Figura 7.32 – Sistemi di Riferimento.

Ogni lastra è interpolata con un piano ai minimi quadrati in modo da individuare il piano appartenente alla generica lastra. Le componenti delle normali appartenenti alle lastre $\eta_{\text{lastra}} \equiv (\eta_E, \eta_N, \eta_h)$, rispetto al sistema cartografico, sono determinate come:

$$n_E = p_1 / M, \quad n_N = p_2 / M, \quad n_h = -1 / M; \quad M = \sqrt{p_1^2 + p_2^2 + 1}$$

Dove p_1, p_2, p_3 , sono i coefficienti dell'equazione cartesiana del piano in forma esplicita:

$$h = p_1 E + p_2 N + p_3$$

Le componenti della normale appartenente al piano generale $N_{\text{GP}} \equiv (N_E, N_N, N_h)$ sono determinate anch'esse rispetto al sistema cartografico; è possibile calcolare l'angolo α_i tra le due normali secondo la relazione:

$$\alpha_i = \arccos(\eta_i \cdot N_{\text{GP}}) = \arccos(\eta_E N_E + \eta_N N_N + \eta_h N_h)$$

Il vettore differenza ϵ_i tra la normale dell' i -esima lastra η_i e quella del piano generale N_{GP} , è dato dalla relazione:

$$\epsilon_i = \eta_i - (\eta_i \cdot N_{\text{GP}}) \cdot N_{\text{GP}}$$

L'angolo α_i insieme al vettore ϵ_i , rappresentano i parametri di assetto della generica lastra $lastra_i$ (figura 7.33); in particolare l'angolo α_i rappresenta la deviazione angolare della singola lastra rispetto al piano

determinato intervallo, la sezione è evidenziata graficamente sulla nuvola di punti. I parametri utilizzati per classificare le differenze di elevazione in corrispondenza dei giunti si basano sullo standard AASHTO-R36 [117].

Ciò consente una prima individuazione automatizzata (sia grafica sia numerica) del *faulting*. Una volta individuate le sezioni critiche, il *faulting* è stimato estraendo le sezioni ortogonali al giunto segnalato.

Il processo appena esposto consiste, quindi, in due fasi fondamentali:

1. Determinazione dei valori di ΔZ

Nella prima fase sono determinati i valori di ΔZ tra i piani delle lastre e il piano generale (figura 7.34): noti i punti appartenenti al piano interpolato su ogni lastra e i coefficienti dell'equazione del piano generale, il valore di ΔZ_{ji} in corrispondenza del *j-esimo* punto appartenente alla *i-esima* lastra, si determina come:

$$h = p_1 E + p_2 N + p_3 \quad (\text{equazione Piano Generale})$$

$$a = p_1 / M, \quad b = p_2 / M, \quad c = -1 / M; \quad M = \sqrt{p_1^2 + p_2^2 + 1}$$

$$\Delta Z_{ji} = \frac{aE_{ji} + bN_{ji} + ch_{ji} + M}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}}$$

Dove E_{ji} , N_{ji} , h_{ji} , sono le coordinate del *j-esimo* punto della *i-esima* lastra, rispetto al sistema cartografico.

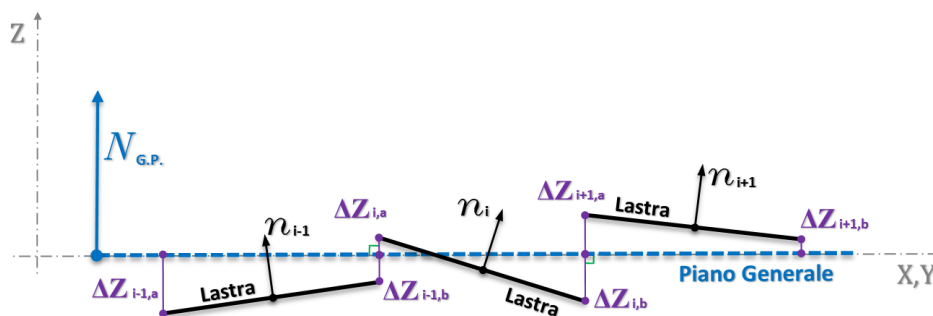


Figura 7.34 – Distanza dal piano generale.

2. Estrazione delle Sezioni

La seconda fase prevede l'estrazione delle sezioni in corrispondenza dei giunti aventi maggior criticità; per maggior criticità si intende un valore

di ΔZ_{ji} maggiore della soglia limite impostata. Le sezioni sono estratte ortogonalmente ai giunti; in particolare è estratta una fascia di punti di spessore 2τ , a cavallo della linea di sezione individuata, e lunga λ , nella direzione perpendicolare al giunto. Successivamente, i punti vengono proiettati su un piano verticale (figura 7.35).

La variazione di spessore della striscia considerata (2τ) comporta inevitabilmente una variazione nel numero di punti estratto. Per scegliere lo spessore adatto è stato calcolato il numero di punti appartenente a differenti aree rettangolari, con λ assegnato e variando lo spessore 2τ da 20mm e 100mm. La trattazione dedicata, con gli esempi numerici, sarà presente nel caso studio trattato nel §7.4.4.

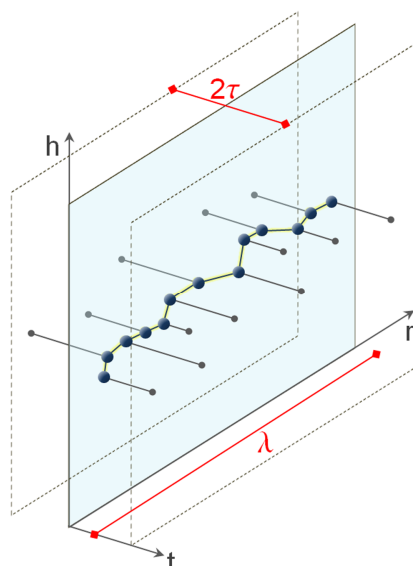


Figura 7.35 – Estrazione della sezione in prossimità dei giunti.

I profili sono stati estratti utilizzando una trasformazione rigida, in particolare una roto-traslazione. Considerando la nuvola di punti georeferenziata nel sistema di riferimento assoluto, se con P_A e P_B si indicano gli estremi della linea di sezione A-B in cui deve essere estratto il profilo di elevazione, le relazioni per la trasformazione diventano:

- Calcolo delle coordinate rispetto al sistema di riferimento con origine nel punto A:

$$x_i^{(A)} = P_i - P_A$$

- Determinazione dell'angolo di direzione φ_{AB} :

$$\varphi_{AB} = \arctan\left(\frac{E_B - E_A}{N_B - N_A}\right)$$

- Rotazione della sezione attorno l'asse Z:

$$r_i = R_Z(\varphi_{AB}) x_i^A$$

Dove $r = [r, t, h]^T$ è la matrice contenente le componenti appartenenti al piano verticale (r, h). La sezione sarà quindi rappresentata nel piano cartesiano; sulle ascisse saranno riportati i valori contenuti nel vettore r , in ordinata i relativi valori di elevazione h .

3. Calcolo del Faulting

A partire dalle sezioni estratte si effettua una interpolazione lineare ai minimi quadrati dei punti appartenenti alle singole lastre. La differenza di elevazione tra le due rette, in corrispondenza del giunto, fornirà la stima del *faulting* (figura 7.36).

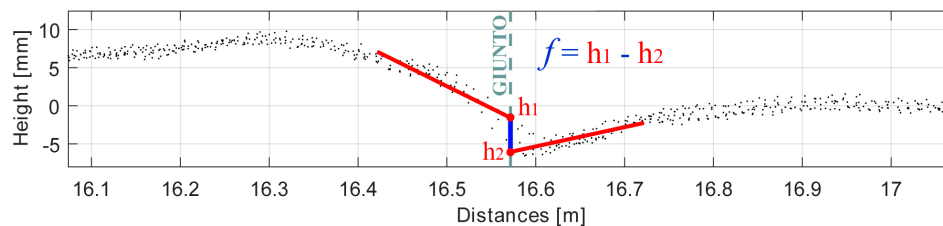


Figura 7.36 – Determinazione del Faulting (f).

La variazione dei parametri λ e 2τ influisce sulla stima del *faulting*; nel §7.4.4 saranno evidenziate le possibili criticità sulla base di un caso test.

Insieme ai valori di *faulting*, sono determinati i valori di RMSE in modo da avere una stima sulla bontà dell'interpolazione e valutare l'incertezza associata.

7.4.3 Stima dell'Incertezza dei parametri calcolati

La metodologia proposta prevede l'utilizzo di quantità derivanti da misure, pertanto è bene analizzare e studiare l'attendibilità dei parametri calcolati.

1. Incertezza nella determinazione dei parametri di assetto

L'interpolazione con il criterio dei minimi quadrati permette di calcolare l'errore standard delle stime dei coefficienti dell'equazione del piano. L'incertezza nel calcolo delle normali e delle quantità che ne derivano, possono essere ottenute applicando la formula di propagazione dell'errore a partire dalla matrice di co-varianza Σ_p dei coefficienti a e b . Se J_{np} è lo Jacobiano della trasformazione dai coefficienti p del piano alle componenti della normale e Σ_n la matrice di covarianza della normale al piano della lastra, otteniamo:

$$J_{np} = M^{-3} \begin{bmatrix} p_2^2 + 1 & -p_1 p_2 \\ -p_1 p_2 & p_1^2 + 1 \\ p_1 & p_2 \end{bmatrix} ; \quad \Sigma_n = J_{np} \Sigma_{pp} J_{np}^t$$

Definiamo con Σ_N la matrice di covarianza della normale N_{GP} al piano generale e assumendo che non sia correlata con la generica normale alla lastra n , la deviazione standard (SD) del prodotto scalare è ottenuta attraverso lo Jacobiano della trasformazione J_{sn} :

$$J_{sn} = [N_E \ N_N \ N_h \ n_E \ n_N \ n_h] = \begin{bmatrix} \underline{N}^t & \underline{n}^t \end{bmatrix}$$

La varianza dell'angolo tra le normali α può essere espresso dal prodotto scalare:

$$\sigma_\alpha^2 = \sigma_s^2 / (1 - s^2) \quad ; \quad \sigma_s^2 = \begin{bmatrix} \underline{N}^t & \underline{n}^t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Sigma_{nn} & 0 \\ 0 & \Sigma_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{N} \\ \underline{n} \end{bmatrix} = \underline{N}^t \Sigma_n \underline{N} + \underline{n}^t \Sigma_N \underline{N}$$

Il vettore $\underline{\varepsilon}$ della differenza tra la normale alla generica lastra e la normale al piano generale risulta:

$$\underline{\varepsilon} = \underline{n} - \underline{N} = \begin{bmatrix} I_3 & -I_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{n} \\ \underline{N} \end{bmatrix} \quad ; \quad \Sigma_\varepsilon = \begin{bmatrix} I_3 & -I_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Sigma_{nn} & 0 \\ 0 & \Sigma_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_3 \\ -I_3 \end{bmatrix} = \Sigma_{nn} + \Sigma_{NN}$$

Per la proiezione del vettore $\underline{\varepsilon}$ sul piano generale ε_π , si ottiene:

$$\varepsilon_\pi = \underline{n} - (\underline{n} \cdot \underline{N}) \underline{N} = \begin{bmatrix} I_3 - (\underline{n} \cdot \underline{N}) I_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{n} \\ \underline{N} \end{bmatrix}$$

$$\Sigma_\varepsilon = \begin{bmatrix} I_3 - (\underline{n} \cdot \underline{N}) I_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Sigma_{nn} & 0 \\ 0 & \Sigma_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_3 \\ -(\underline{n} \cdot \underline{N}) I_3 \end{bmatrix} = \Sigma_{nn} + (\underline{n} \cdot \underline{N})^2 \Sigma_N$$

La conoscenza dell'incertezza associata a queste grandezze ci consente di stimare il reale significato delle differenze tra i valori calcolati.

2. Incertezza nel calcolo del Faulting

Come già evidenziato, i valori di *Faulting* derivano dalla differenza di elevazione delle rette interpolate sulle sezioni estratte con associato un valore di RMSE. Un valore basso di RMSE, per entrambe le rette, indica un buon adattamento del modello lineare; da questo si deduce che il valore di *faulting* calcolato avrà un attendibilità maggiore rispetto ad un valore derivante da rette con bassi valori di RMSE.

Indicato con σ_{h1} , il valore dell' RMSE relativo alla retta interpolata a sinistra del giunto, e con σ_{h2} , il valore dell'RMSE relativo alla retta interpolata a destra del giunto (figura 7.36 §7.4.2); l'incertezza associata al valore del *faulting* è determinata come:

$$\sigma_f^2 = \sigma_{h1}^2 + \sigma_{h2}^2$$

L'attendibilità del calcolo è effettuata mediante la stima del rapporto tra valore del *faulting* f e l'incertezza associata σ_f :

$$W_f = \frac{f}{\sigma_f}$$

Il test si basa sull'ipotesi nulla H_0 ; se $E()$ è il valore atteso, l'ipotesi nulla che si assume vera, fino a che non risulta in contrasto con l'ipotesi alternativa, è $H_0: E(f)=0$. Supponendo che il valore misurato f appartenga ad una distribuzione normale a media nulla e varianza σ_f^2 , si ha: $f \sim N(0, \sigma_f^2)$.

Una volta fissato il livello di significatività α del test (nel seguito verrà assunto $\alpha=0,1$) è possibile definire l'intervallo di accettazione $\pm w_\alpha$. Se l'ipotesi nulla è vera, il valore della variabile rientrerà nell'intervallo di confidenza $\pm w_\alpha$, corrispondente a una probabilità $(1-\alpha)$. Al contrario, se il valore assoluto del *faulting* risulta maggiore dell'intervallo $\pm w$, l'ipotesi nulla è rifiutata e la differenza di altezza calcolata dovrà essere considerata significativa. Avendo assunto $\alpha=0,1$, il valore critico assunto è $w_\alpha=1,65$.

7.4.4 Applicazione su Piazzola Aeroportuale

L'area test è costituita da una piazzola avente una estensione di circa $800m^2$ e situata in un aeroporto internazionale italiano. La pavimentazione rigida è costituita da lastre in calcestruzzo armato larghe

circa 5x5m. Le lastre sono collegate l'una all'altra mediante giunti senza barre di compartecipazione. La piazzola in esame è stata scelta in modo che presentasse differenti livelli di degrado; le ripetute sollecitazioni prodotte dalle differenti configurazioni dei carrelli degli aeromobili, hanno causato dei cedimenti differenziali producendo differenti livelli di irregolarità.

La misura è stata effettuata con un LST Riegl VZ400. Lo strumento è caratterizzato da grande portata e un'acquisizione a alta velocità; le sue caratteristiche tecniche principali sono riportate in tabella 7.12. L'accuratezza effettiva dello strumento dipende principalmente dall'angolo di incidenza (angolo tra il raggio laser e la normale rispetto alla superficie) oltre alle caratteristiche di riflettività e rugosità dell'oggetto scansionato; l'intensità del segnale ricevuto diminuisce con l'aumentare dell'angolo di incidenza e influenza l'accuratezza della misura della distanza. Pertanto, all'aumentare dell'angolo di incidenza e della distanza, si ottiene un rapporto segnale/rumore basso e una densità decrescente.

Laser Scanner	Riegl VZ400
Divergenza raggio laser	0,35 μ rad
Diametro raggio laser	35mm @ 100m
Portata	da 1,5m a 600m
Frequenza massima	300kHz (122 \cdot 10 ³ punti/s)
FOV (V,H)	100 $^{\circ}$ x360 $^{\circ}$
Accuratezza nella distanza	5mm @ 100m
Risoluzione angolare	da 0,0024 $^{\circ}$ a 0,288 $^{\circ}$
Parametri Impostati	
Risoluzione angolare	0,005 $^{\circ}$
Frequenza	300kHz

Tabella 7.12 – Caratteristiche LST Riegl VZ400.

In totale sono state effettuate 2 stazioni LST; lo strumento è stato messo in stazione su treppiede dotato di asta telescopica, in questo modo è stato possibile impostare un'altezza strumentale pari a 2,20m, così da ridurre il più possibile l'angolo di incidenza. Le nuvole di punti prodotte sono state co-registrate e allineate. La georeferenziazione è avvenuta con l'ausilio di 4 target sferici, aventi diametro pari a 15cm; la posizione degli stessi è stata misurata con ricevitori GNSS in modalità nRTK. Il sistema di

riferimento adottato si basa sul sistema *Gauss-Boaga* utilizzato generalmente in aeroporto [119]. La posizione delle stazioni LST e dei target è mostrata in figura 7.37.

La “ricostruzione” dei target e la georeferenziazione è avvenuta utilizzando il software *PolyWorks ver.14* della casa costruttrice *InnovMetric*. In tabella 7.13 sono riportati alcuni valori di sintesi dei residui di georeferenziazione.

Massimo [mm]	11
Minimo [mm]	2
Media [mm]	6
Deviazione Standard [mm]	4

Tabella 7.13 – Statistica residui di Georeferenziazione.



Figura 7.37 – Area Test, Stazioni LST e Target.

Nella figura 7.37 è riportato il contorno dell’area analizzata (linea tratteggiata in giallo); in particolare, sono state prese in riferimento 24 lastre, 6 nella direzione di percorrenza degli aeromobile e 4 in direzione trasversale, a cavallo delle linee di asse. Nella figura 7.38a sono riportati i contorni delle lastre analizzate con il numero di punti appartenenti ad ogni singola lastra. Nella figura 7.38b, invece, è riportata la mappa della densità superficiale dell’intera superficie analizzata (n° punti/m²).

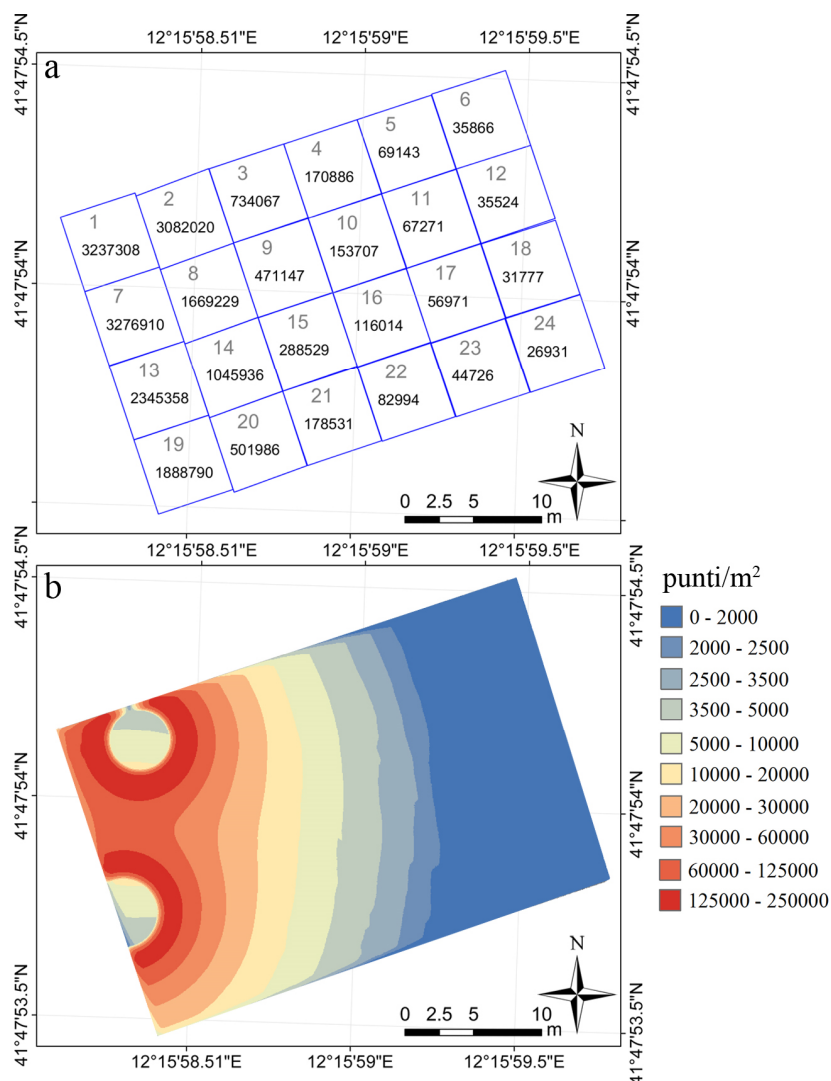


Figura 7.38 – Densità superficiale; a) Numero di punti per ogni lastra; b) Densità superficiale ($n \cdot \text{punti}/\text{m}^2$).

L'intera nube è stata tagliata lungo i giunti, così da ottenere le 24 sub-nubi delle singole lastre. L'intera nuvola di punti e ogni singola sub-nube sono state interpolate con un piano ai minimi quadrati; in questo modo sono stati ricavati i coefficienti delle equazioni, rispettivamente del piano generale e delle singole lastre (da qui in avanti, il piano interpolato sulla sub-nube sarà denominato lastra). La bontà dell'interpolazione è stata valutata mediante il calcolo dell'RMSE; in figura 7.39 sono riportati i

valori calcolati di RMSE in relazione alla distanza di ogni singola lastra rispetto al centro stazione. L'errore cresce linearmente all'aumentare della distanza dal centro strumentale.

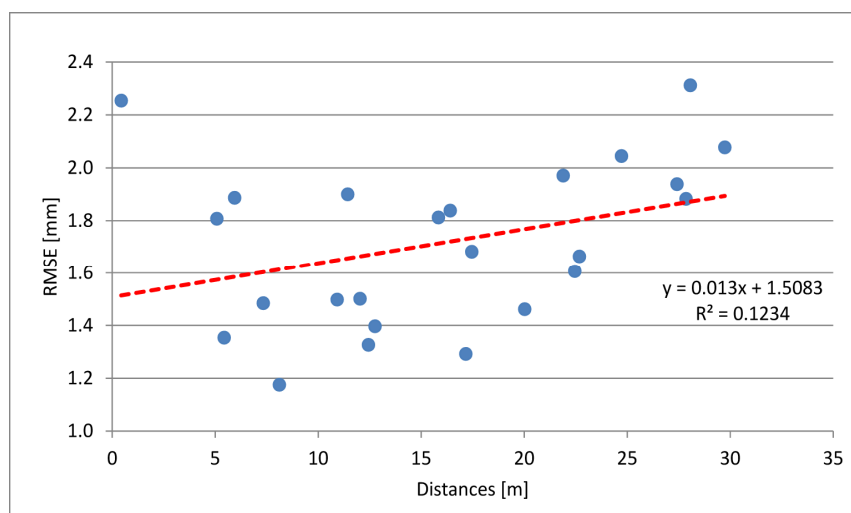


Figura 7.39 – Errore di Interpolazione vs Distanza centro stazione.

La giacitura di ogni singola lastra è stata caratterizzata stimando i parametri di assetto introdotti nel §7.4.1. In tabella 7.14 sono riportati i valori dell'angolo di deviazione α della normale di ogni lastra rispetto alla normale al piano generale, comprensivi delle relative incertezze (SD) stimate come descritto nel §7.4.3 al punto 1. L'incertezza stimata è sempre molto inferiore rispetto al valore dell'angolo dedotto; per le lastre più lontane il valore non supera due millesimi di grado sessadecimale.

Lastra	φ (deg)	SD (deg)	Lastra	φ (deg)	SD (deg)
1	0,05	0,0001	13	0,11	0,0001
2	0,06	0,0001	14	0,05	0,0001
3	0,14	0,0002	15	0,05	0,0002
4	0,02	0,0004	16	0,06	0,0005
5	0,10	0,0008	17	0,11	0,0008
6	0,07	0,0013	18	0,11	0,0014
7	0,10	0,0001	19	0,03	0,0001
8	0,05	0,0001	20	0,04	0,0001
9	0,10	0,0002	21	0,02	0,0003
10	0,04	0,0005	22	0,06	0,0005
11	0,11	0,0008	23	0,10	0,0011
12	0,05	0,0012	24	0,04	0,0015

Tabella 7.14 – Angolo di deviazione φ con incertezza associata.

Il vettore direzione $\underline{\varepsilon}$ individua la retta di massima pendenza della generica lastra e il relativo asse di rotazione rispetto al piano generale. In tabella 7.15 è riportata una statistica riassuntiva dei parametri dedotti insieme alle relative incertezze stimate, come descritto nel §7.4.3 al punto 1. Anche in questo caso, l'incertezza associata è circa 200 volte più piccola rispetto al valore calcolato. In figura 7.40 sono riportati i vettori $\underline{\varepsilon}$ proiettati sul piano generale; il modulo è proporzionale all'angolo di deviazione φ .

	Valori per componenti			Rapporto tra componente e SD		
	X	Y	Z	X	Y	Z
Massimo	0,00217	0,00189	0,000017	976	1206	1075
Minimo	0,00008	0,00001	0,000001	12	3	12
Media	0,000898	0,000604	7,13E-06	230	189	240

Tabella 7.15 – Statistica Vettori direzione $\underline{\varepsilon}$ con incertezze associate.

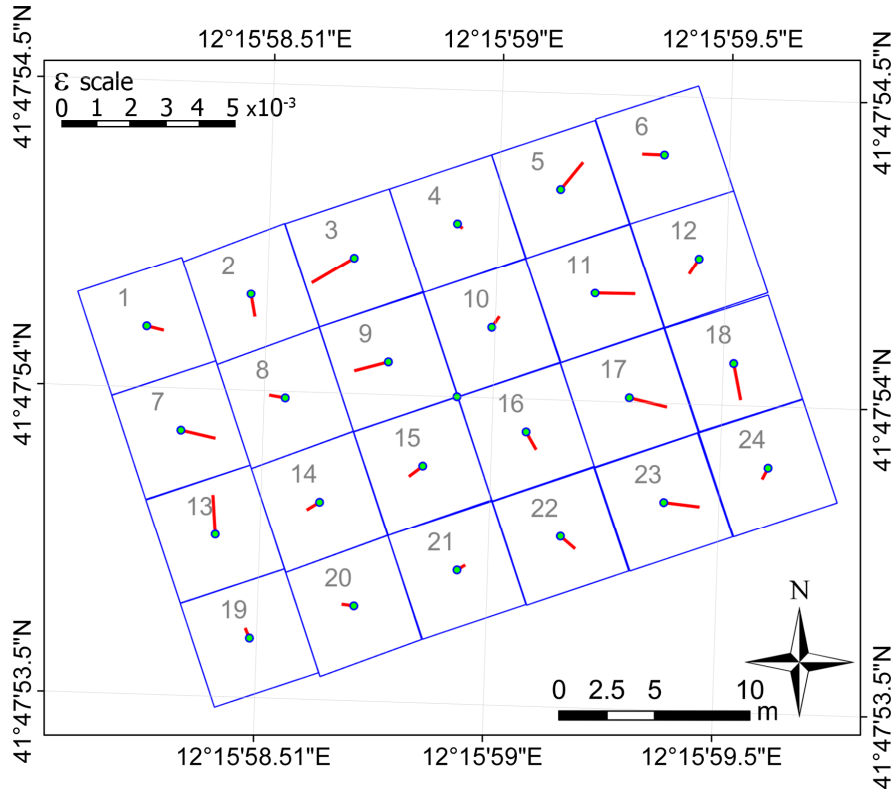


Figura 7.40 – Modulo e direzione dei vettori ϵ proiettati sul piano generale.

Il calcolo del ΔZ , secondo quanto descritto nel §7.4.2 al punto 1, è stato effettuato per tutti i punti appartenenti alle lastre; il risultato è riportato nella mappa classificata di figura 7.41. La scala cromatica è proporzionale ai valori di ΔZ , cioè, alla distanza di ogni singolo punto della lastra dal piano generale. Il passo di visualizzazione scelto (2mm) permette una visualizzazione efficace delle zone caratterizzate da *faulting*.

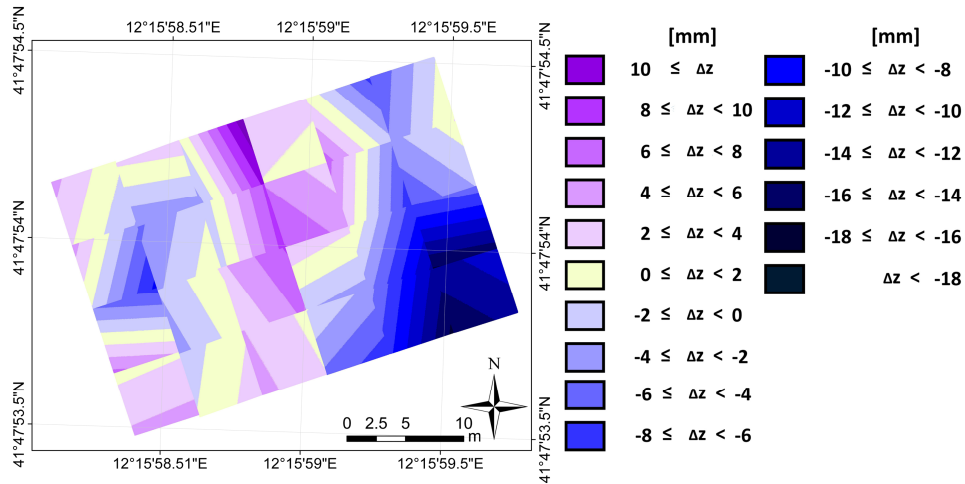


Figura 7.41 – Mappa Classificata dei ΔZ .

L'algoritmo implementato permette di evidenziare e classificare i giunti caratterizzati da differenti livelli di *faulting*, calcolati in questo primo step a partire dai valori di ΔZ . Le soglie limite sono state desunte dallo standard AASHTO-R36 [117]. Successivamente, vengono tracciate delle linee ortogonali ai soli giunti evidenziati e caratterizzati da valori più gravosi di ΔZ lungo la stessa traiettoria longitudinale. La figura 7.42 mostra l'output del processo.

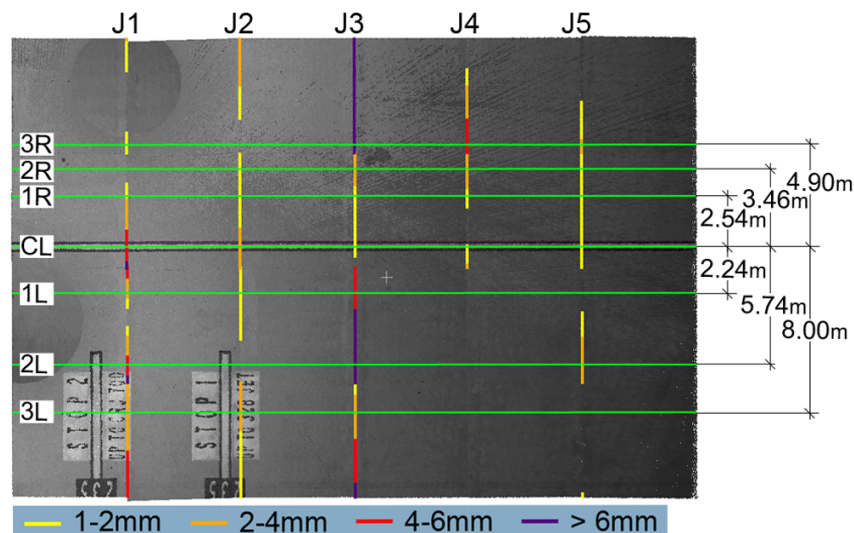


Figura 7.42 – Individuazione delle zone critiche.

In tabella 7.16 sono riportati i valori numerici del *faulting* in corrispondenza delle sezioni riportate in figura 7.42 (linee verdi orizzontali).

<i>Faulting</i> da ΔZ (mm)					
	J1	J2	J3	J4	J5
3R	1,4	0,2	8,8	5,5	2,1
2R	0,5	1,3	2,1	2,7	1,2
1R	1,8	1,6	1,8	1,6	1,3
CL	5,1	2,2	1,1	1,1	1,6
1L	2,4	1,2	5,4	0,3	0,2
2L	4,9	0,9	7,9	0,4	3,1
3L	3,5	2,1	2,8	0,5	0,3

Tabella 7.16 – *Faulting* in corrispondenza delle zone critiche.

Le fasi di elaborazione effettuate fino a ora sono necessarie per evidenziare le zone caratterizzate da maggiori criticità. La fase successiva riguarda l'estrazione delle sezioni e il calcolo vero e proprio del *faulting*, come descritto nei punti 1 e 2 del §7.4.2. Come già evidenziato nei paragrafi precedenti, lo spessore della fascia di sezione 2τ influenza la determinazione del *faulting*, dato che lo stesso sarà determinato mediante interpolazione lineare con i punti contenuti nella finestra $(2\tau, \lambda)$. La valutazione dell'influenza dello spessore 2τ è stata effettuata valutando la variazione della densità superficiale di punti al variare delle dimensioni di un'area rettangolare larga $\lambda=150\text{mm}$ e con spessore 2τ variabile da 25mm a 100mm (figura 7.43).

2τ [mm]	<i>Distanza Massima</i> [mm]				
	J1	J2	J3	J4	J5
100	5,5	3,4	5,8	8,9	18,5
90	5,6	3,4	6,4	8,9	21,2
80	5,6	3,8	7,6	13,7	21,5
70	4,7	3,8	9,1	13,7	26,5
60	4,7	4,8	9,4	16,9	40,6
50	4,3	4,8	9,4	16,9	40,6
40	4,5	4,8	11,8	18,8	45,2
35	4,5	5,9	12,0	19,1	53,0
30	5,7	5,9	12,6	22,7	53,0
25	5,7	8,4	15,1	35,0	56,7

Tabella 7.17 – *Massima Distanza* vs spessore 2τ .

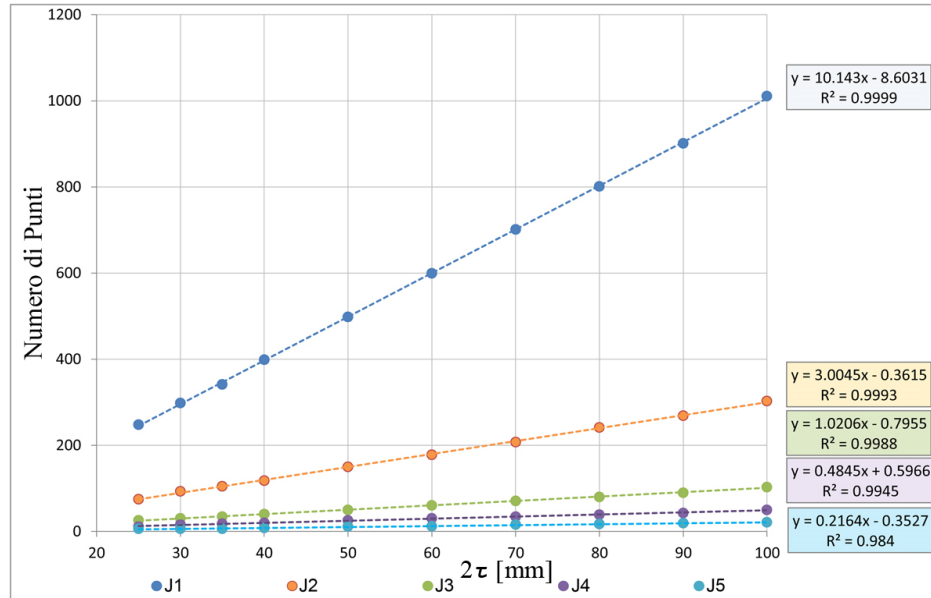


Figura 7.43 – Relazione tra numero di punti e spessore della sezione.

I punti diagrammati in figura 7.43 appartengono alla sezione dell'asse centrale della piazzola. La densità aumenta in modo lineare; oltre il giunto J5 (il più lontano dalle stazioni laser), il valore massimo della densità si attesta intorno ai $0,07$ punti/cm², nell'area di 150×100 mm.

In tabella 7.17 sono riportate le distanze massime tra i punti all'interno delle aree ($2\tau, \lambda$). In corrispondenza del giunto J5, l'inter-distanza risulta 40 mm per uno spessore 2τ di 50 mm mentre scende al di sotto di 20 mm per uno spessore 2τ di 100 mm. In corrispondenza del giunto J4, per ottenere un inter-distanza inferiore a 20 mm, bisognerebbe adottare uno spessore 2τ almeno pari a 30 mm. Considerando questi risultati e tenendo conto delle dimensioni medie dell'area di impronta di una ruota del carrello anteriore dell'aeromobile, è stato adottato uno spessore 2τ pari a 100 mm, così da assicurare una densità di punti sufficiente anche per i giunti più lontani.

I valori di *faulting* sono stati quindi calcolati come riportato nel §7.4.2 al punto 3, mediante interpolazione lineare sui punti estratti nelle fasce aventi uno spessore pari a $2\tau=100$ mm e una lunghezza pari a $\lambda=150$ mm dal giunto. In tabella 7.18 sono riportati i risultati ottenuti in corrispondenza delle sezioni individuate, insieme alle incertezze associate.

	J1			J2			J3			J4			J5		
	f	σ_f	w_f	f	σ_f	w_f	f	σ_f	w_f	f	σ_f	w_f	f	σ_f	w_f
3R	2,1	2,2	0,94	1,2	1,1	1,08	5,1	1,4	3,67	0,3	1,0	0,31	0,2	1,1	0,17
2R	2,1	1,3	1,64	2,2	1,0	2,35	1,7	0,8	2,13	0,2	0,9	0,21	0,4	1,0	0,39
1R	0,8	1,1	0,75	0,3	1,1	0,24	1,8	0,9	2,07	1,2	0,8	1,52	0,3	0,7	0,38
CL	1,5	1,5	1,00	1,6	1,1	1,48	1,2	1,0	1,15	1,00	0,9	1,13	1,1	0,9	1,21
1L	0,7	1,1	0,61	0,1	0,8	0,13	4,5	1,4	3,20	0,6	0,8	0,83	1,8	0,8	2,11
2L	3,3	1,3	2,62	2,5	1,1	2,31	2,9	1,8	1,61	0,4	1,2	0,35	0,6	1,2	0,54
3L	2,0	1,5	1,31	0,2	1,4	0,12	3,9	1,5	2,64	0,3	1,4	0,18	2,1	1,8	1,15

Tabella 7.18 – Faulting (100x150mm).

Secondo quanto detto al punto 2 del §7.4.3, i valori di *faulting* dedotti con un livello di confidenza maggiore del 90% sono quelli che presentano un valore $w_f \geq 1,65$ (valori evidenziati in tabella 7.18); secondo questa ipotesi, solo 9 valori di *faulting* risultano significativi (circa il 26%). È chiaro che scegliendo un livello di confidenza inferiore, a esempio dell'80%, la soglia del rapporto critico diventa pari a $w_f = 1,28$, di conseguenza i valori significativi salgono a 14 (il 40%).

Come già evidenziato, i valori di *faulting* sono stati ricavati valutando solo le sezioni a ridosso dei giunti. I 300mm totali a cavallo dei giunti (150+150mm) derivano dal procedimento standardizzato e adottato per misure profilometriche [117]; risulta doveroso confrontare, quindi, i valori dedotti dalle analisi effettuate solo in prossimità dei giunti con i valori determinati prendendo come riferimento l'intera lasta. In tabella 7.19 sono riportati i valori delle differenze Δf dei valori di *faulting* determinati sul modello locale (300x100mm) e quelli dedotti utilizzando l'intero piano.

Sezioni	Δf (mm)				
	J1	J2	J3	J4	J5
3R	-0,7	-1	3,7	5,2	1,9
2R	-1,6	-0,9	0,4	2,5	0,8
1R	1	1,3	0	0,4	1
CL	3,6	0,6	-0,1	0,1	0,5
1L	1,7	1,1	0,9	-0,3	-1,6
2L	1,6	-1,6	5	0	2,5
3L	1,5	1,9	-1,1	0,2	-1,8

Tabella 7.19 – Faulting, Locale vs Intera Lastra.

Nel 43% dei casi i valori delle differenze sono inferiori a 1mm, si attestano intorno al 17% per differenza maggiori di 2mm. L'analisi locale, quella effettuata solo in prossimità dei giunti, è più adatta dato che tiene conto delle deformazioni localizzate.

Poiché il numero di punti presente nella striscia considerata ($2\tau, \lambda$) è funzione delle dimensioni della stessa, sono stati analizzati anche i valori dedotti assumendo una lunghezza $\lambda=200\text{mm}$ ($\lambda=200+200\text{mm}$, $2\tau=100\text{mm}$). La tabella 7.20 contiene i risultati ottenuti con le indeterminazioni associate, determinati sulle fasce di $200 \times 100\text{mm}$ su bordo lastra; come detto nel §7.4.2 e §7.4.3.

	J1			J2			J3			J4			J5		
	f	σ_f	w_f	f	σ_f	w_f	f	σ_f	w_f	f	σ_f	w_f	f	σ_f	w_f
3R	2,4	2,1	1,11	1,6	1,1	1,46	6,7	1,4	4,64	0,7	1,0	0,71	0,2	1,1	0,22
2R	2,8	1,4	2,08	2,5	1,0	2,57	2,7	0,9	2,88	0,3	0,9	0,28	1,0	1,0	1,01
1R	0,7	1,2	0,69	0,3	1,0	0,29	1,9	0,8	2,27	1,3	0,9	1,52	0,5	0,8	0,61
CL	1,6	1,5	1,11	2,1	1,1	1,89	1,4	1,0	1,38	1,4	0,9	1,59	1,7	1,0	1,77
1L	0,8	1,1	0,78	0,02	0,8	0,03	5,3	1,4	3,93	0,5	0,8	0,65	2,5	1,0	2,69
2L	4,1	1,3	3,15	2,8	1,1	2,58	4,1	1,8	2,35	0,7	1,1	0,64	1,2	1,2	1,03
3L	1,8	1,5	1,18	0,4	1,4	0,27	4,0	1,5	2,76	0,4	1,5	0,29	2,0	1,7	1,20

Tabella 7.20 – Faulting (100x200mm).

Analizzando la tabella 7.20 la maggior parte dei valori di *faulting* sono leggermente superiori rispetto a quelli di tabella 7.18, calcolati su un'area inferiore ($100 \times 150\text{mm}$). I valori di deviazione standard sono invece confrontabili, con variazioni non significative. I valori statisticamente significativi sono pari a 13 ($w_f \geq 1,65$), maggiori rispetto al caso precedente. In figura 7.44 sono riportati alcuni confronti del calcolo del *faulting* (f) determinato sulle differenti aree. Nei primi tre casi (figura 7.44a) il valore di f è così piccolo che l'ipotesi nulla H_0 $w_f < 1,65$ (nessun passaggio tra le lastre) è pienamente accettata per entrambi i casi ($\lambda=150\text{mm}$ e $\lambda=200\text{mm}$). Per i giunti di figura 7.44b i valori di w_f sono elevati quindi l'ipotesi nulla H_0 deve essere respinta; in questo caso i valori di *faulting* sono significativi a prescindere dal valore di λ scelto. La figura 7.44c mostra un caso in cui la scelta del valore λ influisce sulla significatività dei risultati; per $\lambda=150\text{mm}$ l'ipotesi nulla è accettata, i valori di *faulting* determinati sono poco significativi ($w_f < 1,65$), per

$\lambda=200\text{mm}$, invece, l'ipotesi nulla va respinta e i valori di *faulting* in questo caso diventano significativi.

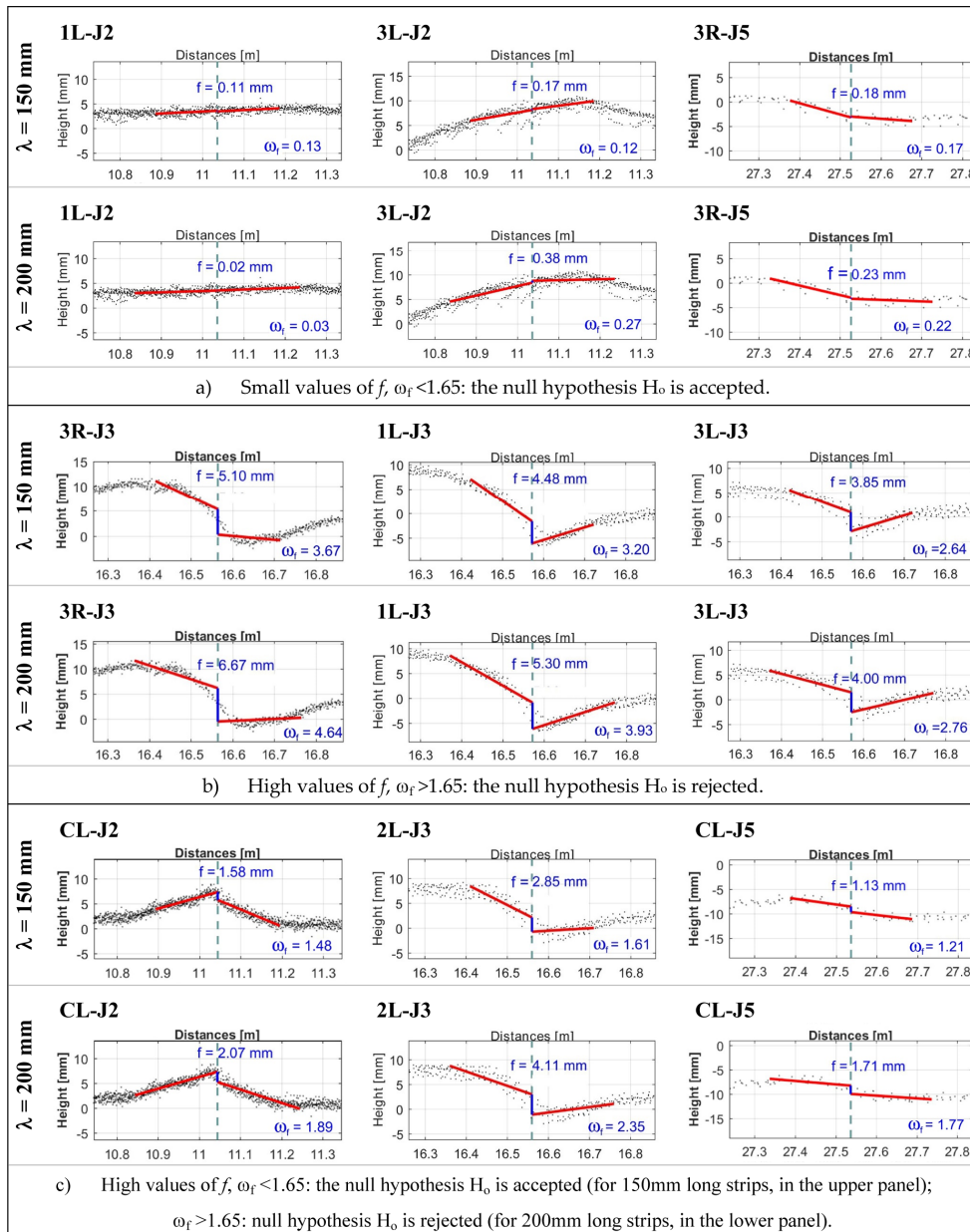


Figura 7.44 – Confronto valori di faulting determinati sulle aree (100x150mm) e (100x200mm).

Il più delle volte, l'uso di $\lambda = 200\text{mm}$ porta a un aumento del numero di casi in cui il valore misurato è significativamente diverso da zero e quindi indicativo di un gradino effettivamente presente tra le lastre lungo la sezione considerata. Va sottolineato che, sebbene significativo, il valore valutato per l'altezza del gradino può essere così piccolo da non generare alcuna criticità.

Il metodo proposto individua tutti quei valori che potrebbero essere ragionevolmente confrontati con le soglie critiche utilizzando misure celerimetriche al posto dei dispositivi portatili; ciò consente di rendere disponibile un'osservazione su larga scala del comportamento dell'infrastruttura e quindi la possibilità di utilizzare indagini preesistenti per ricostruire il degrado della pavimentazione e la sua puntuale evoluzione nel tempo.

8 Conclusioni

In questo lavoro di tesi si sono volute mettere in evidenza le potenzialità dell'impiego della tecnica di rilievo LiDAR, una delle tecniche di telerilevamento più interessanti e in fase di continuo sviluppo, allo scopo di valutare lo “*stato di degrado*” della pavimentazione stradale. La tecnica si è mostrata efficace per fornire dati che permettono di costruire un modello della superficie della infrastruttura sul quale calcolare gli indici di stato della pavimentazione. Uno dei vantaggi dei dati da LiDAR è che questi sono molto più densi di quelli rilevati con le tecniche tradizionali e anche più accurati. Inoltre, la misura LiDAR è celere e non interferisce con la normale viabilità.

Poiché l'utilizzo dei rilievi LiDAR nelle applicazioni su infrastrutture è recente e in letteratura sono presenti solo alcune proposte riguardo all'acquisizione e elaborazione dei dati rilevati per determinare standard normativi, è stato necessario studiare algoritmi dedicati e implementarli in programmi di calcolo.

I primi strumenti a scansione laser furono introdotti negli anni'90 ma solo agli inizi del XXI secolo furono messi in commercio i primi sistemi terrestri compatti e in grado di acquisire nuvole di punti sia da stazione fissa sia, se installati su veicoli strumentati in movimento, da stazione mobile. Da allora, strumenti sempre più precisi e di migliori prestazioni hanno reso possibile un forte progresso nella ricerca di applicazioni della tecnica a vari campi dell'ingegneria civile.

È chiaro il grosso contributo che tali tecniche innovative possono fornire alle metodologie tradizionali, non solo in alternativa ma anche come completamento. Essendo la tecnica recente e ancora più recenti le applicazioni al rilievo di infrastrutture, vi sono ancora molti aspetti critici da valutare. I software commerciali presenti sul mercato implementano solo alcune funzioni, in risposta alle esigenze specifiche di professionisti e non soddisfano quindi appieno la comunità scientifica. Nel tentativo di superare tali limitazioni sono stati analizzati i problemi che sorgono

nell'applicazione della tecnica al rilievo stradale e sono stati implementati in *Matlab* alcuni processi di calcolo studiati per l'estrazione dei parametri di interesse. Gli algoritmi sviluppati sono stati testati su casi studio e i risultati sperimentali hanno dimostrato il raggiungimento degli obiettivi preposti.

Le nuvole di punti acquisite non sono direttamente utilizzabili ma vanno prima trattate per eliminare eventuali outliers (vegetazione, automobili, pedoni, ecc.) e estrarre in maniera semi-automatica i soli punti appartenenti alla carreggiata. L'algoritmo implementato si basa sul metodo MSAC, una stima robusta dei parametri di un modello matematico a partire da un insieme di dati contenente outliers. È un algoritmo non deterministico che produce un risultato corretto solo con una data probabilità, che aumenta al crescere delle iterazioni.

Oltre alle coordinate spaziali degli oggetti scansionati, i laser scanner registrano i valori di riflettanza, in termini di percentuale di luce incidente che la superficie colpita è in grado di riflettere. Questo dato è stato utilizzato per estrarre dalla nuvola di punti la segnaletica orizzontale; in particolare è stata tarata una procedura di estrazione che si basa sulla correzione dei valori di intensità nativa.

Per quantificare e analizzare le differenti tipologie di degrado, in particolare la regolarità che incide sul benessere degli utenti e alcuni degradi localizzati, responsabili principalmente della sicurezza dell'infrastruttura, è stato costruito un modello digitale della superficie (DEMc) studiato appositamente per le pavimentazioni stradali. La valutazione delle caratteristiche superficiali mediante simulazione dinamica e la conseguente stima degli effetti sull'utente in termini di confort di guida, hanno permesso di analizzare il ruolo svolto dalle differenti modalità di acquisizione dei dati insieme all'accuratezza delle misure. Le sollecitazioni calcolate sulle superfici estratte dai dati LST e LSM hanno prodotto risultati praticamente uguali se si analizzano gli effetti prodotti in termini di percezione del confort; le differenze dei valori calcolati sono inferiori alla soglia limite di percezione. La stima del confort può quindi prescindere dalla differenza, in termini di accuratezza, che esiste tra un dato acquisito in modalità statica o in modalità dinamica.

In merito alle procedure implementate, i risultati sperimentali hanno evidenziato che la scelta dei parametri da inserire a scelta dall'utente per l'estrazione della carreggiata o dei degradi analizzati è delicata in quanto

influenza fortemente i risultati. Per la complessità della configurazione dei diversi degradi e della geometria della carreggiata è bene scegliere tali parametri in funzione delle condizioni al contorno e non imporre dei valori di default, validi per qualsiasi condizione.

L'esigenza di confrontare le misure LSM con tecniche tradizionali e standardizzate ha comportato la misura mediante alcune di queste, a esempio quella da profilometro inerziale. È stato implementato il calcolo di alcuni degli indici di regolarità più rappresentativi dello stato della pavimentazione, quali l'IRI e l'RMSD, che sono stati confrontati con quelli calcolati con procedure tradizionali e standardizzate. Il confronto ha dato buoni risultati, le correlazioni sono risultate soddisfacenti e hanno dimostrato la possibilità di quantificare la regolarità dell'intera superficie a fronte della misura su soli profili lineari, inadatti a rappresentare la superficie nella sua reale complessità.

Anche per sovrastrutture rigide, la ricerca si è orientata allo studio di misure meno "invasive", che incidano meno sulla riduzione della sicurezza e della funzionalità dell'infrastruttura. Per tali motivi, è stata elaborata una procedura in grado di calcolare la giacitura delle lastre di una piazzola aeroportuale rilevata con LST e successivo calcolo del *faulting*. Ciò rende possibile una stima su larga scala del comportamento dell'infrastruttura, non possibile con le tecniche tradizionali. Grazie alla celerità delle misure si rivela quindi una procedura efficace per operazioni di monitoraggio continuativo.

L'analisi della letteratura, insieme alle sperimentazioni condotte e documentate in questa tesi, hanno permesso di elaborare una sintesi dei principali dissesti e delle irregolarità analizzabili con la tecnica LiDAR, in linea con la risoluzione e l'accuratezza del sistema. È bene, quindi, evidenziare che le informazioni ricavabili dalla tecnica sono ampiamente esaustive se l'analisi è focalizzata oltre che all'individuazione di tutti quei dissesti responsabili dei decrementi di sicurezza, anche a quei dissesti le cui dimensioni sono compatibili con le risoluzioni e l'accuratezza ottenibili; una celere quantificazione diventa necessaria per l'individuazione delle tratte a elevata priorità di intervento al fine di redigere un programma di primo intervento basato su un approccio innovativo e non standardizzato.

Sui dati LiDAR così densi e accurati sarebbe auspicabile studiare un nuovo indice che tenga in considerazione le peculiarità della tecnica per

fornire un giudizio puntuale e globale sulla pavimentazione. La ricerca intrapresa vuole andare in questa direzione.

Bibliografia

1. Tighe, S.; Li, N.; Cowe Falls, L.; Haas, R. *Incorporating road safety into pavement management*. 2000; Vol. 1699, p 1-10.
2. Bester, C.J. The effect of road roughness on safety. In *Transportation Research Board (TRB) Annual Meeting*, Washington, US, 2003; p 23.
3. Ihs, A. The influence of road surface condition on traffic safety and ride comfort. In *6th International Conference on Managing Pavements 19–24 October 2004. Brisbane Convention & Exhibition Centre, Queensland Australia.*, Statens väg- och transportforskningsinstitut: Linköping, 2005; pp 11-21.
4. Chan, C.Y.; Huang, B.; Yan, X.; Richards, S. Relationship between highway pavement condition, crash frequency, and crash type. *Journal of Transportation Safety & Security* **2009**, *1*, 268-281.
5. Chen, S.; Saeed, T.U.; Alqadhi, S.D.; Labi, S. Safety impacts of pavement surface roughness at two-lane and multi-lane highways: Accounting for heterogeneity and seemingly unrelated correlation across crash severities. *Transportmetrica A: Transport Science* **2017**, 1-16.
6. <https://road-asset.piarc.org/en>. Asset management manual: A guide for practitioners. World Road Association website: 2017.
7. Gillespie, T.D.P.; Queiroz, C.A.V.; Sayers, M.W. *The international road roughness experiment: Establishing correlation and a calibration standard for measurements*; Washington DC, 1986.
8. Kumar, P.; McElhinney, C.P.; Lewis, P.; McCarthy, T. Automated road markings extraction from mobile laser scanning data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* **2014**, *32*, 125-137.
9. AIPCR. Comité technique des caractéristiques de surface. In *XIX Congrès mondial de la routre*, Marrakech, 1991.
10. ISO-13473. Characterization of pavement texture by use of surface profiles. 2002.
11. ASTM; E867-06(2012). Standard terminology relating to vehicle-pavement systems. ASTM International: West Conshohocken, PA, 2012.
12. W. Sayers, M. *The little book of profiling – basic information about measuring and interpreting road profiles*. 1998.

13. Dodds, C.J.; Robson, J.D. The description of road surface roughness. *Journal of Sound and Vibration* **1973**, *31*, 175-183.
14. ISO-8608. Mechanical vibration–road surface profiles–reporting of measured data. International Standardization Organization: Geneva, Switzerland, 1995. .
15. Gillespie, T.D.P.; William, D.O.; Sayers, M.W. *Guidelines for conducting and calibrating road roughness measurements*; WTP46; Washington DC, 1986.
16. Cantisani, G.; Loprencipe, G. Road roughness and whole body vibration: Evaluation tools and comfort limits. *Journal of Transportation Engineering* **2010**, *136*, 818-826.
17. Karamihas, S.M.; Institute, U.o.M.T.R.; Administration, U.S.F.H. *Critical profiler accuracy requirements*. University of Michigan, Transportation Research Institute: 2005.
18. Byrne, M.; Albrecht, D.; Sanjayan, J.G.; Kodikara, J. Recognizing patterns in seasonal variation of pavement roughness using minimum message length inference. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* **2009**, *24*, 120-129.
19. Gao, J.; Chen, K. *Frequency-domain simulation and analysis of vehicle ride comfort based on virtual proving ground*. 2011; Vol. 4.
20. Ahlin, K.; Granlund, N.O.J. Relating road roughness and vehicle speeds to human whole body vibration and exposure limits. *International Journal of Pavement Engineering* **2002**, *3*, 207-216.
21. Sharif Tehrani, S. Performance measurement using iri and collision rates in the province of alberta. University of Calgary, 2014.
22. Sayers, M.W. Two quarter-car models for defining road roughness: Iri and hri. *Transportation Research Record* **1989**.
23. ISO-2631-1:1997. Mechanical vibration and shock - evaluation of human exposure to whole-body vibration - part 1: General requirements. International Standardization Organization.
24. Duarte, M.L.M.; de Araújo, P.A.; Horta, F.C.; Vecchio, S.D.; de Carvalho, L.A.P. Correlation between weighted acceleration, vibration dose value and exposure time on whole body vibration comfort levels evaluation. *Safety Science* **2018**, *103*, 218-224.
25. Janoff, M.S.; Nick, J.B.; Davit, P.S.; Hayhoe Gordon, F. *Nchrp report 275 pavement roughness and rideability*; 500 Fifth Street, NW, Washington, DC United States 20001, 1985.
26. Janoff, M.S. *Nchrp report 308 pavement roughness and rideability*; 500 Fifth Street, NW, Washington, DC United States 20001, 1988.
27. Liu, C.; Herman, R. Road profiles, vehicle dynamics, and human judgment of serviceability of roads: Spectral frequency domain analysis. *Journal of Transportation Engineering* **1998**, *124*, 106-111.

28. Liu, C.; Herman, R. Road profile, vehicle dynamics, and ride quality rating. *Journal of Transportation Engineering* **1999**, *125*, 123-128.
29. M Varunjikar, T.; K Vemulapalli, P.; Nicholson-Crotty, S.; Brennan, S. *Multi-body vehicle dynamics simulation based on measured 3d terrain data*. 2017.
30. Uys, P.E.; Els, P.S.; Thoresson, M. Suspension settings for optimal ride comfort of off-road vehicles travelling on roads with different roughness and speeds. *Journal of Terramechanics* **2007**, *44*, 163-175.
31. Muniz de Farias, M.; de Souza, R.O. Correlations and analyses of longitudinal roughness indices. *Road Materials and Pavement Design* **2009**, *10*, 399-415.
32. Ueckermann, A.; Steinauer, B. *The weighted longitudinal profile*. 2008; Vol. 9, p 135-157.
33. ASTM; E1703M-10, E. Standard test method for measuring rut-depth of pavement surfaces using a straightedge. West Conshohocken, PA, 2015.
34. Bennett, C.R.; Wang, H. *Harmonising automated rut depth measurements*. Transfund New Zealand Research Report: 2002.
35. Simpson, A.L.; United, S.; Federal Highway, A.; Office of Infrastructure, R.; Development; Fugro-Bre, I.; Turner-Fairbank Highway Research, C. Characterization of transverse profiles. **2001**.
36. ASTM; D6433-18. Standard practice for roads and parking lots pavement condition index surveys. ASTM International: West Conshohocken, PA, 2018.
37. Hall, K.; Muñoz, C. Estimation of present serviceability index from international roughness index. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* **1999**, 93-99.
38. Gulen, S.; Woods, R.; Weaver, J.; Anderson, V. Correlation of present serviceability ratings with international roughness index. *Transportation Research Record* **1994**, *1435*, 27.
39. Liu, C. Vehicle-road interaction, evolution of road profiles and present serviceability index. *Road Materials and Pavement Design* **2000**, *1*, 35-51.
40. Gillespie, T.D. *Nchrp research results digest 244 operational guidelines for longitudinal pavement profile measurement*; 500 Fifth Street, NW, Washington, DC United States 20001, 1999.
41. ASTM; E950M-09(2018), E. Standard test method for measuring the longitudinal profile of traveled surfaces with an accelerometer-established inertial profiling reference. ASTM International: West Conshohocken, PA, 2018.
42. Lee, M.H.; Chou, C.P. Laboratory method for inertial profiler verification. *Journal of the Chinese Institute of Engineers* **2010**, *33*, 617-627.

43. Board, T.R.; National Academies of Sciences, E.; Medicine. *Automated pavement distress collection techniques*. The National Academies Press: Washington, DC, 2004; p 84.
44. ASTM; E1364-95(2017). Standard test method for measuring road roughness by static level method. ASTM International: West Conshohocken, PA, 2017.
45. Karamihas, S.M. *Benchmark test evaluation report*; University of Michigan Transportation Research Institute: September, 2011.
46. Hays, J.D. Comparison of new technology for measuring ride quality. Thesis, Auburn University, 2006.
47. Kashani, A.; Olsen, M.; Parrish, C.; Wilson, N. A review of lidar radiometric processing: From ad hoc intensity correction to rigorous radiometric calibration. *Sensors* **2015**, *15*, 28099.
48. Crosilla, F.; Dequal, S. *Laser scanning terrestre*. CISM: 2006.
49. Chin, A. Paving the way for terrestrial laser scanning assessment of road quality. 2012.
50. Chang, J.; Chang, K.; Chen, D. Application of 3d laser scanning on measuring pavement roughness. **2006**.
51. Křemen, T.; Štroner, M.; Třasák, P. Determination of pavement elevations by the 3d scanning system and its verification. *Geoinformatics FCE CTU* **2014**, *12*, 55-60.
52. Alhasan, A.; White, D.J.; De Brabanter, K. Spatial pavement roughness from stationary laser scanning. *International Journal of Pavement Engineering* **2017**, *18*, 83-96.
53. Barbarella, M.; De Blasiis, M.R.; Fiani, M. Terrestrial laser scanner for the analysis of airport pavement geometry. *International Journal of Pavement Engineering* **2017**, 1-15.
54. Hoensheid, R.C.; Dean, D.B.; Brooks, C.; Ahlborn, T.M.; Harris, D.K.; Dobson, R.J. An evaluation of surface defect detection in reinforced concrete bridge decks using terrestrial lidar. Master's Thesis, Michigan Technological University, 2012.
55. Kim, M.-K.; Sohn, H.; Chang, C.-C. Localization and quantification of concrete spalling defects using terrestrial laser scanning. *Journal of Computing in Civil Engineering* **2015**, *29*, 04014086.
56. Löhmus, H.; Ellmann, A.; Märdla, S.; Idnurm, S. Terrestrial laser scanning for the monitoring of bridge load tests – two case studies. *Survey Review* **2018**, *50*, 270-284.
57. Olsen, M.J.; Kuester, F.; Chang, B.J.; Hutchinson, T.C. Terrestrial laser scanning-based structural damage assessment. *Journal of Computing in Civil Engineering* **2010**, *24*, 264-272.
58. Tang, P.; Huber, D.; Akinici, B. Characterization of laser scanners and algorithms for detecting flatness defects on concrete surfaces. *Journal of Computing in Civil Engineering* **2011**, *25*, 31-42.

-
59. Caltrans surveys manual. California Department of Transportation Office of Land Surveys, 1727 30th Street Sacramento, CA 95816-8041: 2018.
 60. Guan, H.; Li, J.; Cao, S.; Yu, Y. Use of mobile lidar in road information inventory: A review. *International Journal of Image and Data Fusion* **2016**, *7*, 219-242.
 61. Pu, S.; Rutzinger, M.; Vosselman, G.; Oude Elberink, S. Recognizing basic structures from mobile laser scanning data for road inventory studies. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **2011**, *66*, S28-S39.
 62. Duffell, C.; Rudrum, D. Remote sensing techniques for highway earthworks assessment. In *Site characterization and modeling*, 2005; pp 1-13.
 63. Yadav, M.; Singh, A.K.; Lohani, B. Computation of road geometry parameters using mobile lidar system. *Remote Sensing Applications: Society and Environment* **2018**, *10*, 18-23.
 64. Yen, K.S.; Ravani, B.; Lasky, T.A. *Lidar for data efficiency*; Washington (State). Dept. of Transportation. Office of Research and Library Services: 2011.
 65. Glennie, C. Kinematic terrestrial light-detection and ranging system for scanning. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* **2009**, 135-141.
 66. Williams, K.; Olsen, M.; V. Roe, G.; Glennie, C. *Synthesis of transportation applications of mobile lidar*. 2013; Vol. 5, p 4652-4692.
 67. Olsen, M.J.; Knodler, M.A.; Squellati, A.; Tuss, H.; Williams, K.; Hurwitz, D.; Reedy, M.; Persi, F.; Glennie, C.; Roe, G.V., *et al. Guidelines for the use of mobile lidar in transportation applications*. 2013.
 68. Barber, D.; Mills, J.; Smith-Voysey, S. Geometric validation of a ground-based mobile laser scanning system. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **2008**, *63*, 128-141.
 69. Glennie, C. Rigorous 3d error analysis of kinematic scanning lidar systems. In *Journal of Applied Geodesy*, 2007; Vol. 1, p 147.
 70. Toschi, I.; Rodríguez-Gonzálvez, P.; Remondino, F.; Minto, S.; Orlandini, S.; Fuller, A. Accuracy evaluation of a mobile mapping system with advanced statistical methods. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* **2015**, *XL-5/W4*, 245-253.
 71. Gräfe, G. In *Kinematic 3d laser scanning for road or railway construction surveys*, 1st International Conference on Machine Control & Guidance 2008, Zurich, Switzerland, 24–26 June 2008; Zurich, Switzerland, pp 24–26.

72. Jaselskis, E.J.; Gao, Z.; Welch, A.; O'Brien, D. In *Pilot study on laser scanning technology for transportation projects*, Mid-Continent Transportation Research Symposium, 2003.
73. Rybka, R. Down-to-earth lidar. *LiDAR News* **2011**, 21.
74. Yu, Y.; Li, J.; Guan, H.; Wang, C.; Yu, J. Semiautomated extraction of street light poles from mobile lidar point-clouds. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **2015**, 53, 1374-1386.
75. Balado, J.; Díaz-Vilariño, L.; Arias, P.; González-Jorge, H. Automatic classification of urban ground elements from mobile laser scanning data. *Automation in Construction* **2018**, 86, 226-239.
76. Manandhar, D.; Shibasaki, R. Auto-extraction of urban features from vehicle-borne laser data. *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **2002**, 34, 650-655.
77. Gargoum, S.A.; El-Basyouny, K.; Froese, K.; Gadowski, A. A fully automated approach to extract and assess road cross sections from mobile lidar data. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* **2018**, 1-10.
78. Holgado-Barco, A.; Riveiro, B.; González-Aguilera, D.; Arias, P. Automatic inventory of road cross-sections from mobile laser scanning system. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* **2017**, 32, 3-17.
79. Kumar, P.; Lewis, P.; Mc Elhinney, C.; Rahman, A. *An algorithm for automated estimation of road roughness from mobile laser scanning data*. 2015; Vol. 30, p 30-45.
80. Kumar, P.; Angelats, E. An automated road roughness detection from mobile laser scanning data. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* **2017**, XLII-1/W1, 91-96.
81. Guan, H.; Li, J.; Yu, Y.; Chapman, M.; Wang, H.; Wang, C.; Zhai, R. Iterative tensor voting for pavement crack extraction using mobile laser scanning data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **2015**, 53, 1527-1537.
82. Díaz-Vilariño, L.; González-Jorge, H.; Bueno, M.; Arias, P.; Puente, I. Automatic classification of urban pavements using mobile lidar data and roughness descriptors. *Construction and Building Materials* **2016**, 102, 208-215.
83. Guan, H.; Li, J.; Yu, Y.; Wang, C.; Chapman, M.; Yang, B. Using mobile laser scanning data for automated extraction of road markings. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **2014**, 87, 93-107.
84. Kaasalainen, S.; Jaakkola, A.; Kaasalainen, M.; Krooks, A.; Kukko, A. Analysis of incidence angle and distance effects on terrestrial laser scanner intensity: Search for correction methods. *Remote Sensing* **2011**, 3, 2207.

-
85. Javanmardi, M.; Javanmardi, E.; Gu, Y.; Kamijo, S. Towards high-definition 3d urban mapping: Road feature-based registration of mobile mapping systems and aerial imagery. *Remote Sensing* **2017**, *9*, 975.
 86. Ragnoli, A.; De Blasiis, M.R.; Di Benedetto, A. Pavement distress detection methods: A review. *Infrastructures* **2018**, *3*, 58.
 87. Yoon, J.; Crane, C.D. In *Evaluation of terrain using lidar data in urban environment for autonomous vehicles and its application in the darpa urban challenge*, 2009 ICCAS-SICE, 18-21 Aug. 2009, 2009; pp 641-646.
 88. Smadja, L.; Ninot, J.; Gavrilovic, T. Road extraction and environment interpretation from lidar sensors. *IAPRS* **2010**, *38*, 281-286.
 89. Ibrahim, S.; Lichti, D. Curb-based street floor extraction from mobile terrestrial lidar point cloud. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* **2012**, *XXXIX-B5*, 193-198.
 90. Kumar, P.; McElhinney, C.P.; Lewis, P.; McCarthy, T. An automated algorithm for extracting road edges from terrestrial mobile lidar data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **2013**, *85*, 44-55.
 91. Yadav, M.; Singh, A.K.; Lohani, B. Extraction of road surface from mobile lidar data of complex road environment. *International Journal of Remote Sensing* **2017**, *38*, 4655-4682.
 92. Torr, P.; Zisserman, A. *Mlesac: A new robust estimator with application to estimating image geometry*. 2000; Vol. 78, p 138-156.
 93. Myilsamy, R. *A comparative study of robust ransac techniques*. 2012; Vol. 2, p 227-232.
 94. Yang, B.; Wei, Z.; Li, Q.; Li, J. Automated extraction of street-scene objects from mobile lidar point clouds. *International Journal of Remote Sensing* **2012**, *33*, 5839-5861.
 95. Guan, H.; Li, J.; Yu, Y.; Wang, C.; Chapman, M.; Yang, B. Using mobile laser scanning data for automated extraction of road markings. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **2014**, *87*, 93-107.
 96. Tee-Ann, T.; Hui-Lin, Y. Empirical radiometric normalization of road points from terrestrial mobile lidar system. *Remote Sensing* **2015**, *7*, 6336-6357.
 97. Yu, Y.; Li, J.; Guan, H.; Jia, F.; Wang, C. Learning hierarchical features for automated extraction of road markings from 3-d mobile lidar point clouds. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* **2015**, *8*, 709-726.
 98. Otsu, N. A threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* **1979**, *9*, 62-66.
 99. Farin, G.E.; Hansford, D. *The essentials of cagd*. A. K. Peters, Ltd.: 2000; p 229.

100. Ben-Arieh, D.; Chang, S.; Rys, M.; Zhang, G. *Geometric modeling of highways using global positioning system data and b-spline approximation*. 2004; Vol. 130.
101. Hasberg, C.; Hensel, S. In *Online-estimation of road map elements using spline curves*, 2008 11th International Conference on Information Fusion, 30 June-3 July 2008, 2008; pp 1-7.
102. Esposito, T.; Mauro, R. *La geometria stradale. Fondamenti di infrastrutture viarie*. Hevelius: 2001.
103. Hengl, T. Finding the right pixel size. *Computers & Geosciences* **2006**, 32, 1283-1298.
104. Yang, C.-S.; Kao, S.-P.; Lee, F.-B.; Hung, P.-S. In *Twelve different interpolation methods: A case study of surfer 8.0*, Proceedings of the XXth ISPRS Congress, 2004; pp 778-785.
105. Sayers, M.W. On the calculation of international roughness index from longitudinal road profile. *Transportation Research Record* **1995**.
106. ASTM; E1926-08(2015). Standard practice for computing international roughness index of roads from longitudinal profile measurements. ASTM International: West Conshohocken, PA, 2015.
107. Mansfield, N.J. *Human response to vibration*. CRC press: 2004.
108. Katu, U.; Desavale, R.; Kanai, R. In *Effect of vehicle vibration on human body—rit experience*, Proceedings of the 11th National Conference on Machines and Mechanisms, 2003; pp 1-9.
109. Fujisaki, S.; Taniguchi, T.; Sakai, S.; Fukuda, M. Effects of acceleration on the human body and response to physiological permissible limits. *Nippon Jibiinkoka Gakkai Kaiho* **1963**, 66, 903-908.
110. Fwa, T.F.; Pasindu, H.R.; Ong, G.P. Critical rut depth for pavement maintenance based on vehicle skidding and hydroplaning consideration. *Journal of Transportation Engineering* **2012**, 138, 423-429.
111. Hussan, S.; Kamal, M.A.; Hafeez, I.; Farooq, D.; Ahmad, N.; Khanzada, S. Statistical evaluation of factors affecting the laboratory rutting susceptibility of asphalt mixtures. *International Journal of Pavement Engineering* **2017**, 1-15.
112. Start, M.; Kim, J.; Berg, W. Potential safety cost-effectiveness of treating rutted pavements. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* **1998**, 1629, 208-213.
113. Fwa, T.F.; Ong, G.P. Wet-pavement hydroplaning risk and skid resistance: Analysis. *Journal of Transportation Engineering* **2008**, 134, 182-190.
114. Obaidat, M.T.; Al-Suleiman, T.I.; Abdul-Jabbar, G.T. Quantification of pavement rut depth using stereovision technology. *Journal of Surveying Engineering* **1997**, 123, 55-70.

-
115. Hadley, W.O.; Myers, M.G. Rut depth estimates developed from cross profile data. Au-179. *Texas Research and Development Foundation, Austin* **1991**.
 116. Hao, X.; Sha, A.; Sun, Z.; Li, W.; Hu, Y. Laser-based measuring method for mean joint faulting value of concrete pavement. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics* **2016**, *127*, 274-278.
 117. AASHTO; R36-13. Standard practice for evaluating faulting of concrete pavements. AASHTO Designation R 36-13: 2014.
 118. Barbarella, M.; D'Amico, F.; De Blasiis, M.; Di Benedetto, A.; Fiani, M. Use of terrestrial laser scanner for rigid airport pavement management. *Sensors* **2018**, *18*, 44.
 119. Barbarella, M. Digital technology and geodetic infrastructures in italian cartography. *Citta e Storia* **2014**, *9*.