



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale

Dottorato di ricerca in
Infrastrutture e Trasporti

Monitoraggio della regolarità delle pavimentazioni stradali mediante valutazione dei livelli di accelerazione.

Tutor

Dott. Ing. Giuseppe Loprencipe

Dottorando

Pablo Zoccali

XXIX CICLO – ANNO ACCADEMICO 2015-2016

Monitoraggio della regolarità delle pavimentazioni stradali mediante valutazione dei livelli di accelerazione.

Monitoraggio della regolarità delle pavimentazioni stradali mediante valutazione dei livelli di accelerazione.

INDICE

Lista delle Figure.....	V
Lista delle Tabelle	XIV
Introduzione	1
1. Metodi consolidati di valutazione della regolarità stradale.....	3
1.1. International Roughness Index (IRI).....	8
1.2. Ride Number (RN).....	11
1.3. Michigan Ride Quality Index (RQI_{Mich}).....	12
1.4. Minnesota Ride Quality Index (RQI_{Mn}).....	13
1.5. Dynamic Load Index (DLI).....	14
1.6. Classificazione dei profili stradali secondo la ISO 8608	15
1.7. Pavement Condition Index (PCI)	17
2. Metodi alternativi di valutazione della regolarità stradale.....	21
2.1. Accelerazione verticale ponderata in frequenza (a_{wz}).....	24
2.2. Procedura di calcolo dello spettro dell'accelerazione	27
2.3. Modello di simulazione <i>full-car 8 d.o.f.</i>	33
3. Analisi preliminari e comparative tra i vari metodi	38
3.1. Campione di profili artificiali.....	38
3.2. Campione di profili reali	40
3.3. Irregolarità puntuali (<i>potholes</i>): analisi di sensibilità.....	41
3.4. Irregolarità diffuse: analisi di sensibilità.....	56
3.5. Confronto tra indice a_{wz} e altri indici di comfort (RN, RQI_{Mich} , RQI_{Mn})	63
3.6. Confronto tra indice a_{wz} e classificazione profili ISO 8608.....	69
3.7. Confronto tra indice a_{wz} e IRI	73
4. Caratteristiche del sistema di misura a bordo del veicolo.....	80
4.1. Frequenza di campionamento.....	80
4.2. Posizionamento della strumentazione all'interno del veicolo.....	85
4.3. Progettazione e verifica del supporto per la strumentazione.....	92

4.3.1. Supporto A: struttura a mensola	92
4.3.2. Supporto B: struttura a telaio	95
4.4. Effetto di disturbo dell'accelerazione di gravità sull'accelerazione verticale misurata.....	103
4.5. Selezione Applicazione per cellulari smartphone	108
5. Strumentazione prescelta per le misure in sito.....	111
5.1. Piattaforma Inerziale LandMark 10 GPSA-150-10-200	111
5.2. Cellulari Smartphone.....	114
5.3. Analisi delle prestazioni dell'unità LMRK10	116
5.3.1. Analisi precisione dati GPS	116
5.3.2. Analisi ripetibilità dati accelerometrici	123
5.3.3. Analisi misure Vigna di Valle	127
5.4. Principali problematiche emerse e comparazione acquisizione statica	135
6. Campagna di misurazioni in sito.....	141
7. Elaborazione dati.....	156
7.1. Risultati unità LMRK10.....	156
7.2. Risultati cellulari smartphone.....	175
7.3. Confronto a_{wz} -PCI.....	184
8. Conclusioni e futuri sviluppi.....	200
Bibliografia.....	203

LISTA DELLE FIGURE

Figura 1-1. Classi di tessitura in funzione della lunghezza d'onda e della frequenza spaziale	3
Figura 1-2. Rappresentazione schematica dei profili longitudinali e trasversali di una strada.....	4
Figura 1-3. Profilometri di Classe I: (a) Dipstick e (b) Walking profiler G2	5
Figura 1-4. Profilometri di Classe II: the Automatic Road Analyzer (ARAN)	5
Figura 1-5. Profilometri di Classe III: the Analyseur de Profile en Long (APL)	6
Figura 1-6. Profili longitudinali grezzi (a) e i medesimi profili filtrati (b).....	7
Figura 1-7. Modello quarter-car.....	9
Figura 1-8. Funzione di risposta del modello quarter-car per il calcolo dell'IRI.....	9
Figura 1-9. Relazione tra RQI_{Mn} e IRI in funzione del tipo di pavimentazione	14
Figura 1-10. Smoothed e Fitted PSD di un generico profilo stradale secondo la ISO 8608.....	16
Figura 1-11. Classificazione dei profili stradali secondo la ISO 8608 per $w=2$	17
Figura 1-12. Relazione IRI-PCI in funzione della classificazione funzionale delle strade	19
Figura 1-13. Relazione IRI-PCI per diverse tipologie di pavimentazione	20
Figura 2-1. Relazione IRI-PCI per diverse tipologie di pavimentazione e sampietrini.....	22
Figura 2-2. Posture assunte dal soggetto durante l'esposizione alle vibrazioni	25
Figura 2-3. Andamento delle principali curve di ponderazione in frequenza	26
Figura 2-4. Finestra di osservazione rettangolare	28
Figura 2-5. Segnale sinusoidale troncato con finestra rettangolare	28
Figura 2-6. Spettro del segnale sinusoidale troncato con finestra rettangolare	29
Figura 2-7. Esempio di segnale finestrato	30
Figura 2-8. Finestra di Hanning	31
Figura 2-9. Finestra di Hamming.....	31
Figura 2-10. Finestra di Blackman	32
Figura 2-11. Split-Cosine Bell	33
Figura 2-12. Schema del modello full-car 8 d.o.f.	35
Figura 3-1. Distribuzione dell'esponente w calcolato per il campione di profili stradali reali	41
Figura 3-2. Geometria buca con livello di severità basso.....	42
Figura 3-3. Geometria buca con livello di severità medio.....	43
Figura 3-4. Geometria buca con livello di severità alto.....	43
Figura 3-5. Profili singola buca con grado di severità basso	44

Figura 3-6. Profili singola buca con grado di severità medio	44
Figura 3-7. Profili singola buca con grado di severità alto	44
Figura 3-8. Analisi di sensibilità degli indici consolidati rispetto al grado di severità e alla localizzazione di una buca: (a) DLI, (b) IRI, (c) RN e (d) RQI_{Mich}	45
Figura 3-9. Analisi di sensibilità dell'indice a_{wz} per $V=10$ km/h e diversi metodi di stima dello spettro: (a) FFT-Hanning, (b) FFT-Hamming, (c) FFT-Blackman, (d) FFT-Split-Cosine Bell, (e) Welch-Hamming e (f) Welch-Hanning	46
Figura 3-10. Analisi di sensibilità dell'indice a_{wz} per $V=40$ km/h e diversi metodi di stima dello spettro: (a) FFT-Hanning, (b) FFT-Hamming, (c) FFT-Blackman, (d) FFT-Split-Cosine Bell, (e) Welch-Hamming e (f) Welch-Hanning	47
Figura 3-11. Analisi di sensibilità dell'indice a_{wz} per $V=70$ km/h e diversi metodi di stima dello spettro: (a) FFT-Hanning, (b) FFT-Hamming, (c) FFT-Blackman, (d) FFT-Split-Cosine Bell, (e) Welch-Hamming e (f) Welch-Hanning	48
Figura 3-12. Valore indice a_{wz} in funzione della velocità di marcia e della procedura di stima dello spettro dell'accelerazione per la buca con livello di severità basso	49
Figura 3-13. Valore indice a_{wz} in funzione della velocità di marcia e della procedura di stima dello spettro dell'accelerazione per la buca con livello di severità medio	49
Figura 3-14. Valore indice a_{wz} in funzione della velocità di marcia e della procedura di stima dello spettro dell'accelerazione per la buca con livello di severità alto	50
Figura 3-15. Variabilità indici in funzione della lunghezza del profilo: (a) DLI, (b) IRI, (c) RN, (d) RQI_{Mich} , (e) a_{wz} (FFT-Hanning) e (f) a_{wz} (FFT-Split-Cosine Bell)	51
Figura 3-16. Variazione dell'indice DLI aggiungendo una singola buca a un campione di profili reali: (a) severità bassa, (b) severità media e (c) severità alta	52
Figura 3-17. Variazione dell'indice IRI aggiungendo una singola buca a un campione di profili reali: (a) severità bassa, (b) severità media e (c) severità alta	53
Figura 3-18. Variazione dell'indice RN aggiungendo una singola buca a un campione di profili reali: (a) severità bassa, (b) severità media e (c) severità alta	54

Figura 3-19. Variazione dell'indice RQI_{Mich} aggiungendo una singola buca a un campione di profili reali: (a) severità bassa, (b) severità media e (c) severità alta	55
Figura 3-20. Variazione dell'indice a_{wz} aggiungendo una singola buca a un campione di profili reali: (a) severità bassa, (b) severità media e (c) severità alta	56
Figura 3-21. Comparazione tra i valori dell'indice DLI ottenuti per i tre diversi campioni di profili: (a) 100m-200m, (b) 100m-320m e (c) 200m-320m.....	57
Figura 3-22. Comparazione tra i valori dell'indice IRI ottenuti per i tre diversi campioni di profili: (a) 100m-200m, (b) 100m-320m e (c) 200m-320m.....	58
Figura 3-23. Comparazione tra i valori dell'indice RN ottenuti per i tre diversi campioni di profili: (a) 100m-200m, (b) 100m-320m e (c) 200m-320m.....	59
Figura 3-24. Comparazione tra i valori dell'indice RQI_{Mich} ottenuti per i tre diversi campioni di profili: (a) 100m-200m, (b) 100m-320m e (c) 200m-320m.....	60
Figura 3-25. Comparazione tra i valori dell'indice a_{wz} ottenuti adottando diversi metodi di stima spettrale	62
Figura 3-26. Relazione tra i valori del Ride Number e del Michigan Ride Quality Index.....	63
Figura 3-27. Relazione tra i valori del Michigan Ride Quality Index e del Minnesota Ride Quality Index	64
Figura 3-28. Relazione tra i valori del Minnesota Ride Quality Index e del Ride Number.....	64
Figura 3-29. Percentuale di accordo nella valutazione del campione di profili reali	65
Figura 3-30. Ripartizione percentuale del campione di profili reali tra i quattro livelli di Ride Quality.....	65
Figura 3-31. Correlazioni tra l'indice a_{wz} ($V=70$ km/h) e gli altri indicatori di comfort	67
Figura 3-32. Andamento del coefficiente di correlazione R^2 in funzione della velocità di marcia	67
Figura 3-33. Correlazioni tra l'indice a_{wz} ($V=40$ km/h) e gli altri indicatori di comfort	68
Figura 3-34. Percentuale di agreement tra l'indice a_{wz} e gli altri indicatori al variare della velocità di marcia	69
Figura 3-35. Distribuzione dei valori dell'indice IRI tra le classi ISO 8608 caratterizzanti il campione di profili reali	70
Figura 3-36. Distribuzione dei valori dell'indice a_{wz} tra le classi ISO 8608 caratterizzanti il campione di profili reali	71

Figura 3-37.Distribuzione dei valori dell'indice a_{wz} al variare della velocità di transito per i profili reali di Classe C	71
Figura 3-38.Distribuzione dei valori dell'indice a_{wz} al variare della velocità di transito per i profili reali di Classe D	71
Figura 3-39.Velocità di marcia tali da indurre un livello di comfort <i>fairly uncomfortable</i> o migliore e valori di IRI per sezioni consecutive di 100 m...	72
Figura 3-40.Relazione tra gli indici a_{wz} e IRI per diverse velocità: (a) 30 km/h, (b) 50 km/h, (c) 70 km/h e (d) 90 km/h	75
Figura 3-41.Incidenza della velocità di marcia sulla relazione tra a_{wz} e IRI: (a) coefficiente angolare e (b) coefficiente di correlazione R^2	76
Figura 3-42.Confronto tra le relazioni ottenute tra gli indici a_{wz} e IRI per profili di 320 m al variare della velocità di marcia: (a) coefficiente angolare e (b) coefficiente di correlazione R^2	77
Figura 3-43.Comparazione tra i diversi coefficienti di proporzionalità tra a_{wz} e IRI	78
Figura 4-1.Analisi della variabilità dell'indice a_{wz} campionando l'accelerazione a 100 Hz per diverse velocità di marcia	82
Figura 4-2.PSD in bande in terzi d'ottava delle accelerazioni verticali ottenute per il campione di profili reali	83
Figura 4-3.Confronto valori di IRI per i profili destri e sinistri della Strada 01 del campione di profili reali	86
Figura 4-4.Confronto tra valori di a_{wz} calcolati in corrispondenza del sedile del guidatore e del passeggero	87
Figura 4-5.Confronto tra valori di a_{wz} calcolati in corrispondenza del baricentro del veicolo per i due casi di studio	87
Figura 4-6.Relazione tra IRI e a_{wz} calcolata in diversi punti di misura: (a) sedile guidatore, (b) sedile passeggero e (c) baricentro veicolo	89
Figura 4-7.Relazione tra a_{wz} calcolata in corrispondenza del sedile del guidatore e in posizione baricentrica per diverse velocità di marcia (10-60 km/h)	90
Figura 4-8.Funzione di trasferimento PSD delle accelerazioni tra sedile e baricentro per diverse velocità di marcia	91
Figura 4-9.Elementi costitutivi del supporto A	92
Figura 4-10.Modello agli elementi finiti indeformato del supporto A	93
Figura 4-11.Frequenze e autovalori modali al variare della dimensione della mesh	94
Figura 4-12.Forme modali dei primi quattro modi di vibrare del supporto A	95
Figura 4-13.Conformazione iniziale del supporto B	96

Figura 4-14.Frequenze e autovalori modali per la struttura a ponte ad angoli retti al variare della dimensione della mesh	97
Figura 4-15.Conformazione effettiva del supporto B	98
Figura 4-16.Confronto tra frequenze e autovalori modali ottenuti per struttura ad angoli retti e angoli effettivi	99
Figura 4-17.Confronto tra le forme modali dei primi quattro modi di vibrare ottenute per le due configurazioni del supporto B	101
Figura 4-18.Supporto B completo della piastra superiore	102
Figura 4-19.Frequenze e autovalori modali al variare del materiale e dello spessore della piastra superiore	103
Figura 4-20.Confronto tra le frequenze modali della sola struttura a telaio e quelle determinate con l'applicazione di una piastra con spessore di 1 cm	103
Figura 4-21.Sistemi di riferimento Est,Nord,Up e intrinseco al veicolo x,y,z	104
Figura 4-22.Misura accelerazione verticale grezza e filtrata con filtro passa-alto	104
Figura 4-23.Angoli di Eulero.....	105
Figura 4-24.Confronto tra accelerazione filtrata con filtro high-pass e accelerazione depurata del vettore accelerazione di gravità tramite matrice DCM.....	107
Figura 5-1.Significato nomenclatura identificativa del prodotto.....	112
Figura 5-2.Elementi costitutivi l'unità inerziale LMRK10	112
Figura 5-3.Supporto per il posizionamento del cellulare smartphone A sul parabrezza.....	114
Figura 5-4.Posizionamento dello smartphone B in prossimità dell'unità inerziale LMRK10	115
Figura 5-5.Schermata di esempio per il reperimento delle specifiche tecniche dei singoli sensori all'interno dei cellulari smartphone	115
Figura 5-6.Comparazione traiettorie LMRK10 e KIN-VADASE: passaggio n. 1	118
Figura 5-7.Comparazione traiettorie LMRK10 e KIN-VADASE: passaggio n. 2	118
Figura 5-8.Comparazione traiettorie LMRK10 e KIN-VADASE: passaggio n. 3	118
Figura 5-9.Differenze tra le coordinate Est e Nord rilevate con LMRK10 e ricevitore GPS per KIN-VADASE in corrispondenza di una medesima epoca	119
Figura 5-10.Confronto tra i diversi passaggi effettuati lungo l'anello intorno Circo Massimo	120

Figura 5-11. Confronto tra i diversi passaggi effettuati lungo l'anello intorno Circo Massimo: particolare del tratto di viale Aventino	120
Figura 5-12. Sovrapposizione dei dati di posizionamento della piattaforma LMRK10 con OpenStreetMap in ambiente Q-GIS	121
Figura 5-13. Confronto velocità puntuale rilevata tramite KIN-VADASE e LMRK10	123
Figura 5-14. Misura per un medesimo tratto effettuata in giorni diversi: (a) velocità e (b) accelerazione verticale	125
Figura 5-15. Valori dell'indice a_{wz} ottenuti per i singoli transiti sulla tratta Due Leoni-Grotte Celoni (73)	126
Figura 5-16. Inserimento dei valori di a_{wz} all'interno di una piattaforma GIS con individuazione della presenza di uno scambio	126
Figura 5-17. Ripetibilità del livello di comfort registrato in corrispondenza dello scambio	127
Figura 5-18. Strada provinciale 11b nella località di Vigna di Valle	128
Figura 5-19. Profili destro e sinistro misurati con il Dipstick (a) e filtrando la pendenza longitudinale della strada (b)	129
Figura 5-20. Posizionamento dei markers di riferimento per l'allineamento dei segnali accelerometrici	130
Figura 5-21. Accelerazione verticale rilevata durante il primo passaggio a 20 km/h	130
Figura 5-22. Distanza della sezione di prova calcolata a partire dalla localizzazione dei marker lungo il profilo percorso	131
Figura 5-23. Passaggi per i quali è stato rispettato il requisito della velocità per le varie classi	133
Figura 5-24. Confronto tra i valori di a_{wz} calcolati e quelli attesi rispetto alle analisi con il modello <i>full-car</i>	134
Figura 5-25. Confronto tra dati di posizionamento rilevati con cellulare smartphone e tramite LMRK10	137
Figura 5-26. Acquisizione statica tramite i diversi dispositivi: (a) smartphone B, (b) smartphone A, (c) LMRK10 e (d) posizione delle tre strumentazioni a bordo del veicolo	139
Figura 5-27. Confronto tra le coordinate WGS84 fornite dai tre dispositivi durante l'acquisizione statica	140
Figura 5-28. Confronto modulo del vettore accelerazione di gravità misurato con i tre dispositivi durante l'acquisizione statica	140
Figura 6-1. Carta tecnica comunale con individuazione delle frazioni di interesse	142

Figura 6-2. Individuazione dei tre livelli di rete principali.....	143
Figura 6-3. Suddivisione in sezioni e unità campione della frazione di Valentano Centro (V.C.).....	144
Figura 6-4. Suddivisione in sezioni e unità campione della frazione di Villa Fontane (V.F.).....	145
Figura 6-5. Suddivisione in sezioni e unità campione della frazione di Felceti (FEL.).....	146
Figura 6-6. Posizione dei punti fiduciali utilizzati come riferimento per la conversione dalla rappresentazione in coordinate cartografiche Cassini-Soldner a quella UTM-WGS84.....	150
Figura 6-7. Traiettoria georeferenziata in coordinate cartografiche UTM-WGS84 LMRK10 - frazione di Valentano Centro	152
Figura 6-8. Traiettoria georeferenziata in coordinate cartografiche UTM-WGS84 LMRK10 - frazione di Villa Fontane: in rosso tratto percorso in direzione nord; in verde tratto percorso in direzione sud.....	153
Figura 6-9. Traiettoria georeferenziata in coordinate cartografiche UTM-WGS84 LMRK10 - frazione di Felceti.....	154
Figura 6-10. Esempio dei poligoni utilizzati per il taglio dei segnali accelerometrici in corrispondenza delle varie sezioni di calcolo.....	155
Figura 7-1. Particolare delle sezioni da 17 a 20 nella frazione di Villa Fontane..	161
Figura 7-2. Anomalia durante il rilievo dell'accelerazione verticale dovuta a un probabile temporaneo malfunzionamento dell'unità inerziale LMRK10.....	162
Figura 7-3. Livello di comfort rilevato a 20 km/h nella frazione di Felceti	163
Figura 7-4. Livello di comfort rilevato a 30 km/h nella frazione di Felceti	163
Figura 7-5. Livello di comfort rilevato a 40 km/h nella frazione di Felceti	164
Figura 7-6. Livello di comfort rilevato a 20 km/h nella frazione di Valentano Centro.....	164
Figura 7-7. Livello di comfort rilevato a 30 km/h nella frazione di Valentano Centro.....	165
Figura 7-8. Livello di comfort rilevato a 20 km/h nella frazione di Villa Fontane	166
Figura 7-9. Livello di comfort rilevato a 30 km/h nella frazione di Villa Fontane	167
Figura 7-10. Livello di comfort rilevato a 40 km/h nella frazione di Villa Fontane	168
Figura 7-11. Particolare dei rilievi effettuati presso (a) Valentano Centro con $V_{ref}=30$ km/h e (b) Villa Fontane con $V_{ref}=40$ km/h.....	169

Figura 7-12. Ripartizione percentuale tra i vari livelli di qualità di marcia di un campione di profili reali in funzione della velocità di marcia considerata per il calcolo dell'indice a_{wz}	170
Figura 7-13. Correlazione tra i valori dell'indice a_{wz} alle varie velocità: (a) $a_{wz,20}-a_{wz,30}$; (b) $a_{wz,20}-a_{wz,40}$ e (c) $a_{wz,30}-a_{wz,40}$	172
Figura 7-14. Livello di comfort stimato per $V_{ref}=30$ km/h per la frazione di Felceti.....	172
Figura 7-15. Livello di comfort stimato per $V_{ref}=40$ km/h per la frazione di Felceti.....	173
Figura 7-16. Livello di comfort stimato per $V_{ref}=30$ km/h per la frazione di Valentano Centro.....	173
Figura 7-17. Livello di comfort stimato per $V_{ref}=30$ km/h per la frazione di Villa Fontana.....	174
Figura 7-18. Livello di comfort stimato per $V_{ref}=40$ km/h per la frazione di Villa Fontana.....	175
Figura 7-19. Confronto tra i valori dell'indice a_{wz} calcolati impiegando diverse funzioni di interpolazione.....	177
Figura 7-20. Confronto tra i valori di a_{wz} ottenuti tramite unità inerziale LMRK10 e smartphone B per diverse funzioni di interpolazione: (a) lineare, (b) spline e (c) pchip/cubica.....	179
Figura 7-21. Confronto tra i valori di a_{wz} ottenuti tramite unità inerziale LMRK10 e smartphone A per diverse funzioni di interpolazione: (a) lineare, (b) spline e (c) pchip/cubica.....	181
Figura 7-22. Confronto tra i valori dell'indice a_{wz} calcolati impiegando diverse funzioni di interpolazione.....	182
Figura 7-23. Sensibilità del punto di osservazione rispetto al transito dei due assi su di una singola irregolarità puntuale.....	183
Figura 7-24. Posizionamento videocamera Blackvue.....	185
Figura 7-25. Sezione V.C. SEZ. 03: (a) scheda del rilievo degli ammaloramenti e (b) ripresa video durante le misure accelerometriche.....	187
Figura 7-26. Sezione V.C. SEZ. 10: (a) scheda del rilievo degli ammaloramenti e (b) ripresa video durante le misure accelerometriche.....	188
Figura 7-27. Sezione V.F. SEZ. 05: (a) scheda del rilievo degli ammaloramenti e (b) ripresa video durante le misure accelerometriche.....	189
Figura 7-28. Sezione V.F. SEZ. 06: (a) scheda del rilievo degli ammaloramenti e (b) ripresa video durante le misure accelerometriche.....	190
Figura 7-29. Correlazione tra il PCI e l'indice a_{wz} per diverse velocità di riferimento: (a) 20 km/h, (b) 30 km/h e (c) 40 km/h.....	192

Figura 7-30. Correlazione tra il PCI ricalcolato non considerando gli ammaloramenti 1-L, 3-L, 7-L, 10-L e 17-L e l'indice a_{wz} per diverse velocità di riferimento: (a) 20 km/h, (b) 30 km/h e (c) 40 km/h..... 194

Figura 7-31. Percentuale di accordo massima tra PCI e a_{wz} per il campione di sezioni esaminate: (a) $V_{rif}=20$ km/h, (b) $V_{rif}=30$ km/h e (c) $V_{rif}=40$ km/h ... 196

Figura 7-32. Correlazione tra il PCI e l'indice a_{wz} (Smartphone B) per diverse velocità di riferimento: (a) 20 km/h, (b) 30 km/h e (c) 40 km/h 198

Figura 7-33. Correlazione tra il PCI e l'indice a_{wz} (Smartphone A) per diverse velocità di riferimento: (a) 20 km/h, (b) 30 km/h e (c) 40 km/h 199

LISTA DELLE TABELLE

Tabella 1-1. Specifiche IRI adottate in alcuni stati degli USA.....	10
Tabella 1-2. Specifiche IRI adottate in alcuni paesi non appartenenti agli USA ...	11
Tabella 1-3. Scala di valutazione usata per il Ride Number.....	12
Tabella 1-4. Corrispondenza tra valori di RQI_{Mich} e qualità di marcia	13
Tabella 1-5. Categorie di qualità di marcia per RQI_{Mn}	14
Tabella 1-6. Soglie limite per le prime quattro classi (A-D) di profili ISO 8608...	17
Tabella 1-7. Scala di giudizio sulla qualità delle pavimentazioni per il PCI.....	17
Tabella 1-8. Dimensioni minime delle unità campione	18
Tabella 2-1. Guida all'applicazione delle curve di ponderazione in frequenza per i principali coefficienti di pesatura	25
Tabella 2-2. Livelli di comfort relativi ai valori dell'indice a_{wz} proposti dalla ISO 2631-1 per il trasporto pubblico	26
Tabella 2-3. Parametri di riferimento per il modello <i>full-car 8 d.o.f.</i>	37
Tabella 3-1. Lunghezza tratto rilevato per ciascuna strada	40
Tabella 3-2. Ripartizione tra le classi di profili stradali ISO 8608 del campione di profili reali.....	41
Tabella 3-3. Livello di severità delle buche secondo la ASTM D6433-03	42
Tabella 3-4. Geometria dei casi di studio esaminati	42
Tabella 3-5. Casi di studio per singola irregolarità e progressiva di inserimento ..	43
Tabella 3-6. Livelli di comfort uniformati per gli indici RN , RQI_{Mich} , RQI_{Mn} e a_{wz} ..	64
Tabella 3-7. Relazioni a_{wz} - IRI in letteratura per profili di 100 m.....	78
Tabella 4-1. Risoluzione spettrale in funzione della velocità e della lunghezza delle sezioni stradali.....	85
Tabella 4-2. Proprietà meccaniche dei materiali utilizzati per il supporto A	93
Tabella 4-3. Parametri statistici dell'errore assoluto tra i segnali di accelerazione verticale ottenuti tramite i due diversi approcci	107
Tabella 4-4. Analisi statistica incremento temporale dispositivo smartphone durante le prove di laboratorio	108
Tabella 4-5. Principali parametri statistici degli incrementi temporali registrati per le tre diverse applicazioni per Android	109
Tabella 4-6. Metodi di interpolazione utilizzabili tramite la funzione <i>interp1</i> di Matlab.....	110
Tabella 5-1. Specifiche tecniche unità LMRK10	113
Tabella 5-2. Analisi statistica incremento temporale dt della piattaforma inerziale LMRK10	114

Tabella 5-3. Specifiche tecniche dei sensori montati sui dispositivi smartphone.	116
Tabella 5-4. Confronto tra le soluzioni ottenute tramite KIN-VADASE (modalità L1 e L3) e LGO	117
Tabella 5-5. Analisi statistica differenze tra le coordinate Est e Nord tra singolo ricevitore GPS e LMRK10	120
Tabella 5-6. Analisi statistica dei residui tra le velocità calcolate con KIN-VADASE e LMRK10	123
Tabella 5-7. Classi di velocità previsti per il calcolo dell'indice a_{wz} in ambito urbano	123
Tabella 5-8. Accelerazione ponderata in frequenza lungo le tre direzioni ortogonali calcolata per i singoli passaggi misurati (73)	125
Tabella 5-9. Valori dello slope utilizzati per il calcolo dei valori stimati dell' a_{wz}	134
Tabella 5-10. IRI calcolato per i profili rilevati destro e sinistro	134
Tabella 6-1. Sezioni definite per la frazione di Valentano Centro	147
Tabella 6-2. Sezioni definite per la frazione di Villa Fontane	147
Tabella 6-3. Sezioni definite per la frazione di Felceti	148
Tabella 6-4. Coordinate dei punti fiduciali nei diversi sistemi di riferimento	151
Tabella 7-1. Valori a_{wz} ottenuti in diversi passaggi a 20 km/h nella frazione di Felceti	157
Tabella 7-2. Valori a_{wz} ottenuti in diversi passaggi a 20 km/h nella frazione di Valentano Centro	157
Tabella 7-3. Valori a_{wz} ottenuti in diversi passaggi a 20 km/h nella frazione di Villa Fontane	158
Tabella 7-4. Valori a_{wz} ottenuti in diversi passaggi a 30 km/h nella frazione di Felceti	158
Tabella 7-5. Valori a_{wz} ottenuti in diversi passaggi a 30 km/h nella frazione di Valentano Centro	159
Tabella 7-6. Valori a_{wz} ottenuti in diversi passaggi a 30 km/h nella frazione di Villa Fontane	159
Tabella 7-7. Valori a_{wz} ottenuti in diversi passaggi a 40 km/h nella frazione di Felceti	160
Tabella 7-8. Valori a_{wz} ottenuti in diversi passaggi a 40 km/h nella frazione di Villa Fontane	160
Tabella 7-9. Analisi statistica dei residui tra a_{wz} LMRK10 e smartphone B	179
Tabella 7-10. Analisi statistica dei residui tra a_{wz} LMRK10 e smartphone A	182
Tabella 7-11. Analisi statistica della deviazione standard ottenuta per le varie sezioni utilizzando i due smartphone A e B	184

Tabella 7-12.Elenco degli ammaloramenti nelle pavimentazioni flessibili secondo il metodo PCI	186
Tabella 7-13.Riepilogo valori PCI per ciascuna sezione di calcolo	190
Tabella 7-14.Soglie PCI e livelli di giudizio della pavimentazione	195

INTRODUZIONE

Una delle principali funzioni di una pavimentazione stradale è garantire un piano di rotolamento regolare e poco deformabile, tale da corrispondere a prestabiliti requisiti minimi di sicurezza e comfort. A tale scopo, di fondamentale importanza è l'implementazione di un opportuno sistema di monitoraggio del livello di regolarità che interessi una specifica strada, al fine di consentire tempestivi interventi di manutenzione atti al ripristino di livelli prestazionali accettabili, prima dell'insorgere di un eccessivo degrado della pavimentazione con conseguenti effetti dannosi sulla circolazione stradale (e.g. aumento dell'incidentalità, riduzione della qualità di marcia percepita dagli utenti, incremento del carico dinamico trasmesso alla pavimentazione, etc.).

Al fine di ottimizzare le risorse a disposizione delle varie amministrazioni, è opportuno che queste implementino un sistema di gestione delle pavimentazioni (*Pavement Management System – PMS*), tramite l'impiego del quale è possibile pianificare gli interventi da effettuarsi nel corso degli anni e accantonare le corrispettive somme di denaro necessarie per la loro realizzazione. Inoltre, tramite l'adozione di un sistema di monitoraggio il più possibile continuo nel tempo, è possibile affinare nel corso degli anni i modelli di decadimento delle prestazioni fornite dalle pavimentazioni stradali (non solo in termini di regolarità ma anche di portanza e aderenza), ottenendo previsioni sempre più affidabili circa le tempistiche degli interventi di manutenzione richiesti da una pavimentazione lungo la sua vita utile.

Per quanto concerne la valutazione della regolarità di una pavimentazione stradale, diversi sono ad oggi i metodi utilizzati in vari paesi, i quali sono stati essenzialmente sviluppati per un impiego in ambito extraurbano, presentando invece diversi limiti e problematiche in caso di utilizzo per la valutazione della regolarità di pavimentazioni di strade urbane, le quali presentano alcune peculiarità quali:

- Presenza preponderante di discontinuità puntuali o comunque localizzate in aree circoscritte.
- Elevata dispersione delle traiettorie.
- Basse velocità di transito dei veicoli.
- Difficoltà del rilievo in presenza di traffico.
- Tipologie di veicoli ammessi al transito diversa rispetto ad altre tipi di strade e rispetto a veicoli americani; quest'ultimi utilizzati come riferimento per l'implementazione di diversi indici di regolarità nonché per i *Mean Panel Rating (MPR)* alla base degli indici di comfort sviluppati in alcuni stati degli USA.
- Differenti tipologie di pavimentazioni impiegate (e.g. pavimentazioni lapidee di valenza storica quali in sampietrini e basoli).

Nella presente tesi si vuole proporre e verificare la possibilità di impiego di un metodo di valutazione della regolarità delle pavimentazioni (in particolare quelle urbane) basato sul rilievo delle accelerazioni verticali misurate all'interno dei veicoli stradali. A tale scopo, sono quindi state prese in esame diverse strumentazioni con l'obiettivo di valutare l'utilizzo di apparecchiature oramai diffuse e a basso costo quali i cellulari smartphone.

1. METODI CONSOLIDATI DI VALUTAZIONE DELLA REGOLARITÀ STRADALE

La definizione della regolarità di una pavimentazione stradale è così fornita dalla norma americana ASTM E867-02 (1): «insieme delle deviazioni della superficie della pavimentazione da una superficie piana di riferimento aventi caratteristiche tali da influenzare la dinamica dei veicoli, la qualità della percorribilità dell'infrastruttura ed i valori dei carichi dinamici applicati dai veicoli alla pavimentazione».

Il termine *regolarità* non va confuso con le caratteristiche di micro-, macro- e megatessitura della superficie di una pavimentazione stradale. Infatti, come si può notare in Figura 1-1, ciascuno di essi presenta un intervallo di lunghezze d'onda caratteristico come descritto in (2) (3) a cui sono associabili determinati effetti benefici o dannosi che possono interessare l'interazione tra veicolo e pavimentazione.

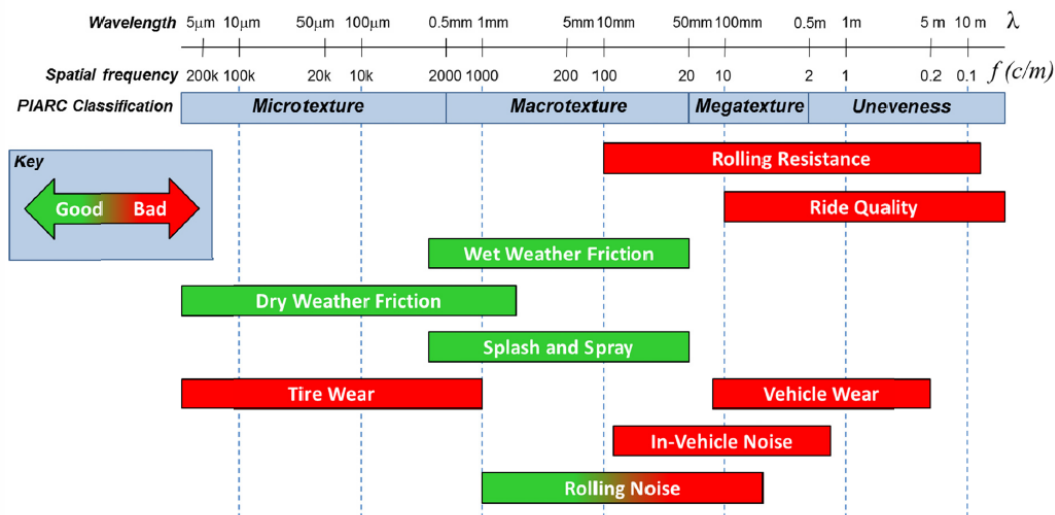


Figura 1-1. Classi di tessitura in funzione della lunghezza d'onda e della frequenza spaziale

Un deficit di macro- e mega-tessitura, ad esempio, può portare a problemi di aquaplaning, mentre l'eccessiva presenza della seconda può comportare un peggioramento della qualità di marcia. La regolarità invece, interessa lunghezze d'onda superiori a $0.5\ \text{m}$ sino a valori prossimi a $50\ \text{m}$ ed è causata tra le altre, di fenomeni di fatica sulle parti meccaniche dei veicoli stradali, decremento del comfort degli utenti e aumento della resistenza al rotolamento.

Al fine di valutare la regolarità di una pavimentazione stradale, è necessario esaminare i profili longitudinali e trasversali che la caratterizzano (Figura 1-2). Diversi sono gli approcci che possono essere impiegati per la stima dello stato superficiale di una pavimentazione: utilizzo di strumenti per il rilievo oggettivo dei profili, sistemi di tipo a risposta e valutazioni soggettive (*subjective panel ratings*).

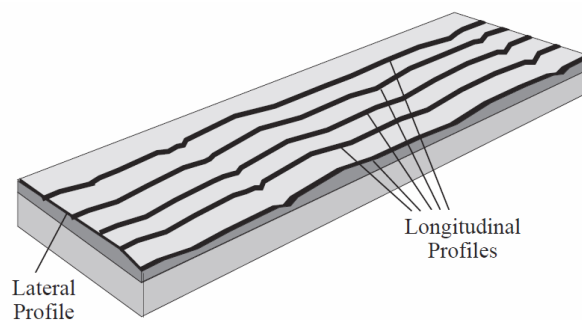


Figura 1-2. Rappresentazione schematica dei profili longitudinali e trasversali di una strada

Una classificazione generale delle apparecchiature per la misura della regolarità è stata sviluppata da Sayers et al. (4), i quali hanno definito le seguenti quattro classi:

- *Class I:* I profilometri appartenenti a tale classe mantengono un riferimento esterno, consentendo quindi di misurare il cosiddetto “*true profile*” (profilo assoluto). Alcuni esempi di tali apparecchiature sono il Dipstick (Figura 1-3a), Automated Rod and Level (AR&L) e il Walking Profiler G2 (Figura 1-3b).
- *Class II:* Tali profilometri sono impiegati per la misura del “*relative profile*” (profilo relativo), così definiti in quanto non collegati a un riferimento esterno assoluto. Questi possono essere sia a contatto sia non a contatto. The Automatic Road Analyzer (ARAN) (Figura 1-4) e il profilometro laser LISA, ad esempio, appartengono a tale classe. Tutti gli strumenti di questa categoria devono essere calibrati tramite l’impiego di un profilometro di Classe I.
- *Class III:* Questi sistemi sono in genere chiamati *Response-Type Road Roughness Measuring Systems (RTRRMS)*. Le misure effettuate tramite l’impiego di suddetti sistemi a risposta devono essere opportunamente correlate con altri indici di valutazione della regolarità basati sull’analisi dei profili stradali, quale ad esempio l’*International Roughness Index (IRI)*. La calibrazione di tali strumenti, ad esempio The Analyseur de Profile en Long (APL) (Figura 1-5) e il Bump Meter, può essere realizzata sia con sistemi di Classe I che di Classe II.
- *Class IV:* A questa classe appartengono le valutazioni soggettive e non calibrate, ottenute transitando su di una pavimentazione stradale o tramite ispezione visiva.

Le prestazioni richieste alle singole apparecchiature per poter essere catalogate come appartenenti alla Classe I o Classe II sono definite nella norma ASTM E950-98 (5).



(a)



(b)

Figura 1-3. Profilometri di Classe I: (a) Dipstick e (b) Walking profiler G2

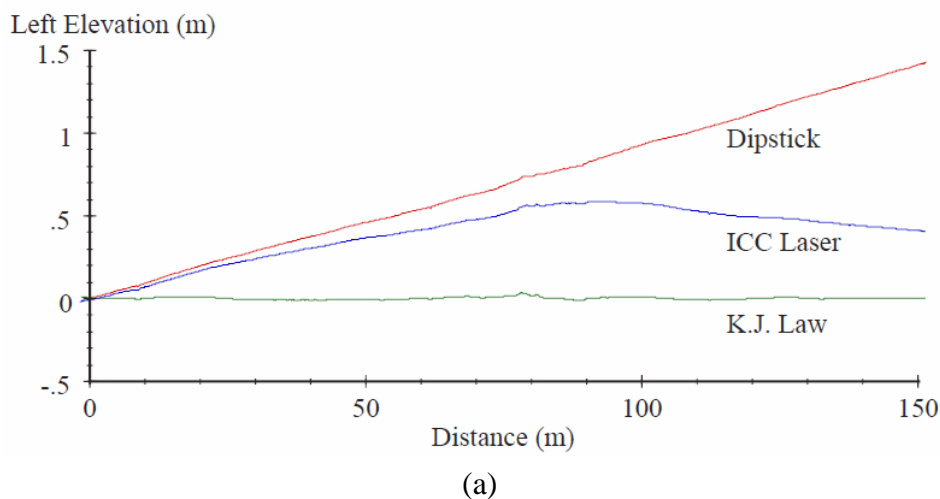


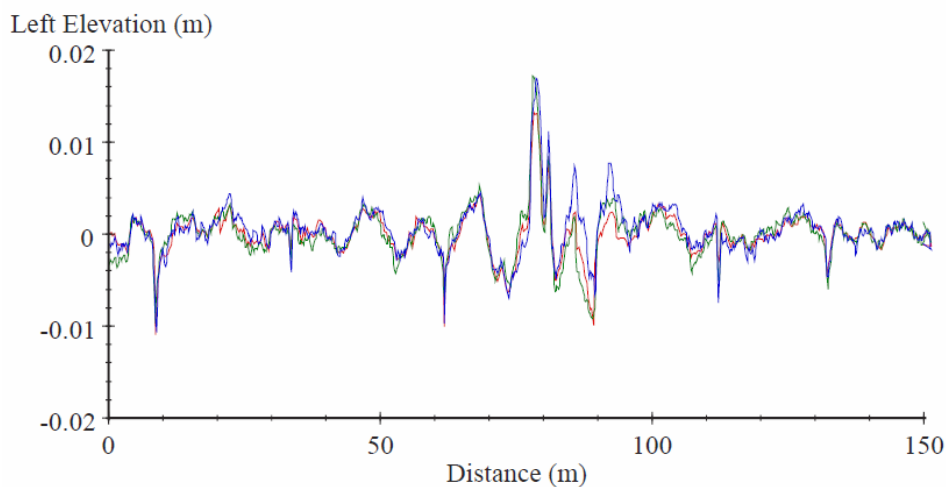
Figura 1-4. Profilometri di Classe II: the Automatic Road Analyzer (ARAN)



Figura 1-5. Profilometri di Classe III: the Analiseur de Profil en Long (APL)

La differenza tra il *true profile* e il *relative profile* consiste, come detto in precedenza, nella capacità o meno del profilometro utilizzato per la misurazione di mantenere un riferimento assoluto esterno. Nel caso quindi di impiego di una strumentazione di Classe II, non si riescono a rilevare le lunghezze d'onda più elevate come riportato da Sayers e Karamihas (6) a differenza ad esempio di una misurazione effettuata con il Dipstick, il quale riesce a cogliere la pendenza longitudinale e/o trasversale (a seconda del profilo che si sta rilevando) della strada. Come è possibile verificare dalla comparazione dei due grafici riportati in Figura 1-6 e ripresi da *The Little Book of Profiling* (6), filtrando i profili grezzi ottenuti da tre diverse apparecchiature in modo tale da eliminare le lunghezze d'onda più elevate, i profili risultanti risultano essere tra loro comparabili.





(b)

Figura 1-6. Profili longitudinali grezzi (a) e i medesimi profili filtrati (b)

L'analisi del profilo trasversale di una pavimentazione mira essenzialmente alla verifica della corrispondenza della pendenza trasversale effettivamente presente in sito con quanto previsto in sede progettuale, al fine di garantire un corretto deflusso delle acque meteoriche dalla piattaforma stradale. In aggiunta, è possibile verificare la presenza di ormaie, valutandone nel contempo la gravità e quindi l'eventuale necessità di un intervento manutentivo.

Per quanto concerne invece il profilo longitudinale, solitamente si è soliti rilevare i due allineamenti rappresentativi delle traiettorie percorse dalle ruote destre e sinistre; valutandone successivamente la regolarità tramite l'impiego di indicatori sintetici ideati al fine di individuare opportune soglie limite, superate le quali si rende necessario intervenire per ripristinare lo stato ottimale della pavimentazione. Diversi sono gli approcci sviluppati nel corso degli anni, ognuno dei quali pone particolare attenzione su di uno specifico aspetto che interessa l'interazione tra veicolo e pavimentazione. È stata implementata, ad esempio, una classificazione dei profili stradali basata su considerazioni geometriche e definita nella norma *ISO 8608* (7). Altri indici invece, impiegati in alcuni stati degli U.S.A quali Michigan, Minnesota e Florida, vengono utilizzati per la valutazione del livello di regolarità della superficie stradale tramite una stima del comfort percepito dagli utenti in transito su di essa. I più noti sono il *Ride Number (RN)* e il *Ride Quality Index (RQI)*. Un approccio diverso invece, è alla base del *Dynamic Load Index (DLI)* sviluppato da Chatti e Lee (8), il quale mira a contenere l'incremento dinamico del carico trasmesso dai veicoli pesanti alla pavimentazione e dovuto alla presenza di irregolarità lungo il profilo. Senza ombra di dubbio però, l'indice di regolarità maggiormente utilizzato in tutto il mondo è l'*International Roughness Index (IRI)*. Tale metodo di valutazione tiene conto di diversi aspetti quali l'incremento dinamico del carico e il comfort percepito dagli utenti.

Suddetti indici, richiedono tutti il rilievo del profilo stradale della pavimentazione esaminata tramite l'impiego dei profilometri, il cui impiego su strade urbane presenta una

serie di difficoltà. I profilometri *a contatto* (i quali consentono il rilievo del true profile, e.g. Dipstick) ad esempio, presentano un basso rendimento (circa 150 m/h) e richiedono l'interdizione al traffico durante le misure, il che ne sconsiglia l'impiego in ambito urbano, o in generale per il monitoraggio di una porzione di rete con estensione superiore a 1 km. Per quanto concerne invece i profilometri definiti *non a contatto* (e.g. profilometri inerziali/laser), essi sono dispositivi ad alto rendimento che trovano ampia applicazione nel rilievo di strade extraurbane. Tali apparecchiature, dalle quali si ottiene il relative profile, forniscono però risultati attendibili solo a determinate velocità di misura, in genere maggiori di 30-35 km/h, le quali non sempre sono consentite in ambito urbano per diverse ragioni; quali la presenza di limiti di velocità, l'andamento planimetrico delle strade urbane nonché l'elevata presenza di intersezioni a raso. In aggiunta, i profilometri non a contatto necessitano di una zona di lancio che consenta loro di raggiungere la prefissata velocità di rilievo, il che ne limita ulteriormente l'applicazione in un contesto urbano.

Alle carenze da parte dei dispositivi di rilievo dei profili stradali, si somma inoltre l'assenza di soglie di accettabilità o di intervento per i vari indici di regolarità attualmente in uso e precedentemente descritti, che siano state definite per corrispondere alle particolari esigenze e peculiarità delle strade urbane; prima fra tutte le velocità ridotte, in genere inferiori a 50 km/h. Laddove si è cercato di ovviare a tale mancanza, come ad esempio alcuni limiti dell'indice IRI definiti in funzione della tipologia di strada o di pavimentazione, non esiste comunque una omogeneità della loro applicazione a livello internazionale.

In considerazione di tutte queste problematiche, si è scelto di valutare la possibilità di utilizzare un indice diverso da quelli attualmente in uso, il quale non richieda il rilievo del profilo stradale. I vari indicatori su menzionati, sono quindi stati presi in esame e comparati tra loro in una prima fase del presente lavoro, con l'obiettivo di verificare e validare l'indice proposto come metodo di valutazione della regolarità stradale in ambito urbano, basato sul rilievo delle accelerazioni verticali all'interno dell'abitacolo.

1.1. International Roughness Index (IRI)

L'indice di regolarità più utilizzato al mondo è sicuramente l'*International Roughness Index (IRI)*, ideato e sviluppato da Sayers in uno studio finanziato dalla World Bank negli anni '80 (9). Il calcolo dell'indice IRI si basa su di un modello matematico denominato *quarter-car* (Figura 1-7), i cui parametri meccanici sono standardizzati e riportati nella norma ASTM E1926:08 (10).

La valutazione della regolarità tramite tale indice, si basa sul calcolo degli spostamenti verticali della sospensione indotti dalle irregolarità presenti lungo il profilo stradale, dividendo il risultato per la lunghezza complessiva percorsa secondo la seguente equazione:

$$IRI = \frac{1}{l} \int_0^{l/v} |\dot{z}_s - \dot{z}_u| dt \quad \text{Eq. 1.1}$$

in cui l è la lunghezza del profilo in km, v è la velocità utilizzata nella simulazione e pari a 80 km/h, \dot{z}_s è la derivata prima rispetto al tempo dello spostamento verticale della massa sospesa in metri e \dot{z}_u è la derivata prima rispetto al tempo dello spostamento verticale della massa non sospesa, sempre in metri. Il risultato finale di tale calcolo è solitamente espresso in unità di m/km oppure mm/m. Il modello matematico così sviluppato è capace di cogliere gli effetti di un limitato intervallo di lunghezze d'onda; infatti la risposta del modello presenta valori inferiori a 0.5 per lunghezze d'onda al di fuori dell'intervallo compreso tra 1.3m (0.77 cicli/m) e 30.5 m (0.033 cicli/m) come visibile in Figura 1-8.

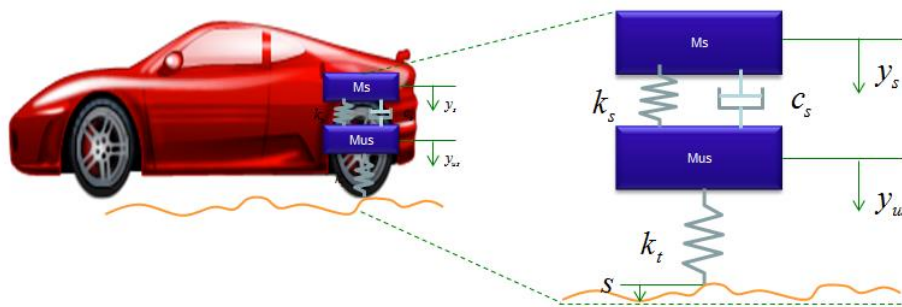


Figura 1-7. Modello quarter-car

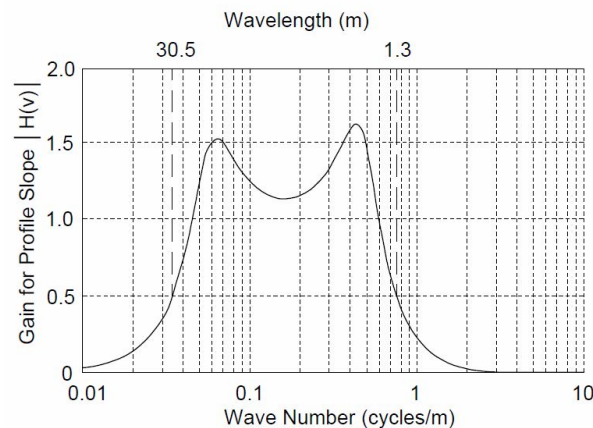


Figura 1-8. Funzione di risposta del modello quarter-car per il calcolo dell'IRI

Al fine di determinare i corrispettivi valori di IRI per i profili esaminati nel presente studio, è stato implementato in ambiente Matlab un codice di calcolo basato sull'algoritmo semplificato proposto dallo standard ASTM E1926-08 (10). La correttezza del codice così sviluppato è stata verificata tramite comparazione con i risultati forniti dal software PROVAL3.4 (11), il quale è un programma sponsorizzato dalla Federal Highway Administration (FHWA) negli Stati Uniti; incorporato, inoltre, nelle specifiche di regolarità emanate dalla American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). Per ciascun tratto stradale, rilevati i due allineamenti (destro e sinistro) e calcolato per cia-

scuno di essi il corrispondente valore di IRI, si determina il valore medio che caratterizzerà l'intera sezione:

$$IRI = \frac{IRI_{left} + IRI_{right}}{2} \quad \text{Eq. 1.2}$$

Nonostante sia l'indice di regolarità più usato al mondo, non esiste una reale uniformità nel suo impiego; infatti, a livello internazionale, esistono diverse soglie di accettabilità adottate da ciascun paese e definite, tra le altre cose, per differenti lunghezze del tratto stradale da esaminare (12) (13). In particolare in (12), sono riportate una serie di specifiche adottate nei diversi stati degli USA e in altri paesi, di cui alcuni esempi sono riportati, rispettivamente, nella Tabella 1-1 e nella Tabella 1-2.

Come si può notare in entrambe le suddette tabelle, esiste una considerevole varietà di soglie di intervento adottate dai vari paesi; mentre, seppur esista una certa variabilità, la lunghezza della sezione da utilizzare per il calcolo dell'IRI presenta dei valori più frequenti, corrispondenti a 161 m per gli stati degli USA e a 100 m per gli altri paesi. In aggiunta, emerge come la scelta delle soglie di intervento dipenda fortemente dal tipo di strada esaminata, dalla velocità massima consentita su di essa e dalla tipologia di pavimentazione.

Tabella 1-1. Specifiche IRI adottate in alcuni stati degli USA

US state	IRI/MRI	Lunghezza Sezione (m)	IRI specifications-acceptance (m/km)	IRI specifications-corrective work (m/km)
California	MRI	161	0.95 (PCC) 0.95 (AC, thick lift > 61 mm) 1.18 (AC, thin lift < 61 mm)	
Hawai	IRI	161	1.26-1.58 (HMA)	
Kentucky	MRI	161	0.63-1.10 and 0.73-1.26 (HMA, Categories A and B) 0.94-1.25 and 1.04-1.34 (PCC, Categories A and B)	1.28, 1.44 (HMA, Categories A and B) 1.43, 1.52 (PCC, Categories A and B)
Massachusetts	IRI	161	1.18 (HMA, v > 90 km/h) 1.66 (HMA, v > 65 km/h and v < 90 km/h)	1.58 (HMA, v > 90 km/h) 1.97 (HMA, v > 65 km/h and v < 90 km/h)
Michigan	MRI	Total length/161	1.1 (HMA/PCC, total length, v > 80.5 km/h) 2.05 (bridge decks, total length, v > 80.5 km/h) 1.58 (HMA/PCC, total length, v > 48.3 and v < 80.5 km/h)	1.18 (HMA/PCC, 161 m, v > 80.5 km/h) 1.97 (HMA/PCC, 161 m, v > 48.3 and v < 80.5 km/h)
Minnesota	MRI	161	1.8 (HMA-A, three lifts, v > 73 km/h) 1.26 (HMA-B, two lifts, v > 73 km/h) 1.50 (HMA-C, one lift, v > 73 km/h) 1.42 (PCC-A, v > 73 km/h)	> 1.18 (HMA-A, three lifts, v > 73 km/h) > 1.26 (HMA-B, two lifts, v > 73 km/h) > 1.50 (HMA-C, one lift, v > 73 km/h) > 1.42 (PCC-A, v > 73 km/h)
Missouri	MRI	161	0.85-1.26 (PCC/AC, v > 72.4 km/h) 1.10-1.97 (PCC/AC, v < 72.4 km/h)	1.26 (PCC/AC, v > 72.4 km/h) 1.97 (PCC/AC, v < 72.4 km/h)
Montana	MRI	300	0.73-0.87 (HMA/PCC-Category I project) 0.87-0.95 (HMA/PCC-Category II project) 0.87-1.10 (HMA/PCC-Category III project)	1.42 (HMA/PCC-Category I project) 1.50 (HMA/PCC-Category II project) 1.58 (HMA/PCC-Category III project)
Nebraska	IRI	161	1.07-1.47 (PCC) 0.88-1.07 (AC, multi-lift roadways) 0.88-1.17 (AC, single-lift roadways)	1.96 (PCC) 1.52 (AC, multi-lift roadways) 1.52 (AC, single-lift roadways)
New Carolina	MRI	161	0.87-1.1 (HMA/PCC)	1.42 (HMA/PCC)

AC=Asphalt Concrete; HMA=Hot Mix Asphalt; PCC=Portland Cement Concrete; MRI=Mean Roughness Index (it is the mean IRI value from two wheel paths)

L'indice di regolarità IRI è stato sviluppato con la finalità principale di valutare le irregolarità diffuse presenti sulla superficie stradale. Nonostante ciò, in alcuni paesi (soprattutto negli USA) viene anche impiegato per individuare discontinuità puntuali o comunque localizzate in aree circoscritte, considerando sezioni di lunghezza molto ridotta, pari ad esempio a 7.6 m come specificato nella maggior parte degli stati degli USA (12).

Tabella 1-2. Specifiche IRI adottate in alcuni paesi non appartenenti agli USA

Stato	Tipo di Strada	Lunghezza Sezione (m)	IRI (m/km)	Note
Australia	AC/PCC-freeways		1.6	
	AC/PCC-highways and main roads (<80 km/h)	500	1.9	Based on MRI
	AC/PCC-highways and main roads (100 km/h)		1.9	
Canada-British Columbia	AC-acceptance (full pay)	100	1.1-1.2	
	AC-corrective work		1.8	
Canada-Ontario	AC-acceptance (full pay)	100	0.65-1	
	AC-rejection (corrective work)	100	1.25	
	AC-localised roughness	7.62	3.4	
El Salvador	AC-interurban roads		2	
	PCC-interurban roads	100	2.5	
	AC-country roads		3	
Hungary	AC-main roads		1.2	
	AC-primary and secondary roads	100	1.8	
	AC-local roads		2.2	
Lithuania	AC/PCC-main roads		1.5	
	AC/PCC-national roads	50	2.5	
	AC/PCC-local roads		3.5	
Poland	AC-freeways and primary roads		1.3*, 2.4**	*IRI average value of the entire section (≤1000 m); **IRI maximum value on a 50 m segment
	AC-secondary roads	50/1000	1.7*, 3.4**	
	AC-second upper layer		3*, 4**	
Russia	AC/PCC-highways and first class roads		2.2	
	AC/PCC-second and third class roads	100	2.2	
	Third class roads-cold AC and crushed stone		2.2	
	Fourth and fifth class roads-cold AC and crushed stone		2.6	
Spain	AC-highways		1.5 (50%), 1.8 (80%), 2 (100%)	IRI limits are defined as three percentiles
	AC-other roads		1.5 (50%), 2 (80%), 2.5 (100%)	
	AC-highways-after rehabilitation (> 10 cm)	100	1.5 (50%), 1.8 (80%), 2 (100%)	
	AC-highways-after rehabilitation (< 10 cm)		1.5 (50%), 2 (80%), 2.5 (100%)	
	AC-other roads-after rehabilitation (> 10 cm)		1.5 (50%), 2 (80%), 2.5 (100%)	
AC-other roads-after rehabilitation (< 10 cm)		1.5 (50%), 2 (80%), 2.5 (100%)		

AC=Asphalt Concrete; PCC=Portland Cement Concrete; MRI=Mean Roughness Index (it is the mean IRI value from two wheel paths)

1.2. Ride Number (RN)

Un secondo indice di regolarità il cui utilizzo è molto diffuso in diversi paesi è il *Ride Number (RN)*; il quale, a differenza dell'indice IRI, è statisticamente correlato all'opinione degli utenti stradali sulla qualità di marcia e per tale motivo risulta essere un indice di valutazione del livello di comfort percepito dai passeggeri. L'indice RN è il risultato di uno studio degli anni '80 sponsorizzato da The National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), avente come finalità l'analisi di come le caratteristiche dei profili stradali influenzino la qualità di marcia percepita dagli utenti stradali (6). Benché l'indice IRI non fosse all'epoca ben noto, i ricercatori impiegarono nelle analisi svolte un modello quarter-car simile a quello utilizzato per il calcolo dell'IRI.

La scala di valutazione adottata per tale indice è stata definita tramite due studi distinti, effettuati ad una distanza temporale di 5 anni l'uno dall'altro, e presenta un intervallo di valori compreso tra 0-5 (Tabella 1-3); in cui a 0 corrisponde una pavimentazione non transitabile alla velocità desiderata e a 5 corrisponde una pavimentazione in ottimo stato. Per il calcolo del Ride Number è stato impiegato l'algoritmo proposto dalla norma ASTM E1489-98 (14), implementandolo, come già fatto per l'IRI, in un codice Matlab.

Il procedimento richiede il rilievo con un profilometro di Classe I dei profili dei due allineamenti destro e sinistro, per ognuno dei quali si determina il corrispettivo valore del *Profile Index (PI)*, calcolandone successivamente il valore medio che caratterizzerà l'intero tratto, tramite la seguente equazione (Eq. 1.3):

$$PI = \sqrt{\frac{PI_{left}^2 + PI_{right}^2}{2}} \quad \text{Eq. 1.3}$$

Il PI di ciascun allineamento non è altro che il *root mean square (RMS)* delle pendenze filtrate dei profili delle elevazioni misurate.

Trovato quindi il valore di PI è possibile determinare il valore di RN applicando la seguente formula (Eq. 1.4):

$$RN = 5e^{-160(PI)} \quad \text{Eq. 1.4}$$

Tabella 1-3. Scala di valutazione usata per il Ride Number

<i>Description</i>	<i>Ride Number</i>
<i>Perfect</i>	5.0
<i>Very Good</i>	4.5
	4.0
<i>Good</i>	3.5
	3.0
<i>Fair</i>	2.5
	2.0
<i>Poor</i>	1.5
	1.0
<i>Very poor</i>	0.5
<i>Impassable</i>	0.0

L'indice RN presenta una buona correlazione con l'IRI, anche se è bene ricordare che i due metodi non sono intercambiabili; inoltre, il *Ride Number* presenta una buona portabilità anche se inferiore all'IRI, e se ne sconsiglia ad esempio l'utilizzo nel caso di rilievo dei profili effettuato con apparecchiature a ultrasuoni (6).

1.3. Michigan Ride Quality Index (RQI_{Mich})

Un secondo indice di valutazione della qualità di marcia è stato sviluppato da ricercatori del Michigan Department of State Highways con l'obiettivo di predire l'opinione degli utenti stradali circa lo stato di una pavimentazione e il livello di regolarità che la interessa, a partire dal profilo stradale. Il *Michigan Ride Quality Index (RQI_{Mich})* si basa sulla correlazione tra il comfort percepito dagli utenti stradali (rilevato tramite *Mean Panel Rating-MPR*) e il contenuto in lunghezze d'onda delle funzioni di Densità di Potenza Spettrale (PSD) (15). Sono quindi stati individuati tre intervalli di lunghezze d'onda più significativi così definiti: lunghezze d'onda corte (0.61-1.52 m), medie (1.52-7.62 m) e lunghe (7.62-15.24 m). Per ciascun intervallo si determina quindi il valore della varianza dopo aver ap-

plicato al profilo grezzo rilevato un opportuno filtro (in (15) si riporta l'impiego di un filtro Butterworth del terzo ordine), calcolando quindi il valore finale dell'indice tramite la seguente equazione (Eq. 1.5):

$$RQI_{Mich} = 3.077 \cdot \ln(VAR_1 \cdot 10^8) + 6.154 \cdot \ln(VAR_2 \cdot 10^8) + 9.231 \cdot \ln(VAR_3 \cdot 10^8) - 141.85 \quad \text{Eq. 1.5}$$

in cui VAR_1 , VAR_2 e VAR_3 sono, rispettivamente, le varianze delle lunghezze d'onda lunghe, medie e corte. Si può quindi facilmente verificare come queste ultime presentino un effetto maggiore sul livello di comfort rispetto alle altre.

Come riportato da Lee et al. (16), un valore di RQI_{Mich} compreso tra 0 e 30 indica qualità di marcia eccellente, se ricadente all'interno dell'intervallo 31-54 buona; mentre se compreso tra 55 e 70 la qualità di marcia è giudicata essere mediocre. Pavimentazioni aventi valori di RQI_{Mich} maggiori di 70 inducono invece una qualità di marcia scarsa o insufficiente (Tabella 1-4).

Tabella 1-4. Corrispondenza tra valori di RQI_{Mich} e qualità di marcia

RQI_{Mich} value	Ride Quality
0-30	Excellent
31-54	Good
55-70	Fair
>70	Poor

1.4. Minnesota Ride Quality Index (RQI_{Mn})

Un ulteriore indice di regolarità delle pavimentazioni stradali finalizzato alla valutazione del livello di comfort indotto sugli utenti è il *Ride Quality Index* (RQI_{Mn}) sviluppato dal Minnesota Department of Transportation (Mn/DOT). Tale indicatore deriva dallo studio di 120 sezioni di prova, come riportato nel documento *2015-Pavement Condition Annual Report* (17), nel quale sono state correlate le opinioni fornite dagli utenti stradali con i valori di IRI calcolati per ciascuna sezione. Sono state quindi così ottenute due correlazioni differenti in funzione del tipo di pavimentazione presente in sito: una per pavimentazioni flessibili (Eq. 1.6) e una per pavimentazioni rigide (Eq. 1.7), come specificato in (18), e i cui andamenti sono riportati in Figura 1-9.

$$RQI_{Mn} = 5.697 - (2.104) \cdot \sqrt{IRI} \quad \text{Eq. 1.6}$$

$$RQI_{Mn} = 6.634 - (2.813) \cdot \sqrt{IRI} \quad \text{Eq. 1.7}$$

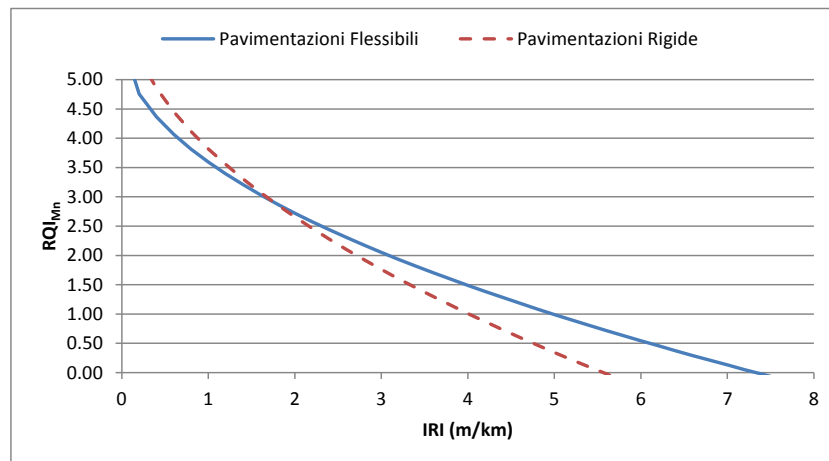


Figura 1-9. Relazione tra RQI_{Mn} e IRI in funzione del tipo di pavimentazione

Analogamente al caso del Ride Number, anche per l'indice RQI_{Mn} la scala di valutazione comprende l'intervallo tra 0 e 5, ma a differenza di RN presenta una diversa corrispondenza tra categoria di qualità di marcia e valore numerico dell'indice, come si può notare in Tabella 1-5.

Tabella 1-5. Categorie di qualità di marcia per RQI_{Mn}

<u>Numerical Rating</u>	<u>Verbal Rating</u>
4.1-5.0	Very Good
3.1-4.0	Good
2.1-3.0	Fair
1.1-2.0	Poor
0.0-1.0	Very Poor

In considerazione della tipologia di pavimentazioni esaminate nel presente studio, è stata utilizzata solo l'equazione Eq. 1.6 relativa a pavimentazioni flessibili.

1.5. Dynamic Load Index (DLI)

A differenza dell'IRI, il quale ha carattere generale, e degli indici di comfort descritti nei precedenti paragrafi (RN, RQI_{Mich} , RQI_{Mn}), il *Dynamic Load Index (DLI)* mira a valutare il carico dinamico trasmesso dai veicoli pesanti alla pavimentazione stradale e dovuto alla presenza di irregolarità lungo il tracciato. Tale indicatore è stato sviluppato da Chatti e Lee (8) e si basa, come i precedenti, sul rilievo del profilo stradale. Il calcolo del DLI viene effettuato tramite la seguente formula (Eq. 1.8):

$$DLI = \sqrt{V_1 + 14 \cdot V_2} \quad \text{Eq. 1.8}$$

in cui V_1 è la varianza del profilo delle elevazioni, filtrato in modo da contenere solo lunghezze d'onda comprese nell'intervallo tra 6.7 m e 17.9 m; V_2 , invece, è la varianza del profilo delle elevazioni filtrato in modo tale che siano presenti solo quelle ricadenti all'interno dell'intervallo 1.8-3.3 m. La scelta di tali intervalli di lunghezze d'onda deriva dall'aver preso in esame diversi veicoli pesanti in marcia con una velocità pari a 96 km/h, per la quale suddetti intervalli di lunghezza d'onda corrispondono ai range di frequenza temporale di 1.5-4 Hz e 8-15 Hz, all'interno dei quali si trovano i picchi principali delle funzioni di risposta dei mezzi pesanti presi in esame (8). Il coefficiente pari a 14 è il risultato di un processo di ottimizzazione delle relazioni tra il *dynamic load coefficient (DLC)* e il 95° percentile del carico dinamico con il DLI. Il valore di quest'ultimo è espresso in unità di 10^{-2} inches (1 inch = 25.4 mm).

1.6. Classificazione dei profili stradali secondo la ISO 8608

Oltre a valutare gli effetti indotti dalla presenza di irregolarità sulla superficie di una pavimentazione stradale, quali comfort e incremento dinamico dei carichi, sono stati sviluppati alcuni metodi di valutazione della regolarità basati direttamente sulla geometria dei profili rilevati. A tal scopo, la norma ISO 8608 (7), fornisce un metodo per la classificazione dei profili stradali incentrato sul calcolo della Densità di Potenza Spettrale (PSD) delle elevazioni. L'intero procedimento descritto nella norma ISO 8608 può essere brevemente riassunto nei seguenti punti:

- Calcolo della *Fast Fourier Transform (FFT)* del profilo delle elevazioni, finestrandolo opportunamente il segnale in esame (e.g. applicando la finestra di Hanning) in modo da contenere il possibile insorgere del fenomeno di *leakage*.
- Rappresentare il PSD delle elevazioni in bande d'ottava dalla frequenza più piccola calcolata fino alla frequenza spaziale centrale pari a 0.0312 cicli/m, in bande in terzi d'ottava dall'ultima banda d'ottava sino alla frequenza centrale di 0.25 cicli/m e in bande in dodicesimi d'ottava fino alla frequenza più alta analizzata. Questo procedimento è definito come *smoothing process* (processo di allisciamento).
- Applicare un processo di *fitting* del PSD allisciato (*smoothed PSD*) tramite la seguente formula (Eq. 1.9):

$$G_d(n) = G_d(n_0) \cdot \left(\frac{n}{n_0} \right)^{-w} \quad \text{Eq. 1.9}$$

dove G_d è lo smoothed PSD delle elevazioni in m^3 , n è la generica frequenza spaziale, $n_0=0.1$ cicli/m è la frequenza spaziale di riferimento, $G_d(n_0)$ è il valore del PSD in corrispondenza della frequenza spaziale di riferimento n_0 (anche no-

to in letteratura come *unevenness index C* (19) (20)) e w è l'esponente del *fitted PSD* (denominato *waviness*).

Un esempio del risultato finale del processo descritto nella ISO 8608 è riportato nella Figura 1-10, nella quale il *fitted PSD* delle elevazioni è raffigurato, in scala bi-logaritmica, in funzione della frequenza spaziale. Pertanto, utilizzando il *fitted PSD* è possibile descrivere l'intero contenuto in frequenza tramite due soli parametri: C e w .

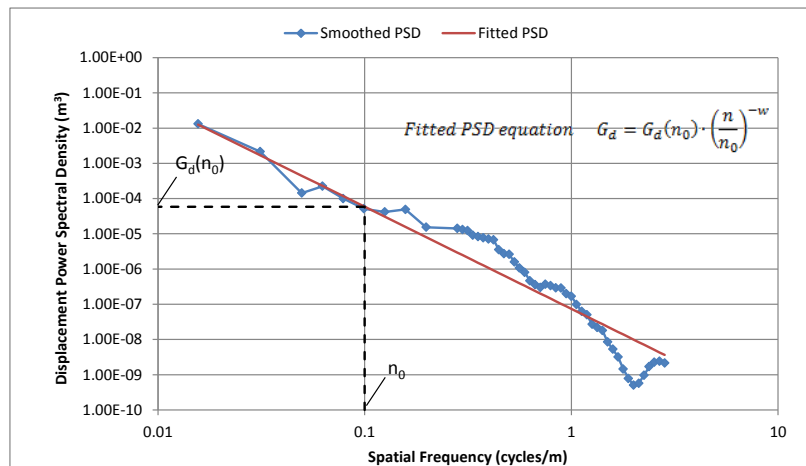


Figura 1-10. Smoothed e Fitted PSD di un generico profilo stradale secondo la ISO 8608

In funzione del valore assunto dal parametro $G_d(n_0)$, i profili stradali sono catalogati come appartenenti a una delle 8 classi (da A a H) definite nella ISO8608 e riportate in Figura 1-11. Le lunghezze d'onda di interesse in ambito stradale sono in genere comprese tra 0.50-50 m (a cui corrisponde l'intervallo di frequenze spaziali compreso tra 0.02-2 cicli/m), ma, come specificato in (7), al fine del calcolo del *fitted PSD* occorre prendere in esame le frequenze spaziali all'interno del range 0.011-2.83 cicli/m (lunghezze d'onda tra 0.35-90 m). In genere, i profili di strade pavimentate difficilmente appartengono a classi peggiori della D, in quanto i vari gestori definiscono soglie di intervento (basate su indicatori di regolarità come ad esempio l'indice IRI) superate le quali vengono attuate una serie di azioni atte al ripristino delle condizioni ottimali. Per tale motivo, nella Tabella 1-6 si riportano i limiti forniti dalla ISO 8608 per le sole classi A (*very good*), B (*good*), C (*average*) e D (*poor*).

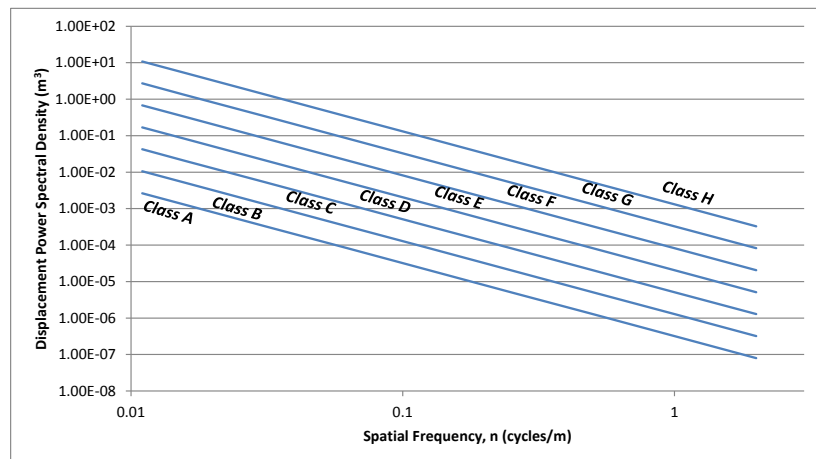


Figura 1-11. Classificazione dei profili stradali secondo la ISO 8608 per $w=2$

Tabella 1-6. Soglie limite per le prime quattro classi (A-D) di profili ISO 8608

ISO 8608 Class	$G_d(n_0) (10^{-6} m^3)$
A (very good)	< 32
B (good)	32-128
C (average)	128-512
D (poor)	512-2048

1.7. Pavement Condition Index (PCI)

In aggiunta ai metodi tradizionali di valutazione della regolarità stradale, è stato inoltre preso in considerazione il *Pavement Condition Index (PCI)* (21) durante le misure sperimentali. Tale metodo consente di ottenere una valutazione generale delle condizioni superficiali e di portanza di pavimentazioni flessibili e/o rigide. Il giudizio viene espresso tramite un valore numerico variabile tra 0 (condizione peggiore) e 100 (condizione migliore), con la corrispondenza tra scala numerica e giudizio verbale riportata in Tabella 1-7.

Tabella 1-7. Scala di giudizio sulla qualità delle pavimentazioni per il PCI

Scala Numerica PCI	Giudizio Verbale
86-100	Eccellente
71-85	Molto Buono
56-70	Buono
41-55	Sufficiente
26-40	Deteriorato
11-25	Molto Deteriorato
0-10	Non Praticabile

Il PCI si basa sul rilievo visivo degli ammaloramenti presenti sulla pavimentazione in esame, determinandone nel contempo il grado di severità secondo quanto riportato nella norma ASTM D6433 (21); nella quale è fornito il catalogo degli ammaloramenti caratteristici delle pavimentazioni flessibili e quello inerente alle pavimentazioni rigide con le relative linee guida da adottare nella valutazione della severità degli stessi.

Indipendentemente dal livello che si intende analizzare (*livello di rete o livello di progetto*) (22), le pavimentazioni da esaminare vengono suddivise in distinte sezioni adottando la seguente procedura:

- Individuare i singoli rami (*branches*) che caratterizzano la rete stradale in esame, associando a ciascuno di essi un nome (*branch name*) e un codice alfanumerico (*branch number*).
- Ogni ramo può essere suddiviso in una o più sezioni omogenee (*sections*), costituite da tratti aventi caratteristiche uguali in termini di pavimentazione (e.g. stratigrafia, spessori, materiali), volume di traffico, fasi costruttive, condizioni generali di servizio.
- Ciascuna sezione omogenea viene a sua volta suddivisa in unità campione (*sample units*), sulle quali si andrà ad effettuare il rilievo visivo. L'estensione dell'area delle unità campione dipende dal tipo di pavimentazione e di infrastruttura, secondo quanto riportato nella Tabella 1-8.

Tabella 1-8. Dimensioni minime delle unità campione

Pavimentazione	Infrastruttura Stradale	Infrastruttura Aeroportuale
<i>flessibile</i>	250 m ² ± 90 m ²	315 m ² ± 135 m ²
<i>rigida</i>	20 lastre ± 8 lastre	20 lastre ± 8 lastre

Sorvolando sui vari passaggi che determinano il valore di PCI di ciascuna unità campione, per i quali si rimanda alla specifica norma ASTM D6433 (21), il valore di tale indice da assegnare all'intera sezione è la media ponderata dei PCI ottenuti per le unità campione. Il tipo di valutazione effettuata, può essere sia di tipo casuale sia addizionale. Nel primo caso, in cui la pavimentazione è ispezionata solo con campioni casuali, si estendono alla superficie della sezione gli ammaloramenti valutati sui singoli campioni; pertanto il PCI della sezione risulterà essere la media dei PCI delle unità campione casuali secondo la seguente formula (Eq. 1.10):

$$PCI_s = \frac{\sum_{i=1}^n PCI_{ri} \cdot A_{ri}}{\sum_{i=1}^n A_{ri}} \quad \text{Eq. 1.10}$$

in cui PCI_s è il PCI della sezione, PCI_{ri} è il valore del PCI dell'unità campione i -esima e A_{ri} è l'area dell'unità campione casuale i -esima.

In presenza di unità aggiuntive il valore dell'indice rappresentativo della sezione viene calcolato tramite l'equazione (Eq. 1.11):

$$PCI_s = \frac{\overline{PCI}_r \cdot \left(A - \sum_{i=1}^m A_{ai} \right) + \overline{PCI}_a \cdot \sum_{i=1}^m A_{ai}}{A} \quad \text{Eq. 1.11}$$

in cui A è l'area totale rilevata, \overline{PCI}_r è la media dei valori delle unità campione casuali, A_{ai} è l'area dell'unità campione aggiuntiva i -esima e \overline{PCI}_a è la media dei valori di PCI delle unità campione aggiuntive e definita dalla formula (Eq. 1.12):

$$\overline{PCI}_a = \frac{\sum_{i=1}^m PCI_{ai} \cdot A_{ai}}{\sum_{i=1}^m A_{ai}} \quad \text{Eq. 1.12}$$

dove PCI_{ai} è il valore del PCI dell'unità campione aggiuntiva i -esima.

Diversi autori in letteratura hanno ricercato possibili correlazioni tra PCI e IRI, in funzione della tipologia di pavimentazione e della categoria di strada. Un esempio di tali relazioni empiriche, è fornito da Ahrin et al. (23); i quali, prendendo in esame dati riferiti ad un arco temporale di 2 anni, hanno determinato diverse relazioni tra i valori di PCI e quelli di IRI ottenendo coefficienti di correlazione R^2 variabili 0.56 e 0.82. Di seguito, sono quindi riportati i grafici di suddette relazioni in funzione della classificazione funzionale delle strade (Figura 1-12) e della tipologia di pavimentazione presente (Figura 1-13).

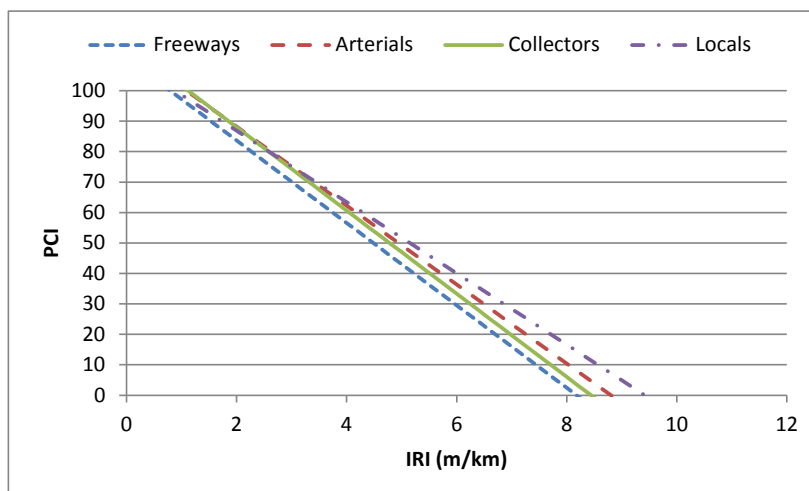


Figura 1-12. Relazione IRI-PCI in funzione della classificazione funzionale delle strade

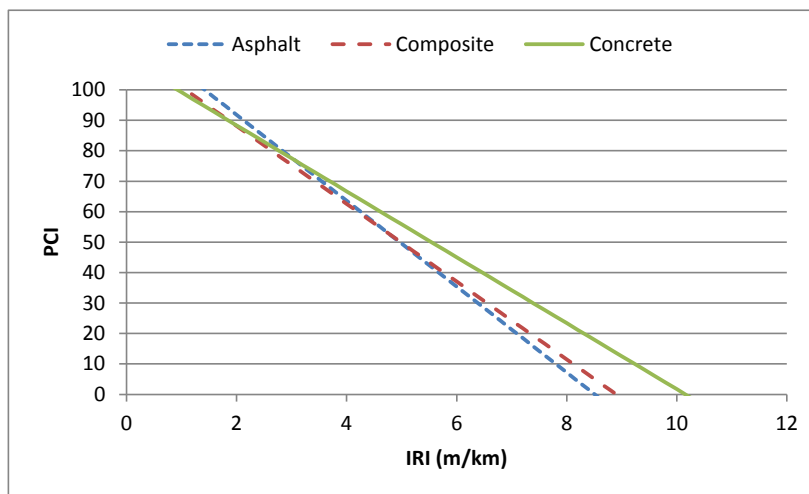


Figura 1-13. Relazione IRI-PCI per diverse tipologie di pavimentazione

2. METODI ALTERNATIVI DI VALUTAZIONE DELLA REGOLARITÀ STRADALE

Nel corso dell'ultimo decennio, diversi autori hanno cercato di sviluppare metodi alternativi di valutazione della regolarità stradale o degli effetti ad essa connessi. In particolare, si è cercato di ovviare (o comunque evidenziare) ad alcuni limiti di applicabilità e validità che interessano i metodi consolidati precedentemente illustrati.

Per i diversi metodi di valutazione del comfort di marcia, ad esempio, il limite principale deriva dal fatto che, ad oggi, la procedura per rilevare il parere soggettivo degli utenti stradali (su cui si basano i tre metodi descritti nel precedente capitolo: RN , RQI_{Mich} e RQI_{Mn}) non è standardizzata. In aggiunta, la definizione di tali soglie è fortemente condizionata dalla tipologia di veicoli impiegati durante i *Mean Panel Ratings (MPR)* nonché dalla velocità di marcia. Per tale motivo, non si ha una loro diffusione in molti paesi ad eccezione di alcuni stati degli USA.

Un maggiore impiego, invece, si riscontra per la classificazione dei profili stradali fornita dalla ISO 8608; la quale è alla base di molti studi per la progettazione e l'analisi del comportamento delle diverse tipologie di sospensioni di veicoli stradali (24) (25). Come descritto in precedenza (si veda §1.6), la ISO 8608 si basa su un processo di *fitting lineare* nel piano bi-logaritmico in cui si riporta l'andamento del PSD delle elevazioni (Figura 1-10). Alcuni autori però, al fine di meglio rappresentare l'intero spettro presente nel segnale, suggeriscono l'utilizzo di soluzioni differenti rispetto a quanto indicato nella ISO 8608, quali, ad esempio, l'approssimare il PSD delle elevazioni dei profili stradali tramite differenti equazioni (28); oppure suddividere l'intero intervallo di lunghezze d'onda di interesse in due (*two-wave bands*) o più sotto intervalli (e.g. *three-wave bands*), ciascuno dei quali caratterizzato da appropriati parametri di regressione (C_i , w_i) (27) (28).

Il principale indice di regolarità a cui sono state mosse critiche e su cui si sono concentrati molti studi però, è l'IRI, il quale è senza dubbio anche l'indicatore più diffuso e impiegato in tutto il mondo. Come riportato in precedenza nelle Tabelle 1-1 e 1-2, esiste un'elevata varietà di soglie di accettabilità e/o di intervento riferite a tale indice. Diversi sono gli autori che hanno proposto limiti da adottare in maniera univoca, la cui determinazione deriva da specifiche considerazioni, quali ad esempio l'influenza della velocità di marcia sulla risposta dinamica del modello *quarter-car* alla base del calcolo dell'IRI (29), oppure la valutazione del livello di comfort percepito dagli utenti stradali in funzione della velocità di transito (30) (31) (32). In particolare, Můčka (33) ha analizzato la variabilità del comfort e della sicurezza di marcia per profili stradali caratterizzati da simili valori di IRI, determinando così, tramite involuppo dei valori trovati, dei limiti da applicare allo stesso indice; i quali sono stati successivamente comparati con alcune soglie presenti in letteratura.

In diversi studi, invece, sono evidenziati alcuni limiti di applicabilità dell'IRI, tra cui i principali riguardano l'incapacità di tale indicatore di rappresentare correttamente il comportamento di diverse tipologie veicolari (34) (28), nonché la variabilità della deviazione standard delle elevazioni e dei livelli di accelerazione verticale indotte sui passeggeri che si riscontrano per profili stradali aventi similari valori di IRI (35). In aggiunta, in ambito urbano, laddove si riscontra una maggiore diversificazione delle tipologie di pavimentazione impiegate (e.g. presenza di pavimentazioni lapidee), non è possibile adottare le medesime soglie di accettabilità e/o di intervento previste per l'indice IRI, in quanto alcune tipologie (e.g. sampietrini) presentano valori elevati già a pavimentazione nuova, come si può notare in Figura 2-1, nella quale si riportano le relazioni tra IRI e PCI per diverse tipologie di pavimentazione (36). Si riporta inoltre, a titolo di nota, che il valore del coefficiente di correlazione R^2 trovato in (36) per la relazione tra PCI e IRI nel caso di sampietrini è risultato essere pari a 0.82.

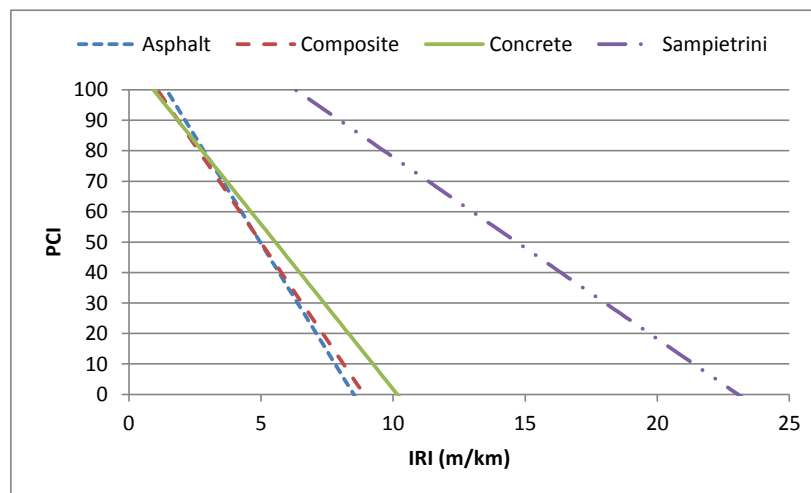


Figura 2-1. Relazione IRI-PCI per diverse tipologie di pavimentazione e sampietrini

Un aspetto comune a tutti gli indicatori di regolarità o degli effetti ad essa connessi, riguarda il fatto che presuppongono tutti il rilievo del profilo stradale, a partire dal quale vengono successivamente effettuati i vari passaggi previsti da ciascun approccio per determinarne il valore finale. I costi elevati derivanti dall'impiego delle apparecchiature profilometriche, unitamente alle stringenti condizioni di utilizzo delle medesime, in particolar modo in un contesto urbano (e.g. difficoltà di rilevare il profilo stradale in presenza di traffico, necessità di tratti di lancio), sono alla base delle motivazioni che hanno portato diversi studiosi a valutare e implementare metodi alternativi per il rilievo dei profili stradali. In particolare, sono state sviluppate diverse metodologie finalizzate alla ricostruzione dell'andamento della superficie di una pavimentazione a partire dalla misura delle accelerazioni (principalmente la componente verticale) all'interno di un veicolo stradale. Ngwangwa et al. (37), ad esempio, hanno sviluppato un algoritmo basato sull'*Artificial Neural Network (ANN) Simulation* e applicato tramite analisi numeriche, testandone l'efficacia in un secondo momento tramite applicazioni sperimentali (38). Altri autori (39)

(40), invece, hanno impiegato algoritmi di ottimizzazione basati sulla teoria della *Cross Entropy (CE)* per la ricostruzione dei profili stradali. Questi approcci di fatto, richiedono l'impiego di una strumentazione dotata di accelerometri (mono- o tri-assiali), giroscopi e antenna GPS; quest'ultima utilizzata sia per il rilievo della velocità di marcia sia per la localizzazione del tratto analizzato. Tali apparecchiature sono oramai presenti in tutte le configurazioni base dei telefoni cellulari smartphone e, pertanto, alcuni autori hanno valutato la possibilità di sostituire le piattaforme inerziali o altre strumentazioni analoghe con suddetti dispositivi in considerazione dell'evoluzione tecnologica che li ha caratterizzati negli ultimi anni e della progressiva riduzione del loro costo; ottenendo risultati soddisfacenti in termini di comparazione tra IRI calcolato e IRI stimato (41) (42) (43).

Un ulteriore campo di applicazione che ha visto l'impiego dei cellulari smartphone, è l'individuazione delle irregolarità puntuali lungo il profilo stradale; realizzata sempre a partire dalla misurazione delle accelerazioni verticali (44) (45) (46) (47) (48).

In considerazione della disponibilità e soprattutto del costo contenuto di una siffatta apparecchiatura per la misura delle accelerazioni all'interno di un veicolo stradale, a maggior ragione se paragonato con le tradizionali strumentazioni ad alto rendimento (profilometri laser/inerziali) per il rilievo dei profili stradali, nella presente tesi si vuole esaminare la possibilità di impiegare l'indicatore di comfort descritto nella norma ISO 2631-1 (49) e indicato con la notazione a_{wz} , per la valutazione delle condizioni di una pavimentazione stradale. Tale indicatore, basato sull'accelerazione verticale ponderata in frequenza, è stato preso in considerazione da alcuni autori al fine di determinare una corrispondenza tra livello di regolarità di una pavimentazione e livello di comfort percepito dagli utenti (50) e per individuare soglie di accettabilità in funzione della velocità di marcia da applicare all'indice IRI (31). Suddetti studi si basano sull'impiego di un modello di simulazione, tramite il quale è stato possibile effettuare diverse analisi variando i parametri di interesse quali la velocità di marcia e il livello di regolarità della pavimentazione stradale.

Nel presente studio, dopo una prima fase nella quale è stato utilizzato un modello numerico rappresentativo del reale comportamento di un comune veicolo passeggeri e finalizzato ad una comparazione tra l' a_{wz} e gli altri indici di regolarità consolidati, sono state effettuate una serie di misure sperimentali al fine di verificare le effettive possibilità di impiego di tale metodo.

A differenza di altri approcci, quindi, non si intende ricavare una stima indiretta dell'indice IRI, bensì impiegare direttamente tale indicatore, individuando un numero contenuto di classi di comfort (3, massimo 5), da cui poter ricavare un'indicazione delle condizioni superficiali di una pavimentazione stradale.

L'obiettivo finale di una metodologia di rilievo dello stato delle pavimentazioni stradali basato su tale approccio, consiste nello sviluppare un sistema di rilievo ad alto rendimento e a costi contenuti, che possa consentire, seppur per mezzo di una valutazione qualitativa, l'individuazione delle priorità di intervento e fornire nel contempo un valido supporto ai gestori della rete stradale nell'implementazione di un Piano di Manutenzione Stradale (PMS).

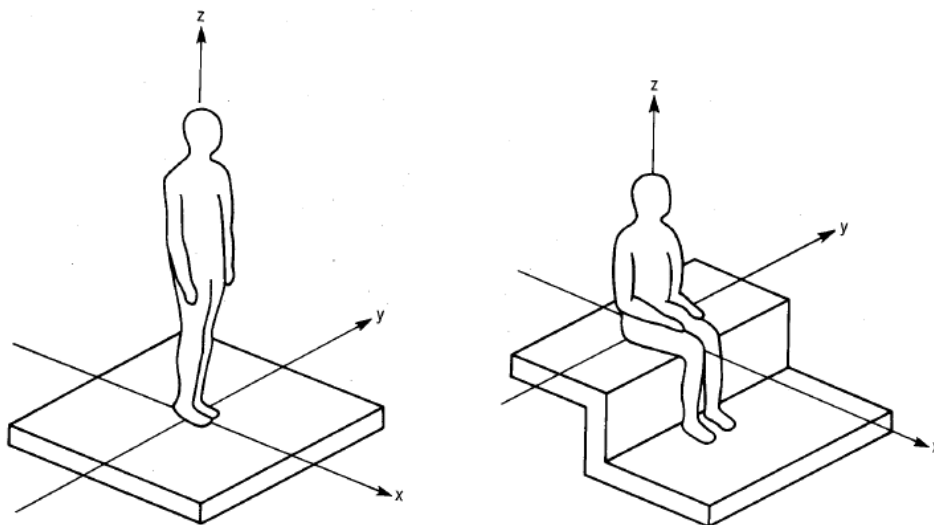
L'utilizzo dell'indice a_{wz} consente, inoltre, la valutazione di un intero tratto di strada di lunghezza predefinita al pari degli altri indici tradizionali. In aggiunta però, avendo a disposizione le misure delle accelerazioni lungo tutto il tratto in esame, è possibile affiancare a tale indicatori uno dei diversi metodi proposti in letteratura per la localizzazione delle irregolarità puntuali lungo il tragitto percorso.

2.1. Accelerazione verticale ponderata in frequenza (a_{wz})

Nello standard ISO 2631-1 (49) vengono fornite diverse metodologie atte alla valutazione degli effetti dannosi e/o di disturbo indotti sul corpo umano, dovuti all'esposizione a sorgenti vibratorie di diversa tipologia. In particolare, si descrive la possibilità di impiego dell'accelerazione ponderata in frequenza nelle tre direzioni ortogonali definite a seconda della postura assunta dal soggetto (in piedi, seduto, sdraiato) durante l'esposizione, i cui tre casi possibili sono riportati in Figura 2-2.

A partire dalla misura delle accelerazioni nel dominio del tempo, si determina quindi l'andamento dello spettro relativo a tale segnale nell'intervallo di frequenza di interesse per la risposta del corpo umano; il quale è indicato nella stessa norma esser compreso tra 0.5-80 Hz per problematiche inerenti alla salute, al comfort e alla semplice percezione. Per problemi di cinetosi (*motion sickness*) invece, è opportuno considerare l'intervallo 0.1-0.5 Hz.

Per le finalità del presente studio, incentrate sulla valutazione del comfort percepito dagli utenti stradali e dovuto alla presenza di irregolarità lungo il percorso di marcia, sarà preso in esame l'intervallo 0.5-80 Hz; il quale, secondo quanto prescritto nella ISO 2631-1, deve essere opportunamente suddiviso in bande d'ottava, i cui rispettivi valori delle 23 frequenze centrali sono riportate nella medesima norma.



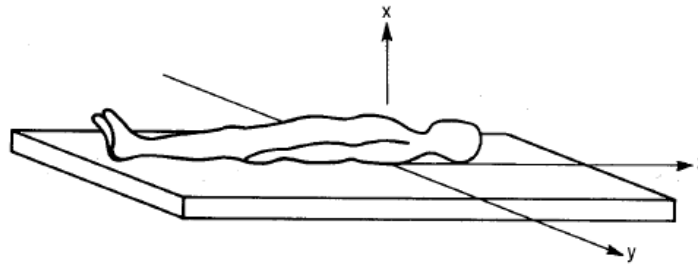


Figura 2-2. Posture assunte dal soggetto durante l'esposizione alle vibrazioni

Una volta determinato il valore efficace dell'accelerazione in corrispondenza di tutte le bande in terzi d'ottava, occorre applicare a ciascuna di esse un opportuno coefficiente di ponderazione funzione della componente che si sta considerando e della postura assunta dal soggetto esposto (Tabella 2-1), ottenendo infine l'accelerazione ponderata in frequenza di ciascuna delle tre componenti ortogonali (x,y,z) del vettore accelerazione tramite l'equazione 2.1:

$$a_{wj} = \left[\sum_i (W_i \cdot a_{j,i})^2 \right]^{1/2} \quad \text{Eq. 2.1}$$

in cui a_{wj} è l'accelerazione ponderata in frequenza calcolata per la direzione j (con $j=x,y,z$), W_i è il coefficiente di ponderazione per l' i -esima banda d'ottava e $a_{j,i}$ è il valore efficace (*root mean square, r.m.s.*) della componente j dell'accelerazione per l' i -esima banda d'ottava. Gli andamenti delle principali curve di ponderazione sono riportate in Figura 2-3.

Tabella 2-1. Guida all'applicazione delle curve di ponderazione in frequenza per i principali coefficienti di pesatura

Frequency weighting	Health	Comfort	Perception	Motion sickness
W_k	z-axis, seat surface	z-axis, seat surface	z-axis, seat surface	-
		z-axis, standing vertical recumbent (except head)	z-axis, standing vertical recumbent (except head)	
		x-, y-, z-axes, feet (sitting)		
W_d	x-axis, seat surface y-axis, seat surface	x-axis, seat surface	x-axis, seat surface	-
		y-axis, seat surface	y-axis, seat surface	
		x-, y-axes, standing horizontal recumbent	x-, y-axes, standing horizontal recumbent	
		y-, z-axes, seat-back		
W_f	-	-	-	vertical

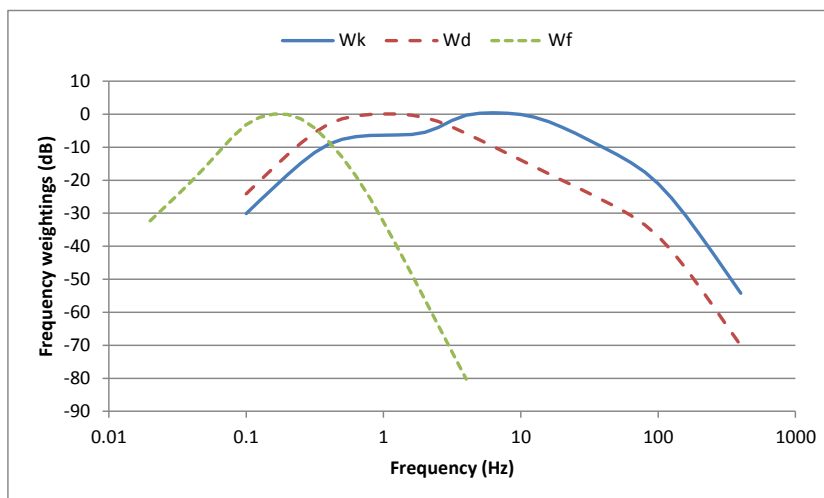


Figura 2-3. Andamento delle principali curve di ponderazione in frequenza

Per quanto concerne la presente tesi, volendo valutare il comfort percepito dagli utenti stradali la postura presa in esame è quella relativa al soggetto seduto; inoltre, come riportato in letteratura, la componente dell'accelerazione maggiormente influenzata dalle irregolarità presenti sulla superficie di una pavimentazione stradale è quella verticale (31)(40). In considerazione di ciò, sono stati impiegati i coefficienti di ponderazione relativi alla curva W_k applicati alla componente dell'accelerazione lungo l'asse z , ottenendo l'indice di comfort a_{wz} secondo l'Eq. 2.1. Lo standard ISO 2631-1, benché non indichi soglie di comfort ben definite in quanto la percezione risulta essere dipendente da diversi fattori (e.g. età del soggetto, fattori ambientali come la temperatura, rumore acustico), fornisce comunque dei valori indicativi per il trasporto pubblico, in corrispondenza dei quali si ha un determinato livello di comfort atteso (Tabella 2-2).

Tabella 2-2. Livelli di comfort relativi ai valori dell'indice a_{wz} proposti dalla ISO 2631-1 per il trasporto pubblico

a_{wz} values	Comfort level
less than 0.315 m/s^2	<i>not uncomfortable</i>
$0.315\text{-}0.63 \text{ m/s}^2$	<i>a little uncomfortable</i>
$0.5\text{-}1 \text{ m/s}^2$	<i>fairly uncomfortable</i>
$0.8\text{-}1.6 \text{ m/s}^2$	<i>uncomfortable</i>
$1.25\text{-}2.5 \text{ m/s}^2$	<i>very uncomfortable</i>
greater than 2 m/s^2	<i>extremely uncomfortable</i>

Nella norma su citata non viene specificata la procedura da adottare per il calcolo dello spettro dell'accelerazione in termini di metodo da impiegare per il calcolo della trasformata e la finestratura del segnale. Tali aspetti sono stati quindi presi in esame in alcune analisi preliminari finalizzate anche alla valutazione del comportamento dell'indice a_{wz} nei riguardi delle irregolarità diffuse e puntuali.

2.2. Procedura di calcolo dello spettro dell'accelerazione

Come anticipato nella precedente sezione, lo standard ISO 2631-1 non fornisce alcun tipo di indicazione sulla procedura da adottare per il passaggio dal dominio del tempo a quello della frequenza del segnale dell'accelerazione. I principali problemi che occorre risolvere in tal senso, riguardano i fenomeni di *aliasing* e di *leakage*.

Il primo si presenta qualora la frequenza di campionamento impiegata per il rilievo del segnale non soddisfi il *Teorema del Campionamento o di Nyquist*, secondo il quale la frequenza di campionamento (f_s) deve essere maggiore o uguale al doppio della frequenza massima (f_{max}) presente nello spettro del segnale (Eq. 2.2):

$$f_s \geq 2 \cdot f_{max} \quad \text{Eq. 2.2}$$

Quando tale condizione non è verificata, a causa di un errato campionamento, armoniche in alta frequenza del segnale vengono riportate nel suo spettro come armoniche in più bassa frequenza. Qualora non sia nota la frequenza massima caratterizzante il fenomeno che si intende misurare, si consiglia di applicare un filtro *antialiasing* (filtro antiequivocazione), il quale altro non è che un filtro passa-basso (*low-pass*) con frequenza di taglio pari a $f_s/3$.

Il fenomeno di *leakage* invece, riguarda essenzialmente il fatto che l'analisi di Fourier si applica formalmente a segnali di durata infinitamente estesa, quindi anche i segnali campionati in maniera discreta dovrebbero essere di lunghezza infinita. Tale condizione è però irrealizzabile, ed il numero di campioni a disposizione saranno necessariamente costituiti da un numero finito di elementi. L'effetto del troncamento del segnale può essere esaminato considerando il segnale campionato $x_w(t)$, di durata limitata, come una porzione del generico segnale $x(t)$, prelevato attraverso una opportuna finestra temporale $w(t)$ denominata finestra (*window*) di troncamento o di osservazione (Eq. 2.3):

$$x_w(t) = x(t) \cdot w(t) \quad \text{Eq. 2.3}$$

A titolo di esempio si riporta il caso di un segnale sinusoidale $x(t)$ di frequenza $f_0=1/T_0$, al quale corrisponderebbe uno spettro costituito da due impulsi a frequenza $\pm f_0$. Applicando quindi a tale segnale una finestra di troncamento $w(t)$ di tipo rettangolare, di durata T_w (Figura 2-4) (51) e definita dalla relazione (Eq. 2.4):

$$w(t) = \begin{cases} 1 & -\frac{T_w}{2} \leq t \leq \frac{T_w}{2} \\ 0 & \text{altrove} \end{cases} \quad \text{Eq. 2.4}$$

si ottiene il segnale troncato evidenziato in Figura 2-5 (51).

Procedendo nel calcolo del relativo spettro tramite prodotto di convoluzione, si riscontra la presenza del fenomeno di dispersione dovuto al processo di troncamento (Figura 2-6) (51). L'entità della dispersione spettrale (*spectral leakage*) dipende dalla durata T_w della finestra di osservazione e dal suo andamento temporale. È possibile migliorare la stima dello spettro del segnale troncato ampliando, entro limiti accettabili, la durata T_w o impiegando finestre temporali non rettangolari, bensì con transizione più graduale alle estremità. In particolare, tramite il processo di finestramento (*windowing*) si cerca di fare in modo che venga eliminato (o quanto meno contenuto) l'effetto di bordo portando a 0 il segnale a entrambi gli estremi della finestra temporale considerata. Per fare ciò, il segnale di partenza viene moltiplicato, nel dominio del tempo, per un secondo segnale, il quale definisce il tipo di finestramento (Figura 2-7).

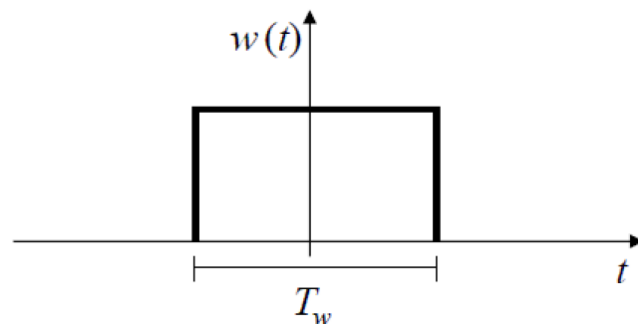


Figura 2-4. Finestra di osservazione rettangolare

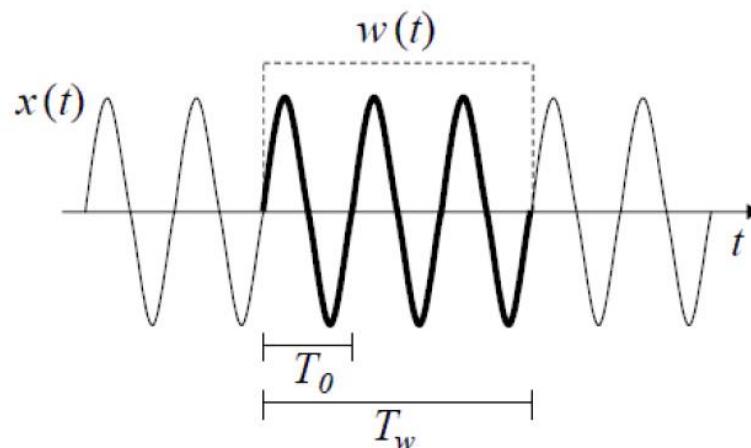


Figura 2-5. Segnale sinusoidale troncato con finestra rettangolare

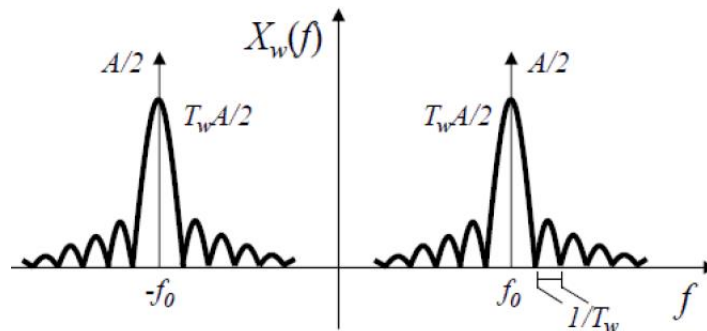


Figura 2-6. Spettro del segnale sinusoidale troncato con finestra rettangolare

La finestra enfatizza la parte centrale del segnale mentre porta a 0 i contributi di bordo, comportando dunque perdita di informazioni. In tal modo, tuttavia, si può ritenere che il segnale finestrato inizi e termini con la medesima fase, perché forzato ad assumere valore nullo agli estremi (0 e T). In questo modo si ha un'attenuazione del *leakage*, ma non si ottiene comunque lo spettro ideale. Per ovviare alla perdita di tali informazioni è quindi necessario calcolare in funzione del tipo di finestra adottata, il relativo coefficiente di *gain* (52). Per l'implementazione del calcolo fin qui descritto, passando dal dominio del tempo a quello della frequenza, si è soliti utilizzare la Trasformata di Fourier Discreta (*Discrete Fourier Transform - DFT*); ed in particolare, l'algoritmo ottimizzato definito come Trasformata Rapida di Fourier (*Fast Fourier Transform - FFT*).

Esistono tuttavia altri approcci, tra cui quelli basati sulla media dei periodogrammi, nei quali il segnale viene suddiviso in n tratti, ciascuno dei quali opportunamente finestrato, stabilendo una prefissata percentuale di sovrapposizione tra due segmenti adiacenti. Per ogni tratto, quindi, viene calcolato il corrispondente spettro, e la stima finale dello spettro del segnale di partenza sarà dato dalla loro media. Tra i vari metodi, uno dei più utilizzati è il cosiddetto metodo del *periodogramma di Welch* descritto in (53), e ripreso anche in (52), dove è stata definita la percentuale ottima di sovrapposizione da impiegare in funzione della finestra adottata. Ad esempio, per la finestra di Hanning si suggerisce di utilizzare una sovrapposizione pari al 50%. In Matlab sono già implementate le funzioni sia per il calcolo della FFT (funzione *fft*) sia del periodogramma di Welch (funzione *pwelch*).

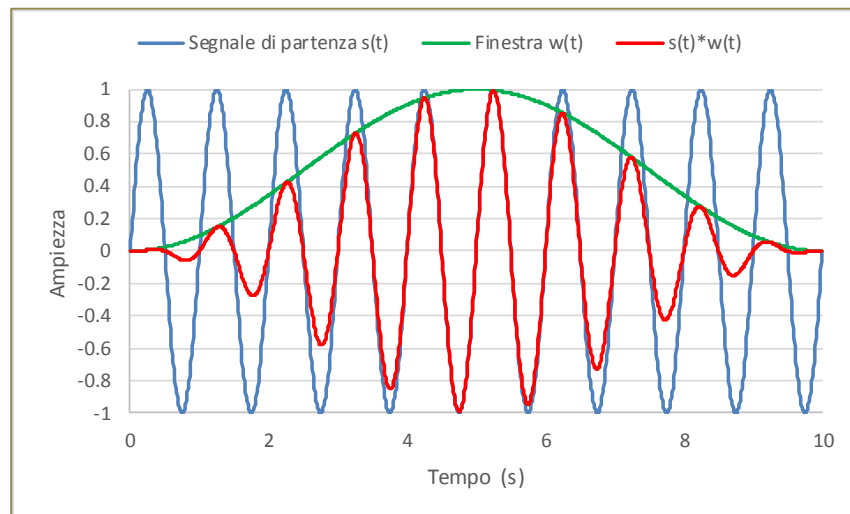


Figura 2-7. Esempio di segnale finestrato

Di seguito viene fornita una breve descrizione (52) delle finestre prese in esame durante le analisi preliminari, finalizzate alla definizione della procedura di calcolo da adottare per il calcolo dell'indice a_{wz} :

- *Finestra di Hanning.*

Presenta una dispersione spettrale e una larghezza di banda ragionevolmente basse e pertanto è spesso utilizzata come funzione di finestrazione standard in diverse applicazioni, qualora l'accuratezza dell'ampiezza dei segnali sinusoidali non sia importante. In Matlab è possibile implementare tale finestra tramite la funzione predefinita $hann(n)$ la quale richiede come input il numero di punti del segnale. In Figura 2-8 si riporta, a titolo esemplificativo, l'andamento di tale finestra (Eq. 2.5) per $n=64$.

$$w(t) = 0.5 \cdot \left(1 - \cos\left(2\pi \frac{n}{N} \right) \right) \quad 0 \leq n \leq N \quad \text{Eq. 2.5}$$

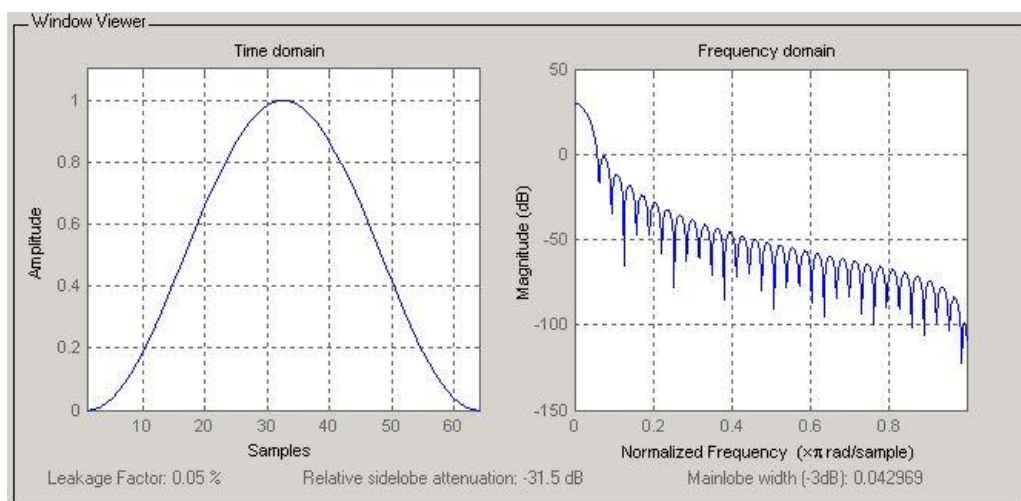


Figura 2-8. Finestra di Hanning

▪ *Finestra di Hamming.*

Tale finestra presenta una larghezza di banda più stretta e potrebbe essere utile in quelle situazioni in cui non è importante l'accuratezza dell'ampiezza e dove il tasso di caduta lenta dei lobi laterali non disturba. Anche per questa finestra in Matlab è presente una funzione predefinita denominata *hamming(n)* nella quale è implementata l'equazione caratteristica di tale finestra (Eq. 2.6), la quale come nel caso precedente richiede come input semplicemente il numero di punti n presenti nel segnale. Il suo andamento nel dominio del tempo e della frequenza, sempre per $n=64$, è riportato in Figura 2-9.

$$w(t) = 0.54 - 0.46 \cdot \cos\left(2\pi \frac{n}{N}\right) \quad 0 \leq n \leq N \quad \text{Eq. 2.6}$$

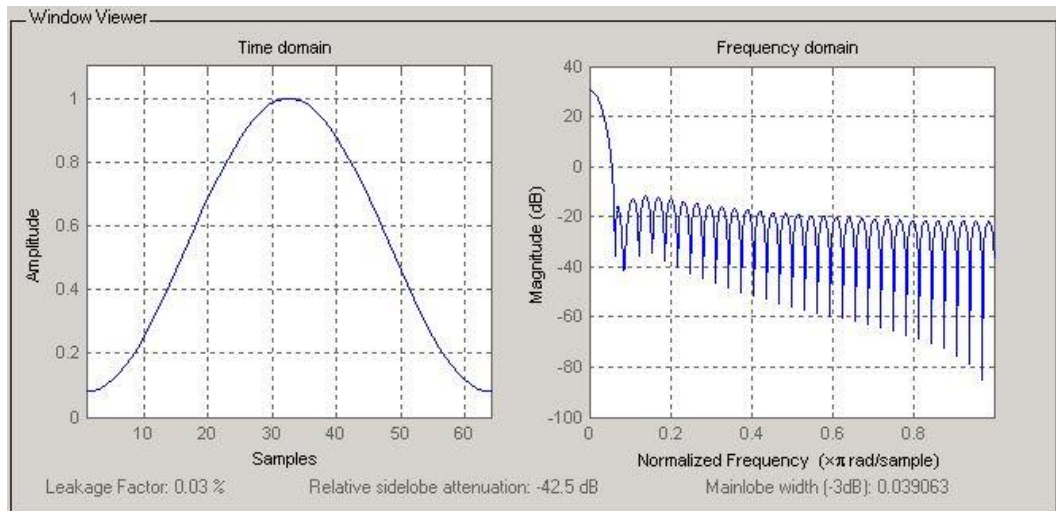


Figura 2-9. Finestra di Hamming

▪ *Finestra di Blackman.*

Appartiene alle finestre coseno generalizzate di ordine superiore e il suo impiego è solitamente consigliato per le applicazioni che richiedono una finestatura (*windowing*) tramite convoluzione nel dominio della frequenza. Esiste in realtà una famiglia di finestre di Blackman, caratterizzate da un parametro α variabile e da cui dipendono i coefficienti delle funzioni coseno. Per convenzione, quando si parla di finestra di Blackman si considera il caso particolare in cui $\alpha=0.16$, da cui ne consegue l'Eq. 2.7:

$$w(t) = 0.42 - 0.5 \cdot \cos\left(2\pi \frac{n}{N-1}\right) + 0.08 \cdot \cos\left(4\pi \frac{n}{N-1}\right) \quad 0 \leq n \leq M-1 \quad \text{Eq. 2.7}$$

dove $M = N/2$ per N pari e $M = (N+1)/2$ per N dispari. L'Eq. 2.7 si riferisce solo alla prima metà della finestra e per tracciare la parte rimanente ($M \leq n \leq N-1$) si procede per simmetria. Tale equazione è anche alla base della funzione *blackman(n)* predefinita in Matlab per la sua implementazione. L'andamento di tale finestra nel dominio del tempo e della frequenza è mostrato in Figura 2-10.

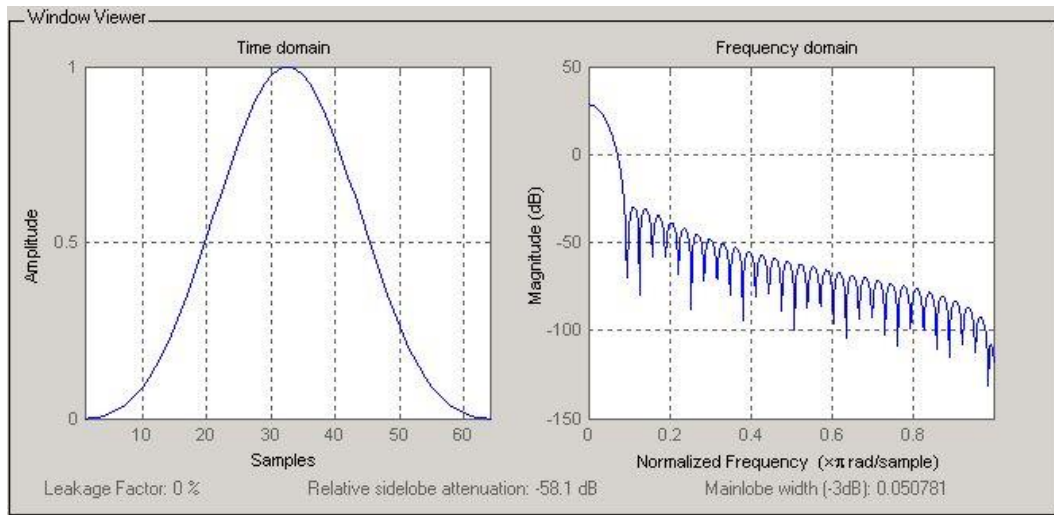


Figura 2-10. Finestra di Blackman

- *Finestra Split-Cosine Bell.* Un'altra funzione di finestrazione utilizzata molto frequentemente è la finestra Split-Cosine Bell caratterizzata dall'Eq. 2.8, in cui si può notare la dipendenza dal parametro p della forma assunta dalla funzione. Quest'ultimo rappresenta la proporzione di dati complessiva che tenderà a zero (processo di *tapering*) (54). Nel caso specifico, si è assunto un valore di p pari a 0.2 (si ottiene così un andamento identico alla finestra suggerita in (55) – Appendice C), il che comporta che il 10% dei campioni in ciascun estremo del segnale tenda progressivamente a zero. A differenza delle equazioni precedenti funzione del numero del campione n , in questo caso è stata considerata la variabile di indice normalizzato $t = n/(N-1)$. Come si può notare in Figura 2-11, l'impiego di tale finestra comporta un leggero aumento del fenomeno di dispersione spettrale (*leakage*) se comparato con le precedenti funzioni di finestrazione.

$$w(t) = \begin{cases} \frac{1}{2} \left(1 - \cos \left(2\pi \frac{t}{p} \right) \right) & 0 \leq t < p/2 \\ 1 & p/2 \leq t \leq 1 - p/2 \\ \frac{1}{2} \left(1 - \cos \left(2\pi \frac{1-t}{p} \right) \right) & 1 - p/2 < t \leq 1 \end{cases} \quad \text{Eq. 2.8}$$

Per informazioni aggiuntive in merito alle caratteristiche delle finestre considerate nella presente tesi e su possibili funzioni di finestrata alternative si rimanda ai documenti in bibliografia (52) (53) (54) e in letteratura.

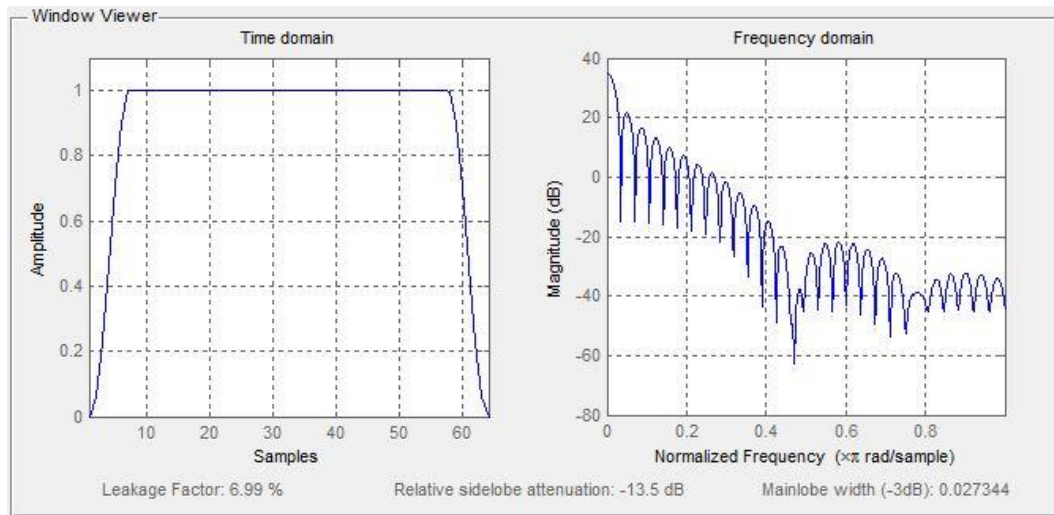


Figura 2-11.Split-Cosine Bell

Per quanto attiene invece al calcolo del contenuto energetico dello spettro in corrispondenza delle bande in terzi d'ottava nell'intervallo di frequenza di interesse (0.5-80 Hz), è stata utilizzata la medesima procedura prevista per la medesima operazione applicata al calcolo del PSD delle elevazioni del profilo stradale descritta nella norma ISO 8608.

2.3. Modello di simulazione *full-car 8 d.o.f.*

Come anticipato in precedenza, alcune valutazioni preliminari sono state realizzate tramite l'impiego di un modello numerico denominato *full-car 8 d.o.f.* implementato in Matlab e rappresentativo del comportamento di un veicolo passeggeri, nel quale è stato incluso anche il sedile del guidatore (Figura 2-12).

L'algoritmo risolutivo è stato quindi sviluppato tramite modello *State Space*, le cui equazioni differenziali devono soddisfare il seguente sistema:

$$\begin{aligned} X' &= AX + Bu \\ Y &= CX + Du \end{aligned} \tag{Eq. 2.9}$$

in cui u è la matrice di input con i quattro profili relativi a ciascuna ruota, X è il vettore di stato con gli 8 gradi di libertà del sistema più le rispettive derivate temporali e Y è il vettore di output delle forze trasmesse alla pavimentazione. Le matrici di stato A , B , C e D sono invece definite come segue:

```

A=[0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;...
-(k1s+k2s+k3s+k4s+k)/ms -(r1s+r2s+r3s+r4s+r)/ms k1s/ms r1s/ms
k2s/ms r2s/ms k3s/ms r3s/ms k4s/ms r4s/ms (-k1s*Lg12-
k2s*Lg12+k3s*Lg34+k4s*Lg34-k*Llhbq)/ms (-r1s*Lg12-
r2s*Lg12+r3s*Lg34+r4s*Lg34-r*Llhbq)/ms (k1s*Lg13-k2s*Lg24+k3s*Lg13-
k4s*Lg24+k*Llhbq)/ms (r1s*Lg13-r2s*Lg24+r3s*Lg13-r4s*Lg24+r*Llhbq)/ms
k/ms r/ms;...
0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;...
k1s/mlu r1s/mlu -(k1t+k1s)/mlu -r1s/mlu 0 0 0 0 0 0 k1s*Lg12/mlu
r1s*Lg12/mlu -k1s*Lg13/mlu -r1s*Lg13/mlu 0 0;...
0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;...
k2s/m2u r2s/m2u 0 0 -(k2t+k2s)/m2u -r2s/m2u 0 0 0 0 k2s*Lg12/m2u
r2s*Lg12/m2u k2s*Lg24/m2u r2s*Lg24/m2u 0 0;...
0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0;...
k3s/m3u r3s/m3u 0 0 0 0 -(k3t+k3s)/m3u -r3s/m3u 0 0 -
k3s*Lg34/m3u -r3s*Lg34/m3u -k3s*Lg13/m3u -r3s*Lg13/m3u 0 0;...
0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0;...
k4s/m4u r4s/m4u 0 0 0 0 0 0 -(k4t+k4s)/m4u -r4s/m4u -
k4s*Lg34/m4u -r4s*Lg34/m4u k4s*Lg24/m4u r4s*Lg24/m4u 0 0;...
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0;...
(-k1s*Lg12-k2s*Lg12+k3s*Lg34+k4s*Lg34-k*Llhbq)/Jgb (-r1s*Lg12-
r2s*Lg12+r3s*Lg34+r4s*Lg34-r*Llhbq)/Jgb k1s*Lg12/Jgb
r1s*Lg12/Jgb k2s*Lg12/Jgb r2s*Lg12/Jgb -k3s*Lg34/Jgb -
r3s*Lg34/Jgb -k4s*Lg34/Jgb -r4s*Lg34/Jgb -
(k1s*Lg12^2+k2s*Lg12^2+k3s*Lg34^2+k4s*Lg34^2+k*Llhbq^2)/Jgb -
(r1s*Lg12^2+r2s*Lg12^2+r3s*Lg34^2+r4s*Lg34^2+r*Llhbq^2)/Jgb
(k1s*Lg13*Lg12-k2s*Lg24*Lg12-
k3s*Lg13*Lg34+k4s*Lg24*Lg34+k*Llhbq*Llhbq)/Jgb (r1s*Lg13*Lg12-
r2s*Lg24*Lg12-r3s*Lg13*Lg34+r4s*Lg24*Lg34+r*Llhbq*Llhbq)/Jgb
k*Llhbq/Jgb r*Llhbq/Jgb;...
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0;...
(k1s*Lg13-k2s*Lg24+k3s*Lg13-k4s*Lg24+k*Llhbq)/Jgr (r1s*Lg13-
r2s*Lg24+r3s*Lg13-r4s*Lg24+r*Llhbq)/Jgr -k1s*Lg13/Jgr -
r1s*Lg13/Jgr k2s*Lg24/Jgr r2s*Lg24/Jgr -k3s*Lg13/Jgr -
r3s*Lg13/Jgr k4s*Lg24/Jgr r4s*Lg24/Jgr (k1s*Lg13*Lg12-
k2s*Lg24*Lg12-k3s*Lg13*Lg34+k4s*Lg24*Lg34+k*Llhbq*Llhbq)/Jgr
(r1s*Lg13*Lg12-r2s*Lg24*Lg12-
r3s*Lg13*Lg34+r4s*Lg24*Lg34+r*Llhbq*Llhbq)/Jgr -
(k1s*Lg13^2+k2s*Lg24^2+k3s*Lg13^2+k4s*Lg24^2+k*Llhbq^2)/Jgr -
(r1s*Lg13^2+r2s*Lg24^2+r3s*Lg13^2+r4s*Lg24^2+r*Llhbq^2)/Jgr -
k*Llhbq/Jgr -r*Llhbq/Jgr;...
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1;...
k/mhb r/mhb 0 0 0 0 0 0 0 0 k*Llhbq/mhb r*Llhbq/mhb -k*Llhbq/mhb
-r*Llhbq/mhb -k/mhb -r/mhb]

B=[0 0 0 0;0 0 0 0;0 0 0 0;k1t/mlu 0 0 0;0 0 0 0;0 k2t/m2u 0 0;0 0
0 0;0 0 k3t/m3u 0;0 0 0 0;0 0 0 k4t/m4u;0 0 0 0;0 0 0 0;0 0 0
0;0 0 0 0;0 0 0 0;0 0 0 0]

C=[0 0 k1t 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;0 0 0 0 k2t 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0;0 0 0 0 0 0 k3t 0 0 0 0 0 0 0 0;0 0 0 0 0 0 0 0 k4t 0 0 0
0 0 0 0]

D=[-k1t 0 0 0;0 -k2t 0 0;0 0 -k3t 0;0 0 0 -k4t]

```

in cui il significato di ciascun parametro presente è il seguente:

m_s = Massa telaio concentrata nel baricentro
 m_{1u} = Massa ruota anteriore 1
 m_{2u} = Massa ruota anteriore 2
 m_{3u} = Massa ruota posteriore 3
 m_{4u} = Massa ruota posteriore 4
 k_{1t} = Rigidezza pneumatico anteriore 1
 k_{2t} = Rigidezza pneumatico anteriore 2
 k_{3t} = Rigidezza pneumatico posteriore 3
 k_{4t} = Rigidezza pneumatico posteriore 4
 r_{1s} = Damping ammortizzatore anteriore 1
 r_{2s} = Damping ammortizzatore anteriore 2
 r_{3s} = Damping ammortizzatore posteriore 3
 r_{4s} = Damping ammortizzatore posteriore 4
 k_{1s} = Rigidezza ammortizzatore anteriore 1
 k_{2s} = Rigidezza ammortizzatore anteriore 2
 k_{3s} = Rigidezza ammortizzatore posteriore 3
 k_{4s} = Rigidezza ammortizzatore posteriore 4
 J_{gb} = Momento d'inerzia rispetto al beccheggio della massa sospesa
 J_{gr} = Momento d'inerzia rispetto al rollio della massa sospesa
 k = Rigidezza del sedile
 r = Damping sedile
 m_{hb} = Massa sedile (comprensiva della massa del passeggero)
 L_{g13} = Semiasse sinistro
 L_{g24} = Semiasse destro
 L_{g12} = Distanza asse anteriore-baricentro
 L_{g34} = Distanza asse posteriore-baricentro
 L_{lhb} = Distanza longitudinale sedile-baricentro
 L_{thbg} = Distanza longitudinale sedile-baricentro

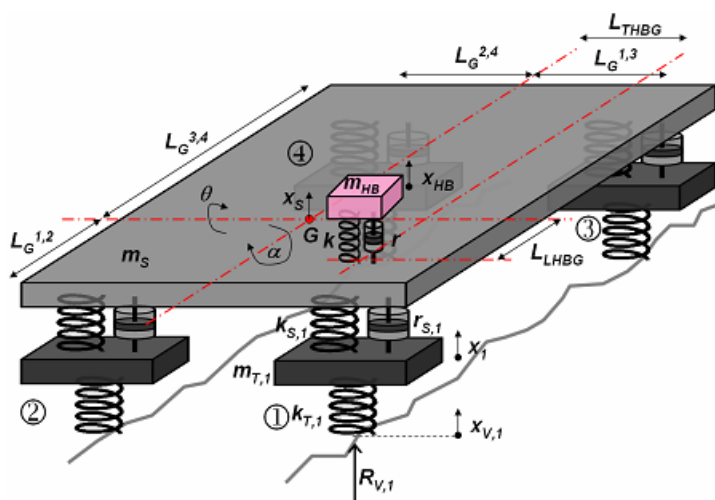


Figura 2-12. Schema del modello full-car 8 d.o.f.

Gli 8 gradi di libertà rappresentano invece le seguenti grandezze: oscillazione massa sospesa (x_s), oscillazione massa non sospesa 1 (x_1), oscillazione massa non sospesa 2 (x_2),

oscillazione massa non sospesa 3 (x_3), oscillazione massa non sospesa 4 (x_4), beccheggio massa sospesa (ϑ), rollio massa sospesa (α) e oscillazione massa sedile (x_{hb}).

Risolto quindi il sistema è possibile calcolare le accelerazioni che interessano il baricentro delle masse del veicolo (a_s) e il corpo del passeggero (a_{hb}).

Per quanto concerne i valori assunti dai parametri meccanici e geometrici da utilizzare nelle simulazioni numeriche, si è fatto riferimento agli studi condotti in precedenza presso il Dipartimento di Ingegneria Civile Edile e Ambientale (DICEA), Area Strade dell'Università degli Studi di Roma – La Sapienza. In particolare, è stato ripreso lo studio di calibrazione condotto dall'Ing. Sbrilli durante la sua tesi di laurea specialistica (56), il quale ha consentito di individuare i valori di suddetti parametri atti a descrivere il comportamento dinamico di una FIAT Stilo a diverse velocità di marcia (Tabella 2-3) (57).

Per quanto concerne invece velocità maggiori di 70 km/h, sono stati utilizzati i medesimi parametri meccanici adoperati in (31), relativi sempre alla stessa tipologia di veicolo stradale.

In aggiunta alle elevazioni dei profili che caratterizzano il contatto tra ciascuna ruota e la pavimentazione stradale e relative al tratto che si intende analizzare, la norma ASTM E 1170-97 (58) raccomanda di aggiungere un tratto iniziale ad elevazione costante di lunghezza pari ad almeno 160 m, al fine di eliminare gli effetti dovuti al transitorio iniziale.

Tabella 2-3. Parametri di riferimento per il modello *full-car 8 d.o.f.*

Model Parameters		Dimension	Speed (km/h)		
			25-50	60	70
<i>p</i>	wheel base	m	2.59		
<i>ms</i>	sprung vehicle mass	kg	1300		
<i>mhb</i>	driver mass	kg	100		
<i>m1u</i>	front/left unsprung mass 1	kg	40		
<i>m2u</i>	front/right unsprung mass 2				
<i>m3u</i>	rear/left unsprung mass 3	kg	35		
<i>m4u</i>	rear/right unsprung mass 4				
<i>r1s</i>	damping constant suspension 1	Ns/m	1400	3100	3530
<i>r2s</i>	damping constant suspension 2	Ns/m	1400	3100	3530
<i>r3s</i>	damping constant suspension 3	Ns/m	1400	3100	3530
<i>r4s</i>	damping constant suspension 4	Ns/m	1400	3100	3530
<i>r</i>	damping constant seat	Ns/m	3000	2200	2600
<i>k1s</i>	spring constant suspension 1	N/m	38889	86111	98056
<i>k2s</i>	spring constant suspension 2	N/m	38889	86111	98056
<i>k3s</i>	spring constant suspension 3	N/m	35000	77500	88250
<i>k4s</i>	spring constant suspension 4	N/m	35000	77500	88250
<i>k1t</i>	spring constant tire 1	N/m	200000		
<i>k2t</i>	spring constant tire 2				
<i>k3t</i>	spring constant tire 3				
<i>k4t</i>	spring constant tire 4				
<i>k</i>	spring constant seat	N/m	87464	64140	75802
<i>Jgb</i>	sprung mass pitch moment of inertia	Nms ²	2700		
<i>Jgr</i>	sprung mass roll moment of inertia	Nms ²	400		
<i>Lg13</i>	axle semiwidth (left)	m	0.8		
<i>Lg24</i>	axle semiwidth (right)				
<i>Lg12</i>	dist. between front-axle/c.o.g. G	m	1		
<i>Lg34</i>	dist. between rear-axle/c.o.g. G	m	1.59		
<i>Lhbg</i>	dist. longit. between seat/c.o.g. G	m	0.2		
<i>Lthbg</i>	dist. transv. between seat/c.o.g. G	m	0.4		

3. ANALISI PRELIMINARI E COMPARATIVE TRA I VARI METODI

Tramite l'impiego del modello numerico *full-car 8 d.o.f.* precedentemente descritto, sono state realizzate diverse analisi preliminari finalizzate allo studio del comportamento dell'indice a_{wz} sia nei riguardi delle irregolarità puntuali che di quelle distribuite presenti lungo un profilo stradale. Tali studi, sono inoltre serviti al fine di determinare il miglior procedimento da adottare per il calcolo dello spettro delle accelerazioni misurate all'interno dei veicoli stradali. Congiuntamente, sono state effettuate le medesime analisi anche per gli indici consolidati descritti al capitolo 1. Successivamente, sono state ricercate possibili correlazioni tra i vari indici e l' a_{wz} , evidenziandone inoltre, le differenze nella valutazione del livello di regolarità presente su di una prefissata superficie stradale, derivanti dall'indicatore prescelto. Al fine di poter realizzare suddette analisi, sono stati utilizzati due diversi campioni di profili: *profili artificiali* e *profili reali*. La principale differenza tra le due tipologie di profili, consiste nella non stazionarietà dei secondi, i quali, nella quasi totalità dei casi, non presentano tutte le componenti armoniche lungo l'intera estensione del profilo; come invece avviene per i profili generati artificialmente. Di seguito si fornisce una breve descrizione delle due serie di campioni impiegate per le diverse analisi.

3.1. Campione di profili artificiali

Nella progettazione e verifica delle sospensioni di veicoli stradali, si è soliti far ricorso a simulazioni numeriche al fine di valutarne la risposta dinamica al mutare delle condizioni al contorno (24) (25). Uno degli aspetti principali, riguarda l'analisi del comportamento delle sospensioni al variare della regolarità della strada percorsa, al fine di garantire, tra le varie prestazioni, prestabiliti livelli di comfort all'utente. Per poter manipolare i profili stradali secondo le proprie esigenze, sono stati implementati diversi metodi finalizzati alla generazione di profili stradali aventi caratteristiche predefinite (e.g. livello di regolarità, lunghezza del profilo, frequenza di campionamento). Tra i vari metodi presenti in letteratura, uno dei più usati è il cosiddetto metodo dell'approssimazione sinusoidale (*sinusoidal approximation*) descritto da Tyan et al. (59). Tale approccio si basa sull'ipotesi che un generico profilo casuale di lunghezza L possa essere approssimato tramite sovrapposizione di N ($\rightarrow\infty$) onde sinusoidali, secondo le seguenti equazioni (Eq. 3.1-3.3):

$$z_R(x) = \sum_{i=1}^N A_i \cdot \sin(\Omega_i \cdot x - \phi_i) \quad \text{Eq. 3.1}$$

$$A_i = \sqrt{\Phi(\Omega_i) \cdot \frac{\Delta\Omega}{\pi}} \quad \text{Eq.3.2}$$

$$\Delta\Omega = (\Omega_N - \Omega_1)/(N - 1) \quad \text{Eq. 3.3}$$

in cui z_R è il profilo delle elevazioni in [m], Ω_i è la i -esima frequenza spaziale angolare in [rad/m], ϕ_i è l' i -esimo angolo di fase in [rad] e le ampiezze A_i sono definite dall'Eq. 3.2, dove con $\Phi(\Omega_i)$ si indica il valore del PSD in corrispondenza della i -esima frequenza spaziale angolare Ω_i . Gli angoli di fase sono considerati come variabili casuali aventi distribuzione uniforme nell'intervallo $[0, 2\pi)$.

Partendo quindi da una prefissata classe definita dalla norma ISO 8608 e selezionando opportunamente i valori dei parametri C (valore assunto dal PSD in corrispondenza della frequenza spaziale di riferimento n_0) e w , si ottiene l'andamento del *fitted PSD* desiderato. Suddividendo quest'ultimo in un opportuno numero di armoniche N , è possibile ricavare i corrispondenti valori delle ampiezze A_i e quindi l'andamento delle elevazioni z_R .

Nella scelta dei parametri da impiegare per la generazione dei profili artificiali, si è tenuto conto di quanto riportato in letteratura. Kropáč e Múčka (60), infatti, riportano come in recenti campagne di misure estensive che hanno interessato le reti stradali di diversi paesi tra cui la Svezia (26), sono stati analizzati i valori del parametro w (*waviness*) del *fitted PSD* calcolato secondo quanto prescritto nella norma ISO 8608 e relativo ai profili reali rilevati. I risultati mostrano come per la maggior parte delle strade i valori di w varino tra 1.5 e 3.5, con un valor medio prossimo a 2.5. Appare opportuno ricordare inoltre, come descritto da Múčka e Granlund (61), che i due parametri necessari per definire il *fitted PSD* (C e w) sono tra loro indipendenti e, in particolare, la *waviness* (w) fornisce un'indicazione circa la distribuzione delle lunghezze d'onda nell'intervallo di frequenze spaziali di interesse. Ad esempio, valori maggiori di 2 indicano la predominanza di lunghezze d'onda elevate, mentre valori inferiori a 2 testimoniano la prevalenza di onde corte.

Al fine di generare un campione di profili artificiali il più variegato possibile, sono stati fatti variare sia il parametro C sia w . Per il primo parametro, sono state prese in esame le prime quattro classi (dalla A alla D) definite nella ISO 8608 e per ciascun intervallo di pertinenza sono stati considerati 30 valori di C (per un totale di $30 \cdot 4 = 120$). Per il parametro di *waviness* invece, è stato preso in esame un intervallo compreso tra 1.5 e 3.7, con un passo di discretizzazione $\Delta w = 0.2$ (per un totale di 12 valori). La totalità del campione di profili artificiali consta pertanto di 1440 profili. Si anticipa fin da ora, che il principale utilizzo di tali profili riguarderà l'analisi del comportamento dell'indice a_{wz} e degli altri indicatori, nei riguardi delle irregolarità diffuse.

3.2. Campione di profili reali

In considerazione delle differenze esistenti tra profili reali e profili artificiali, tra cui la difficoltà per questi ultimi di riprodurre tutte le singolarità caratterizzanti i vari profili stradali reali, si è fatto ricorso ad una serie di profili rilevati tramite impiego di profilometri ad alto rendimento, a disposizione dell'Area Strade del Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale (DICEA) dell'Università degli Studi di Roma – La Sapienza. Suddetti profili appartengono a quattro strade provinciali della rete stradale italiana, per ciascuna delle quali è stato rilevato un tratto di lunghezza variabile (si veda Tabella 3-1), per un totale di circa 200 km. Per ciascuna corsia esaminata sono stati rilevati i due profili appartenenti agli allineamenti destro e sinistro, caratterizzati dal passaggio degli pneumatici dei veicoli in transito.

Tabella 3-1. Lunghezza tratto rilevato per ciascuna strada

<i>Id. Strada</i>	<i>Lunghezza (km)</i>
01	28.8
02	66.24
03	42.88
04	60.8
tot.	198.72

Al fine di caratterizzare il campione di profili reali a disposizione, si è proceduto alla loro classificazione secondo quanto previsto dalla ISO 8608, suddividendo tutte e quattro le tratte in sezioni di 100 m; essendo questa, in genere, la lunghezza di base sulla quale calcolare l'indice *IRI*. Prima di procedere con tale analisi, i profili sono stati trattati secondo quanto riportato nella bozza di norma europea prEN 13036-5 (55); la quale prevede, prima effettuare qualsivoglia analisi sulla regolarità longitudinale, i seguenti due passaggi:

- Filtraggio del profilo tramite filtro passa-banda, in modo da limitare l'ampiezza di banda di lunghezza d'onda all'intervallo 0.781-50 m.
- Ricampionamento del segnale al fine di ricondurlo all'intervallo di campionamento standard pari a 0.05 m. Per tale operazione nell'Allegato A della medesima bozza di norma, si suggerisce di utilizzare l'interpolazione di Shannon.

Completata la fase di *pre-processing* e procedendo con il calcolo del *fitted PSD* secondo quanto indicato nella ISO 8608, si è riscontrato che le classi interessate dal campione di profili reali risultano essere esclusivamente le prime quattro: A (*very good*), B (*good*), C (*average*) and D (*poor*), con una significativa predominanza della classe B. La ripartizione completa in termini percentuali è invece riportata nella Tabella 3-2.

Tabella 3-2. Ripartizione tra le classi di profili stradali ISO 8608 del campione di profili reali

Id. Strada	% di sezioni appartenenti ad una specifica classe di profili ISO 8608			
	Classe A	Classe B	Classe C	Classe D
Road 01	29.1	40.4	26.4	4.1
Road 02	16.8	61.7	21.0	0.5
Road 03	9.5	57.4	32.3	0.7
Road 04	20.4	62.5	15.8	1.3
Totale	18.1%	57.9%	22.6%	1.3%

Un'ulteriore analisi ha riguardato lo studio della distribuzione dei valori del parametro w ottenuti per le varie sezioni. Come si può notare in Figura 3-1, a differenza di quanto ottenuto in studi analoghi presenti in letteratura (26), i quali indicano un valore medio pari a circa 2.5, il campione di profili reali esaminato presenta un intervallo di variabilità per w compreso tra 2.5 e 3.7, con un valor medio pari a 3.16.

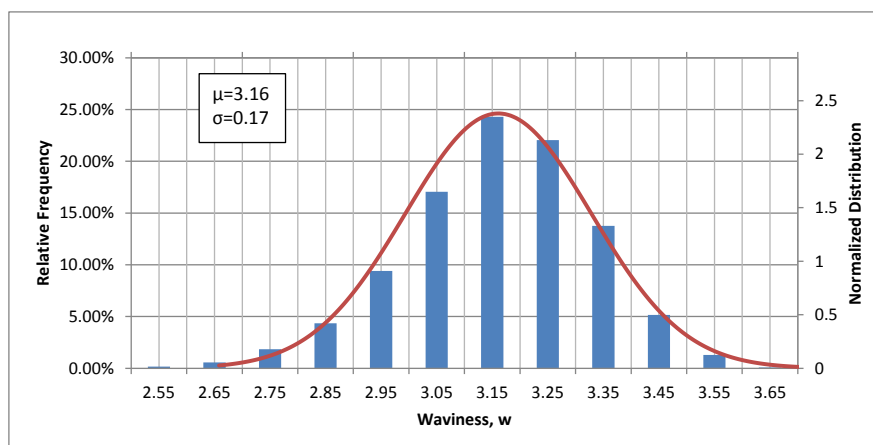


Figura 3-1. Distribuzione dell'esponente w calcolato per il campione di profili stradali reali

3.3. Irregolarità puntuali (*potholes*): analisi di sensibilità

Le pavimentazioni stradali esistenti, soprattutto quelle inerenti a un contesto urbano, sono caratterizzate principalmente dalla presenza di irregolarità puntuali o comunque localizzate in aree circoscritte. Per tale motivo, si è deciso di analizzare la capacità dei vari indicatori di regolarità o degli effetti ad essa connessi, di coglierne la presenza e di valutarne la severità. A tale scopo, con riferimento alla descrizione del grado di severità delle buche (*potholes*) presente nella norma ASTM D6433-03 e riportata nella Tabella 3-3 della presente tesi, è stata definita la geometria di una buca di riferimento per ciascuno dei tre livelli di severità (Tabella 3-4).

Tabella 3-3. Livello di severità delle buche secondo la ASTM D6433-03

Maximum Depth of Pothole	Average Diameter (mm)		
	100 to 200 mm	200 to 450 mm	450 to 750 mm
13 to 25 mm	Low	Low	Medium
>25 to 50 mm	Low	Medium	High
> 50 mm	Medium	Medium	High

Tabella 3-4. Geometria dei casi di studio esaminati

Caso di Studio	Depth (mm)	Diameter (mm)	Severità
1	23	200	Low
2	45	400	Medium
3	65	700	High

Sudette irregolarità sono quindi state geometrizzate tramite equazioni paraboliche e discretizzate adottando l'intervallo di campionamento standard descritto nella prEN 13036-5 e pari a 0.05 m. I rispettivi andamenti delle buche a severità crescente sono riportate in Figura 3-2 (bassa), Figura 3-3 (media) e Figura 3-4 (alta). Per ciascuna irregolarità sono stati presi in esame quattro casi di studio relativi a diverse collocazioni lungo un profilo di 100 m, riepilogati nella Tabella 3-5 e rappresentati in Figura 3-5, Figura 3-6 e Figura 3-7. In questa prima fase, quindi, è stata considerata la sola presenza di ogni singola buca al fine di verificare la ripetibilità della valutazione fornita da ciascun indicatore e valutarne l'andamento in funzione della severità considerata.

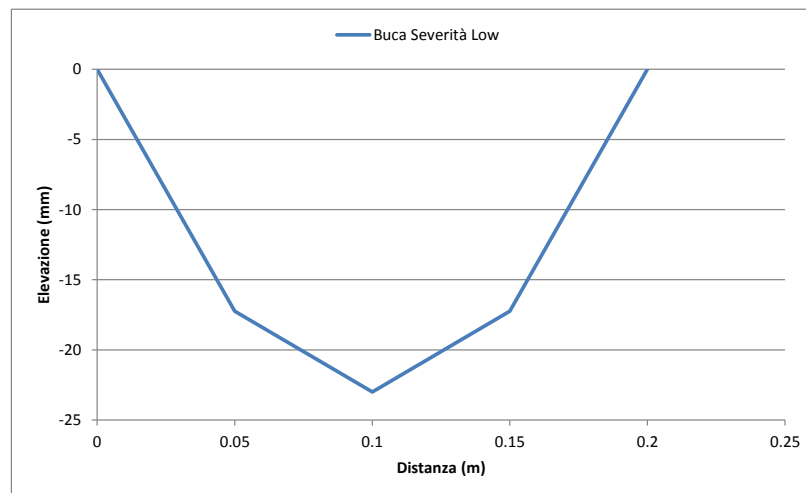


Figura 3-2. Geometria buca con livello di severità basso

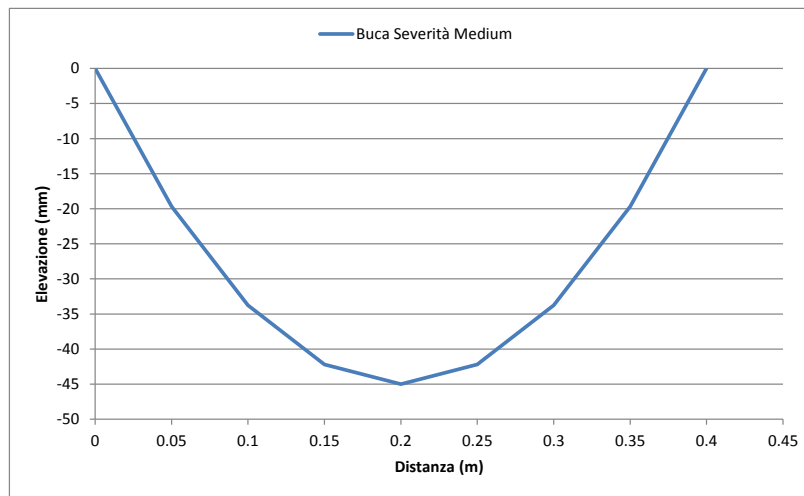


Figura 3-3. Geometria buca con livello di severità medio

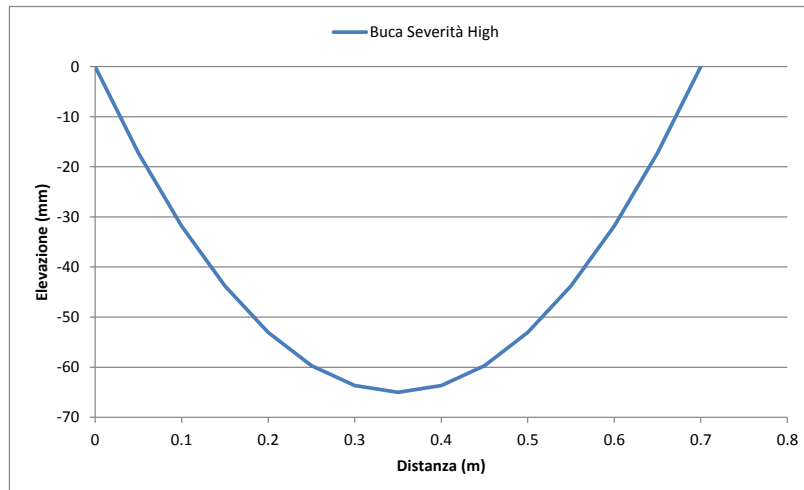


Figura 3-4. Geometria buca con livello di severità alto

Tabella 3-5. Casi di studio per singola irregolarità e progressiva di inserimento

Severità Buca	Quarto di Collocamento	Distanza Normalizzata	Lunghezza Profilo (m)	Progr. di Inserimento (m)
<i>low</i>	I	0.14	100	14
<i>low</i>	II	0.37	100	37
<i>low</i>	III	0.63	100	63
<i>low</i>	IV	0.86	100	86
<i>medium</i>	I	0.14	100	14
<i>medium</i>	II	0.37	100	37
<i>medium</i>	III	0.63	100	63
<i>medium</i>	IV	0.86	100	86
<i>high</i>	I	0.14	100	14
<i>high</i>	II	0.37	100	37
<i>high</i>	III	0.63	100	63
<i>high</i>	IV	0.86	100	86

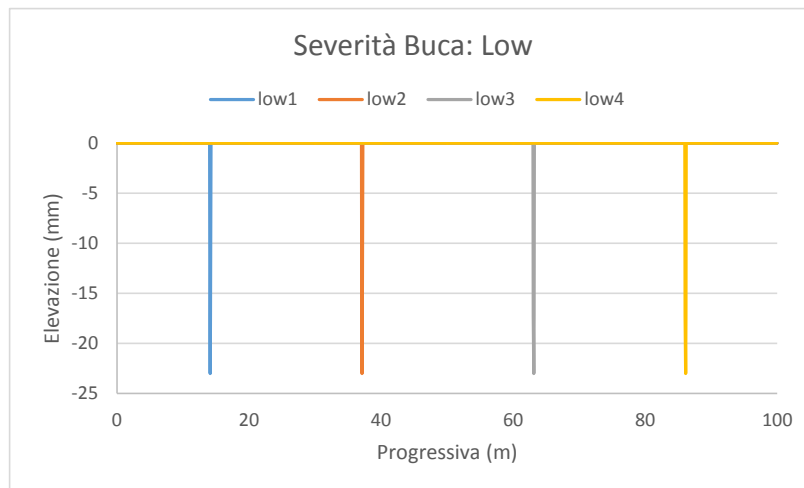


Figura 3-5. Profili singola buca con grado di severità basso

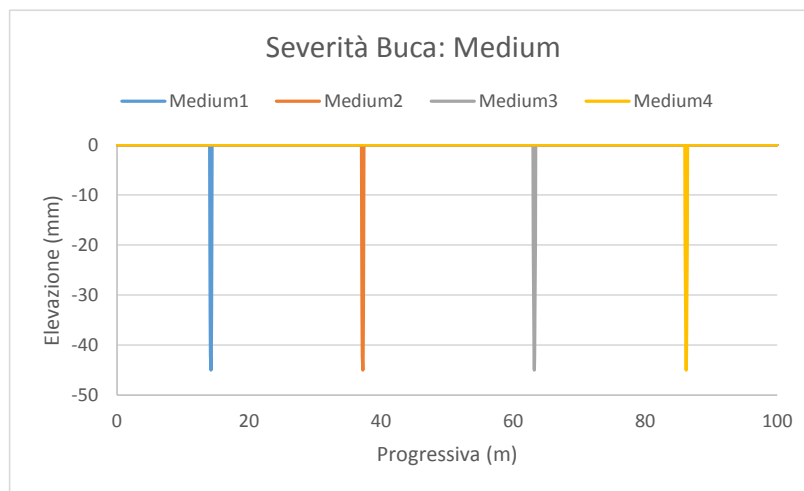


Figura 3-6. Profili singola buca con grado di severità medio

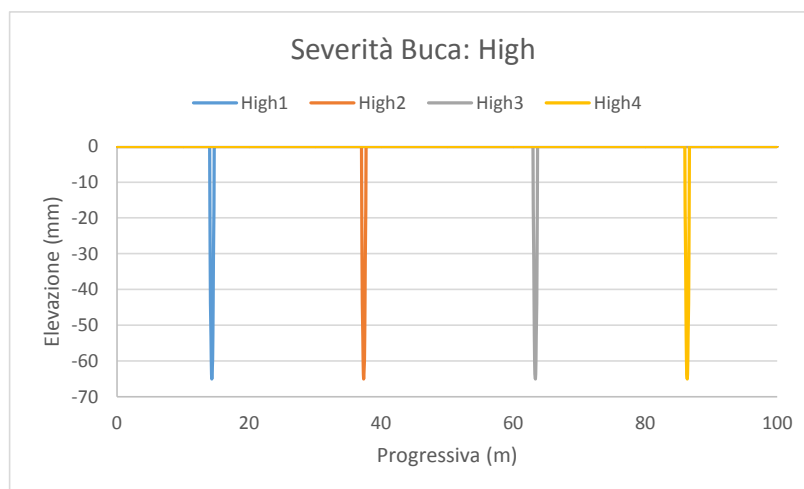


Figura 3-7. Profili singola buca con grado di severità alto

Come si può notare dai risultati riportati in Figura 3-8, gli indici tradizionali presentano un andamento pressoché costante rispetto alla collocazione della buca lungo il profilo, ad eccezione di un lieve decremento riscontrato per l'indice *IRI* (Figura 3-8b) nel caso di irregolarità di severità alta collocata in corrispondenza dell'ultimo quarto del profilo. Ciò lascia intuire come irregolarità posizionate verso la parte terminale della sezione di calcolo non vengano correttamente interpretate da tale indicatore, non avendo a disposizione sufficiente spazio per completare le oscillazioni smorzate delle masse del modello *quarter-car* dovute al transito sopra tale discontinuità. Il grado di severità, inoltre, influisce sulla distanza dall'estremità finale del profilo in corrispondenza della quale si inizia ad avvertire tale difetto di valutazione. Maggiore è il grado di severità, quindi, tanto più elevata sarà la distanza dal margine finale del profilo necessaria affinché vi sia una corretta valutazione da parte dell'indice *IRI*. In questo caso, non è stato preso in esame l'indice di comfort RQI_{Mn} , in quanto calcolato in funzione dell'indice *IRI*.

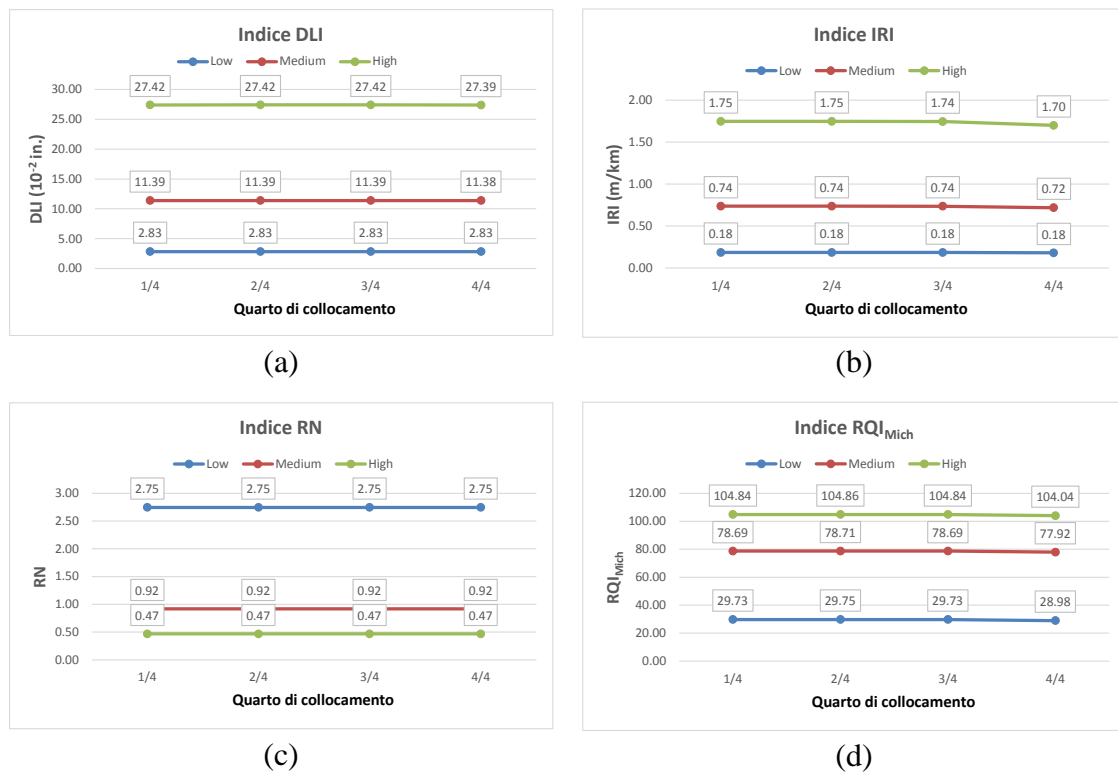


Figura 3-8. Analisi di sensibilità degli indici consolidati rispetto al grado di severità e alla localizzazione di una buca: (a) DLI, (b) IRI, (c) RN e (d) RQI_{Mich}

La medesima analisi di sensibilità è stata quindi effettuata anche per l'indice a_{wz} , prendendo in esame diverse velocità di marcia (intervallo compreso tra 10-90 km/h), differenti procedimenti di stima dello spettro dell'accelerazione (*FFT* e *periodogramma di Welch*) e diverse funzioni di finestrazione (*Hanning*, *Hamming*, *Blackman* e *Split-Cosine Bell*). In Figura 3-9 si riportano i risultati ottenuti nel caso di velocità pari a 10 km/h, in cui è possibile notare come il calcolo tramite *FFT* con impiego delle finestre di *Hanning*, *Hamming* e

Blackman risulta molto sensibile alla posizione delle buche lungo il profilo. Un miglior comportamento si ottiene invece, a parità di funzione di finestrazione (*Hanning* e *Hamming*), tramite stima dello spettro effettuata con il periodogramma di Welch (Figura 3-9e e Figura 3-9f). Anche in questo caso, comunque, permane una residua sensibilità alla localizzazione dell'irregolarità puntuale. Da questo punto di vista, il miglior comportamento si riscontra con l'adozione della procedura che prevede l'impiego della *FFT* con finestra *Split-Cosine Bell* (Figura 3-9d).

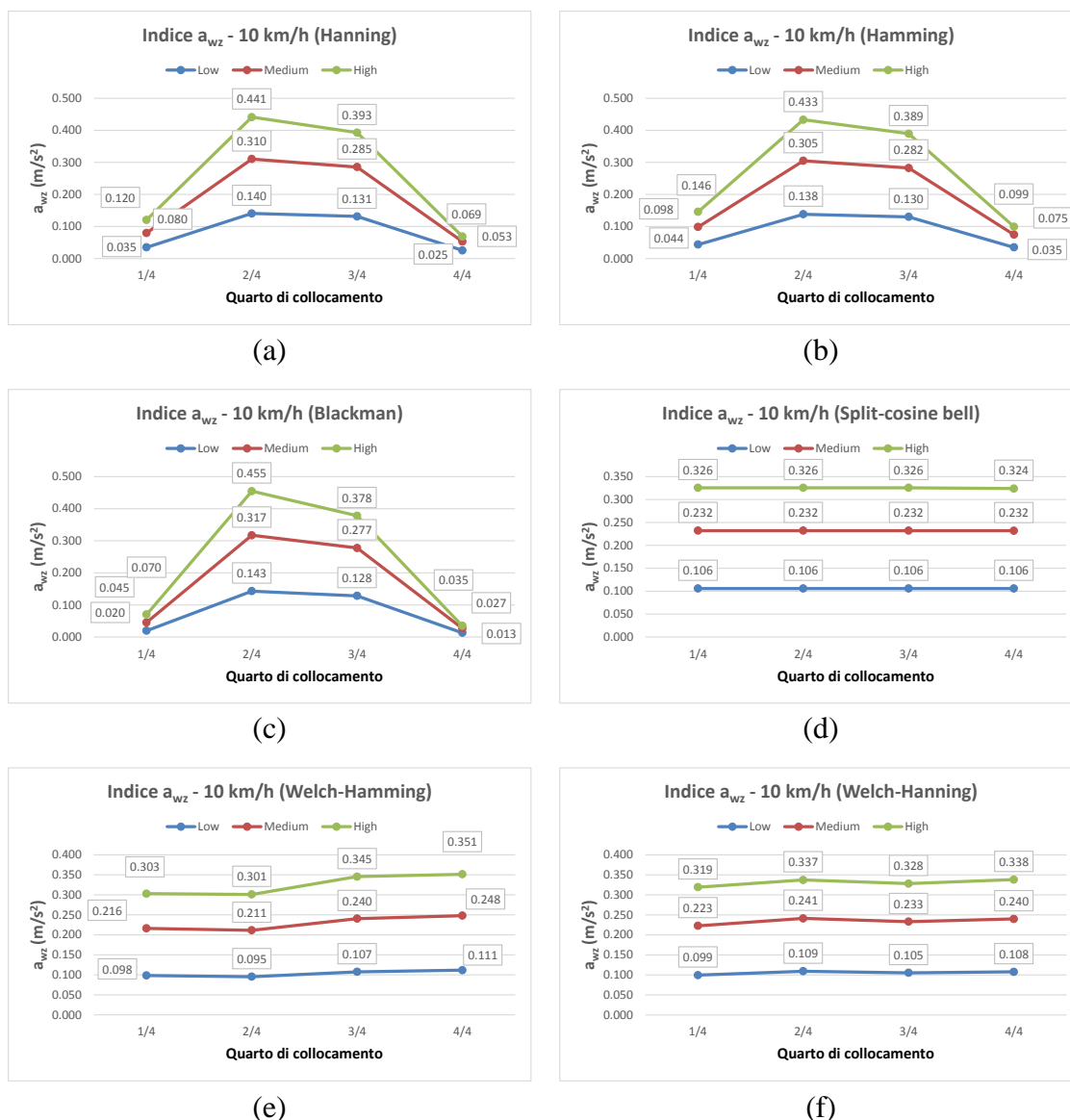


Figura 3-9. Analisi di sensibilità dell'indice a_{wz} per $V=10$ km/h e diversi metodi di stima dello spettro: (a) FFT-Hanning, (b) FFT-Hamming, (c) FFT-Blackman, (d) FFT-Split-Cosine Bell, (e) Welch-Hamming e (f) Welch-Hanning

Gli stessi andamenti si ottengono anche per le altre velocità prese in esame. A tal proposito, a titolo esemplificativo, si riportano in Figura 3-10 e Figura 3-11 i risultati relativi, rispettivamente, ad una velocità di marcia pari a 40 km/h e a 70 km/h.

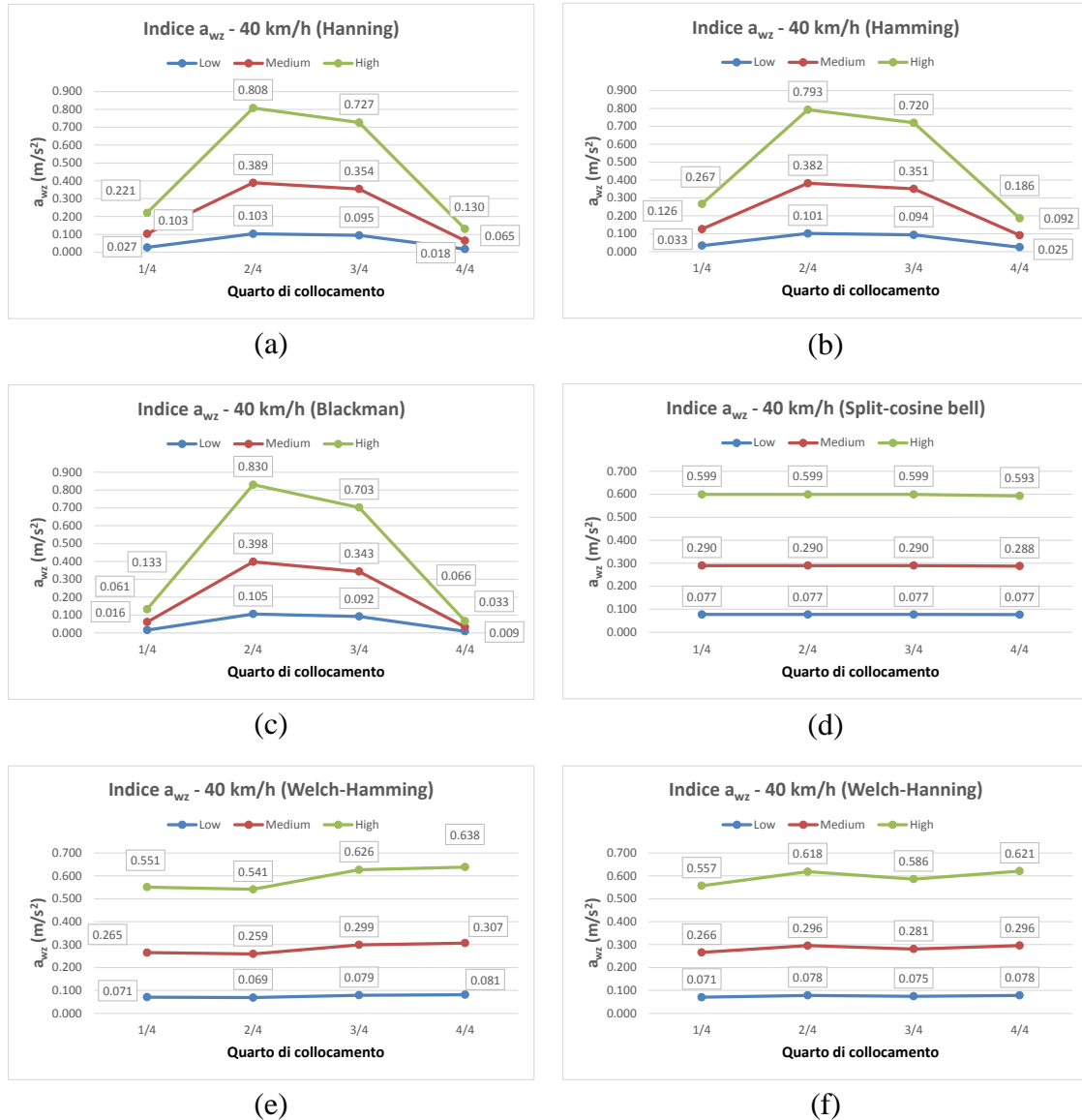


Figura 3-10. Analisi di sensibilità dell'indice a_{wz} per $V=40$ km/h e diversi metodi di stima dello spettro: (a) FFT-Hanning, (b) FFT-Hamming, (c) FFT-Blackman, (d) FFT-Split-Cosine Bell, (e) Welch-Hamming e (f) Welch-Hanning

Come si può notare esaminando il grafico in Figura 3-11d e comparando tale risultato con gli analoghi ottenuti per velocità inferiori (Figura 3-9d e Figura 3-10d), all'aumentare della velocità di transito ($V > 60$ km/h) l'indice a_{wz} presenta un comportamento analogo all'IRI, ovvero una riduzione del valore assunto dall'indicatore per la discontinuità puntuale di severità alta localizzata nell'ultimo quarto di suddivisione del profilo stradale.

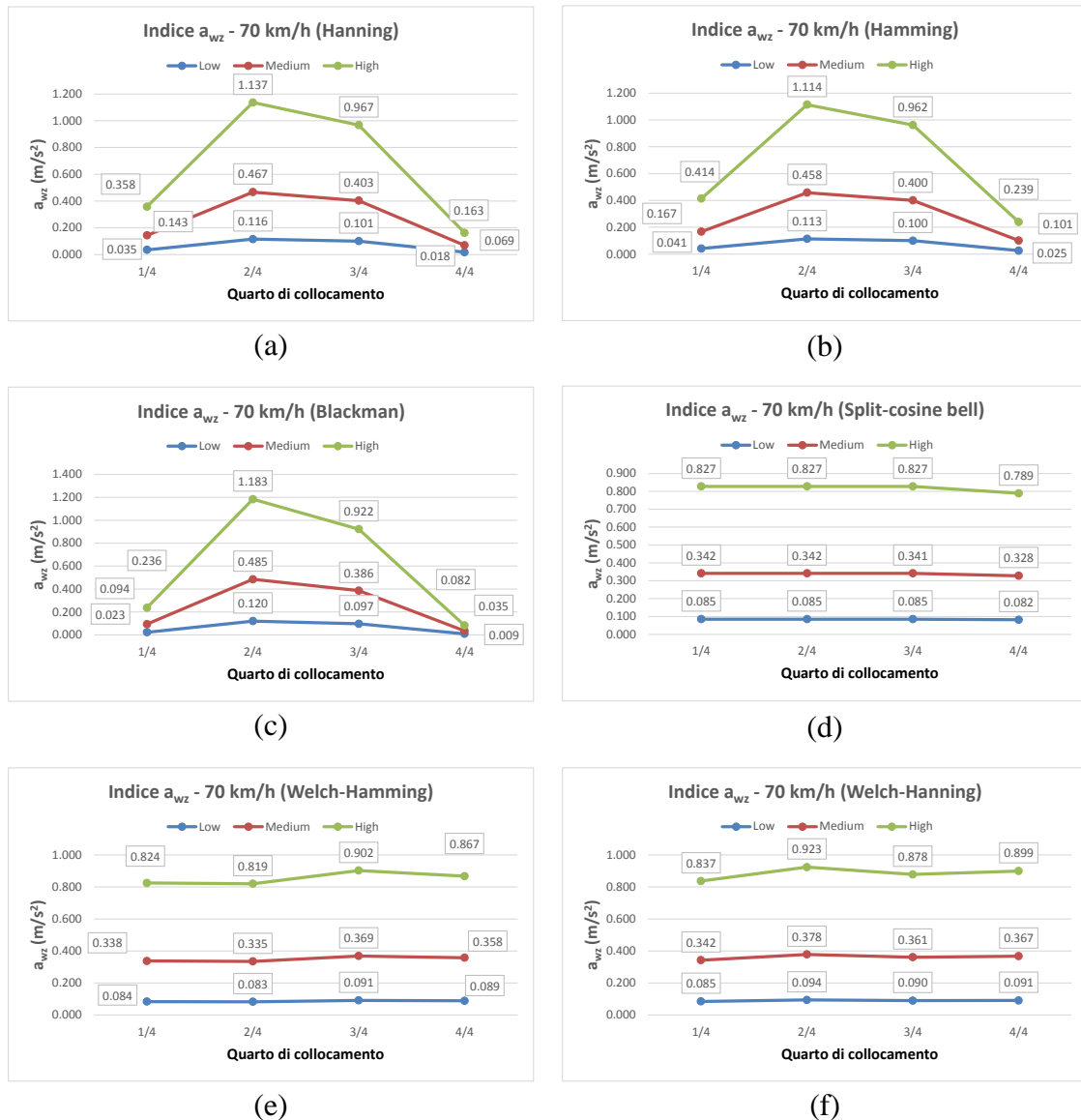


Figura 3-11. Analisi di sensibilità dell'indice a_{wz} per $V=70$ km/h e diversi metodi di stima dello spettro: (a) FFT-Hanning, (b) FFT-Hamming, (c) FFT-Blackman, (d) FFT-Split-Cosine Bell, (e) Welch-Hanning e (f) Welch-Hanning

In aggiunta alla stabilità in funzione della posizione della discontinuità puntuale lungo il profilo, si è preso in esame il valore massimo assunto dall'indicatore a_{wz} e associato a ciascuno dei tre livelli di severità considerati, al variare della funzione di finestrazione e della velocità di marcia. In particolare, è stato preso come riferimento il valore dell'indice ottenuto per la singola buca collocata in corrispondenza del secondo quarto. Come si può notare dai grafici in Figura 3-12, Figura 3-13 e Figura 3-14, le procedure di stima dello spettro dell'accelerazione tramite *FFT* con le finestre di *Hanning*, *Hamming* e *Blackman* producono valori molto simili tra loro. Questi ultimi inoltre, risultano essere sempre maggiori rispetto ai corrispettivi valori ottenuti tramite *FFT* con finestra *Split-Cosine Bell* e per mezzo del periodogramma di Welch con le finestre di *Hanning* e *Hamming*.

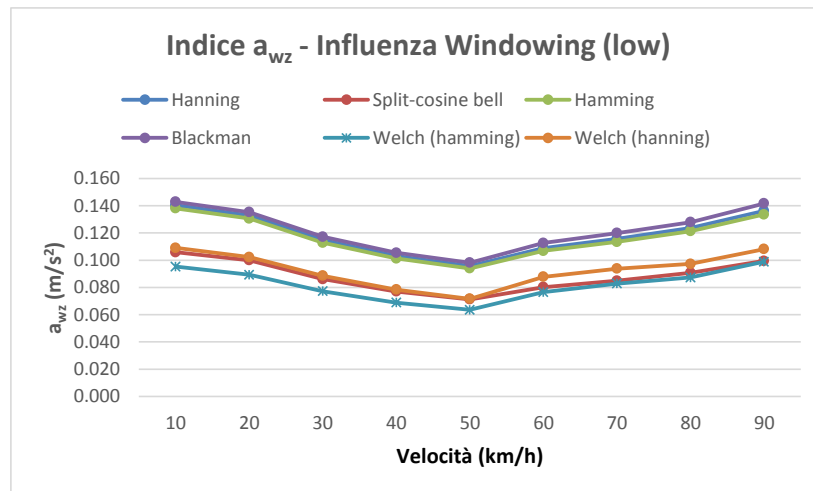


Figura 3-12. Valore indice a_{wz} in funzione della velocità di marcia e della procedura di stima dello spettro dell'accelerazione per la buca con livello di severità basso

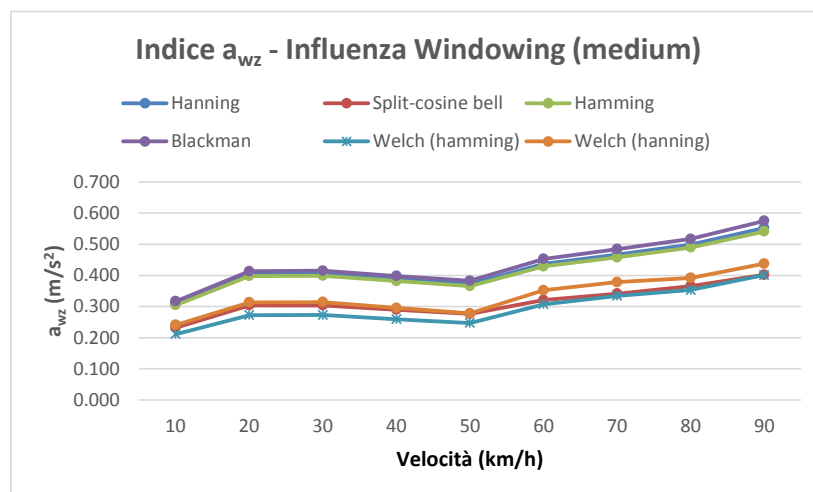


Figura 3-13. Valore indice a_{wz} in funzione della velocità di marcia e della procedura di stima dello spettro dell'accelerazione per la buca con livello di severità medio

Un'ulteriore particolarità riscontrata, riguarda i risultati ottenuti tramite utilizzo della *FFT* con finestra *Split-Cosine Bell*; i quali convergono verso i valori calcolati con il periodogramma di Welch e finestra di *Hanning* per velocità inferiori a 50 km/h, e verso quelli ottenuti con il periodogramma di Welch e finestra di *Hamming* per velocità superiori.

Si segnala inoltre l'andamento anomalo registrato per tutti i casi di analisi inerenti alla valutazione della buca con grado di severità bassa. Per essa infatti, a differenza di quanto ottenuto per il livello di severità alta (Figura 3-14), non si ha un progressivo incremento del valore dell'indice al crescere della velocità di marcia considerata. Tale comportamento sembrerebbe essere dovuto principalmente ai valori molto piccoli che si registrano nel caso di irregolarità di livello basso per tutto l'intervallo di velocità preso in esame; soprattutto se comparati con la soglia limite riportata nella norma ISO 2631-1 e pari a 0.315 m/s^2 , tra i due livelli di comfort definiti come: *not uncomfortable* e *a little uncomfortable*.

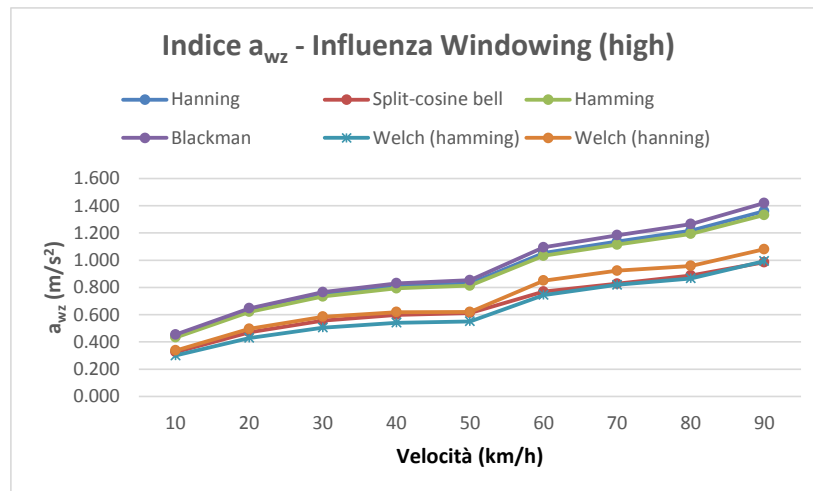


Figura 3-14. Valore indice a_{wz} in funzione della velocità di marcia e della procedura di stima dello spettro dell'accelerazione per la buca con livello di severità alto

A margine di tale studio, è stata inoltre analizzata l'influenza della lunghezza del profilo sul valore assunto dai vari indici per ciascun livello di severità della buca. In particolare, sono stati presi in esame profili di lunghezza pari a 100 m, 200 m e 320 m, posizionando per ciascuno di essi le irregolarità puntuali in corrispondenza delle medesime progressive normalizzate riportate nella precedente Tabella 3-5. Come era lecito attendersi, si riscontra una progressiva riduzione dei valori assunti dai vari indicatori all'aumentare della lunghezza della sezione da analizzare, a parità di irregolarità puntuale considerata (Figura 3-15).

Lo studio descritto in tale sezione, ha evidenziato l'importanza, ai fini del calcolo dell'indice a_{wz} , della scelta della procedura di calcolo per la stima dello spettro dell'accelerazione verticale. Tra le varie metodologie considerate, l'adozione della procedura di calcolo dello spettro caratterizzata dall'uso della Trasformata Rapida di Fourier (*Fast Fourier Transform - FFT*) sul segnale finestrato con la funzione *Split-Cosine Bell*, consente di ottenere andamenti congruenti con quelli riscontrati per gli altri indicatori e soprattutto, ha mostrato una maggiore stabilità al variare della posizione della discontinuità puntuale lungo il profilo esaminato. Tale aspetto risulta indubbiamente di fondamentale importanza in considerazione della non stazionarietà dei segnali dei profili stradali e alla luce della preponderanza di irregolarità puntuali nel caso di pavimentazioni urbane. Per brevità in Figura 3-15 si riportano a titolo esemplificativo solo i risultati ottenuti per l'indice a_{wz} nel caso di velocità pari a 40 km/h e per le sole funzioni di finestratura di *Hanning* e *Split-Cosine Bell*; essendo queste ultime rappresentative dei due macro-comportamenti riscontrati tra le varie procedure di stima dello spettro dell'accelerazione.

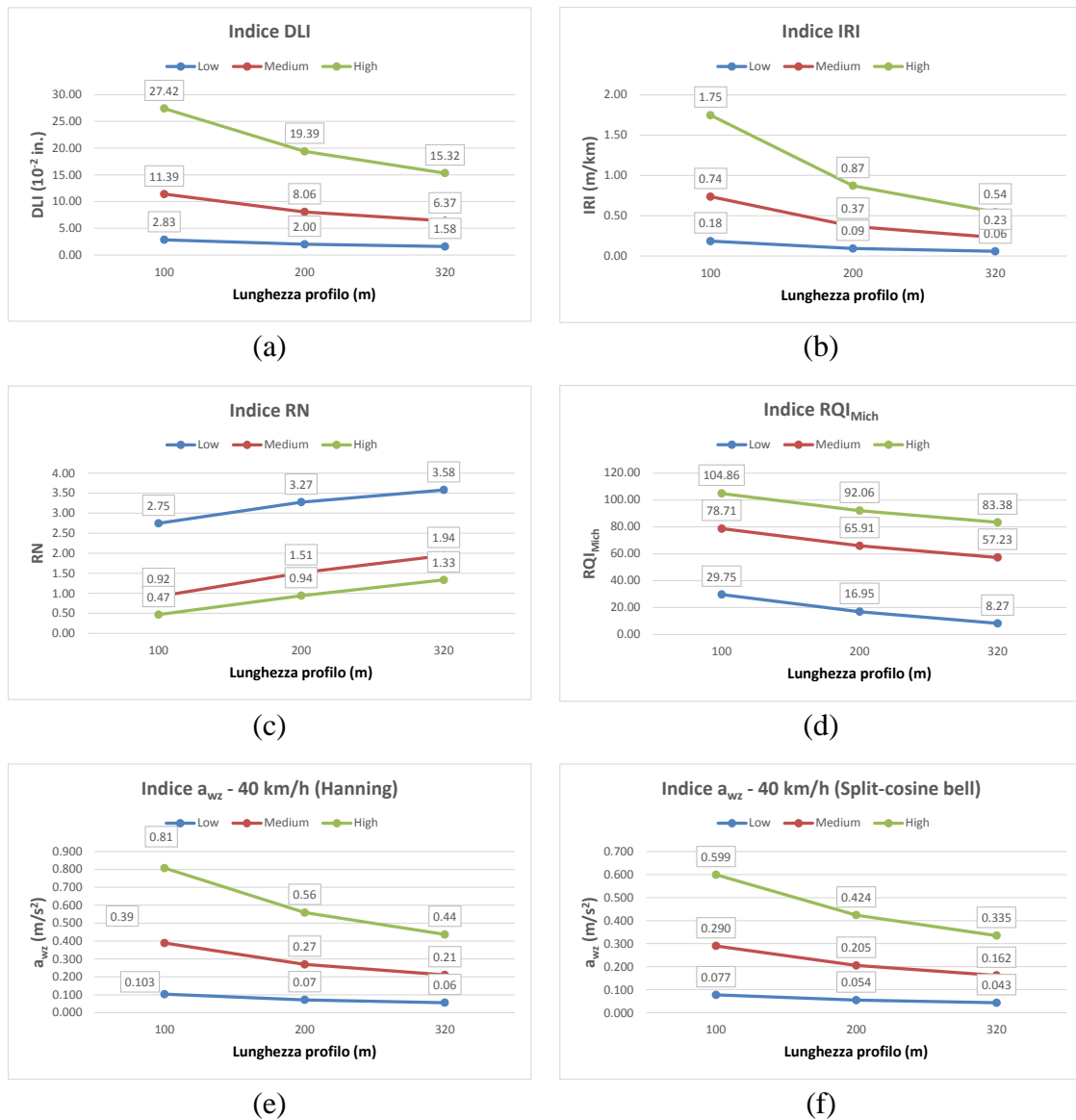


Figura 3-15. Variabilità indici in funzione della lunghezza del profilo: (a) DLI , (b) IRI , (c) RN , (d) RQI_{Mich} , (e) a_{wz} (FFT-Hanning) e (f) a_{wz} (FFT-Split-Cosine Bell)

A margine di tale studio preliminare, si è deciso di verificare la capacità dei vari indici di cogliere la presenza delle medesime irregolarità considerate finora (buche di severità bassa, media e alta) se aggiunte a profili reali casuali. Sono quindi stati presi in esame i profili reali precedentemente descritti al paragrafo § 3.2, i quali sono stati suddivisi in sezioni di lunghezza pari a 100 m; e ai quali sono state aggiunte le singole buche in corrispondenza del secondo quarto di ciascun profilo. Come si può notare dai risultati riportati in Figura 3-16 e Figura 3-17, gli indici IRI e DLI mostrano una variazione quasi nulla nel caso di aggiunta della buca di severità bassa (Figura 3-16a e Figura 3-17a), mentre nel caso di irregolarità più severa si ha un incremento più marcato del valore calcolato per i due indici nel caso di profili di partenza in buone condizioni; mentre si riscontra una progressiva

riduzione del contributo fornito dalle singole irregolarità addizionali mano a mano che si considerano profili più ammalorati.

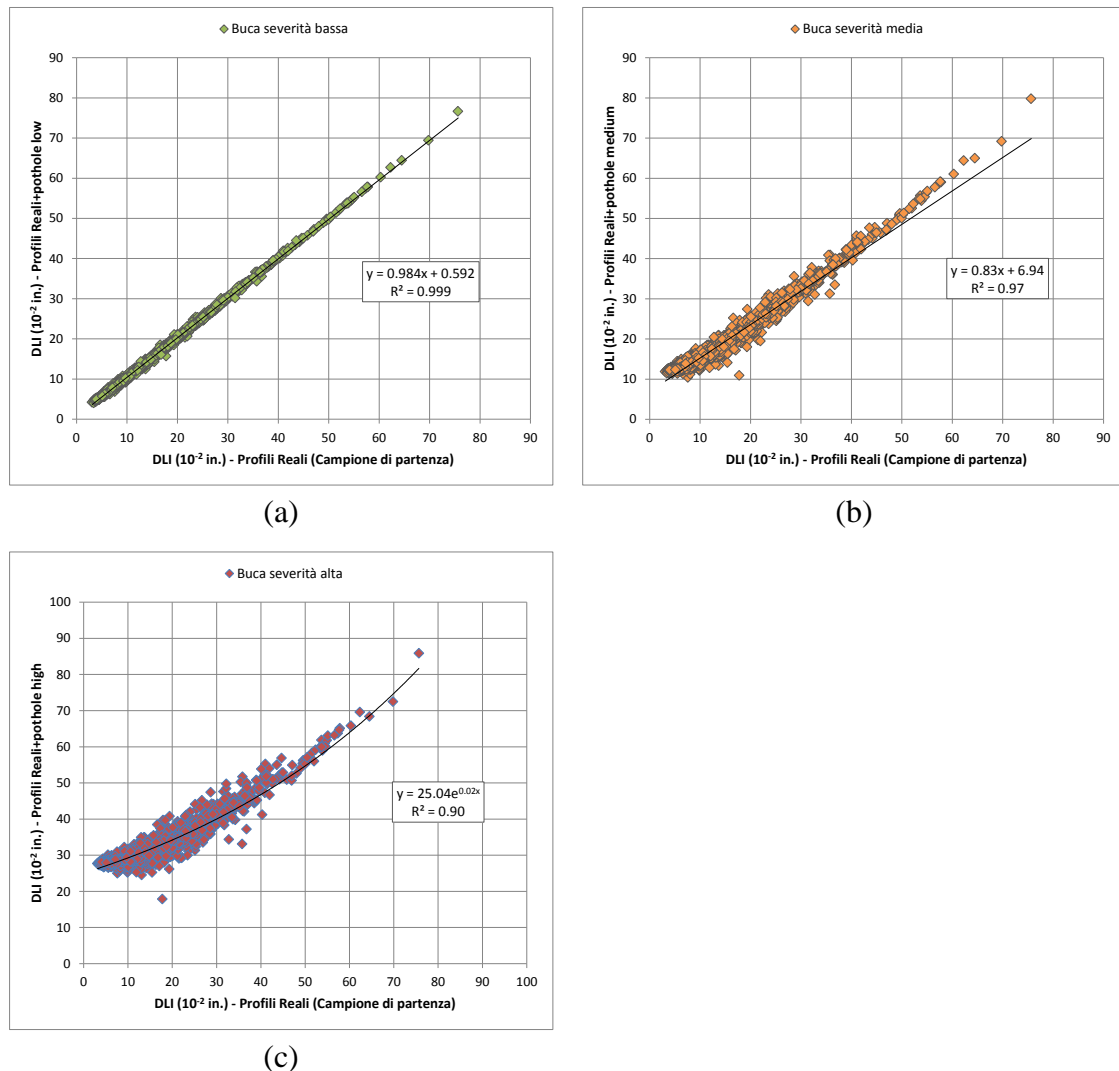


Figura 3-16. Variazione dell'indice DLI aggiungendo una singola buca a un campione di profili reali: (a) severità bassa, (b) severità media e (c) severità alta

Nel caso degli indici di comfort RN e RQI_{Mich} , i cui risultati sono riportati rispettivamente in Figura 3-18 e Figura 3-19, si evince una maggiore sensibilità nei confronti dell'aggiunta di un'irregolarità puntuale, anche se di lieve entità (Figura 3-18a e Figura 3-19a). Anche in questo caso vi è una progressiva riduzione dell'incidenza delle singole buche sul valore finale assunto dai due indicatori, al peggiorare dello stato dei profili di partenza esaminati.

Nel caso invece dell'indice a_{wz} , calcolato per una velocità di marcia pari a 50 km/h e utilizzando la FFT con finestra di segnale di accelerazione verticale tramite funzione $Split-Cosine Bell$, si ha un comportamento più simile agli indici DLI e IRI per quanto concerne l'irregolarità di severità bassa (Figura 3-20a). Nel caso di discontinuità di entità più

severe, si riscontra una maggiore incidenza sul valore ottenuto all'aumentare della gravità. In aggiunta, il numero di profili interessati da una variazione significativa del rispettivo valore dell'indice a_{wz} aumenta in maniera considerevole al crescere della severità della buca considerata.

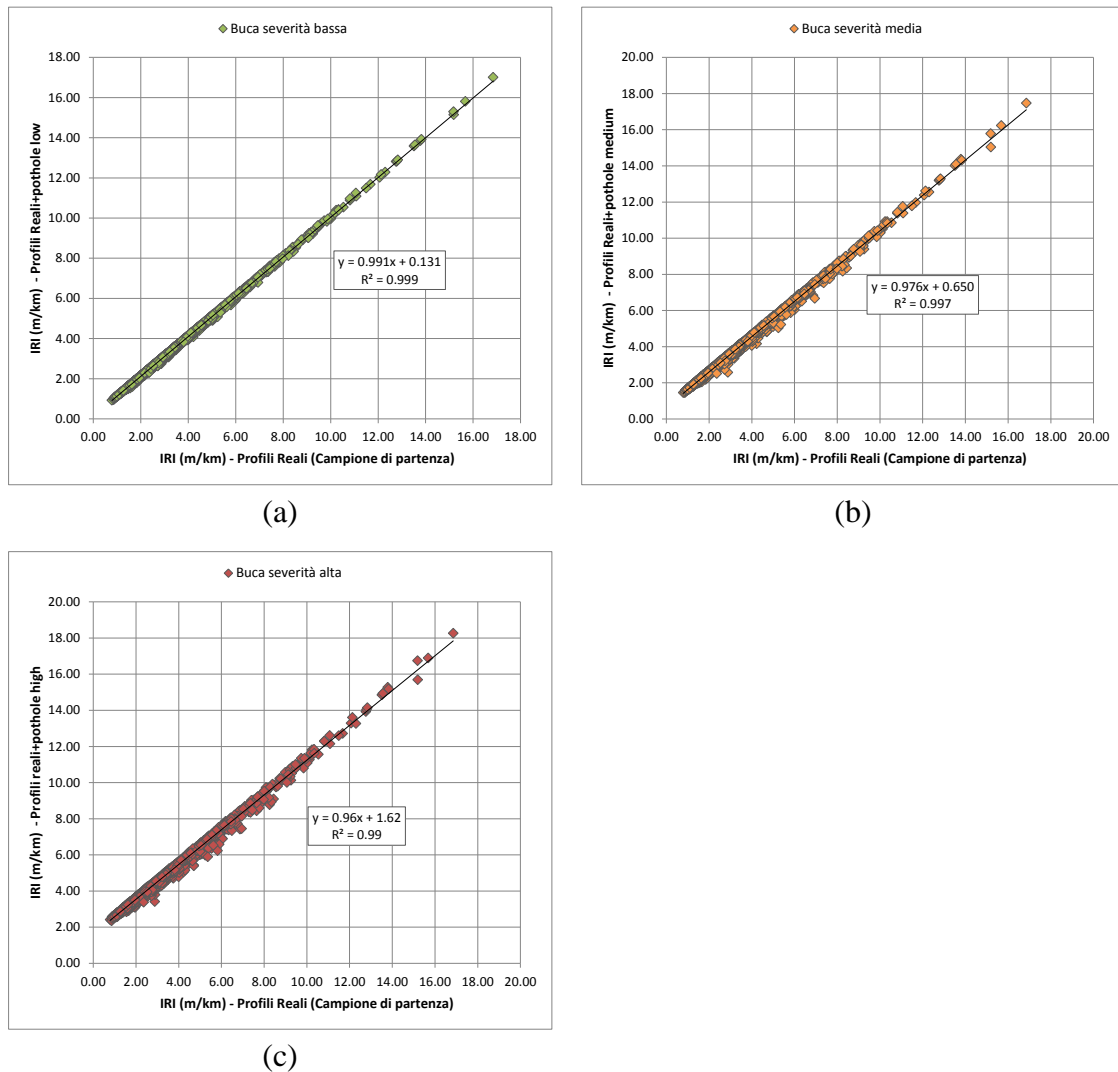


Figura 3-17. Variazione dell'indice IRI aggiungendo una singola buca a un campione di profili reali: (a) severità bassa, (b) severità media e (c) severità alta

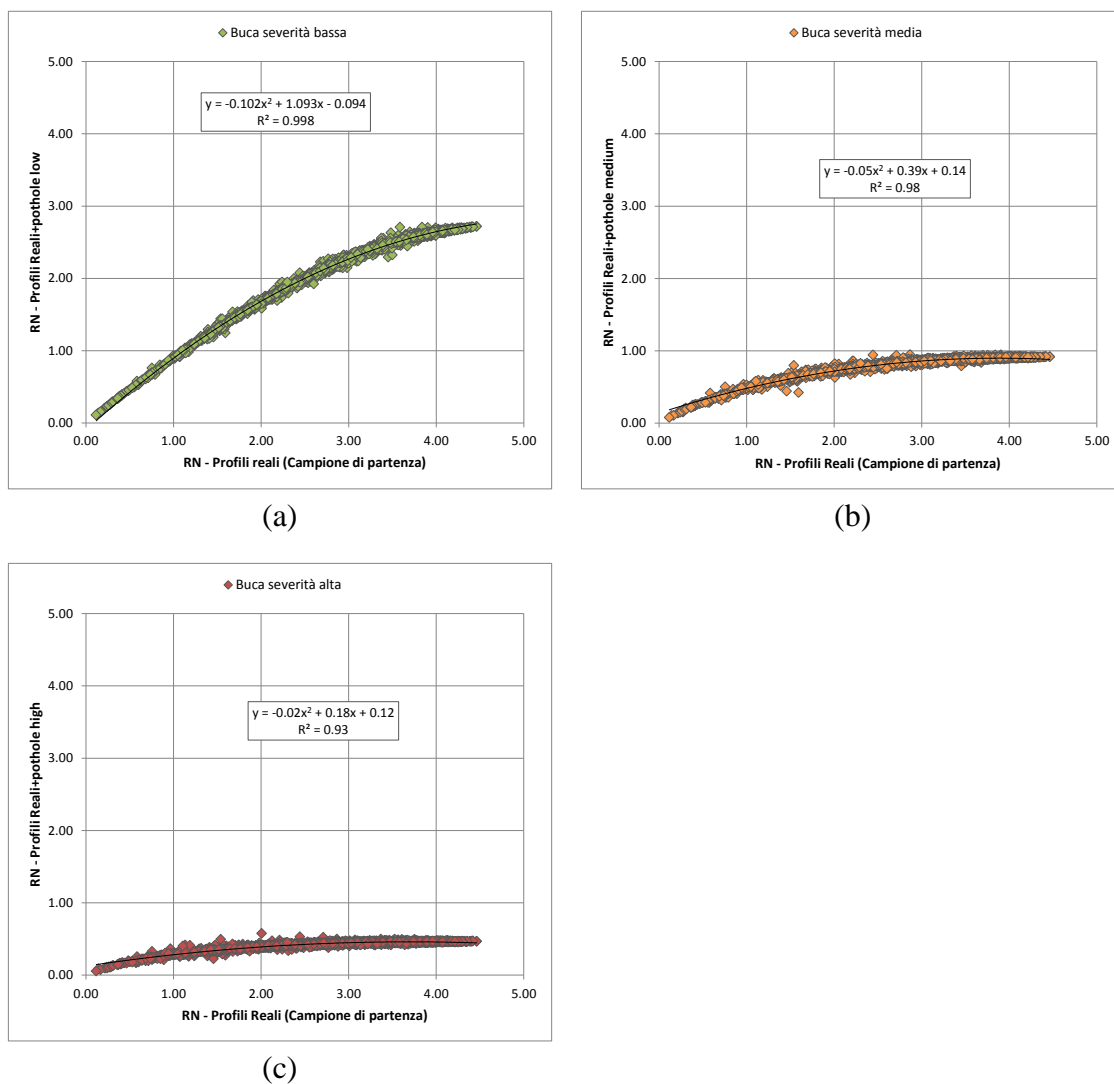


Figura 3-18. Variazione dell'indice RN aggiungendo una singola buca a un campione di profili reali: (a) severità bassa, (b) severità media e (c) severità alta

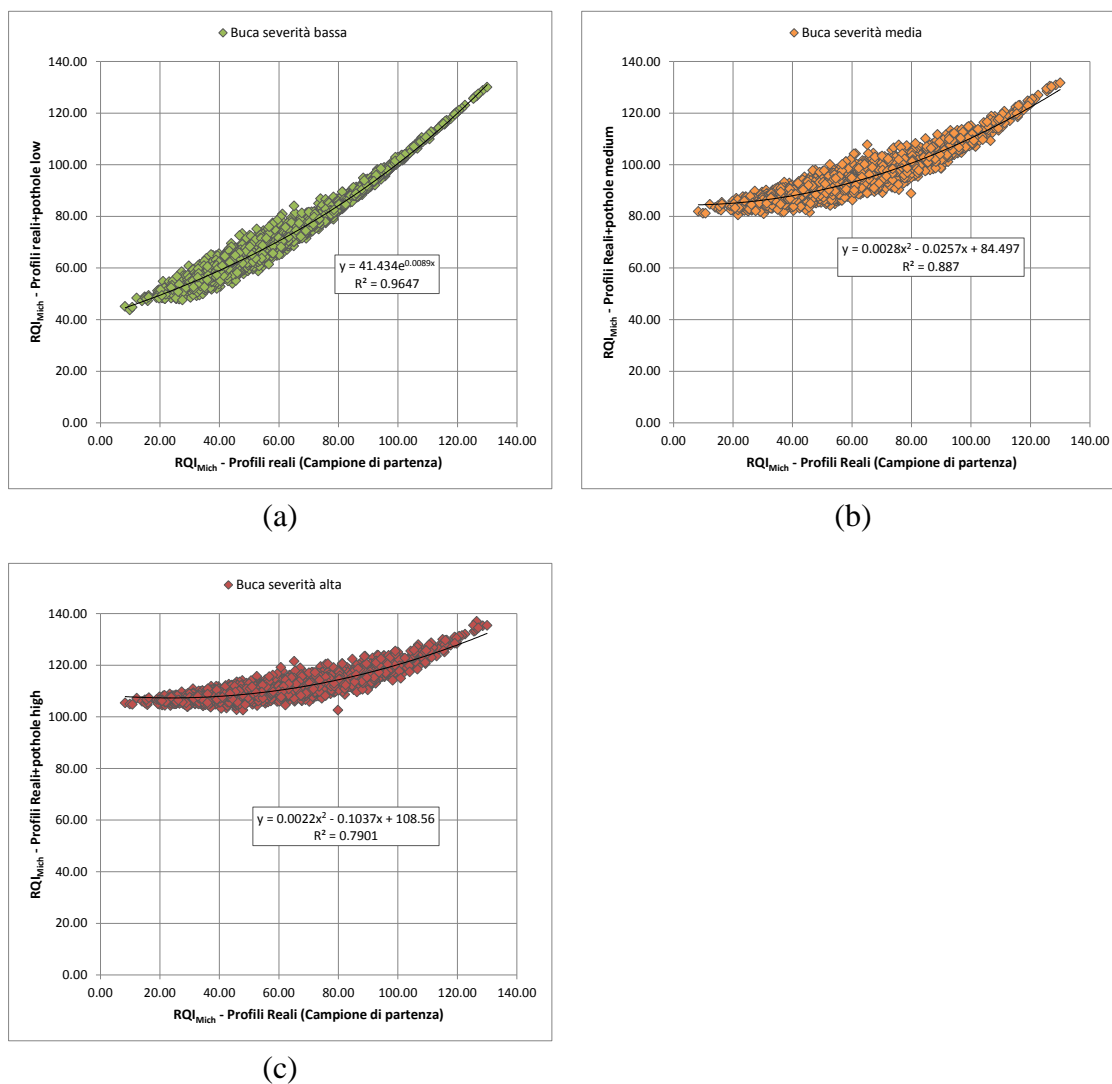


Figura 3-19. Variazione dell'indice RQI_{Mich} aggiungendo una singola buca a un campione di profili reali: (a) severità bassa, (b) severità media e (c) severità alta

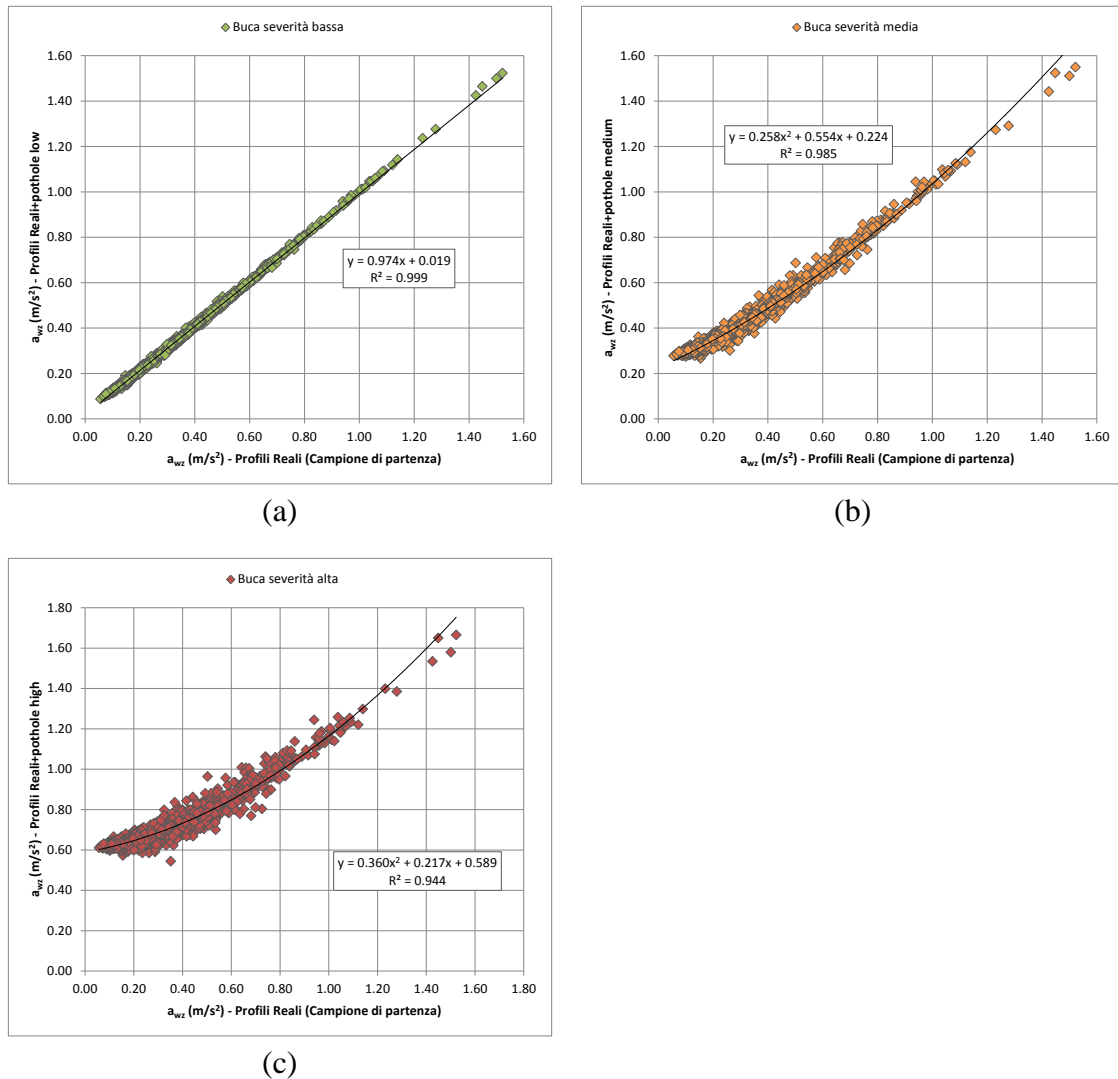


Figura 3-20. Variazione dell'indice a_{wz} aggiungendo una singola buca a un campione di profili reali: (a) severità bassa, (b) severità media e (c) severità alta

3.4. Irregolarità diffuse: analisi di sensibilità

In aggiunta alle irregolarità circoscritte ad aree di estensione limitata, nei profili stradali si può riscontrare la presenza di discontinuità diffuse. A tale scopo, è stata valutata la sensibilità dell'indice a_{wz} , e successivamente anche degli altri indicatori di regolarità, nei confronti di tali irregolarità tramite impiego di profili artificiali ottenuti secondo il procedimento descritto al paragrafo §3.1. Questi ultimi, per come generati, sono segnali stazionari aventi tutte le componenti armoniche presenti con continuità lungo l'intera estensione del profilo da esaminare.

In particolare, sono stati generati e comparati campioni di profili aventi medesimo andamento del PSD ma lunghezza differente; nel dettaglio pari a 100 m, 200 m e 320 m. Per

ogni lunghezza quindi, sono stati generati 1440 profili. Tramite essi, si intende valutare la sensibilità dei vari indicatori nei confronti della variabilità della lunghezza di riferimento prestabilita per il loro calcolo. L'estensione dei profili infatti, a parità di contenuto armonico, incide sul punto di interruzione lungo il singolo periodo caratterizzante ciascuna riga spettrale; il che può inficiare la capacità dei vari metodi di valutazione della regolarità di cogliere e valutare la presenza di irregolarità di determinate lunghezze d'onda. In aggiunta, per ogni lunghezza di analisi, sono state considerate distribuzioni casuali per gli angoli di fase diverse. Come si può notare dai risultati riportati in Figura 3-21, Figura 3-22, Figura 3-23 e Figura 3-24, tutti gli indici consolidati presi in esame presentano un'ottima stabilità nei confronti della lunghezza dei profili e della variabilità degli angoli di fase; infatti le regressioni ottenute sono caratterizzate da valori di intercetta nulla e coefficiente angolare pressoché unitario.

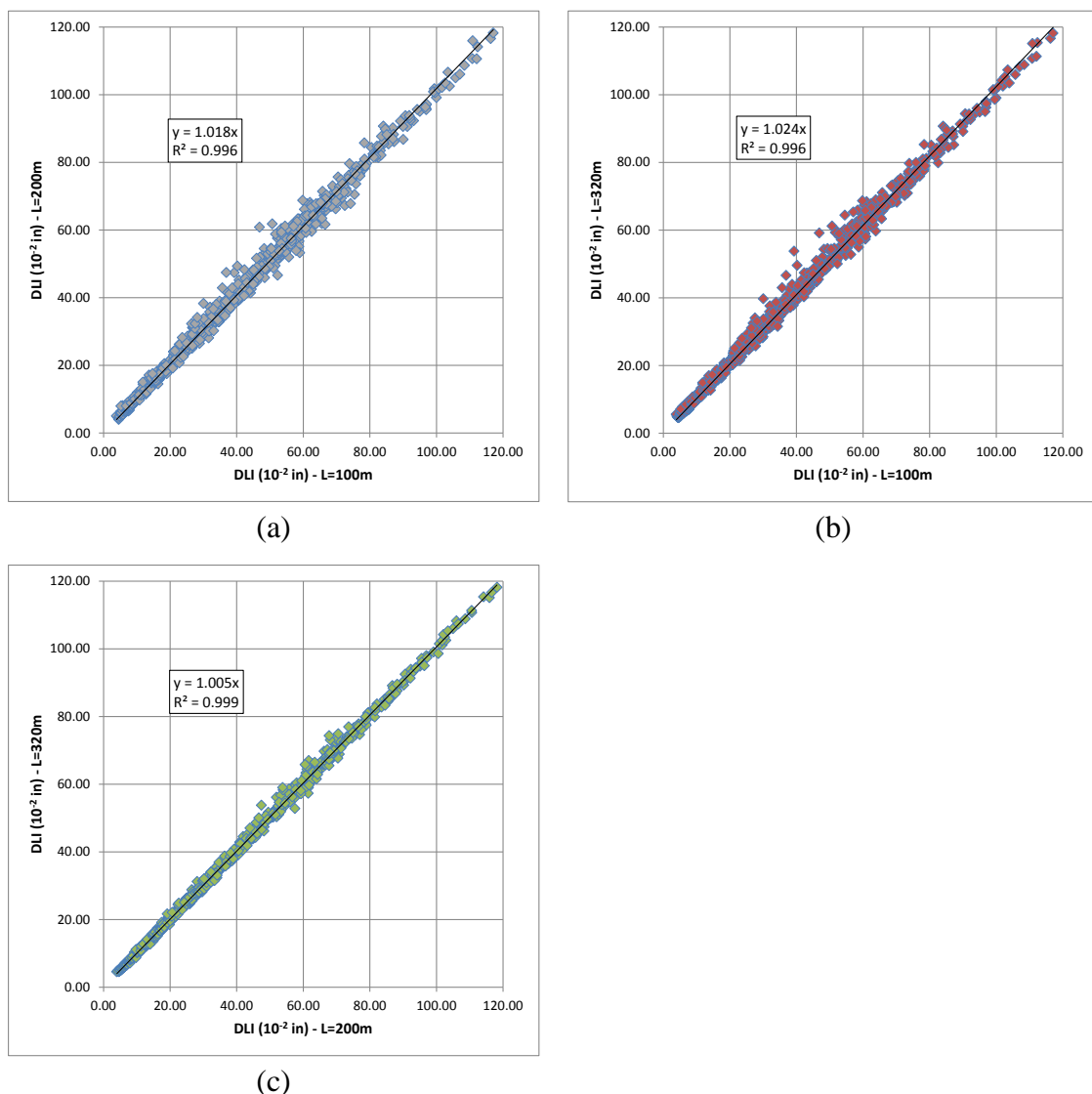


Figura 3-21. Comparazione tra i valori dell'indice DLI ottenuti per i tre diversi campioni di profili: (a) 100m-200m, (b) 100m-320m e (c) 200m-320m

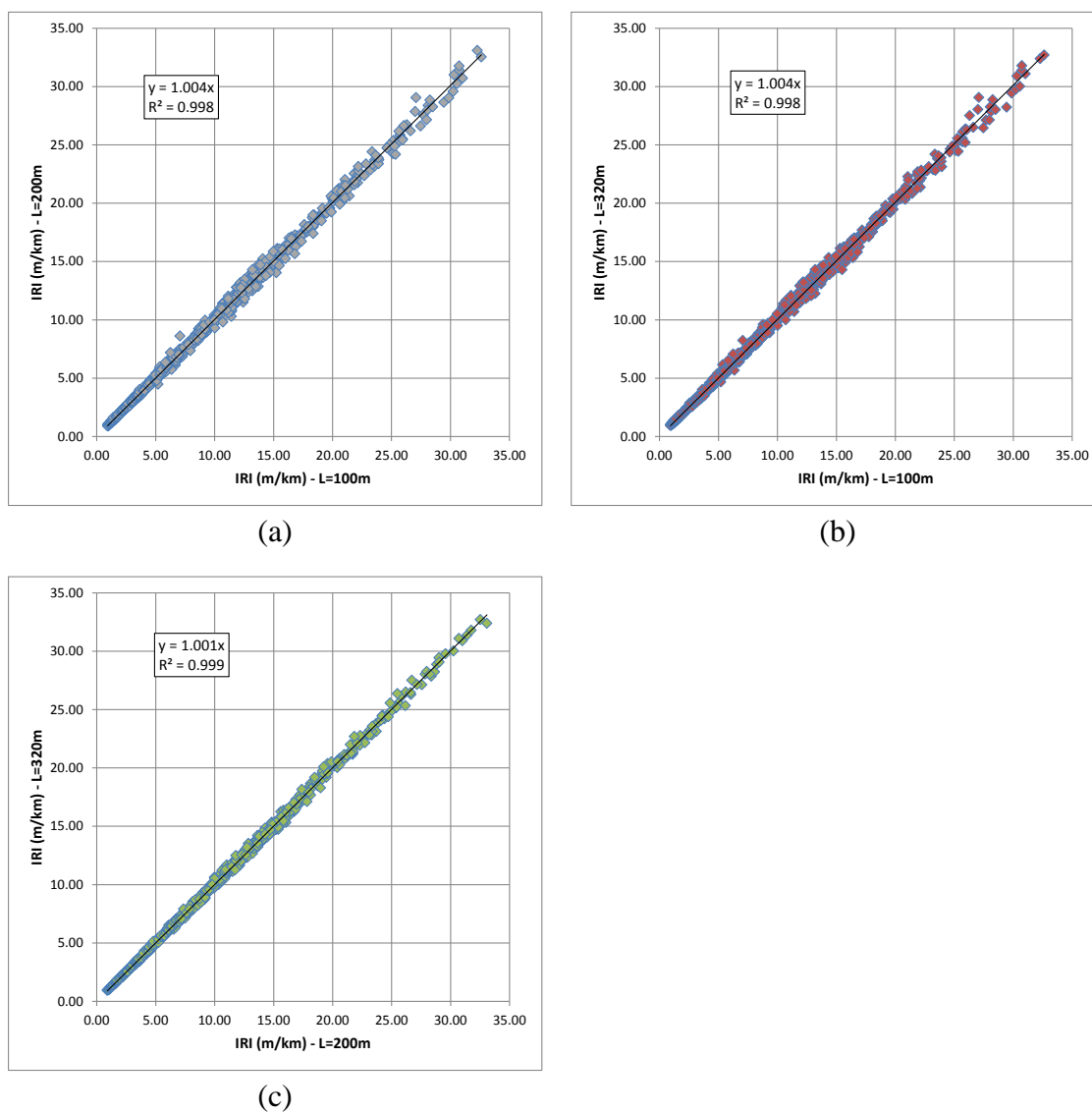


Figura 3-22. Comparazione tra i valori dell'indice IRI ottenuti per i tre diversi campioni di profili: (a) 100m-200m, (b) 100m-320m e (c) 200m-320m

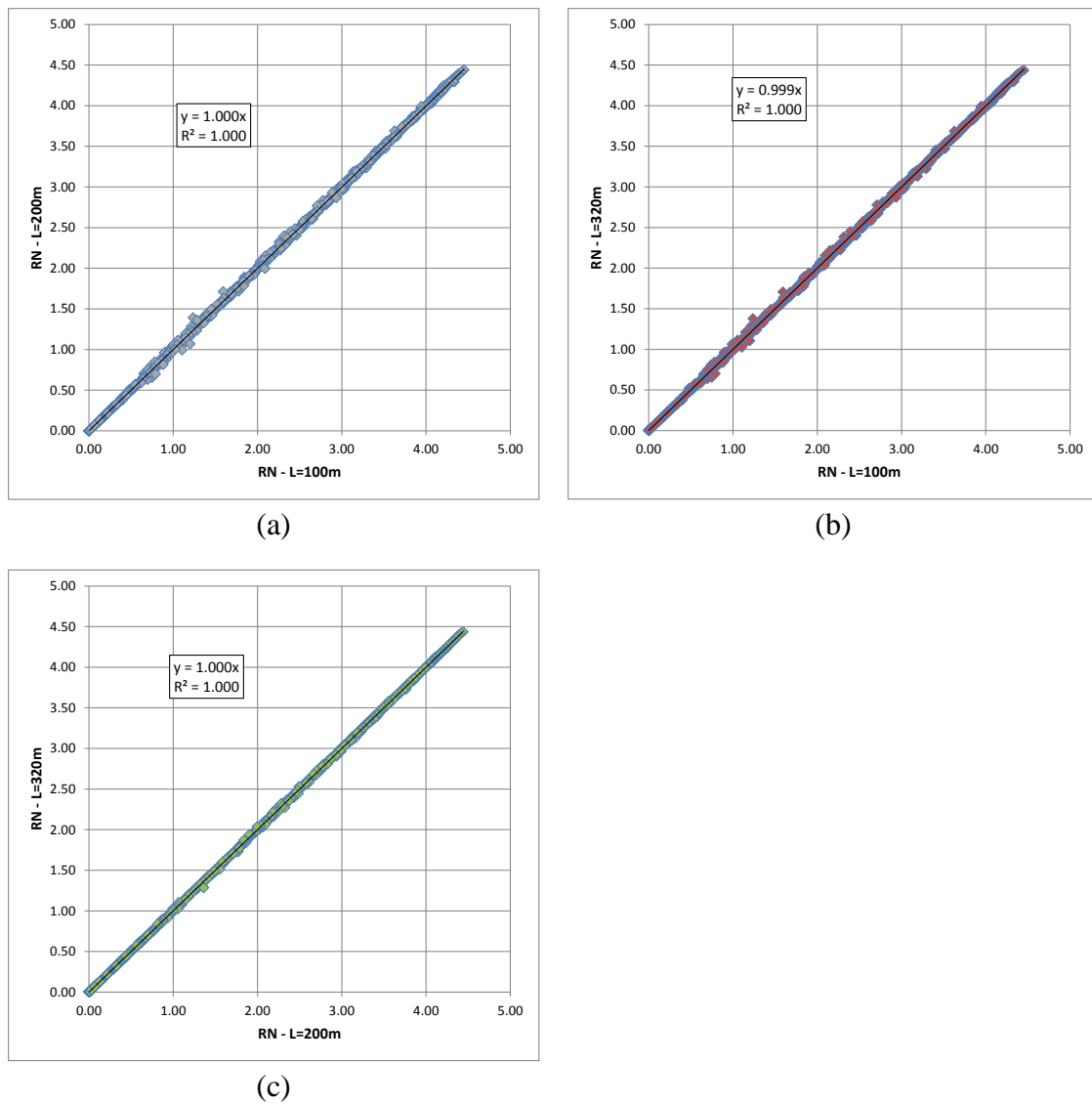


Figura 3-23. Comparazione tra i valori dell'indice RN ottenuti per i tre diversi campioni di profili: (a) 100m-200m, (b) 100m-320m e (c) 200m-320m

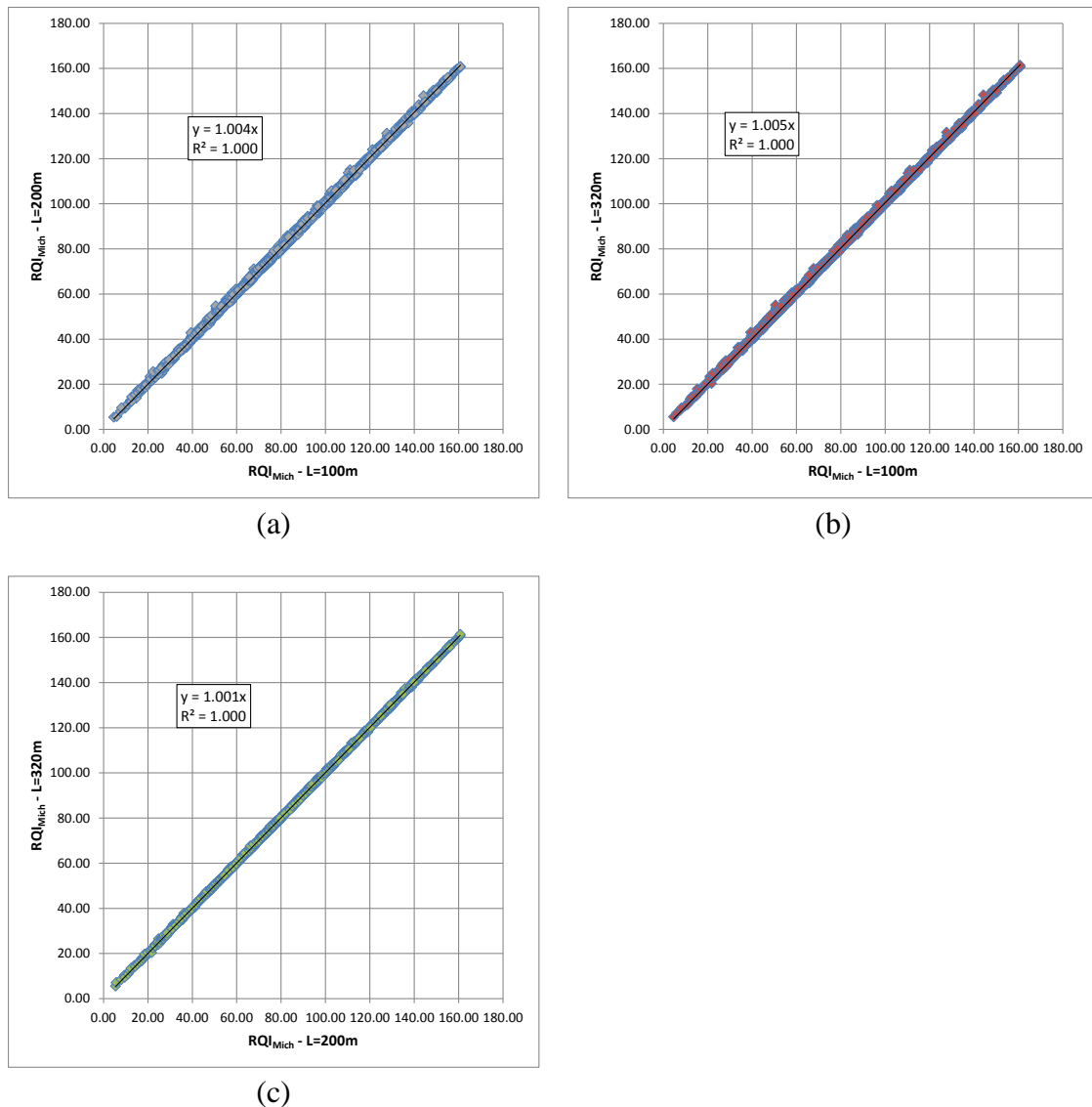
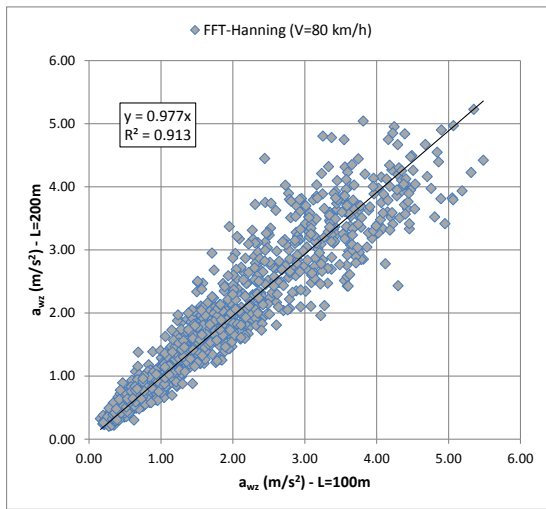
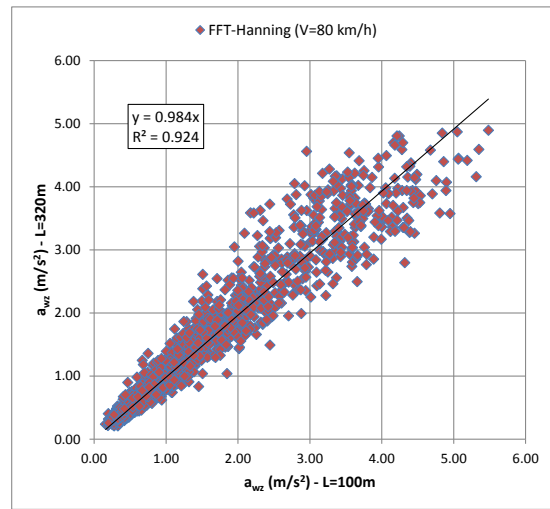


Figura 3-24. Comparazione tra i valori dell'indice RQI_{Mich} ottenuti per i tre diversi campioni di profili: (a) 100m-200m, (b) 100m-320m e (c) 200m-320m

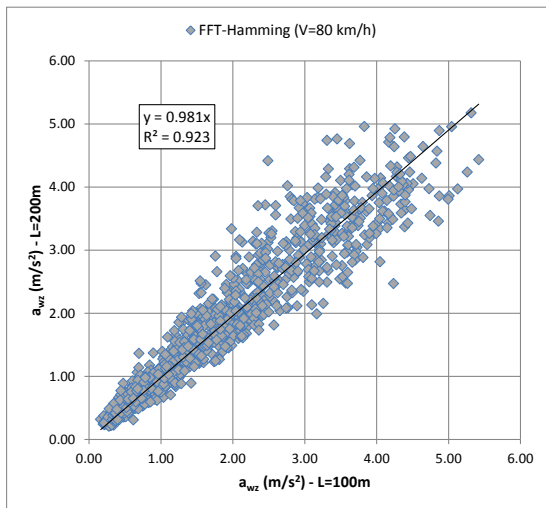
Per quanto concerne i risultati ottenuti per l'indice a_{wz} , i grafici in Figura 3-25, dove per semplicità si riportano solo i confronti tra i profili di 100 m con le altre due lunghezze esaminate per una velocità di marcia di 80 km/h, mostrano come in generale vi sia una soddisfacente correlazione per tutti i metodi di stima dello spettro dell'accelerazione verticale; ma anche in questo caso, un miglior risultato si ottiene tramite l'impiego della *FFT* con finestra *Split-Cosine Bell* (Figura 3-25g e Figura 3-25h). In quest'ultimo caso infatti, i risultati convergono verso quelli ottenuti per gli altri indicatori di regolarità, presentando, rispetto alle altre metodologie di stima dello spettro, una minor dispersione dei dati attorno alla retta di regressione.



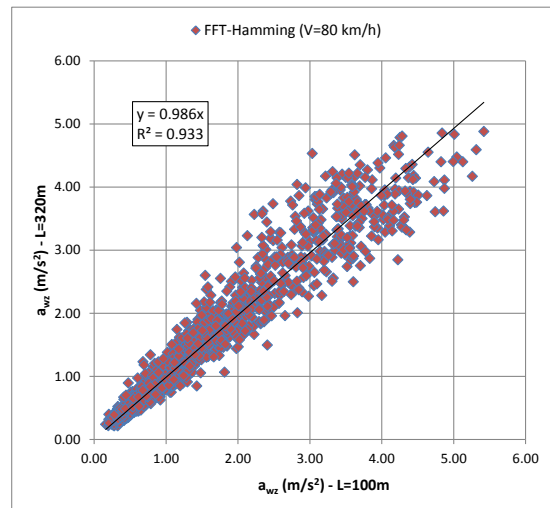
(a)



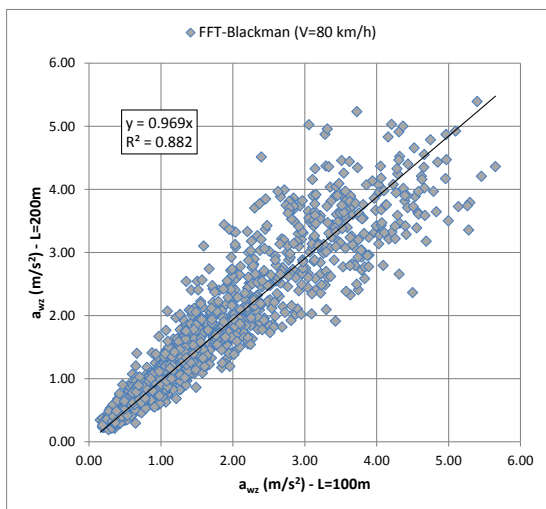
(b)



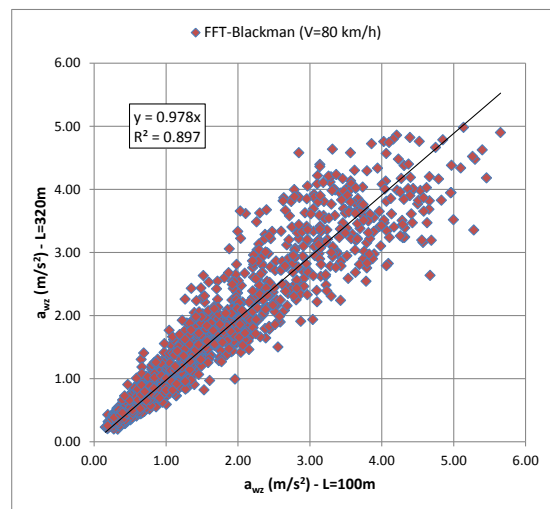
(c)



(d)



(e)



(f)

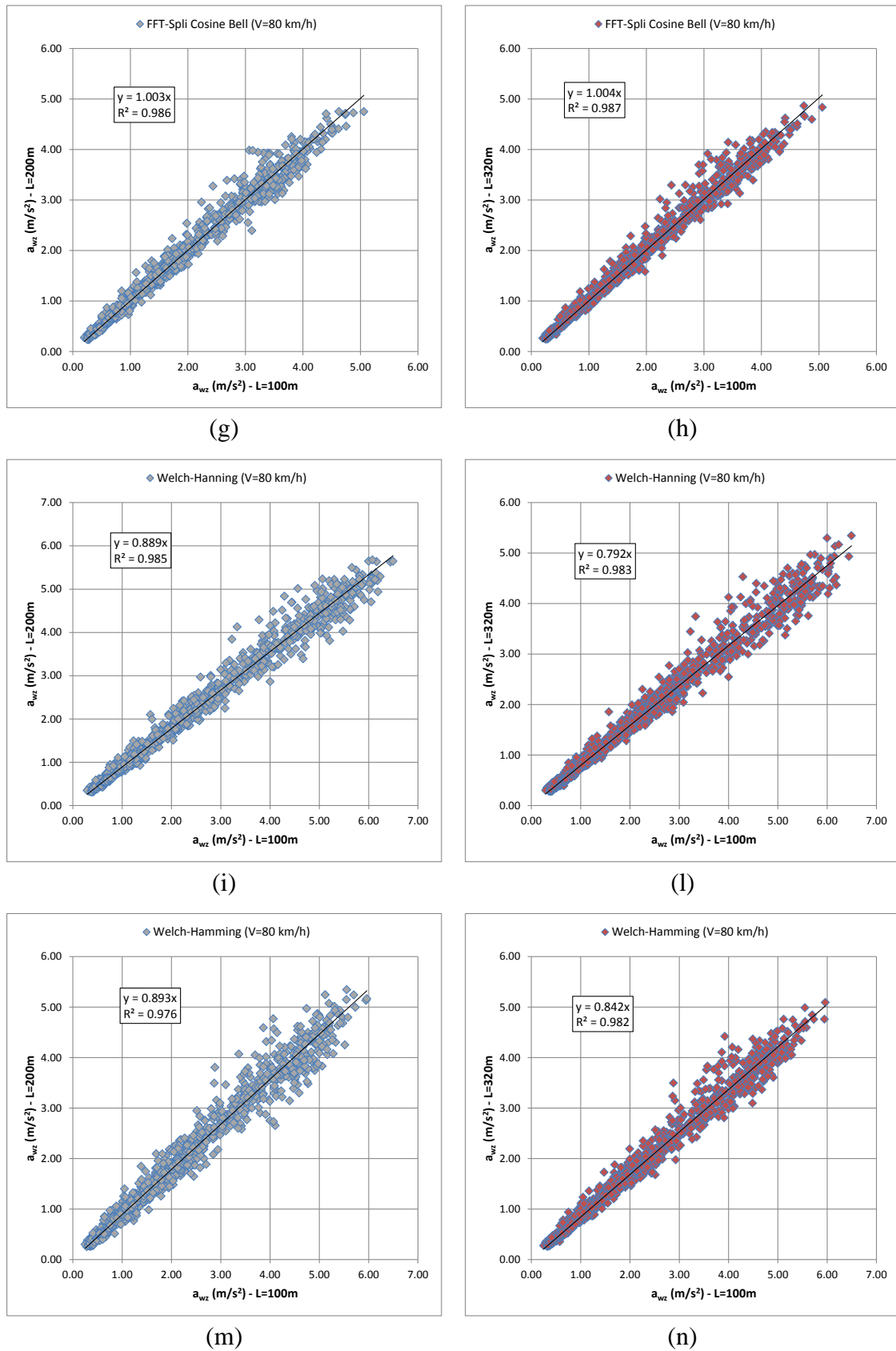


Figura 3-25. Comparazione tra i valori dell'indice a_{wz} ottenuti adottando diversi metodi di stima spettrale

A conclusione di queste due analisi preliminari, incentrate sulle irregolarità puntuali e diffuse, appare evidente la sensibilità dell'indice a_{wz} nei riguardi del metodo impiegato per la stima dello spettro dell'accelerazione verticale. In entrambi i casi di studio, i risultati migliori si sono ottenuti adottando la procedura che prevede l'impiego della *Fast Fourier Transform (FFT)* con finestrata del segnale tramite la *Split-Cosine Bell*. Per le analisi successive, finalizzate alla comparazione e correlazione tra l'indice a_{wz} e gli altri indicatori di regolarità, sarà adottata suddetta procedura.

3.5. Confronto tra indice a_{wz} e altri indici di comfort (RN, RQI_{Mich} , RQI_{Mn})

Determinata quindi la miglior procedura di calcolo dell'indice a_{wz} , il primo passo ha riguardato la comparazione della valutazione del livello di comfort fornita dai diversi metodi presi in esame, nel caso di profili reali. Come già anticipato, l'analisi mira a verificare le differenze derivanti dall'adozione di uno dei diversi metodi proposti in letteratura e al contempo, valutare la capacità dell'indice a_{wz} di affiancare i metodi di valutazione del comfort oramai consolidati. Appare opportuno ricordare nuovamente, come, benché i diversi metodi considerati in questa tesi (RN , RQI_{Mich} , RQI_{Mn}) derivino tutti da correlazioni tra livelli di regolarità di sezioni prova e *Mean Panel Ratings (MPR)*, non esista ad oggi alcuna procedura standardizzata per il rilievo del parere soggettivo degli utenti stradali.

Analizzando le correlazioni intercorrenti tra i tre indici consolidati, si sono riscontrati buoni valori degli indici di correlazione per le regressioni trovate ($R^2 > 0.7$), come si può verificare in Figura 3-26, 3-27 e 3-28.

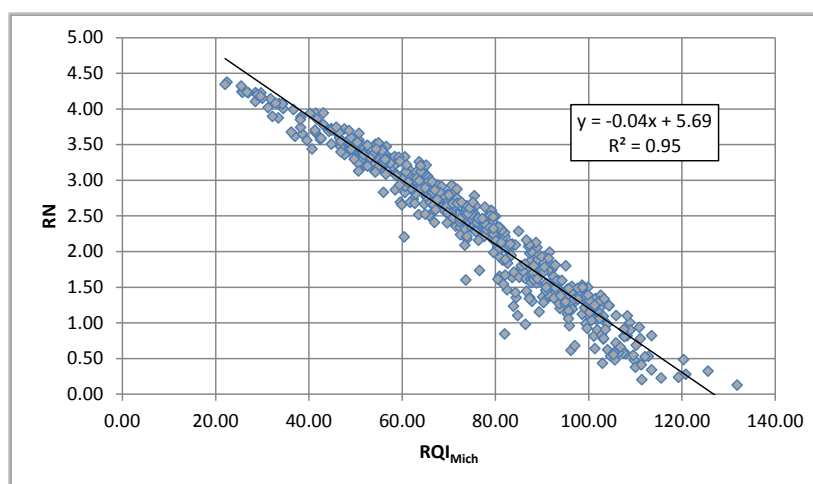


Figura 3-26. Relazione tra i valori del Ride Number e del Michigan Ride Quality Index

I tre indici però, presentano scale di valutazioni molto diverse tra loro, come nel caso del RQI_{Mich} e del RN (per le varie classi di comfort relative a ciascun indice si rimanda alla loro descrizione fornita al capitolo 1). Ciò comporta la possibilità che uno stesso profilo

stradale possa esser valutato in maniera diversa a seconda del tipo di indicatore di comfort prescelto. A tale scopo, sono stati individuati quattro livelli di comfort comuni tra i vari indici, le cui soglie sono riportate nella Tabella 3-6. Successivamente quindi, è stata determinata la percentuale di profili giudicata come appartenente ad una medesima classe di comfort per ogni coppia di indici. Come si può notare dal grafico in Figura 3-29, le percentuali di accordo (*percentage agreement*) superano il 60% (61.24%) solo nel confronto tra RQI_{Mich} e RQI_{Mn} .

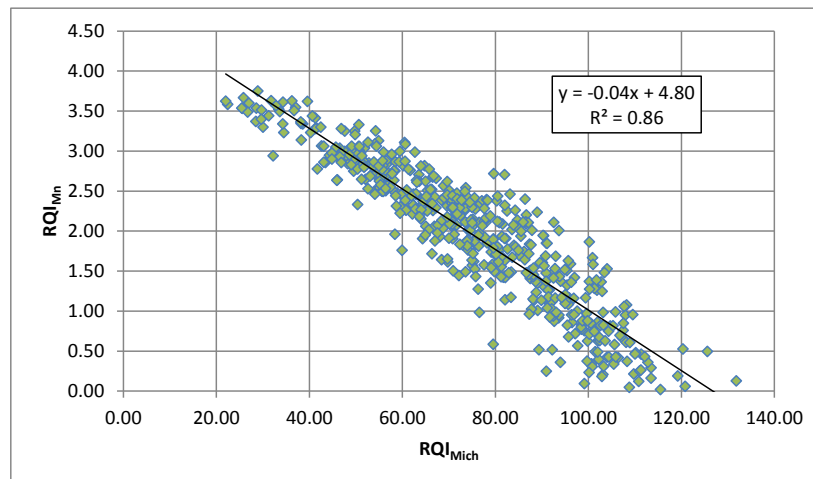


Figura 3-27. Relazione tra i valori del Michigan Ride Quality Index e del Minnesota Ride Quality Index

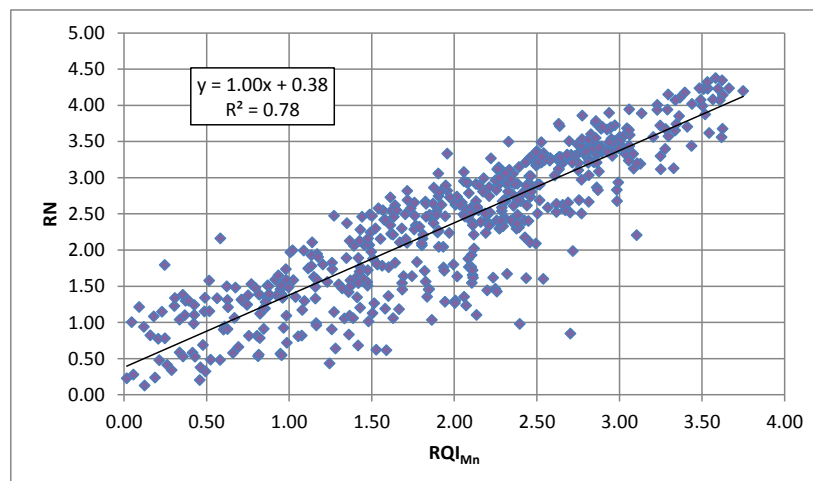


Figura 3-28. Relazione tra i valori del Minnesota Ride Quality Index e del Ride Number

Tabella 3-6. Livelli di comfort uniformati per gli indici RN , RQI_{Mich} , RQI_{Mn} e a_{wz}

Livello di comfort	RN	RQI_{Mich}	RQI_{Mn}	a_{wz} (m/s^2)
<i>Very Good</i>	4.1-5.0	0-30	4.1-5.0	<0.315
<i>Good</i>	3.1-4.0	31-54	3.1-4.0	0.315-0.565
<i>Fair</i>	2.1-3.0	55-70	2.1-3.0	0.565-0.9
<i>Poor and Very Poor</i>	0.0-2.0	>70	0.0-2.0	>0.9

In aggiunta, la minore percentuale si riscontra proprio tra il *Ride Number* e il *Minnesota Ride Quality Index*, i quali presentano una scala di valutazione praticamente analoga. Un tale risultato poteva essere preventivato analizzando la relazione trovata tra i due indici e riportata in Figura 3-28. Come si può notare infatti, a fronte di un coefficiente angolare unitario, si ha un valore non nullo dell'intercetta (nello specifico pari a 0.38). Tale valore, in una scala di valutazione compresa tra 0-5 ha indubbiamente un'incidenza alquanto elevata, determinando, con buona probabilità, il passaggio da una classe di comfort a quella adiacente a seconda del tipo di indice impiegato per la valutazione dei profili stradali.

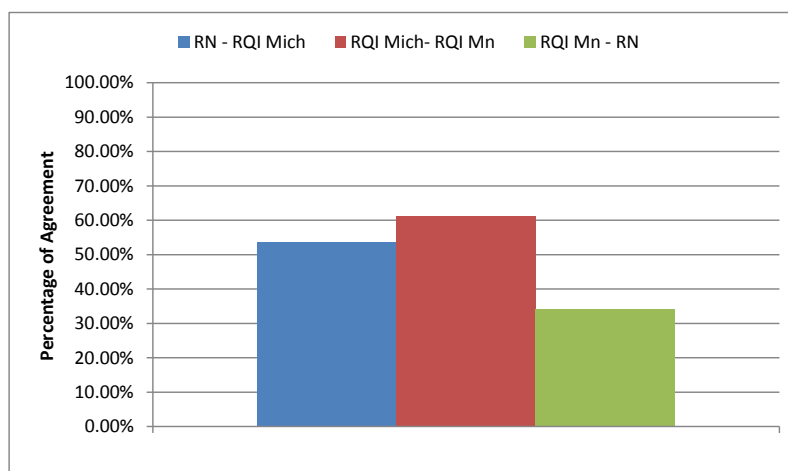


Figura 3-29. Percentuale di accordo nella valutazione del campione di profili reali

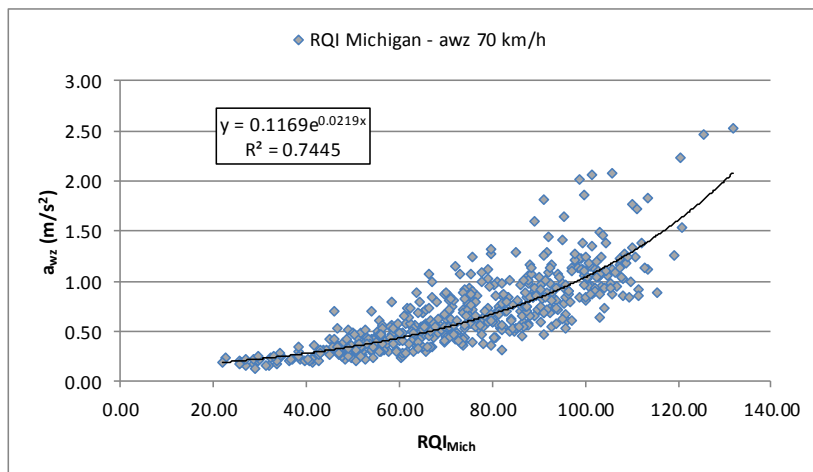
In particolare, come si può notare in Figura 3-30, in cui è riportata la ripartizione percentuale tra le varie classi di qualità di marcia (*Ride Quality Level*) del campione di profili reali e determinata per i tre indici di comfort, l'adozione del RQI_{Mn} sembrerebbe essere una scelta più conservativa e a favore di sicurezza rispetto agli altri due indicatori.



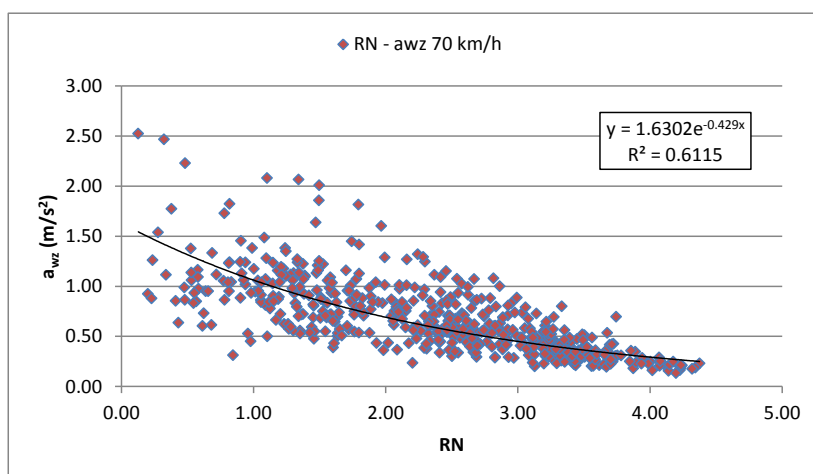
Figura 3-30. Ripartizione percentuale del campione di profili reali tra i quattro livelli di Ride Quality

Per quanto concerne il confronto tra i tre indici di comfort consolidati e l'indice a_{wz} , sono state ottenute regressioni esponenziali del tipo riportato in Figura 3-31, con un anda-

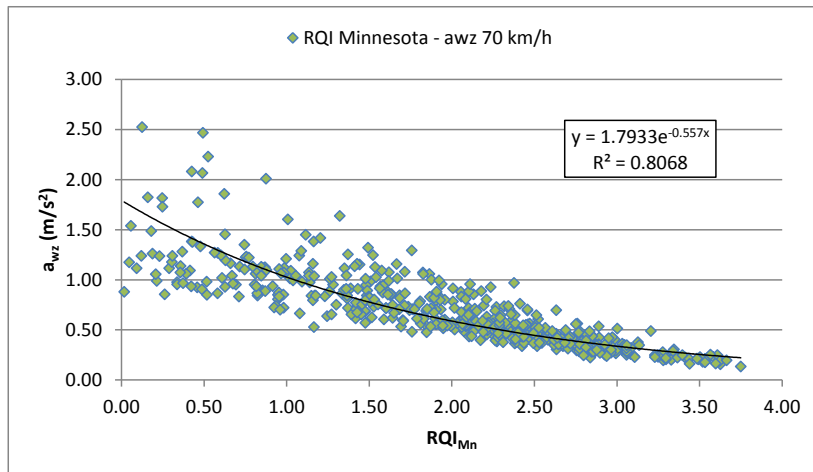
mento del coefficiente di correlazione R^2 crescente al decrescere della velocità di marcia considerata (Figura 3-32).



(a)



(b)



(c)

Figura 3-31. Correlazioni tra l'indice a_{wz} ($V=70$ km/h) e gli altri indicatori di comfort

Tale andamento sembrerebbe dipendere dalla minore sensibilità dei valori calcolati per l'indice a_{wz} alla presenza di determinate irregolarità lungo i profili, nel caso di velocità di marcia inferiori. Come si può notare infatti, comparando i grafici in Figura 3-31 con i corrispettivi in Figura 3-33, si ha una minore dispersione dei valori di a_{wz} intorno alla curva di regressione nel caso di velocità più bassa.

Sempre con riferimento alle classi di comfort e alle rispettive soglie riportate nella Tabella 3-6, sono state quindi determinate le percentuali di accordo tra l'indice a_{wz} e gli altri indicatori, al variare della velocità di marcia considerata per il modello numerico *full-car* (Figura 3-34).

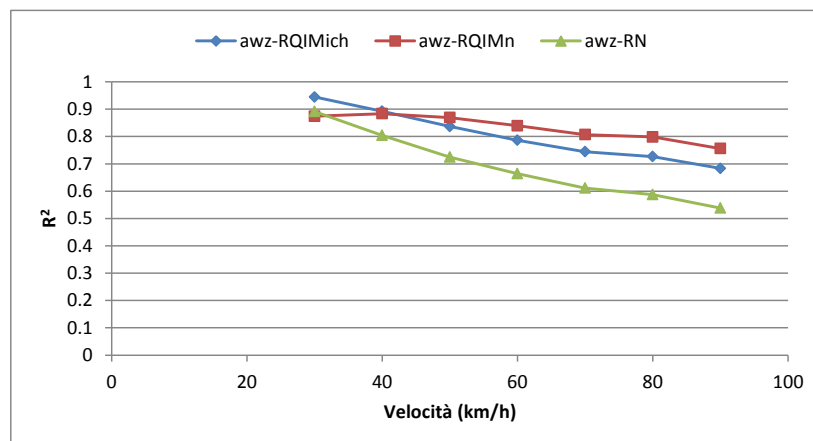
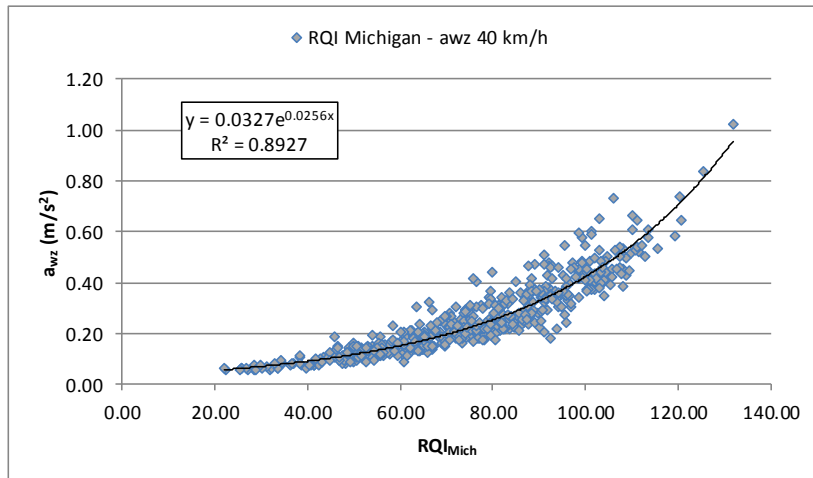
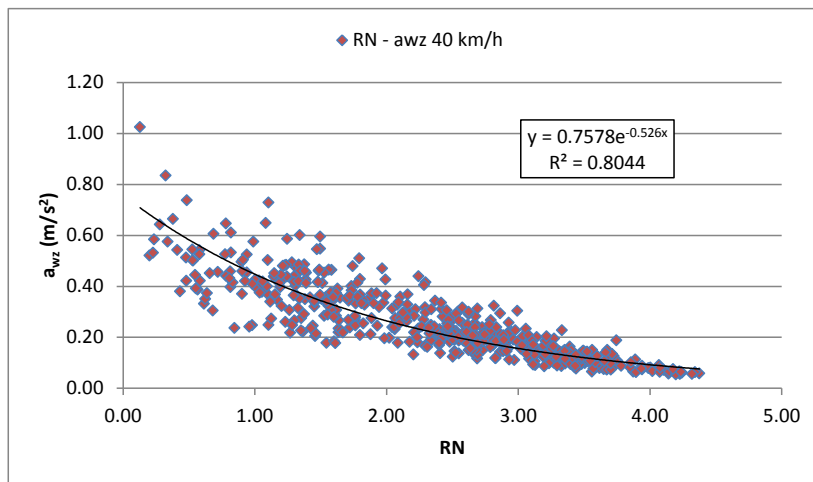


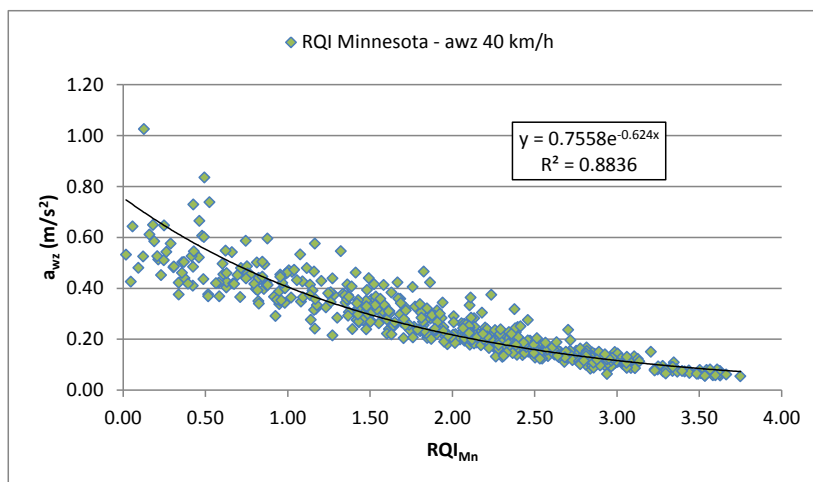
Figura 3-32. Andamento del coefficiente di correlazione R^2 in funzione della velocità di marcia



(a)



(b)



(c)

Figura 3-33. Correlazioni tra l'indice a_{wz} (V=40 km/h) e gli altri indicatori di comfort

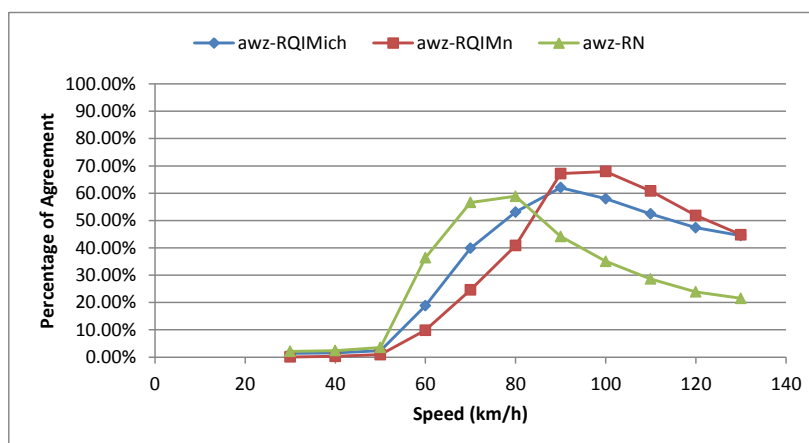


Figura 3-34. Percentuale di agreement tra l'indice a_{wz} e gli altri indicatori al variare della velocità di marcia

Come si può notare, i rispettivi valori di picco si raggiungono in corrispondenza di velocità di transito diverse: 80 km/h per il RN, 90 km/h per il $RQIMich$ e 100 km/h per il $RQIMn$. Il risultato ottenuto trova parziale riscontro nell'algoritmo di calcolo del *Ride Number* (14), il quale prevede per un parametro equiparabile alla velocità impiegata per il calcolo dell'indice *IRI*, l'inserimento di un valore pari a 80. In generale, comunque, il risultato ottenuto conferma la maggior severità della valutazione di un profilo stradale eseguita tramite l'adozione del *Minnesota Ride Quality Index* ($RQIMn$). Il fatto che i valori di picco si attestino in un intervallo compreso tra 58-70%, deriva dalla diversa tipologia di veicolo modellato rispetto a quelli impiegati durante i test di raccolta dei *Mean Panel Ratings* (*MPR*), effettuati per la definizione dei singoli indici consolidati.

Lo studio condotto ha sicuramente confermato la necessità di implementare un metodo standardizzato di raccolta dei pareri da parte degli utenti stradali, in modo da poter meglio confrontare i risultati ottenuti da diversi studi sperimentali.

Accanto a ciò, si è verificato come l'indice a_{wz} presenti delle buone correlazioni con i vari indici di comfort consolidati, presentando al contempo il vantaggio rispetto ad essi, di poter essere impiegato per diverse categorie di strade, ognuna caratterizzata da un proprio intervallo di velocità di progetto.

3.6. Confronto tra indice a_{wz} e classificazione profili ISO 8608

Gli indici consolidati descritti nel capitolo 1 risultano essere tutti indicatori indipendenti dalla velocità di marcia. L'unica parziale eccezione riguarda l'*IRI*, per il quale vengono adottate diverse soglie di accettabilità in funzione della categoria funzionale e della velocità di progetto caratteristici della strada esaminata.

Da questo punto di vista, l'utilizzo dell'indice a_{wz} consente di poter differenziare la valutazione dello stato di una pavimentazione stradale direttamente in funzione della velocità di transito. A tale scopo, si è analizzata la distribuzione dei valori assunti dall'indice a_{wz} per ogni classe di profilo ISO 8608 in cui sono stati raggruppati i profili reali descritti al

paragrafo §3.2. Stessa operazione è stata quindi eseguita anche per l'indice *IRI*, i cui risultati si possono osservare in Figura 3-35. In particolare, considerando che nella maggior parte delle specifiche internazionali (di cui alcuni esempi sono elencati in Tabella 1-1 e Tabella 1-2) riferiti a diversi contesti (e.g. tipologie di pavimentazioni, categoria di strada, limite di velocità consentito) non si superano valori di *IRI* pari a 3 m/km per lunghezze di calcolo di 100 m, si può notare come ne consegue l'accettare essenzialmente profili catalogabili come appartenenti alla classe B (*good*) della ISO 8608 o migliore; e solo marginalmente profili di classe C (*average*).

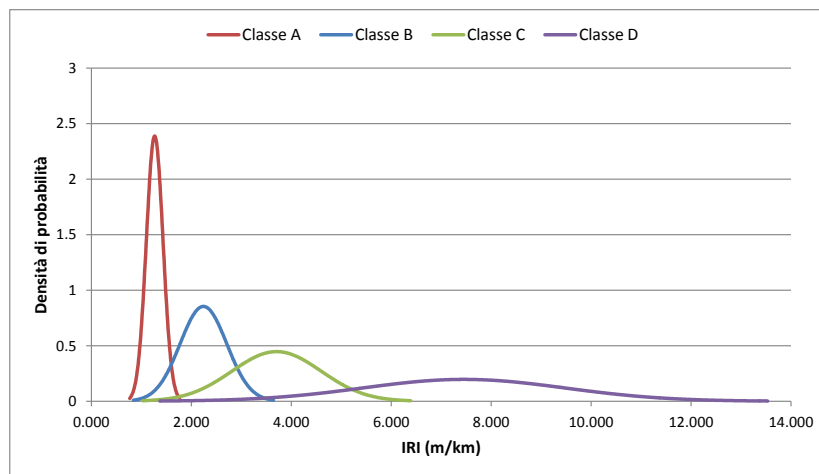


Figura 3-35. Distribuzione dei valori dell'indice IRI tra le classi ISO 8608 caratterizzanti il campione di profili reali

Per quanto concerne i risultati ottenuti per l'indice a_{wz} , si è riscontrata una buona congruenza tra i vari livelli di comfort definiti nella ISO 2631-1 e le quattro classi ISO 8608 per una velocità di transito pari a 80 km/h (Figura 3-36).

Da un punto di vista del comfort percepito dagli utenti, è facile verificare come riducendo la velocità di marcia, sia possibile accettare profili appartenenti a classi inferiori. Come si può notare dai grafici in Figura 3-37 e Figura 3-38, infatti, i profili appartenenti alle classi ISO 8608 C e D possono essere ammesse nel caso di ambito urbano purché le velocità di transito siano alquanto contenute; rispettivamente ≤ 40 km/h (per profili classe C) e < 30 km/h (per profili classe D).

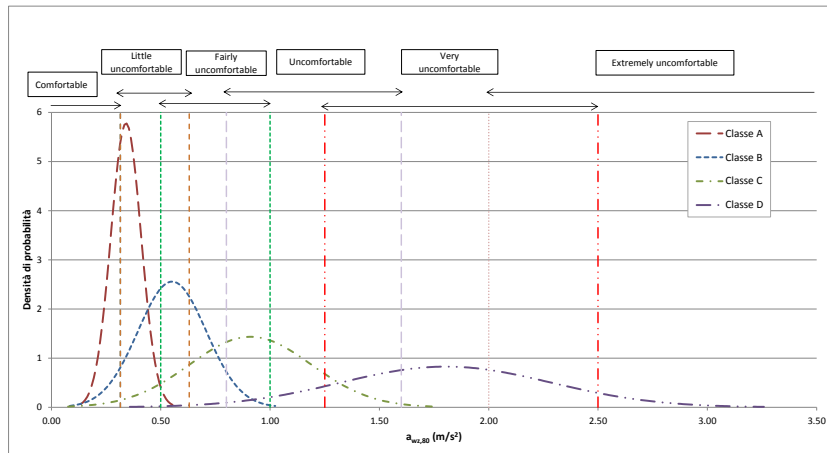


Figura 3-36. Distribuzione dei valori dell'indice a_{wz} tra le classi ISO 8608 caratterizzanti il campione di profili reali

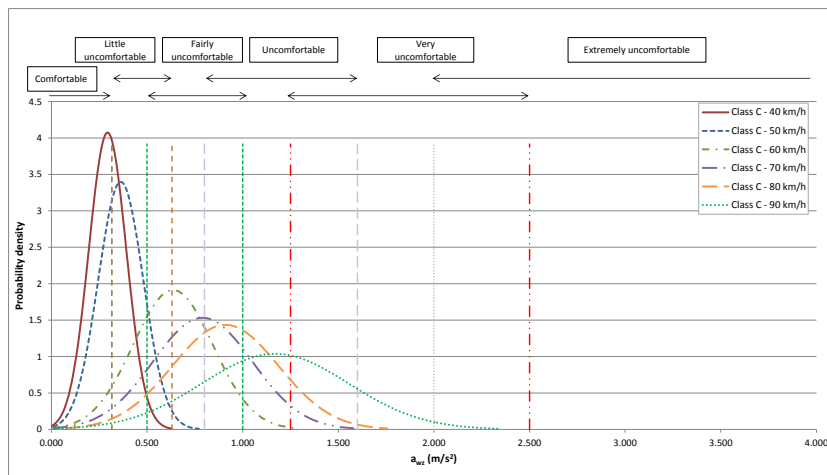


Figura 3-37. Distribuzione dei valori dell'indice a_{wz} al variare della velocità di transito per i profili reali di Classe C

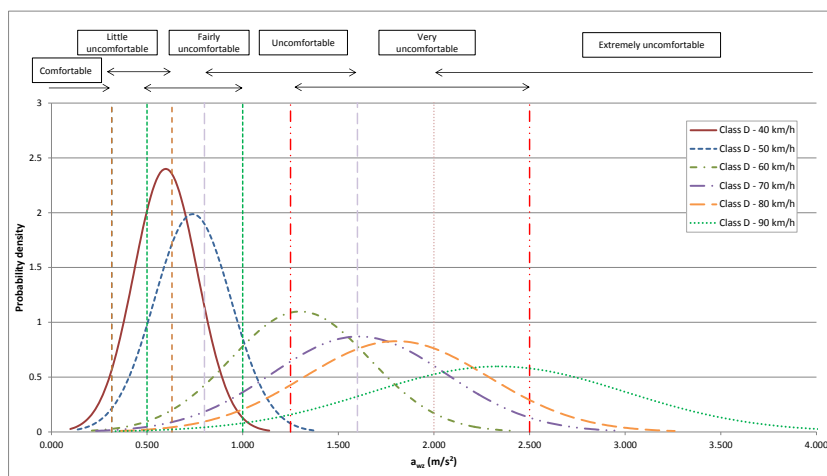


Figura 3-38. Distribuzione dei valori dell'indice a_{wz} al variare della velocità di transito per i profili reali di Classe D

L'impiego quindi dell'indice a_{wz} per la valutazione della qualità di marcia dovuta al transito su di una pavimentazione stradale, consente non solo di individuare le priorità di intervento lungo la rete, ma anche di poter valutare l'eventuale adozione di misure temporanee in attesa del ripristino delle migliori condizioni del manto stradale, quali la riduzione della velocità di marcia consentita sui singoli tratti.

In aggiunta a quanto detto, l'analisi della riduzione della velocità indotta dalla presenza di un eccessivo livello di irregolarità, potrebbe consentire una valutazione più approfondita delle possibili conseguenze sui flussi di traffico. A titolo di esempio, si riporta l'analisi di una delle strade di provenienza dei profili reali rilevati, caratterizzata da una velocità massima consentita pari a 90 km/h. Ipotizzando quindi un livello di comfort minimo giudicato accettabile dagli utenti stradali, è possibile stimare la velocità con la quale transiteranno sopra ciascuna sezione di 100 m e confrontare la differenza di velocità tra due tratti adiacenti al fine di individuare le transizioni più critiche e quindi le priorità di intervento.

I risultati ottenuti per suddetta strada sono riportati in Figura 3-39, in cui per ciascuna sezione di 100 m è stata ricavata la velocità di transito tale da indurre sugli utenti stradali un livello di comfort definito come *fairly uncomfortable* o migliore. In aggiunta, per ciascun tratto, è stato inoltre calcolato il corrispondente valore di *IRI*, il quale è stato successivamente comparato con la soglia di accettabilità indicata da Cantisani & Loprencipe (31) nel caso di velocità di marcia pari a 90 km/h (velocità massima consentita sulla strada esaminata) e qualità di marcia giudicata come *fair/mediocre*.

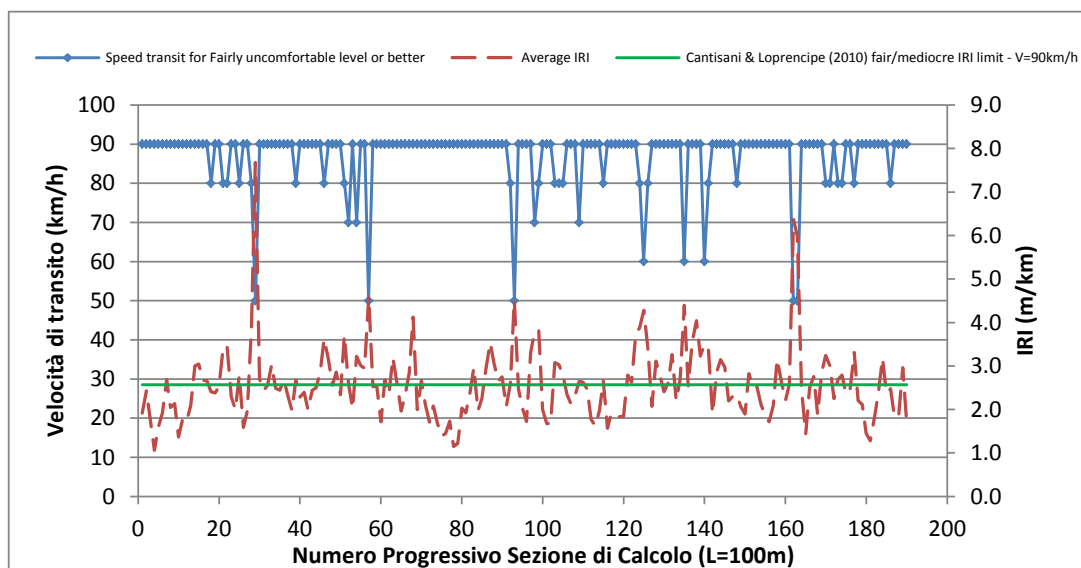


Figura 3-39. Velocità di marcia tali da indurre un livello di comfort *fairly uncomfortable* o migliore e valori di IRI per sezioni consecutive di 100 m

Come si può notare, vi è una buona congruenza tra i risultati ottenuti con l'indice a_{wz} e quelli con l'IRI. Nel caso specifico, è stato preso come riferimento la velocità massima consentita sulla strada; ma qualora siano note le caratteristiche plano-altimetriche, vi è la possibilità di considerare il diagramma delle velocità al fine di ottimizzare ulteriormente il

processo di valutazione della regolarità del manto stradale e l'individuazione delle priorità di intervento.

Al fine di poter effettuare un'analisi di questo tipo senza ricorrere al rilievo delle elevazioni dei profili stradali e successivamente all'impiego di modelli numerici di simulazione, occorre inevitabilmente ricercare delle relazioni che consentano, una volta effettuato il rilievo dell'accelerazione per una data velocità di transito, di stimare la variazione dell'indice a_{wz} all'aumentare o al ridursi della velocità di marcia. Tale aspetto è stato quindi tenuto in considerazione durante la seconda fase della presente tesi, caratterizzata da misure sperimentali effettuate presso il comune di Valentano (VT).

3.7. Confronto tra indice a_{wz} e IRI

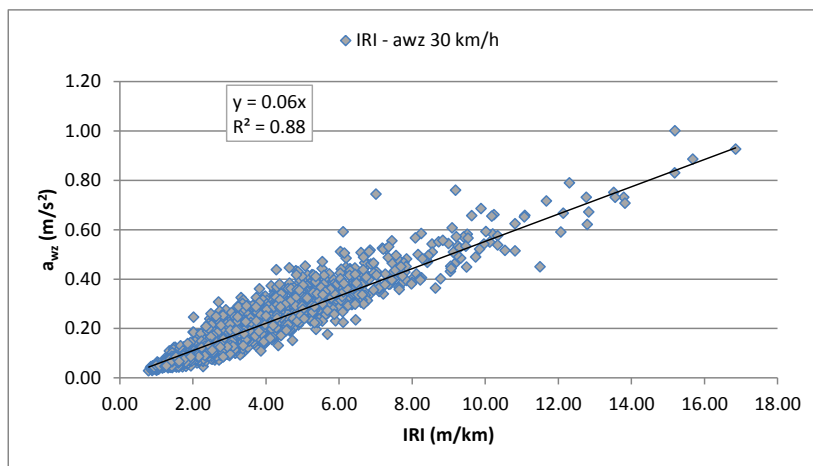
Un'ultima analisi preliminare sviluppata prima di procedere con l'esecuzione di misure sperimentali, ha riguardato la comparazione nella valutazione dello stato superficiale di una pavimentazione stradale tra l'indice di comfort a_{wz} e l'indicatore di regolarità più diffuso al mondo, l'indice IRI. In particolare, si sono ricercate eventuali correlazioni tra i due metodi di valutazione al variare della velocità di marcia considerata. Tali relazioni inoltre, sono state comparate con studi analoghi presenti in letteratura.

Al fine di verificare la stabilità delle relazioni trovate, si è deciso di variare la lunghezza delle sezioni di calcolo rispetto alla quale è stato suddiviso il campione di profili reali. Nello specifico, sono state prese in esame le seguenti lunghezze: 100 m, 200 m e 320 m. La scelta di tali valori è stata inoltre condizionata, a fini comparativi, dall'estensione dei profili impiegati in studi analoghi presenti di letteratura.

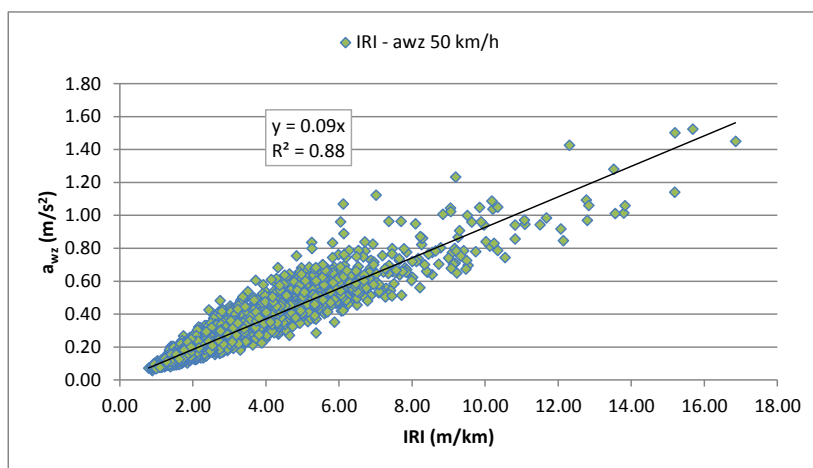
Si è riscontrato come tra gli indici a_{wz} e *IRI*, sembri sussistere una relazione lineare, il cui coefficiente di proporzionalità varia in funzione della velocità di marcia. A titolo esemplificativo, si riportano quindi le correlazioni determinate nel caso di profili aventi estensione pari a 100 m e per velocità di marcia di 30 km/h (Figura 3-40a), 50 km/h (Figura 3-40b), 70 km/h (Figura 3-40c) e 90 km/h (Figura 3-40d). Come si può notare, il primo aspetto che si riscontra, riguarda il fatto che per uno stesso valore di *IRI* si possono avere diversi valori dell'indice a_{wz} , e di conseguenza una diversa valutazione da parte dell'utente della qualità di marcia percepita. Ciò dipende, tra le altre cose, dal fatto che l'indice IRI è un indicatore di regolarità a carattere generale, sviluppato per tenere conto di diversi aspetti connessi alla regolarità del manto stradale; tra cui l'incremento dinamico dei carichi, il comfort degli utenti e le sollecitazioni indotte sui vari componenti meccanici dei veicoli.

In diversi studi presenti in letteratura (33) (62), vi è una conferma del fatto che la miglior relazione tra tali indici consista in una retta di regressione lineare del tipo:

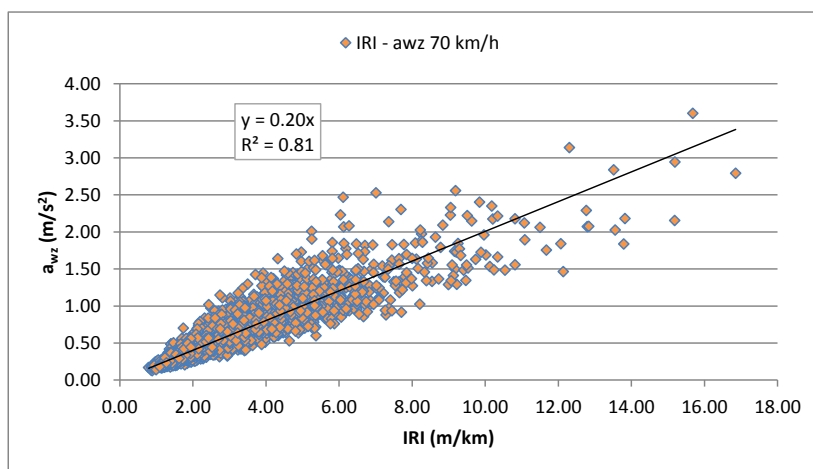
$$a_{wz} = a \cdot IRI + b \quad \text{Eq. 3.4}$$



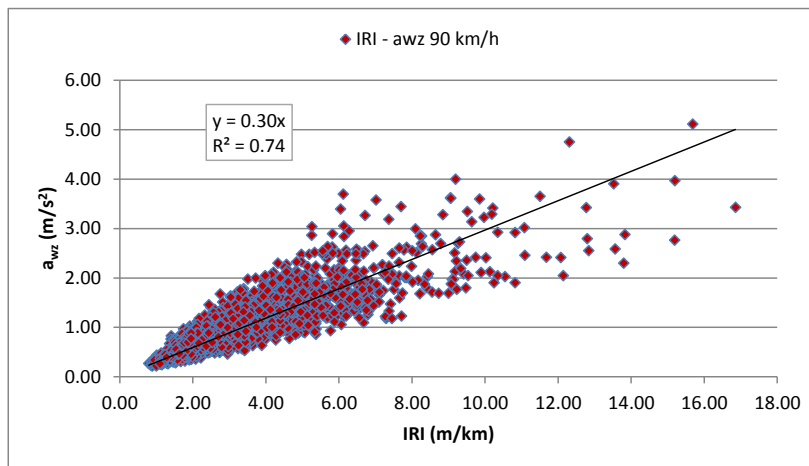
(a)



(b)



(c)



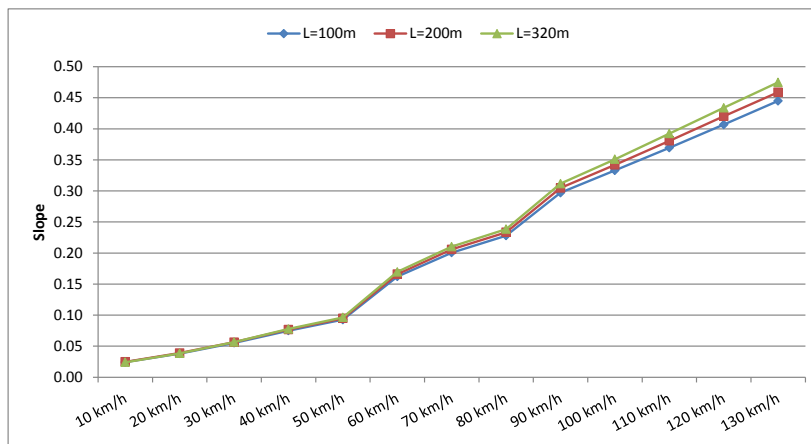
(d)

Figura 3-40. Relazione tra gli indici a_{wz} e IRI per diverse velocità: (a) 30 km/h, (b) 50 km/h, (c) 70 km/h e (d) 90 km/h

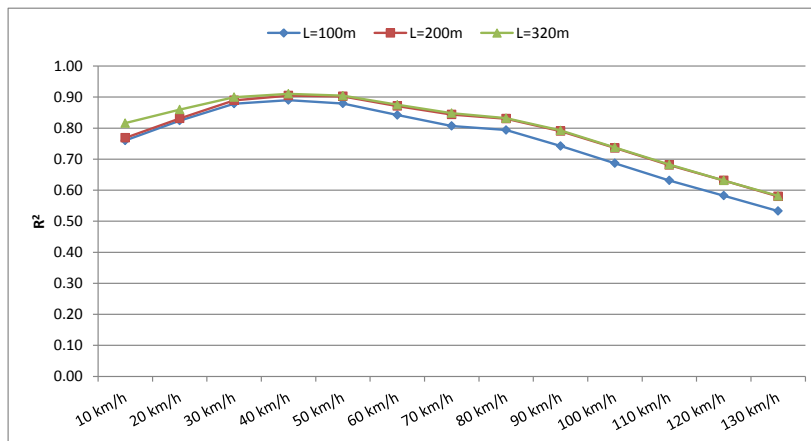
Come riportato in suddetti studi, in realtà si dovrebbe avere un valore nullo dell'intercetta, in quanto per un profilo ideale con $IRI=0$ (superficie perfettamente piana) non si dovrebbero registrare vibrazioni di alcun tipo. Nella realtà, vi sono meccanismi e fonti vibrazionali aggiuntive (e.g. vibrazioni dovute al motore del veicolo, eventuali eccentricità degli pneumatici in riferimento alla loro geometria e rigidità (33)) che fanno sì che tale relazione presenti valori non nulli e positivi dell'intercetta. Nel caso in esame, avendo determinato tale relazioni tramite modello numerico, e quindi in condizioni operative ideali, appare più opportuno considerare una retta di regressione lineare con intercetta nulla. A conferma di tale supposizione, nel caso di impiego di regressioni con intercetta non nulla, i valori assunti dal termine noto b dell'Eq. 3.4 risultano essere comunque prossimi allo zero; avendo infatti registrato un valore massimo pari a 0.032 e, inoltre, non determinando alcuna sostanziale variazione del coefficiente di correlazione R^2 (ΔR^2 massimo pari a circa 0.04 nel caso di velocità di transito di 100 km/h).

Come si può notare dagli andamenti riportati in Figura 3-41, relativi al valore del coefficiente angolare (Figura 3-41a) e di quello di correlazione (Figura 3-41b) calcolati in funzione della velocità di marcia e della lunghezza dei profili, il coefficiente di proporzionalità tra a_{wz} e IRI risulta essere sufficientemente stabile al variare della lunghezza di suddivisione dei profili interi rilevati per le quattro strade reali descritte al paragrafo §3.2. Come era lecito attendersi, all'aumentare della velocità di transito si riscontra un incremento del coefficiente angolare a (*slope*) dell'Eq. 3.4, a cui corrisponde di contro, una progressiva riduzione dei valori assunti dal coefficiente R^2 (Figura 3-41b). Quest'ultimo risultato, è probabilmente dovuto al fatto che all'aumentare della velocità si accentua la differente sensibilità dei due indici nei confronti di determinate lunghezze d'onda, nonché quella verso l'eventuale presenza di irregolarità puntuali più o meno accentuate.

I valori del coefficiente angolare trovati nel caso di profili aventi estensione pari a 320 m, sono quindi stati confrontati con quelli riportati nel lavoro di Cantisani & Loprencipe (31). Questi ultimi, adottando la medesima lunghezza di riferimento per il calcolo degli indici a_{wz} e IRI , hanno determinato analoghe relazioni tra i due indici; esaminando un campione di profili appartenenti a strade degli U.S.A. e rilevate durante il programma *Strategic Highway Research Program (SHRP) Long-Term Pavement Performance (LTPP)* della *University of Michigan Transportation Research Institute (UMTRI 1998)*. In tale modo, si è voluto verificare l'incidenza del campione di profili sulla relazione determinata per gli indici a_{wz} e IRI .



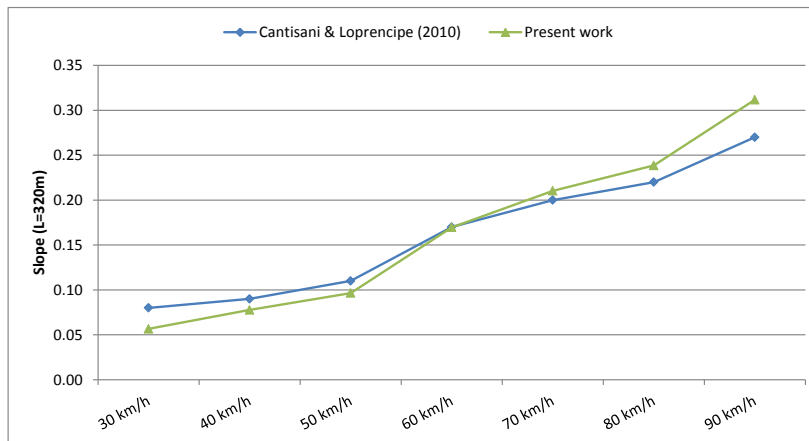
(a)



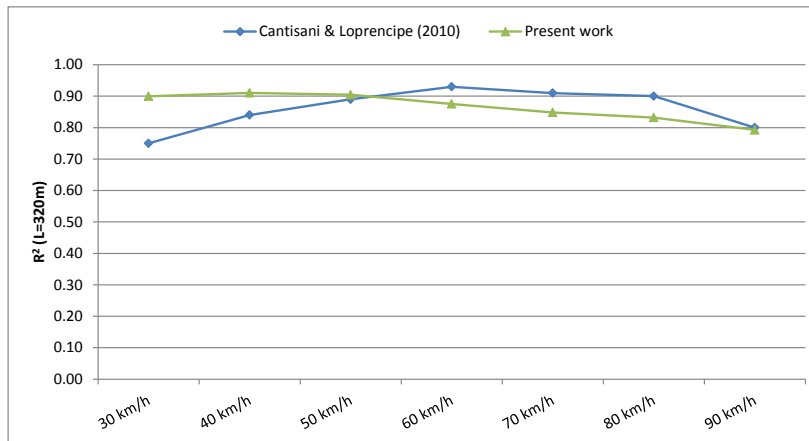
(b)

Figura 3-41. Incidenza della velocità di marcia sulla relazione tra a_{wz} e IRI : (a) coefficiente angolare e (b) coefficiente di correlazione R^2

Come si può notare dai grafici in Figura 3-42, si ha una buona convergenza dei risultati ottenuti nei due differenti studi per l'intervallo di velocità compreso tra 40 e 80 km/h.



(a)



(b)

Figura 3-42. Confronto tra le relazioni ottenute tra gli indici a_{wz} e IRI per profili di 320 m al variare della velocità di marcia: (a) coefficiente angolare e (b) coefficiente di correlazione R^2

Nel caso invece delle due velocità estremali considerate, pari a 30 km/h e 90 km/h, sono invece state riscontrate delle divergenze più marcate tra i valori dei coefficienti angolari determinati nel presente studio e quelli ottenuti nello studio di letteratura (31) con l'impiego di un diverso campione di profili.

In un suo recente articolo (33), Múčka ha elencato diversi studi in cui sono state individuate delle relazioni tra i valori dell'accelerazione ponderata in frequenza (a_{wz}) e quelli dell'indice IRI, ottenuti per un medesimo campione di profili stradali. I risultati ivi descritti, derivano essenzialmente da prove sperimentali effettuate con diverse tipologie di veicoli, nonché su sezioni stradali differenti per tipologia costruttiva e per estensione. In aggiunta, alcuni autori hanno determinato l'accelerazione ponderata in frequenza del vettore accelerazione, combinando le tre componenti ortogonali (x, y, z) secondo quanto previsto dalla ISO 2631-1. Altri, invece, in considerazione degli effetti di disturbo sulle componenti longitudinali e trasversali dell'accelerazione dovute al moto del veicolo e non prettamente correlabili alla presenza di irregolarità lungo il tracciato stradale, hanno preso in considerazio-

ne la sola componente verticale. Avendo nel presente studio adottato questo secondo approccio, sono state prese in esame le relazioni di letteratura riferite solo all'accelerazione verticale ponderata in frequenza (a_{wz}). In Tabella 3-7, sono state quindi riportate le equazioni ottenute nel caso di profili di lunghezza pari a 100 m e per velocità di transito ricadenti all'interno dell'intervallo esaminato nel presente lavoro. Per una panoramica più completa sulle varie relazioni trovate in letteratura si rimanda all'articolo di Múčka (33).

Tabella 3-7. Relazioni a_{wz} -IRI in letteratura per profili di 100 m

Source	Vehicle/measuring point	Test sections	V (km/h)	Relation	R ²
Ahlin et al. (2000)	Truck with trailer, large ambulance/driver's seat	37 km of national highway and 21 km of county road (100m). IRI=0.4-22.8 mm/m	75	$a_{wz}=0.164*IRI+0.247$	-
Ihs et al. (2004)	Passenger car/passenger's seat	Nine sections (500 m), IRI=0.8-10.5 mm/m	30	$a_{wz}=0.071*IRI+0.151$	0.899
			50	$a_{wz}=0.129*IRI+0.184$	0.916
			70	$a_{wz}=0.144*IRI+0.206$	0.948
Wang et al. (2010)	Multifunction laser road condition test vehicle/passenger's seat	15 asphalt road sections, IRI=1-5.5 mm/m	50	$a_{wz}=0.119*IRI+0.165$	0.844
			70	$a_{wz}=0.176*IRI+0.159$	0.946
			30-70	$a_{wz}=0.121*IRI+0.006*V-0.186$	0.849
Zhang et al. (2011)	Multifunction laser road condition test vehicle/driver's seat	12 road sections (2-3 km) IRI=1.06-5.53 mm/m	30	$a_{wz}=0.089*IRI+0.085$	0.869
			50	$a_{wz}=0.108*IRI+0.100$	0.953
			70	$a_{wz}=0.192*IRI+0.078$	0.994

Tutte le relazioni riportate in Tabella 3-7, determinate tramite prove sperimentali, presentano un valore dell'intercetta maggiore di zero; fatto che, come già detto in precedenza, indica la presenza di vibrazioni non direttamente riconducibili alle irregolarità presenti sulla pavimentazione in esame. Per tale motivo, si considera lecito comparare i valori del coefficiente angolare con quelli determinati nel presente studio, in cui si è considerata una regressione lineare con intercetta nulla.

Dal confronto effettuato e riportato in Figura 3-43, si è riscontrato come i valori ottenuti tramite simulazioni numeriche siano comparabili e in linea con quelli presenti in letteratura per le medesime velocità di marcia.

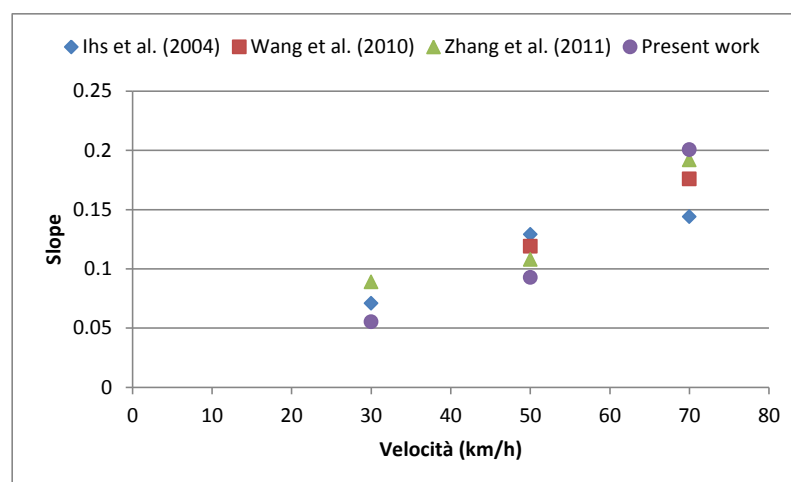


Figura 3-43. Comparazione tra i diversi coefficienti di proporzionalità tra a_{wz} e IRI

I risultati presentati in questa sezione, hanno mostrato come, in generale, esista una buona correlazione tra l'indice di comfort a_{wz} e l'indicatore di regolarità *IRI*; sebbene si riscontrino una certa variabilità sulla percezione della qualità di marcia da parte dell'utente per uno stesso valore di *IRI*. Tale fenomeno, si accentua all'aumentare della velocità di transito e al decrescere del livello di regolarità della strada esaminata. Per tale motivo, piuttosto che ricavare una stima dell'indice *IRI* a partire dalle misure dell'accelerazione verticale ponderata in frequenza, si intende valutare la possibilità di adottare direttamente l'indice a_{wz} come metodo di valutazione della qualità di marcia e quindi della regolarità del manto stradale. L'obiettivo della tesi e in particolare dell'uso dell'indice a_{wz} , mira infatti a determinare una scala di valutazione qualitativa dello stato di una pavimentazione stradale, atta all'individuazione delle priorità di intervento.

La comparazione dei coefficienti di proporzionalità tra gli indici a_{wz} e *IRI* ottenuti nel presente studio con quelli presenti in letteratura, ha consentito non solo di validare il modello numerico impiegato per le varie analisi preliminari, ma ha altresì fornito un'indicazione sulla possibilità di estendere, con buoni margini di approssimazione, i risultati ottenuti tramite una precisa tipologia veicolare ad un insieme più esteso di autovetture. Questo risultato lascia quindi presagire la possibilità, in futuro, di individuare un ristretto numero di categorie di veicoli stradali (e.g. city car, SUV, berlina, minivan), a ognuna delle quali poter applicare un prefissato intervallo di accettabilità dei valori dell'accelerazione ponderata in frequenza; con l'ulteriore possibilità di determinare funzioni di trasferimento o correlazioni tra i diversi gruppi.

4. CARATTERISTICHE DEL SISTEMA DI MISURA A BORDO DEL VEICOLO

Nel presente capitolo sono state analizzate alcune problematiche inerenti all'implementazione e individuazione della strumentazione più opportuna per il rilievo delle accelerazioni verticali all'interno di un veicolo stradale, al fine di calcolare il conseguente valore dell'indice a_{wz} . In particolare, l'attenzione è stata rivolta allo studio del caso delle pavimentazioni urbane in quanto presentano delle peculiarità rispetto alle strade extraurbane; a causa delle quali, la possibilità di impiego dei profilometri ad alto rendimento risulta alquanto limitata. La problematica principale riguarda, senza dubbio, l'impossibilità di mantenere la velocità costante (comunque > 30 km/h) durante la misura nei diversi tratti urbani, nonché la difficoltà di avere a disposizione sufficiente spazio per la zona di lancio del veicolo strumentato (necessario per il raggiungimento della velocità utile per il rilievo); a causa sia della geometria plano-altimetrica sia della considerevole presenza di intersezioni a raso che caratterizzano una generica rete stradale urbana. A ciò si aggiunge la riduzione della precisione del rilievo effettuato tramite profilometri inerziali/laser al decrescere della velocità di marcia, in conseguenza dell'applicazione di filtri passa-alto (*high-pass*) durante il processo di ricostruzione del profilo stradale, necessari al fine di rimuovere elementi di disturbo presenti nel segnale misurato dell'accelerazione e caratterizzati da basse frequenze (63).

Accanto a tali problematiche, è bene ricordare come in ambito urbano siano spesso presenti diverse tipologie di pavimentazioni stradali, tra cui quelle lapidee (64). Si è già evidenziato come per alcune di esse, non siano applicabili le soglie comunemente adottate per l'indice IRI (36). Da questo punto di vista, l'impiego dell' a_{wz} può consentire una valutazione più appropriata in quanto tiene conto della velocità con la quale effettivamente si transita su tali pavimentazioni, fornendo quindi una stima della percezione da parte dell'utente della qualità di marcia. Focalizzandosi quindi su pavimentazioni appartenenti a reti stradali urbane, l'intervallo di velocità primario di interesse risulta essere compreso tra 10-50 km/h. Per alcune delle analisi effettuate nel presente studio, è stato preso in esame un range più ampio sino a una velocità di 90 km/h, al fine di verificare la possibile estensione dei risultati ottenuti al di fuori del contesto urbano.

Di seguito, si descrivono alcuni aspetti analizzati preliminarmente, al fine di individuare le caratteristiche della strumentazione da poter impiegare durante le misure sperimentali e definire la procedura per il trattamento dei dati accelerometrici così rilevati.

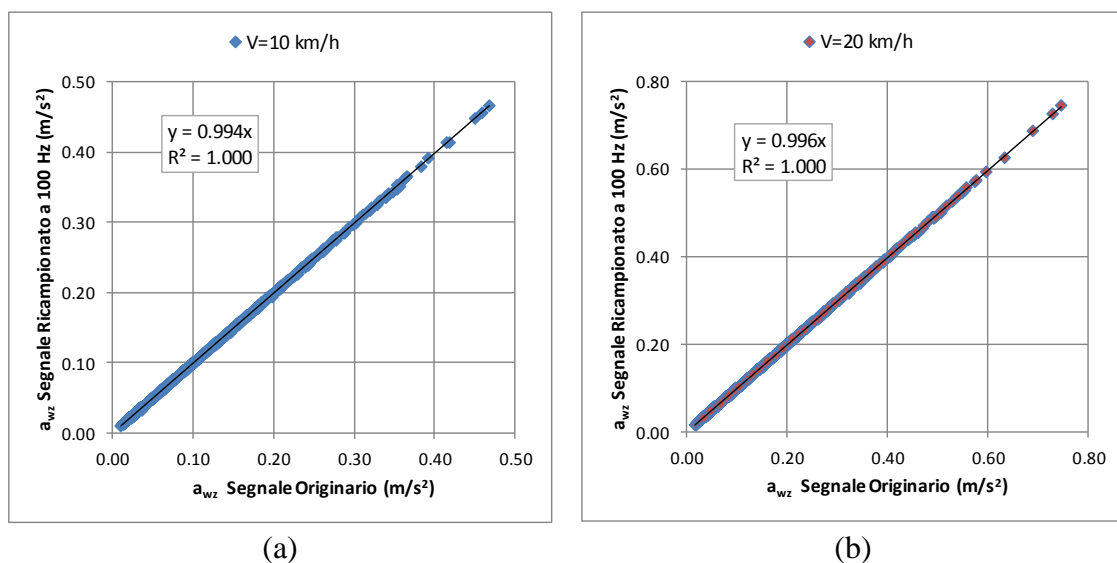
4.1. Frequenza di campionamento

Uno degli obiettivi della presente tesi, oltre alla valutazione sull'effettivo impiego dell'indice a_{wz} come indice di valutazione della qualità di marcia e quindi dello stato di una

pavimentazione stradale, consiste nel verificare la possibilità di utilizzo di strumentazioni a basso costo quali i cellulari smartphone. Questi ultimi, come già anticipato al Capitolo 2, sono oggetto di particolare attenzione da parte della comunità scientifica data l'evoluzione tecnologica che li ha interessati in questi ultimi anni. Una delle problematiche principali però, in merito al possibile impiego per il calcolo dell'indice a_{wz} , risiede nella frequenza massima di campionamento attualmente disponibile per gli accelerometri integrati in tali dispositivi; la quale può raggiungere al massimo un valore di 100 Hz (41) (42) (46). Come descritto in precedenza, l'intervallo di frequenza utile per il calcolo dell'indice a_{wz} secondo quanto riportato nella norma ISO 2631-1, varia tra 0.5 Hz e 80 Hz. Applicando il *Teorema del Campionamento o di Nyquist*, utilizzando una frequenza di campionamento $f_s = 100\text{Hz}$ è possibile rilevare, al massimo, componenti spettrali sino ad una frequenza pari alla metà di quella di campionamento. Per il problema in esame quindi, si perderebbe parte dell'intervallo in frequenza compreso tra 50-80 Hz.

Si è deciso quindi di verificare se l'assenza di tale banda spettrale determini o meno una significativa variazione dell'indice a_{wz} , in considerazione anche dell'andamento dei coefficienti di ponderazione (riportato in Figura 2-3), i quali tendono a ridurre il contributo apportato dal contenuto energetico delle bande d'ottava poste ai due estremi dello spettro dell'accelerazione.

A tale scopo, è stato nuovamente impiegato il modello di simulazione *full-car 8 d.o.f.*, tramite il quale è stato calcolato il valore dell'indice a_{wz} per il campione di profili reali suddivisi in tratti di 100 m. Successivamente, il segnale dell'accelerazione verticale ottenuto per le varie sezioni è stato ricampionato e posto pari a 100 Hz. Infine, sono stati comparati i valori ottenuti tramite le due distinte procedure, i cui risultati per velocità comprese tra 10-60 km/h sono riportati in Figura 4-1.



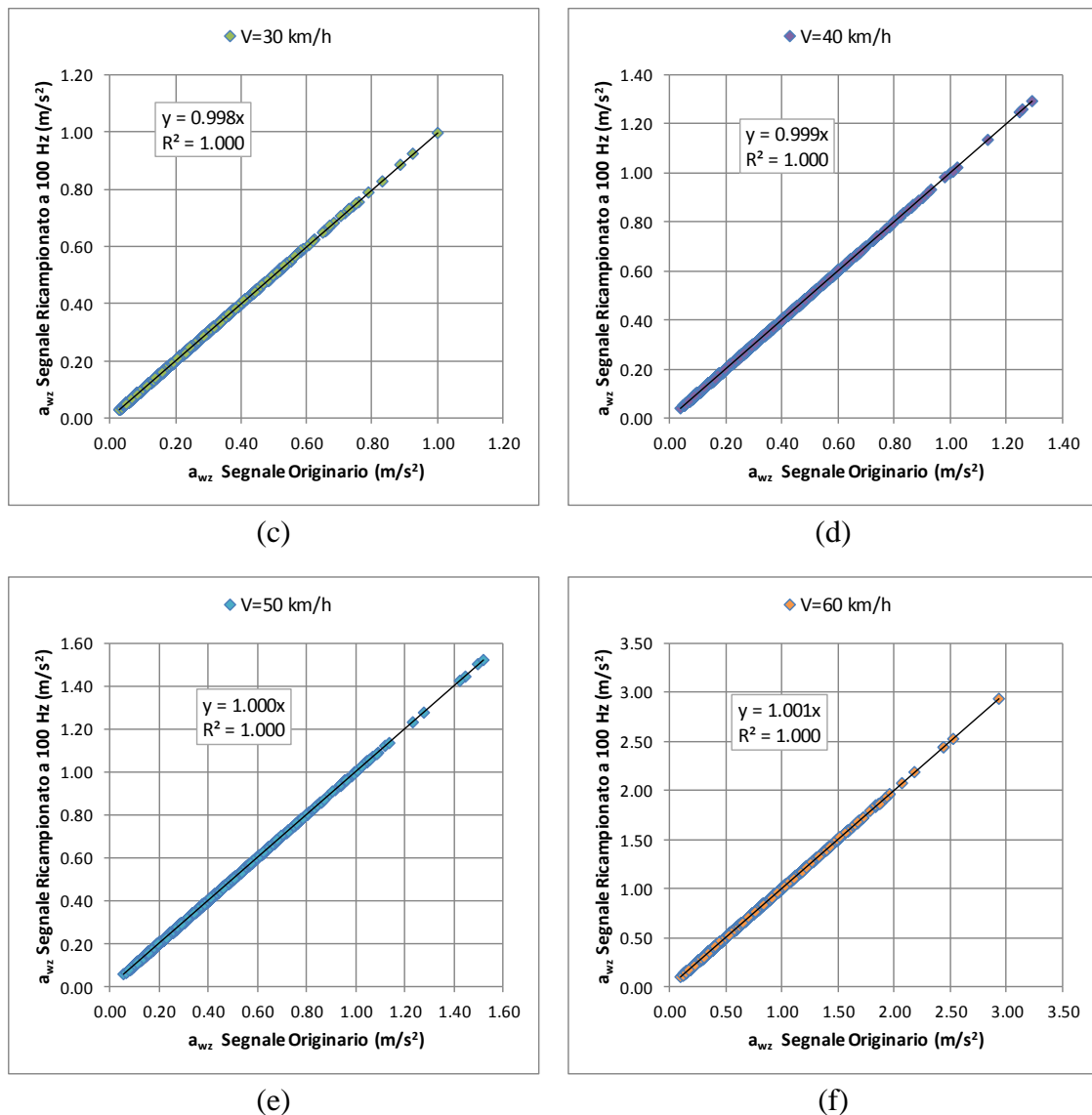


Figura 4-1. Analisi della variabilità dell'indice a_{wz} campionando l'accelerazione a 100 Hz per diverse velocità di marcia

Come si può notare dalle equazioni di regressione lineare riportate nei grafici di suddetta figura, la variazione registrata per i valori dell'indice a_{wz} per il campione di profili reali risulta essere trascurabile e non significativa. A conferma dei risultati ottenuti, sono stati graficati gli andamenti dei PSD in bande in terzi d'ottava per l'intervallo di interesse ai fini del calcolo dell'indice a_{wz} (0.5-80 Hz), relativi al campione di profili reali impiegati per le varie analisi. I risultati mostrano come per basse velocità, le componenti spettrali del segnale dell'accelerazione verticale presentino una frequenza massima inferiore al limite superiore dello spettro di interesse. Nel dettaglio, per una velocità di 10 km/h il segnale dell'accelerazione presenta una componente spettrale massima pari a 20 Hz (Figura 4-2a), mentre per 20 km/h si ottiene un incremento dello spettro sino a interessare frequenze prossime ai 40 Hz (Figura 4-2b). Considerando invece una velocità di marcia pari a 30

km/h (Figura 4-2c), si ha un ulteriore aumento delle componenti a frequenza più alta (sino a un massimo di 65 Hz), comunque inferiori rispetto al limite superiore di interesse pari a 80 Hz.

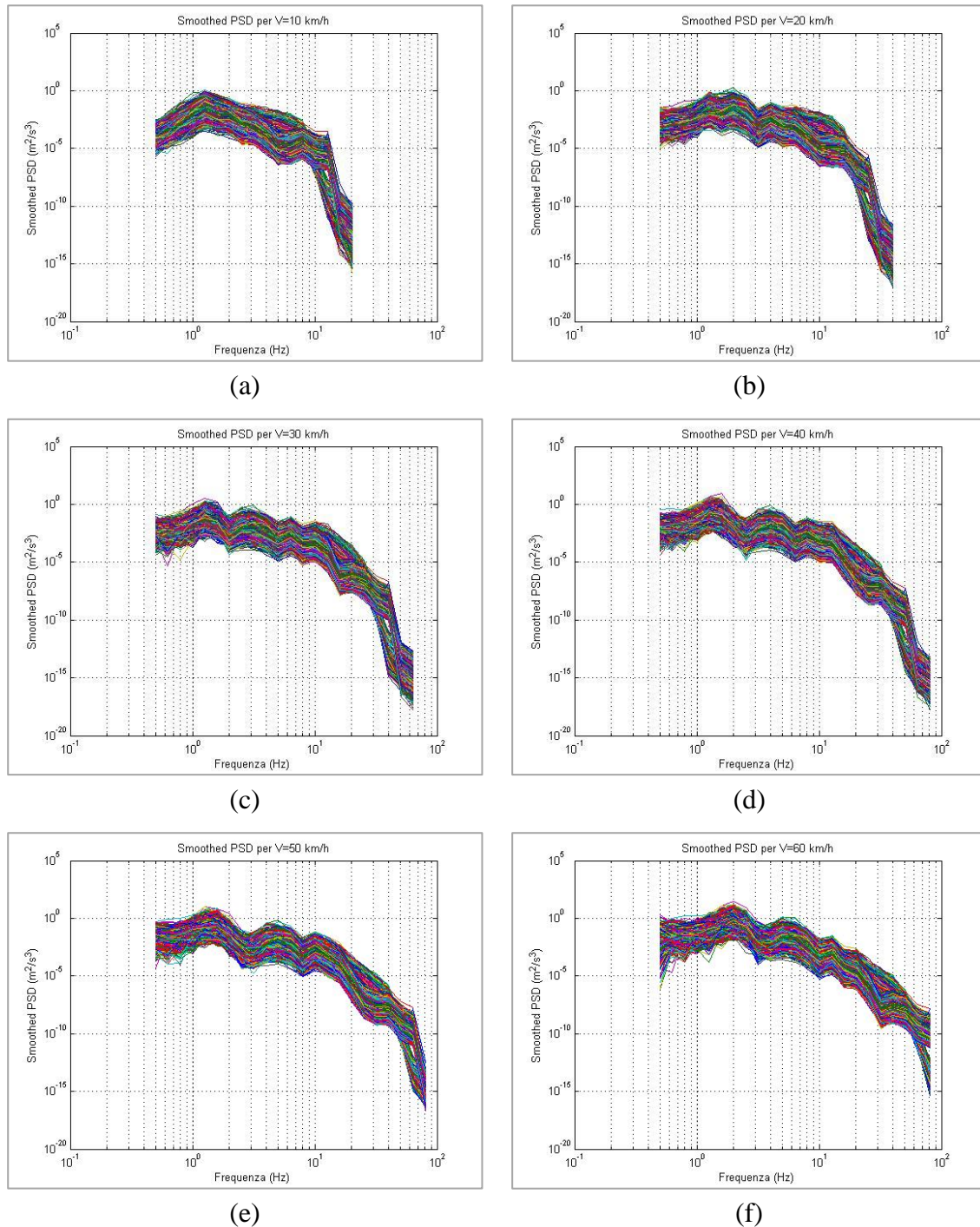


Figura 4-2.PSD in bande in terzi d'ottava delle accelerazioni verticali ottenute per il campione di profili reali

Per velocità superiori (Figura 4-2d, Figura 4-2e e Figura 4-2f), si registra un progressivo aumento delle frequenze massime presenti nel segnale dell'accelerazione calcolata all'interno del veicolo di simulazione, nonché dell'ampiezza del PSD in corrispondenza delle relative bande in terzi d'ottava. Come si può inoltre notare dai grafici in Figura 4-2, il fatto che anche campionando a frequenze relativamente basse (pari a 100 Hz da cui ne consegue uno spettro compreso tra 0.5-50 Hz) non si registrino variazioni significative dell'indice a_{wz} anche per velocità più elevate, dipende dal ridotto contenuto energetico delle bande a frequenza più alta; le quali presentano ampiezze inferiori di diversi ordini di grandezza rispetto alle bande più basse. A ciò si somma inoltre l'effetto dei coefficienti di ponderazione che attenuano ulteriormente il contributo fornito dalle bande estremali dell'intervallo 0.5-80 Hz nel calcolo dell'indice a_{wz} .

In considerazione quindi dei risultati ottenuti, si reputa valido l'utilizzo di una frequenza di campionamento per l'accelerazione misurata all'interno dei veicoli stradali pari a 100 Hz e, di conseguenza, l'impiego dei cellulari smartphone in termini di frequenza di campionamento da essi consentita. Per quanto concerne la verifica dell'accuratezza e della precisione raggiungibile tramite il loro impiego, sono state effettuate delle misure comparative con strumentazione di precisione; i cui risultati saranno descritti nel capitolo successivo.

A margine di tale studio, appare opportuno ricordare come, se da una parte la frequenza di campionamento ha effetti sull'estremo superiore dell'intervallo di frequenza di interesse, la lunghezza del tempo di misura ne ha sulla risoluzione spettrale e quindi sulla capacità di cogliere al meglio le componenti energetiche delle bande in terzi d'ottava caratterizzate dalle frequenze centrali più piccole (e.g. 0.5-0.63 Hz). Infatti, noto il tempo di registrazione delle accelerazioni T_f , la risoluzione spettrale df sarà pari a $df = 1/T_f$. Al fine quindi di ottenere una risoluzione spettrale soddisfacente, occorrerà esaminare sezioni stradali di lunghezza prefissata a seconda della velocità di marcia presa in esame.

Come si può notare infatti nella Tabella 4-1, per una velocità di 50 km/h, per avere un $df < 0.1\text{Hz}$ occorrerebbe considerare un tratto di strada di estensione superiore a 130 m; mentre per una velocità di 20 km/h, sarebbe sufficiente avere sezioni di lunghezza di circa 60-70 m. In ogni caso, al pari di quanto avviene per le bande a frequenze centrali più alte, anche in questo caso, il contributo al calcolo dell'indice a_{wz} fornito dalle bande in terzi d'ottava più basse viene mitigato dai coefficienti di ponderazione W_k (si veda Figura 2-3).

Tabella 4-1. Risoluzione spettrale in funzione della velocità e della lunghezza delle sezioni stradali

		Velocità di marcia								
		20 km/h	30 km/h	40 km/h	50 km/h	60 km/h	70 km/h	80 km/h	90 km/h	100 km/h
L = 10 m	tempo di percorrenza T_f (s)	1.80	1.20	0.90	0.72	0.60	0.51	0.45	0.40	0.36
	df (Hz)	0.556	0.833	1.111	1.389	1.667	1.944	2.222	2.500	2.778
L = 20 m	tempo di percorrenza T_f (s)	3.60	2.40	1.80	1.44	1.20	1.03	0.90	0.80	0.72
	df (Hz)	0.278	0.417	0.556	0.694	0.833	0.972	1.111	1.250	1.389
L = 30 m	tempo di percorrenza T_f (s)	5.40	3.60	2.70	2.16	1.80	1.54	1.35	1.20	1.08
	df (Hz)	0.185	0.278	0.370	0.463	0.556	0.648	0.741	0.833	0.926
L = 40 m	tempo di percorrenza T_f (s)	7.20	4.80	3.60	2.88	2.40	2.06	1.80	1.60	1.44
	df (Hz)	0.139	0.208	0.278	0.347	0.417	0.486	0.556	0.625	0.694
L = 50 m	tempo di percorrenza T_f (s)	9.00	6.00	4.50	3.60	3.00	2.57	2.25	2.00	1.80
	df (Hz)	0.111	0.167	0.222	0.278	0.333	0.389	0.444	0.500	0.556
L = 60 m	tempo di percorrenza T_f (s)	10.80	7.20	5.40	4.32	3.60	3.09	2.70	2.40	2.16
	df (Hz)	0.093	0.139	0.185	0.231	0.278	0.324	0.370	0.417	0.463
L = 70 m	tempo di percorrenza T_f (s)	12.60	8.40	6.30	5.04	4.20	3.60	3.15	2.80	2.52
	df (Hz)	0.079	0.119	0.159	0.198	0.238	0.278	0.317	0.357	0.397
L = 80 m	tempo di percorrenza T_f (s)	14.40	9.60	7.20	5.76	4.80	4.11	3.60	3.20	2.88
	df (Hz)	0.069	0.104	0.139	0.174	0.208	0.243	0.278	0.313	0.347
L = 90 m	tempo di percorrenza T_f (s)	16.20	10.80	8.10	6.48	5.40	4.63	4.05	3.60	3.24
	df (Hz)	0.062	0.093	0.123	0.154	0.185	0.216	0.247	0.278	0.309
L = 100 m	tempo di percorrenza T_f (s)	18.00	12.00	9.00	7.20	6.00	5.14	4.50	4.00	3.60
	df (Hz)	0.056	0.083	0.111	0.139	0.167	0.194	0.222	0.250	0.278
L = 110 m	tempo di percorrenza T_f (s)	19.80	13.20	9.90	7.92	6.60	5.66	4.95	4.40	3.96
	df (Hz)	0.051	0.076	0.101	0.126	0.152	0.177	0.202	0.227	0.253
L = 120 m	tempo di percorrenza T_f (s)	21.60	14.40	10.80	8.64	7.20	6.17	5.40	4.80	4.32
	df (Hz)	0.046	0.069	0.093	0.116	0.139	0.162	0.185	0.208	0.231
L = 130 m	tempo di percorrenza T_f (s)	23.40	15.60	11.70	9.36	7.80	6.69	5.85	5.20	4.68
	df (Hz)	0.043	0.064	0.085	0.107	0.128	0.150	0.171	0.192	0.214
L = 140 m	tempo di percorrenza T_f (s)	25.20	16.80	12.60	10.08	8.40	7.20	6.30	5.60	5.04
	df (Hz)	0.040	0.060	0.079	0.099	0.119	0.139	0.159	0.179	0.198
L = 150 m	tempo di percorrenza T_f (s)	27.00	18.00	13.50	10.80	9.00	7.71	6.75	6.00	5.40
	df (Hz)	0.037	0.056	0.074	0.093	0.111	0.130	0.148	0.167	0.185

4.2. Posizionamento della strumentazione all'interno del veicolo

La valutazione del comfort percepito dagli utenti stradali, presuppone la misura delle accelerazioni in corrispondenza del sedile del passeggero o del guidatore; al fine di valutare il livello di vibrazioni che effettivamente li interessa. La difficoltà principale connessa a un sistema di monitoraggio basato su tali punti di misurazione, consiste essenzialmente nel definire un supporto che possa essere solidale con il sedile, risultando nel contempo non invasivo rispetto al veicolo impiegato. Infatti, uno dei vantaggi connessi all'uso dei cellulari smartphone è quello di implementare un sistema di monitoraggio facilmente allocabile all'interno di un qualsivoglia veicolo stradale.

In aggiunta, la valutazione di una sezione stradale avviene generalmente rilevando i due allineamenti destro e sinistro caratterizzati dal transito degli pneumatici, e calcolando per ognuno di essi il valore dell'indice *IRI*. Infine si determina il valore medio tra i due così determinati e questo viene associato all'intero tratto esaminato. Collocando lo strumento di misurazione nel sedile del guidatore o del passeggero, il segnale dell'accelerazione regi-

strato risentirà in maniera preponderante delle irregolarità presenti, rispettivamente, nell'allineamento sinistro o destro.

Al fine di verificare quest'ultimo aspetto, sono state prese in esame le coppie di profili destro e sinistro appartenenti alla strada reale denominata 01 (suddivisi in tratti di 100 m) e sono quindi stati calcolati i valori dell'indice a_{wz} in corrispondenza del sedile del guidatore tramite l'utilizzo del modello numerico *full-car 8 d.o.f.*. Successivamente, sono stati invertiti i profili dei due allineamenti, calcolando nuovamente l'indicatore di comfort descritto nella ISO 2631-1. In questo caso, avendo invertito i profili, il valore dell'indice a_{wz} così determinato sarà rappresentativo di quello eventualmente ottenuto prendendo in considerazione il sedile del passeggero, posto in corrispondenza dell'allineamento destro dei profili accoppiati originari.

Benché non sussista una vera e propria correlazione tra i valori dell'indice *IRI* calcolati per i profili dei due allineamenti (destro e sinistro), si può comunque riscontrare una tendenza di massima, secondo la quale per una generica sezione di 100 m di tale strada, i valori maggiori di *IRI* sono stati riscontrati per l'allineamento destro (Figura 4-3).

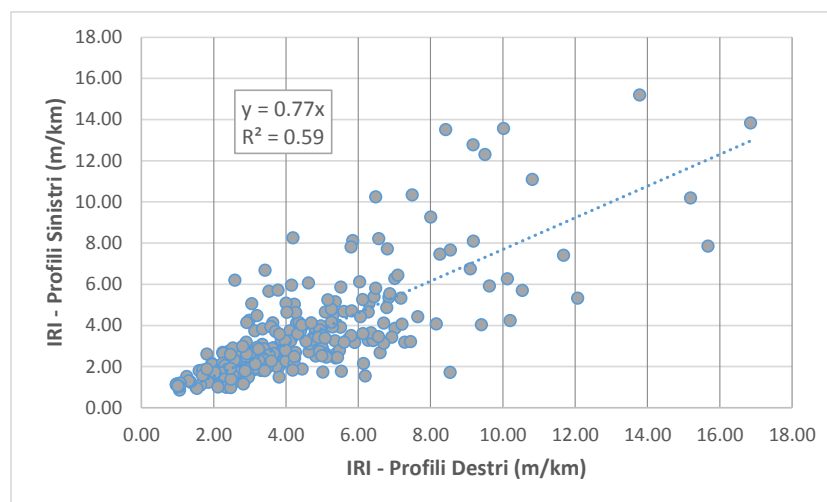


Figura 4-3. Confronto valori di IRI per i profili destri e sinistri della Strada 01 del campione di profili reali

Confrontando quindi i valori di a_{wz} calcolati in corrispondenza del sedile del guidatore e del passeggero, si ritrova una relazione analoga (Figura 4-4); benché mitigata dal comportamento di corpo rigido del telaio del veicolo. Per brevità, si riporta esclusivamente il risultato ottenuto nel caso di velocità di marcia pari a 60 km/h.

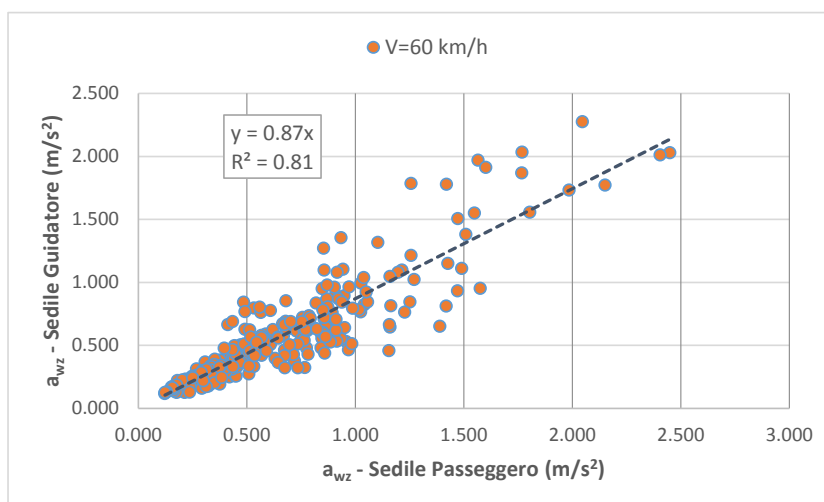


Figura 4-4. Confronto tra valori di a_{wz} calcolati in corrispondenza del sedile del guidatore e del passeggero

Come si può quindi vedere in Figura 4-4, considerando come punto di osservazione la posizione del guidatore, si registrerebbe un valore mediamente inferiore del 13% rispetto al passeggero; pur transitando su di una medesima pavimentazione stradale.

In molti studi di letteratura (40) (41) (42) (46) (47), la strumentazione di misura è stata posta, anche per semplicità di fissaggio, lungo “l’asse di simmetria longitudinale” del veicolo strumentato, tra la posizione del freno a mano ed il cruscotto anteriore. In considerazione di ciò, è stata calcolata l’ a_{wz} a partire dai segnali delle accelerazioni verticali misurate in corrispondenza del baricentro del veicolo, sia nel caso di simulazione per il sedile del guidatore sia nel caso di sedile del passeggero. Come si può notare dal grafico in Figura 4-5, a differenza dei valori dell’indice a_{wz} calcolati in corrispondenza dei due sedili, non si registrano variazioni significative tra i due casi analizzati.

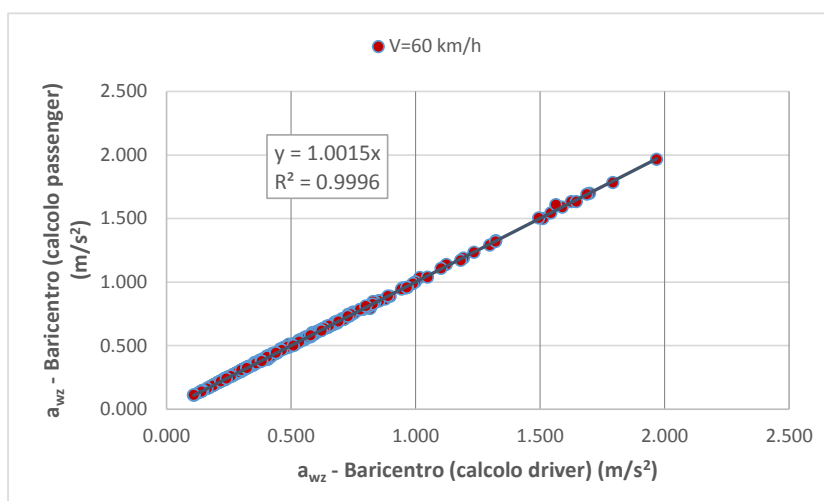
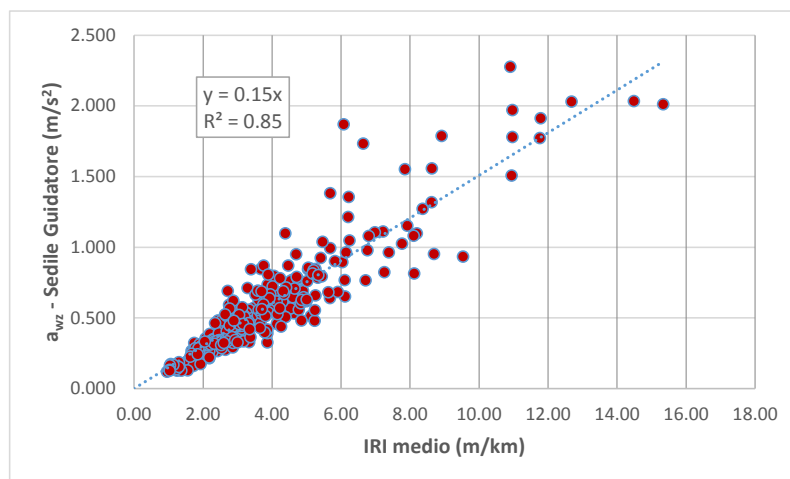


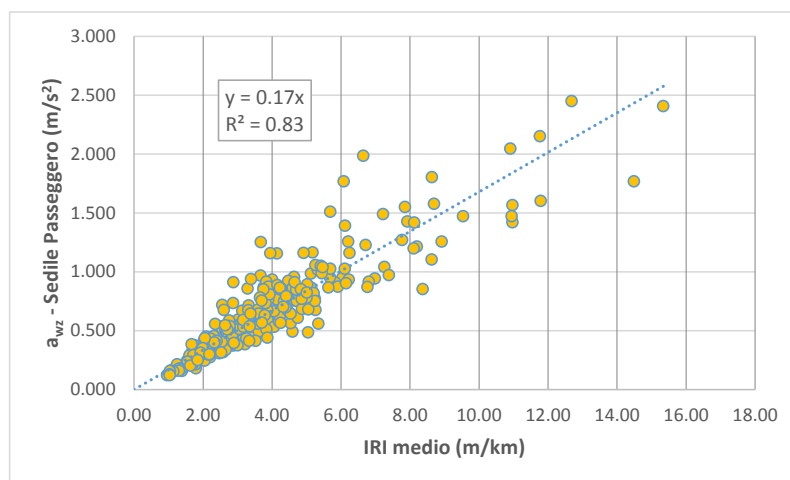
Figura 4-5. Confronto tra valori di a_{wz} calcolati in corrispondenza del baricentro del veicolo per i due casi di studio

In merito alla correlazione con i valori medi dell'indice *IRI* e quelli dell' a_{wz} , si può verificare come vi sia una leggera variazione del coefficiente di proporzionalità a seconda del punto di osservazione considerato (Figura 4-6). Dai risultati ottenuti in ogni caso, appare più significativo per l'intera sezione di pavimentazione stradale esaminata considerare l'accelerazione rilevata in corrispondenza del baricentro del veicolo in quanto maggiormente rappresentativa delle condizioni medie che la interessano. Inoltre, come evidenziato dalle precedenti analisi, e in particolar modo dai risultati riportati in Figura 4-5, adottare quale punto di misurazione una posizione il più possibile baricentrica consente di ottenere valori più stabili rispetto al possibile differente livello di regolarità che può interessare i due allineamenti (destro e sinistro) percorsi dal veicolo strumentato.

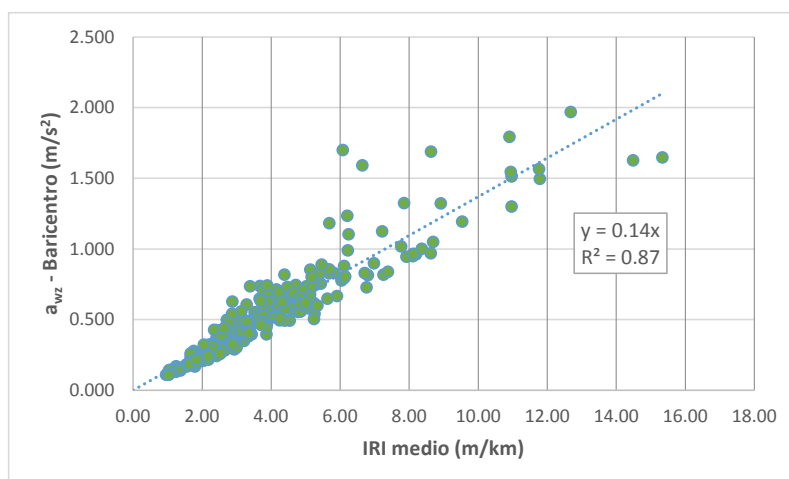
Valutata quindi la possibilità di rilevare le accelerazioni verticali in corrispondenza del baricentro del veicolo, o quanto meno in una posizione ad esso prossima o lungo l'asse longitudinale del mezzo considerato, si è deciso di valutare la correlazione tra l' a_{wz} calcolata al sedile del guidatore e quella ottenuta per la posizione baricentrica, al variare della velocità di marcia (intervallo esaminato 10-60 km/h) e per l'intero campione di profili reali.



(a)



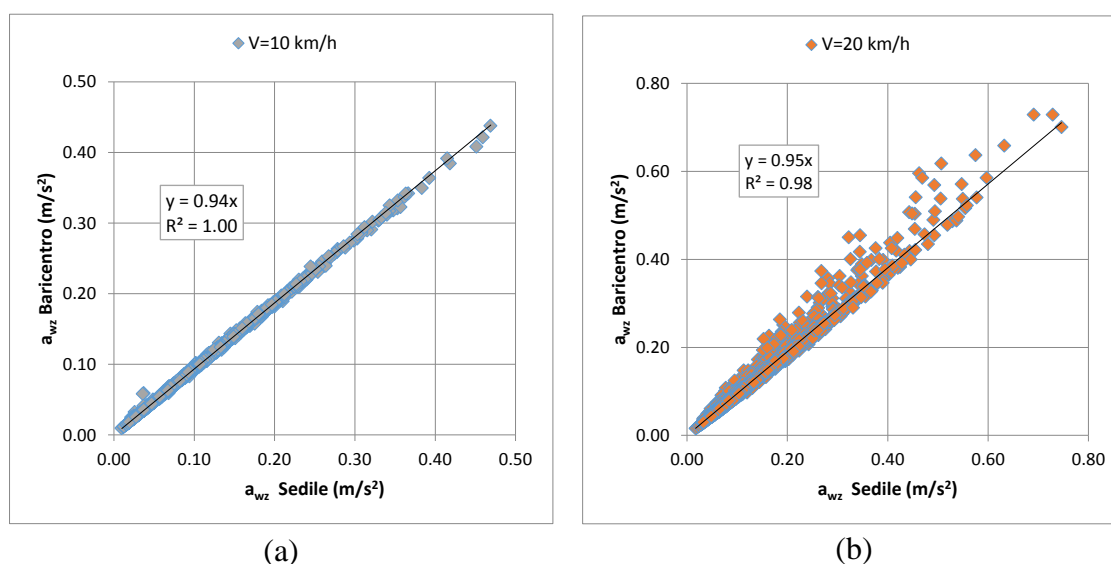
(b)



(c)

Figura 4-6. Relazione tra IRI e a_{wz} calcolata in diversi punti di misura: (a) sedile guidatore, (b) sedile passeggero e (c) baricentro veicolo

Dai risultati ottenuti, riportati in Figura 4-7, si può verificare come i valori dell'indice a_{wz} calcolati per le due differenti posizioni della strumentazione siano tra loro comparabili con buona approssimazione. Il risultato ottenuto sembrerebbe essere in contraddizione con una delle funzioni principali assolve dai sedili di un veicolo stradale, concernente l'attenuazione del livello di vibrazioni che possano interessare i passeggeri. Per tale motivo, sono state analizzate le funzioni di trasferimento dei PSD delle accelerazioni riferite al sedile del guidatore e al baricentro del mezzo modellato.



(a)

(b)

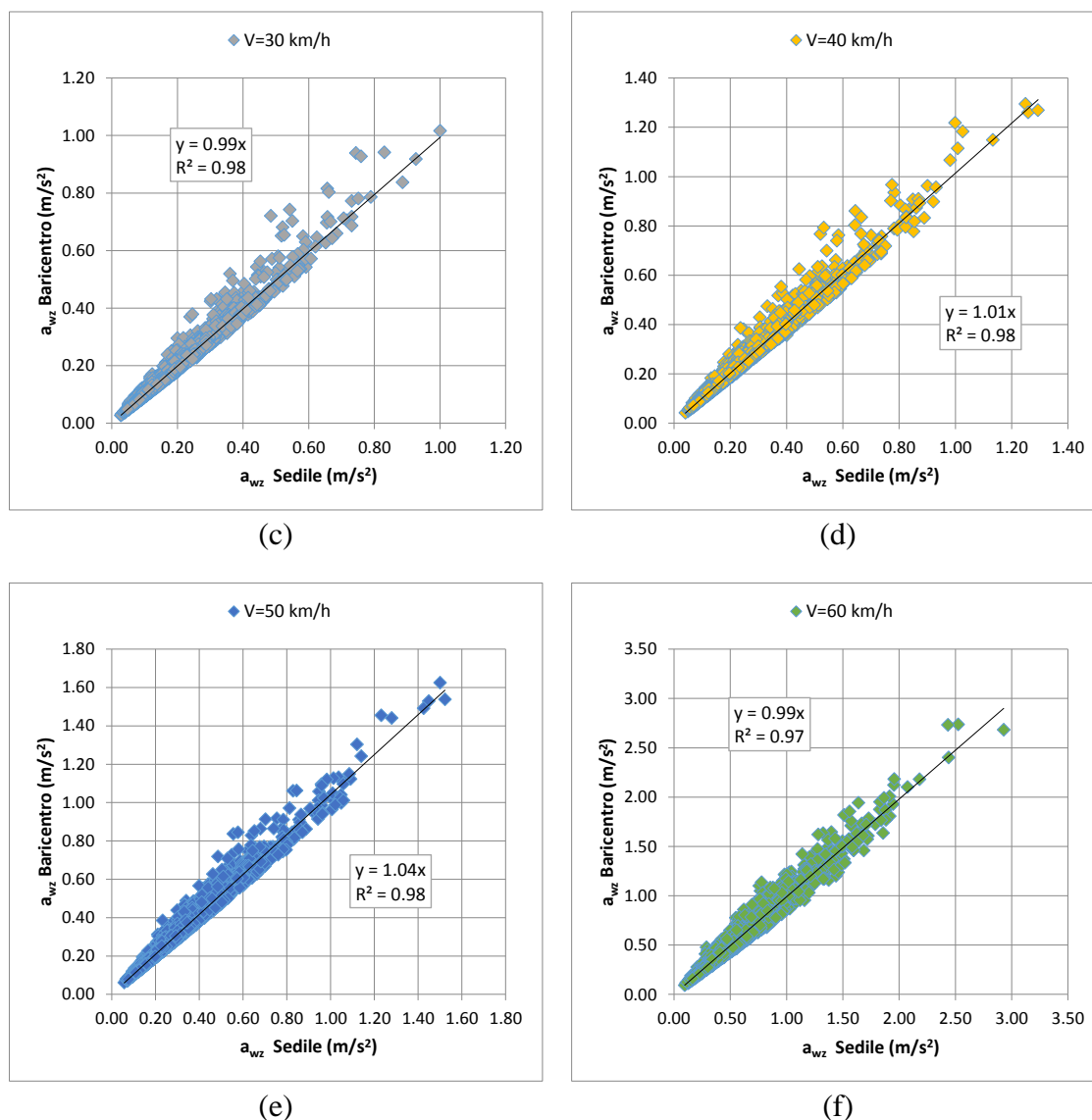


Figura 4-7. Relazione tra a_{wz} calcolata in corrispondenza del sedile del guidatore e in posizione baricentrica per diverse velocità di marcia (10-60 km/h)

Come si può notare dagli andamenti riportati in Figura 4-8, il sedile smorza essenzialmente le frequenze superiori a 10-20 Hz, riducendole mediamente di un ordine di grandezza rispetto al contenuto energetico rilevato in corrispondenza del pianale. In corrispondenza di tale intervallo, però, come si è visto in precedenza (Figura 4-2), il PSD delle accelerazioni assume valori di diversi ordini di grandezza inferiori rispetto alle frequenze comprese tra 0-5 Hz e 10 Hz; le quali quindi, risultano essere le bande di maggiore interesse per le velocità che generalmente caratterizzano le strade urbane (<50 km/h). Sempre dai grafici di Figura 4-8, inoltre, si può notare come in corrispondenza di tale intervallo di frequenza (0.5-10 Hz), l'efficacia del sedile risulta essere mediamente trascurabile.

Considerando tali aspetti, nonché la ricerca di una collocazione della strumentazione tale da agevolare le operazioni di fissaggio e smontaggio, si è deciso di posizionare le ap-

parecchiature prescelte per le misure in sito su di un supporto sito a cavallo del freno a mano; potendo considerarsi questa, con approssimazione accettabile, la posizione baricentrica del veicolo.

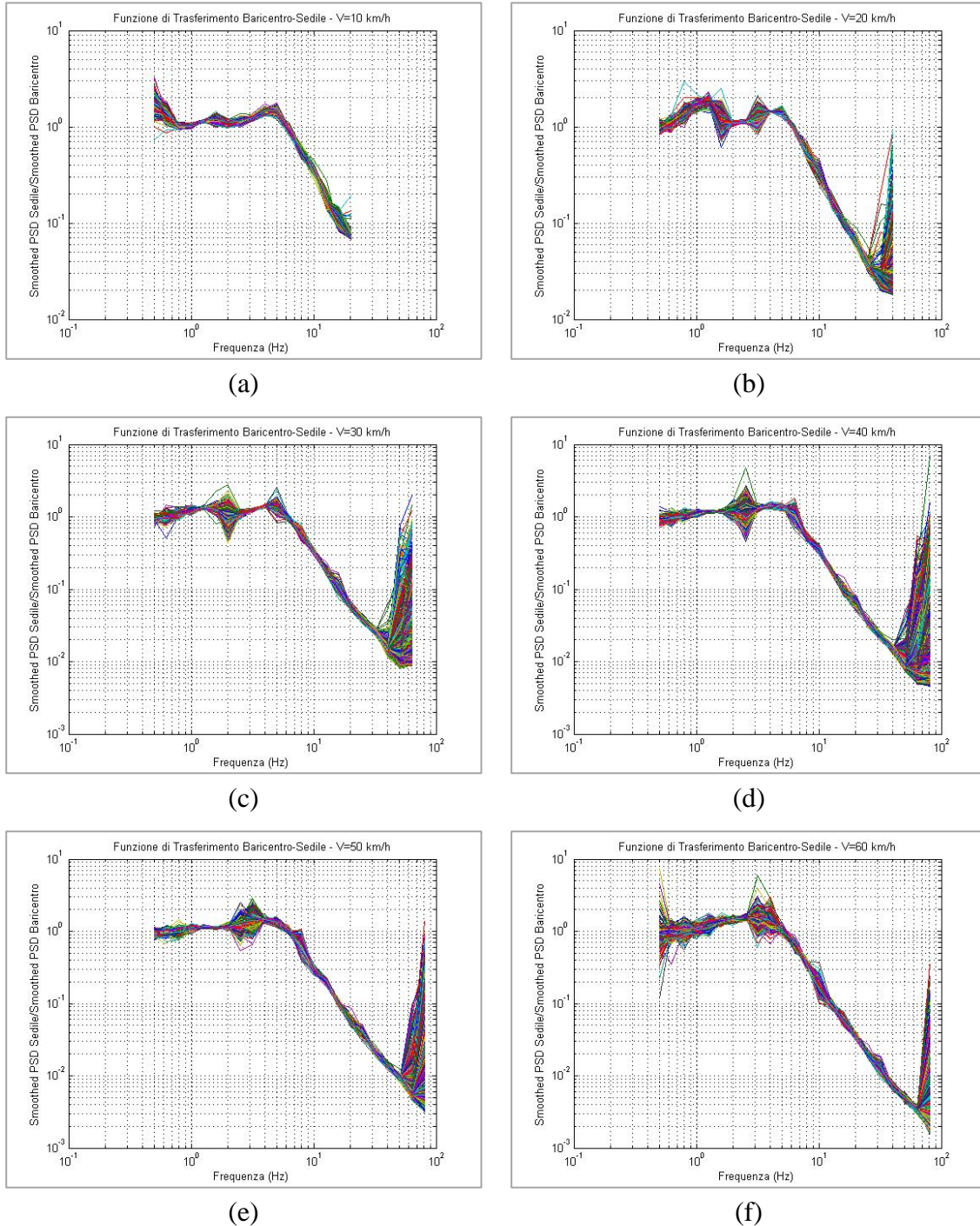


Figura 4-8. Funzione di trasferimento PSD delle accelerazioni tra sedile e baricentro per diverse velocità di marcia

4.3. Progettazione e verifica del supporto per la strumentazione

Scelta la posizione in cui collocare la strumentazione, si è proceduto all'ideazione del supporto di fissaggio della strumentazione. In particolare, al fine di minimizzare l'impatto sul veicolo da strumentare, si è deciso di sfruttare i bulloni di fissaggio delle guide più interne dei sedili anteriori della FIAT Panda (anno di immatricolazione 2007), prescelta per la realizzazione della campagna di misure in sito.

Nel corso del dottorato sono stati impiegati due distinti supporti. Il primo, presenta una struttura a mensola, ed è stato utilizzato in una fase preliminare al fine di verificare il funzionamento della piattaforma inerziale prescelta come strumento di precisione, nonché come riferimento per le misure effettuate tramite smartphone, durante le varie misure sperimentali.

Il secondo supporto, ideato al fine di poter consentire l'alloggiamento contemporaneo della piattaforma inerziale e di un cellulare smartphone, presenta invece una struttura a telaio. Entrambi, sono stati oggetto di analisi al fine di verificare che le frequenze naturali che li contraddistinguono non interferiscano con l'intervallo di frequenza di interesse al fine del calcolo dell'indice a_{wz} .

4.3.1. Supporto A: struttura a mensola

Al fine di eseguire una serie di analisi preliminari atte alla verifica del funzionamento della piattaforma inerziale prescelta, è stato assemblato un primo supporto costituito dai seguenti elementi (Figura 4-9): un bullone $\phi 8$, due cilindri di ottone forati e una piastra in PVC duro. I cilindri sono stati introdotti al fine di irrigidire il bullone e quindi la struttura portante del supporto. Alla piastra in PVC sono stati applicati un foro a profili multipli al fine di consentire il serraggio del bullone e alcuni fori $\phi 3$ sui quali innestare la piattaforma inerziale, la quale sarà introdotta e descritta nel capitolo successivo. Per il serraggio del bullone è stato quindi sfruttato il dado predisposto dalla casa di fabbricazione del veicolo e necessario per fissare la guida del sedile del passeggero.

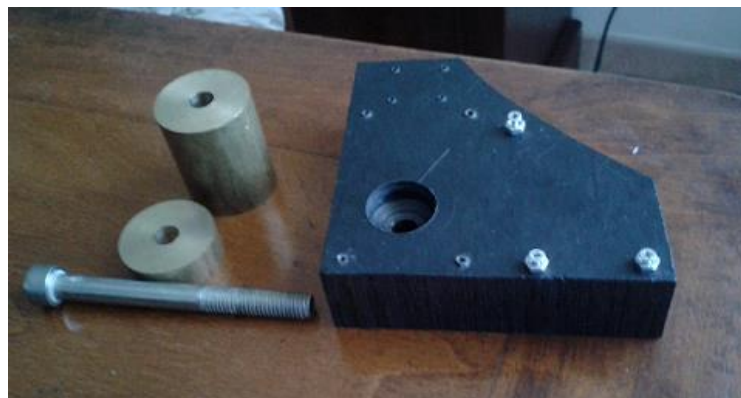


Figura 4-9. Elementi costitutivi del supporto A

Si è quindi proceduto alla modellazione dei singoli elementi tramite il software agli elementi finiti Abaqus, assemblando quindi il supporto A come riportato in Figura 4-10.

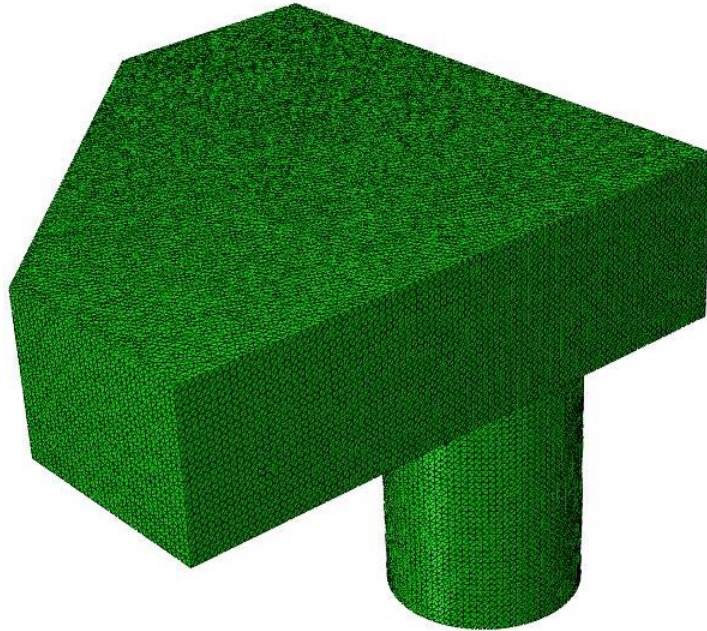
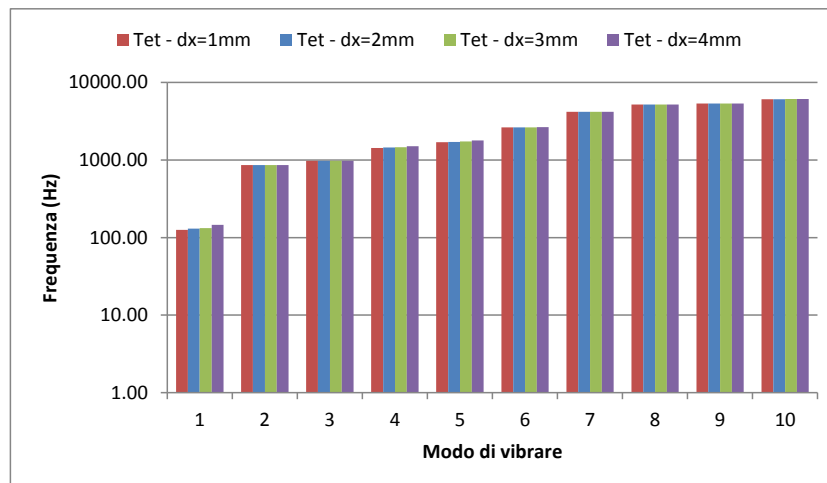


Figura 4-10. Modello agli elementi finiti indeformato del supporto A

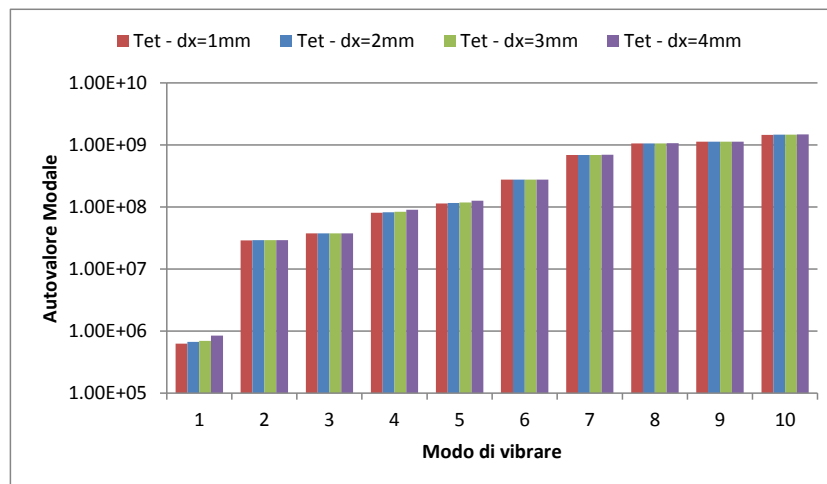
Per i parametri meccanici dei singoli materiali si è fatto riferimento a quanto presente in letteratura. I valori impiegati per l'analisi modale sono quindi riportati nella Tabella 4-2. Per la discretizzazione del modello sono stati utilizzati elementi tetraedrici C3D10, effettuando inoltre uno studio sulla convergenza dei risultati al variare della dimensione degli elementi di discretizzazione. In particolare, la dimensione massima degli elementi è stata fatta variare tra 1-4 mm. Considerando differenti dimensioni degli elementi tetraedrici, non sono state rilevate significative variazioni né delle frequenze (Figura 4-11a) né degli autovalori (Figura 4-11b) relativi ai primi 10 modi di vibrare.

Tabella 4-2. Proprietà meccaniche dei materiali utilizzati per il supporto A

Materiale	Densità ρ (kg/m³)	Modulo di Young E (MPa)	Coeff. di Poisson ν
<i>Ferro</i>	7874	200000	0.30
<i>Ottone</i>	8400	100000	0.35
<i>PVC dura</i>	1430	3000	0.35



(a)



(b)

Figura 4-11. Frequenze e autovalori modali al variare della dimensione della mesh

Come si può notare in particolare nella Figura 4-11a, le frequenze modali risultano tutte maggiori del limite superiore dell'intervallo di frequenza di interesse. L'unica frequenza modale che vi si avvicina è quella riferita al primo modo (pari a circa 126 Hz).

Di seguito, in Figura 4-12, si riportano le prime quattro forme modali. In particolare, il 1° modo di vibrare ha carattere torsionale, il 2° traslazionale lungo z (la terna di riferimento è quella del programma Abaqus), il 3° traslazionale lungo l'asse x e il 4° modo è anch'esso un modo traslazionale che interessa una direzione obliqua nel piano xz .

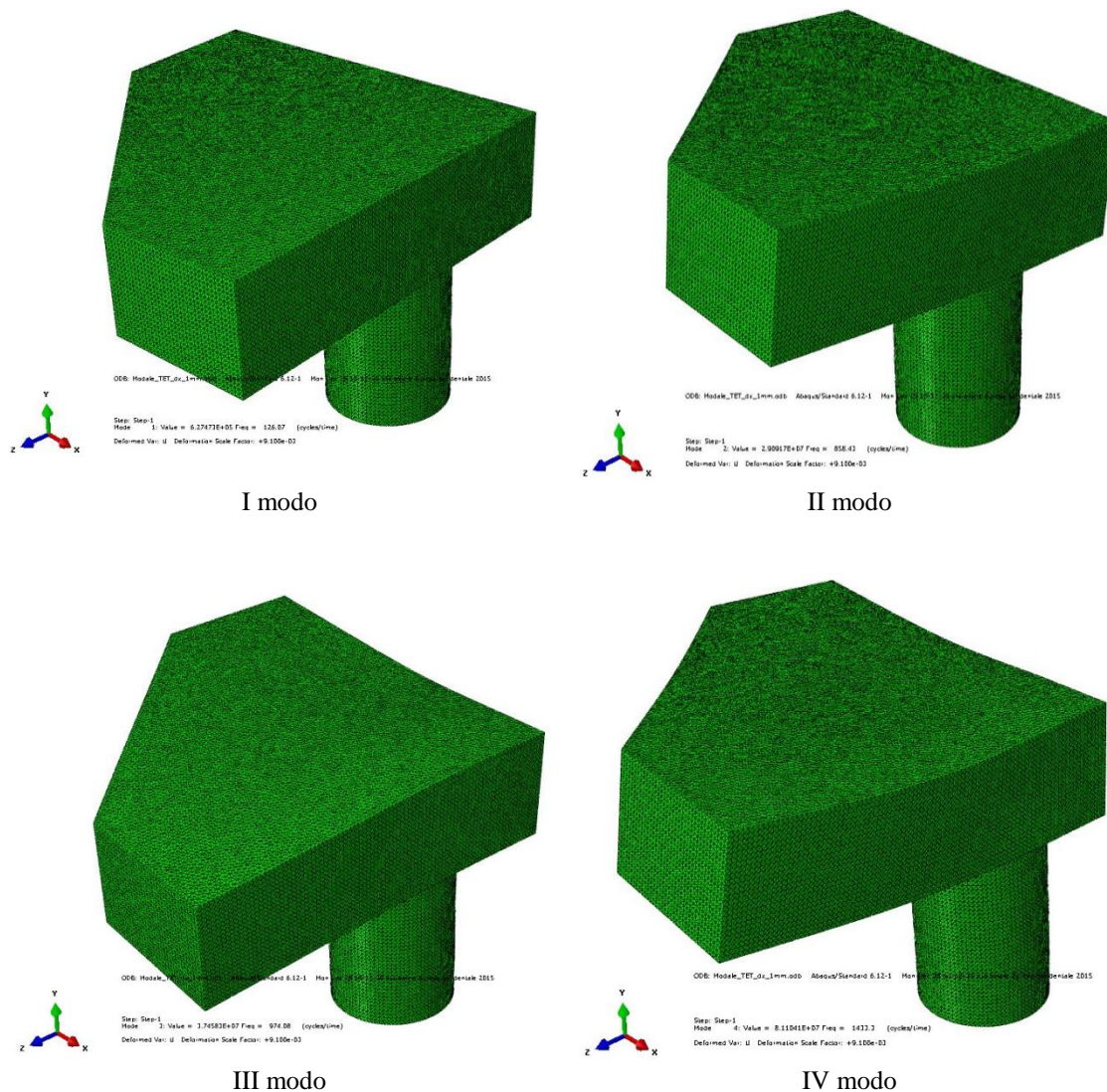


Figura 4-12. Forme modali dei primi quattro modi di vibrare del supporto A

4.3.2. Supporto B: struttura a telaio

Al fine di poter effettuare le misure dell'accelerazione verticale all'interno del veicolo strumentato impiegando contemporaneamente la piattaforma inerziale e il cellulare smartphone, collocati approssimativamente nel medesimo punto di osservazione, è stato ideato un supporto a telaio di dimensioni tali da consentire il posizionamento di entrambe le strumentazioni. La struttura a ponte viene fissata sfruttando i bulloni di attacco delle guide interne dei sedili anteriori, determinando quindi la collocazione delle apparecchiature lungo l'ipotetico asse longitudinale del veicolo e in corrispondenza della posizione del freno a mano.

In un primo momento, prese le dimensioni di ingombro massime a disposizione per il fissaggio del supporto tra i due sedili, è stata esaminata una struttura a ponte caratterizzata da angoli retti, come riportata in Figura 4-13. In considerazione della regolarità della geometria del supporto, si è deciso di utilizzare per la discretizzazione del modello, elementi esaedrici C3D8.

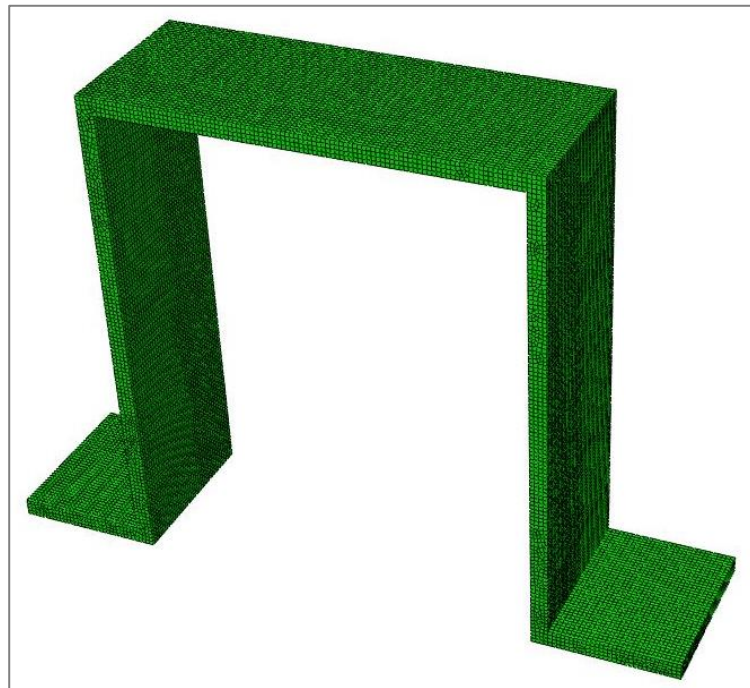
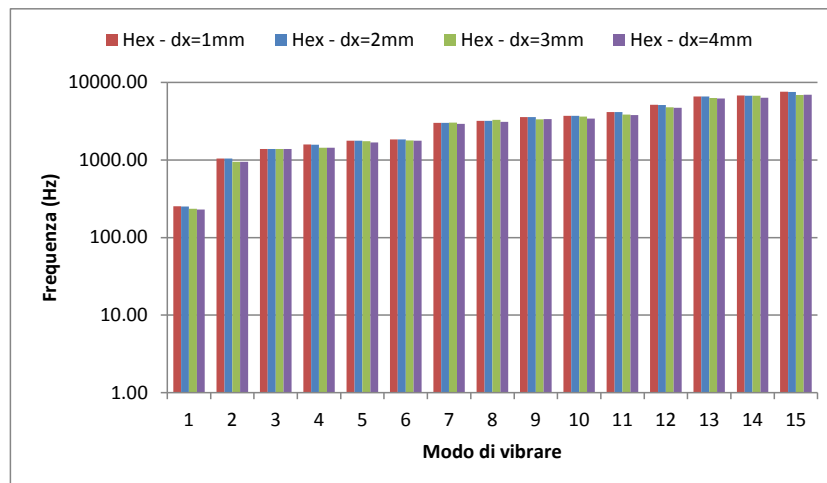
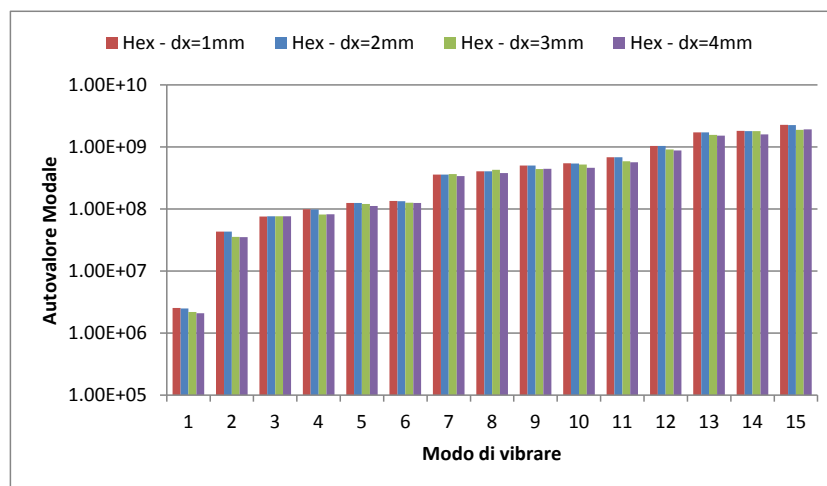


Figura 4-13. Conformazione iniziale del supporto B

Anche in questo caso, così come per il supporto A, è stata realizzata un'analisi di convergenza dei risultati al variare della dimensione caratteristica della mesh esaedrica nell'intervallo 1-4 mm. Dai risultati ottenuti, riportati in Figura 4-14, non sono state riscontrate variazioni significative delle frequenze e degli autovalori dei primi 15 modi di vibrare.



(a)



(b)

Figura 4-14. Frequenze e autovalori modali per la struttura a ponte ad angoli retti al variare della dimensione della mesh

Al momento della realizzazione della struttura, assemblata tramite piastre di ferro saldate, a causa di alcune problematiche costruttive, si è determinato un angolo non retto, pari a circa 81.44° . Per valutare quindi l'influenza di tale valore rispetto allo schema considerato preliminarmente, è stato implementato un nuovo modello tenendo conto di tale variazione (Figura 4-15). In questo caso, al fine di evitare distorsioni agli elementi esaedrici, si è scelto di impiegare per la mesh elementi tetraedrici C3D10. Confrontando le frequenze e gli autovalori modali ottenuti per le due configurazioni del supporto (Figura 4-16), si sono riscontrate alcune differenze soprattutto in corrispondenza delle prime cinque forme modali. Tali variazioni, in ogni caso, non comportano particolari problematiche per l'implementazione del sistema di rilievo delle accelerazioni verticali. Infatti queste, sono semplicemente una conseguenza della variazione delle forme modali e delle loro deformate, come si può notare dalla comparazione dei primi quattro modi riportati in Figura 4-17.

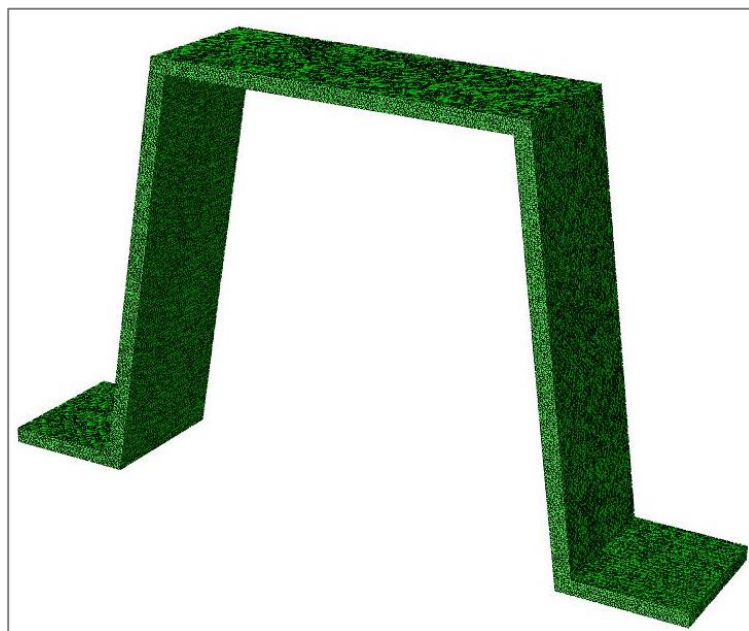
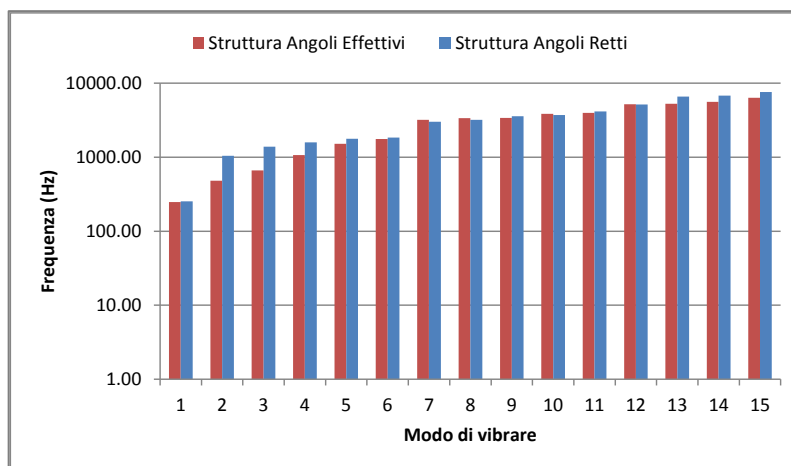
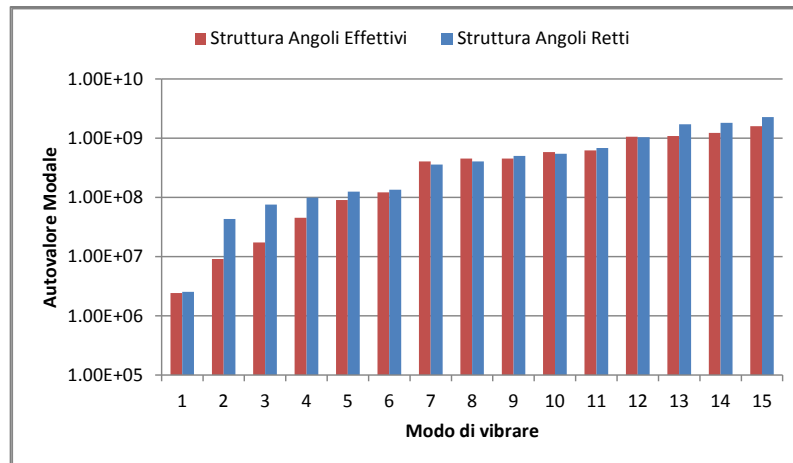


Figura 4-15. Conformazione effettiva del supporto B

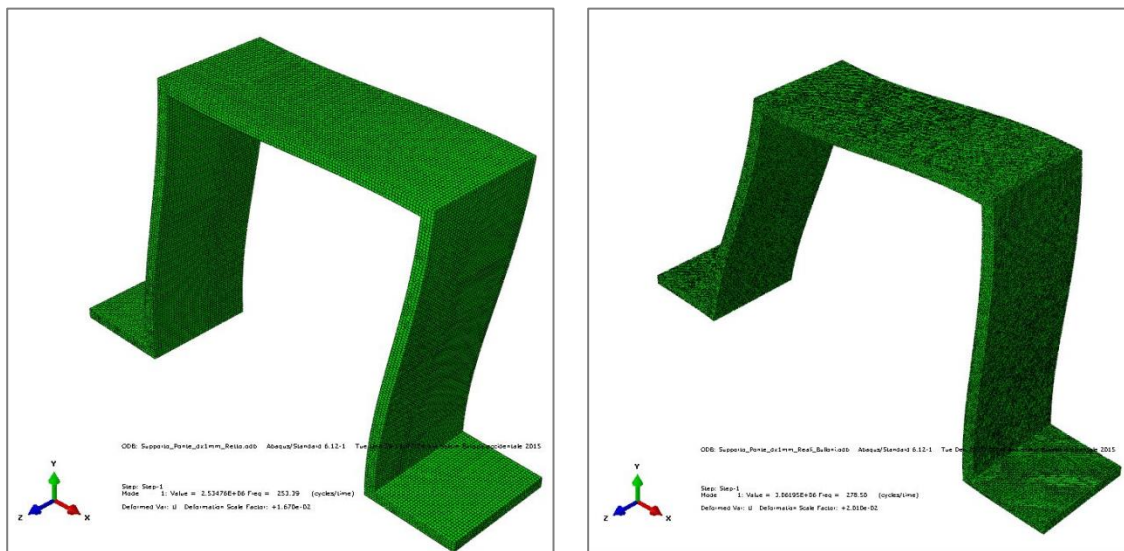


(a)



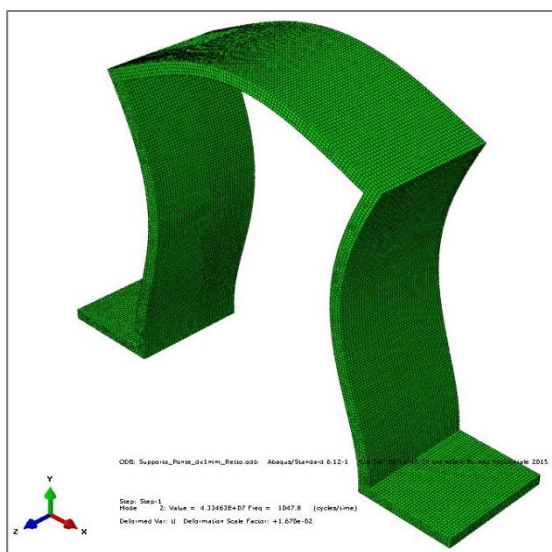
(b)

Figura 4-16. Confronto tra frequenze e autovalori modali ottenuti per struttura ad angoli retti e angoli effettivi

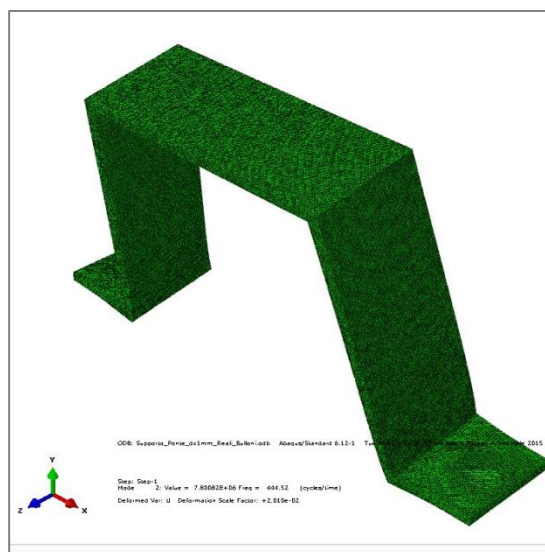


I modo – angoli retti

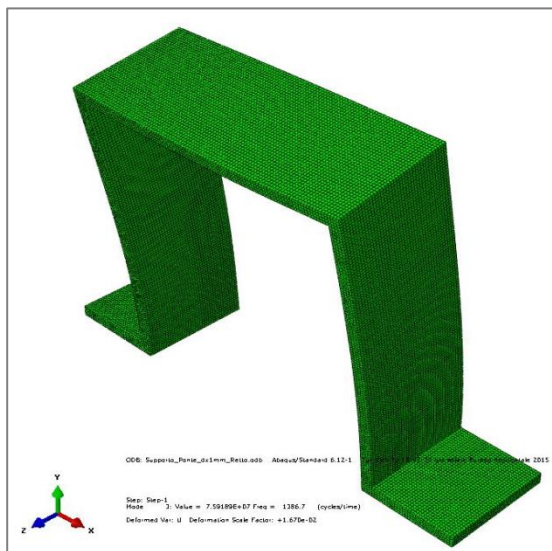
I modo – angoli effettivi



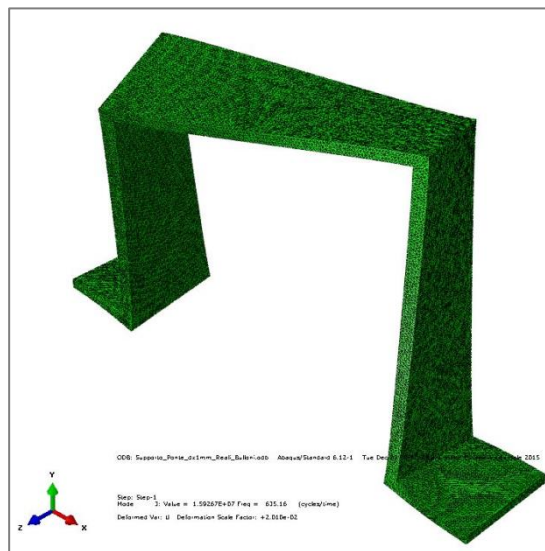
II modo – angoli retti



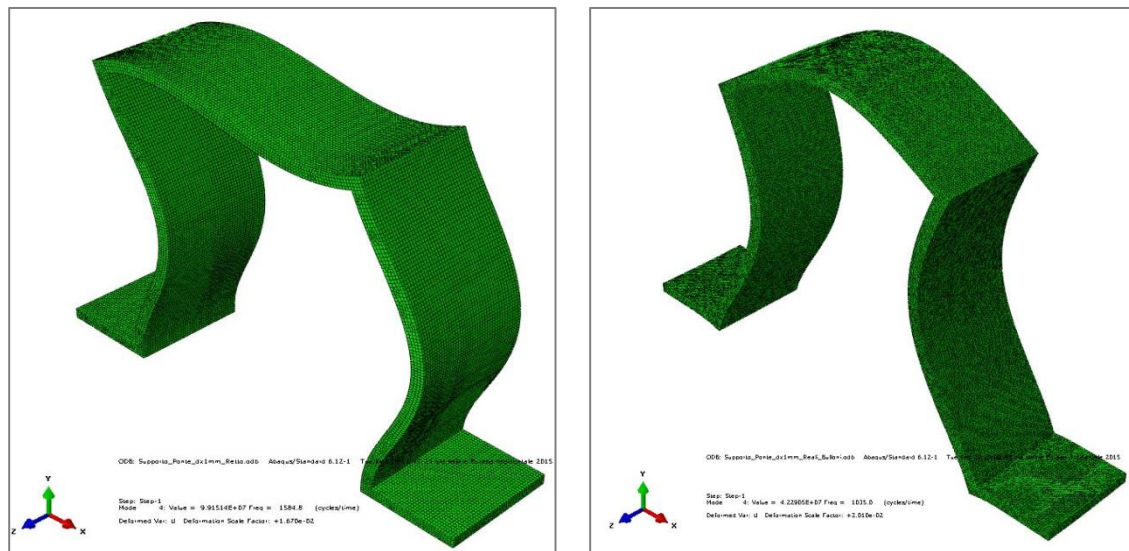
II modo – angoli effettivi



III modo – angoli retti



III modo – angoli effettivi



IV modo – angoli retti

IV modo – angoli effettivi

Figura 4-17. Confronto tra le forme modali dei primi quattro modi di vibrare ottenute per le due configurazioni del supporto B

Verificata quindi la struttura di base del supporto B per il fissaggio al telaio del veicolo, sono state prese in esame diverse tipologie di piastre rettangolari da applicare in sommità al telaio; di dimensioni tali da consentire il fissaggio delle strumentazioni. Tali piastre, infatti, consentono di aumentare la superficie orizzontale a disposizione, avendo dimensione pari a 125x60 mm. In particolare, sono stati considerati due materiali distinti (ferro e PVC) e due spessori (0.5 cm e 1 cm). In Figura 4-18 si riporta a titolo di esempio la geometria del supporto B completo della piastra superiore, di spessore pari a 1 cm. Per tutti e quattro i casi di studio, sono stati utilizzati per la discretizzazione del modello, elementi tetraedrici C3D10 con dimensione caratteristica pari a 2 mm.

Per quanto concerne i valori delle frequenze modali si riscontrano variazioni dell'ordine dei 40-70 Hz per il primo modo di vibrare tra le varie configurazioni esaminate (Figura 4-19a). Tali differenze, non risultano essere significative per l'intervallo di frequenze di interesse ai fini del calcolo dell'indice a_{wz} . In particolare, impiegando una piastra superiore in PVC, non si riscontrano sostanziali variazioni rispetto ai valori determinati per la sola struttura a telaio (Figura 4-20). Ad esempio, la frequenza per il primo modo di vibrare per il solo telaio è risultata essere pari a circa 248 Hz, mentre applicando la piastra superiore in PVC con spessore di 1 cm è stata ottenuta una frequenza pari a circa 253 Hz. Utilizzando invece il ferro come materiale, a parità di spessore, è stato trovato un valore pari a circa 189 Hz. In considerazione della minor incidenza rispetto alla sola struttura, si è scelto di utilizzare il PVC, anche nell'ottica di ridurre il peso complessivo del supporto. Per quanto concerne ulteriori eventuali variazioni sul comportamento dinamico del supporto B una volta fissate le strumentazioni, queste sono state reputate trascurabili in considerazione delle masse ridotte che caratterizzano le apparecchiature impiegate.

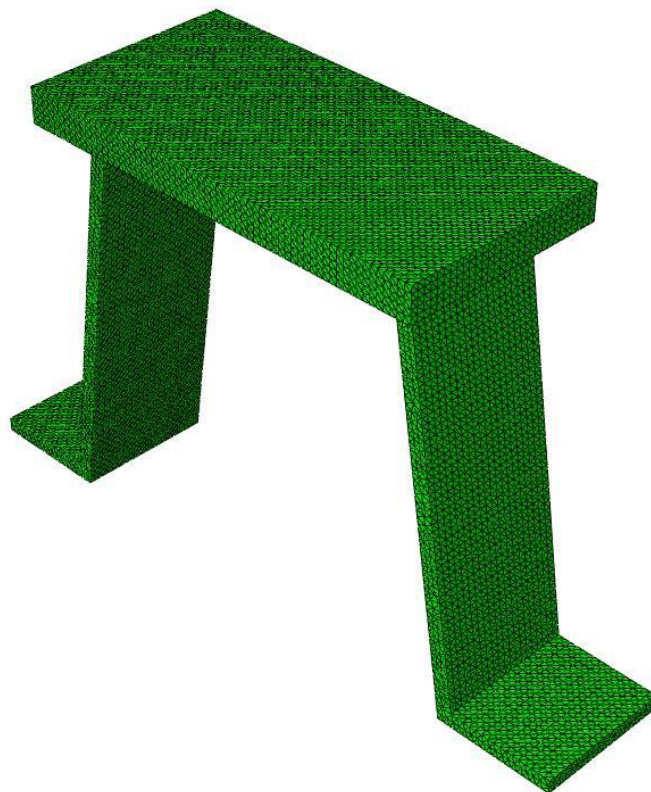
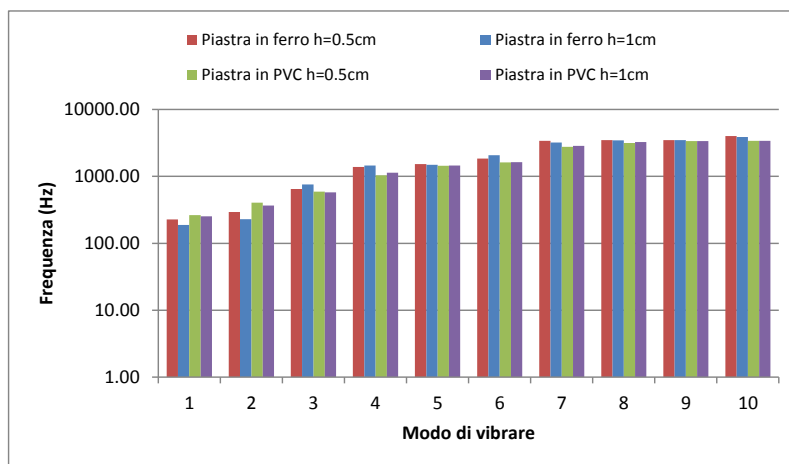
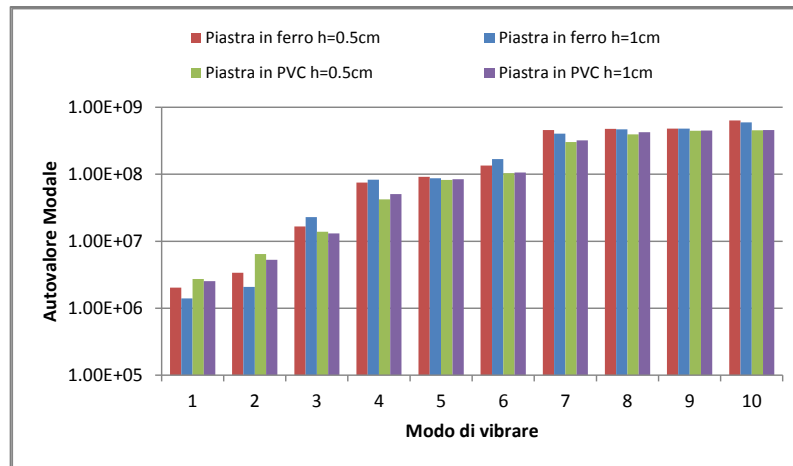


Figura 4-18. Supporto B completo della piastra superiore



(a)



(b)

Figura 4-19. Frequenze e autovalori modali al variare del materiale e dello spessore della piastra superiore

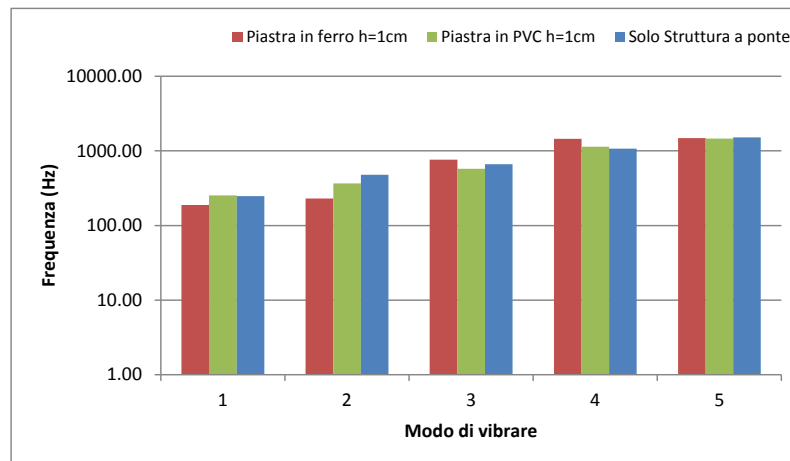


Figura 4-20. Confronto tra le frequenze modali della sola struttura a telaio e quelle determinate con l'applicazione di una piastra con spessore di 1 cm

4.4. Effetto di disturbo dell'accelerazione di gravità sull'accelerazione verticale misurata

Al fine di misurare e valutare effettivamente solo l'accelerazione verticale dovuta alla presenza delle irregolarità lungo il tratto stradale percorso, è di fondamentale importanza depurare le misurazioni dalla componente dell'accelerazione di gravità lungo l'asse verticale z del sistema di riferimento intrinseco alla piattaforma inerziale e al cellulare smartphone. In generale infatti, la terna locale Est-Nord-Up (riferita al piano tangente localmente alla superficie terrestre) non coincide con quella delle strumentazioni di misura (x, y, z); di conseguenza, quota parte del vettore accelerazione di gravità graverà sulle tre

componenti x, y, z in funzione della posizione relativa dei due sistemi di riferimento ad assi ortogonali.

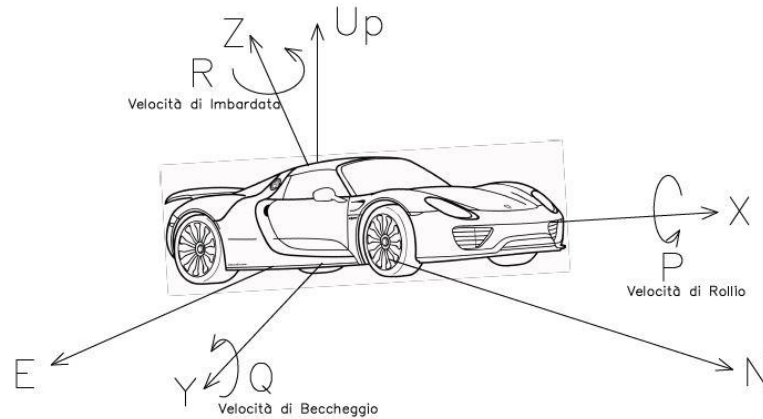


Figura 4-21. Sistemi di riferimento Est, Nord, Up e intrinseco al veicolo x, y, z

I metodi principali suggeriti per tale operazione, consistono essenzialmente nell'applicare al segnale dell'accelerazione verticale un filtro *high-pass*, oppure, noti gli angoli di Eulero, determinare la proiezione lungo l'asse z del vettore accelerazione di gravità tramite l'impiego di opportune matrici di trasformazione. Nel primo caso, si parte dal presupposto che il contributo dovuto all'accelerazione di gravità si mantenga pressoché costante e quindi corrisponda essenzialmente ad una componente spettrale con frequenza $f \rightarrow 0$ (Figura 4-22).

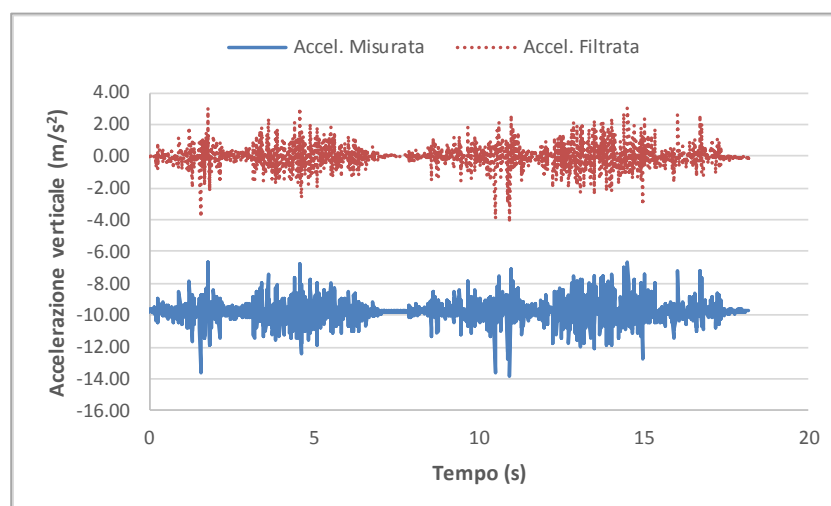
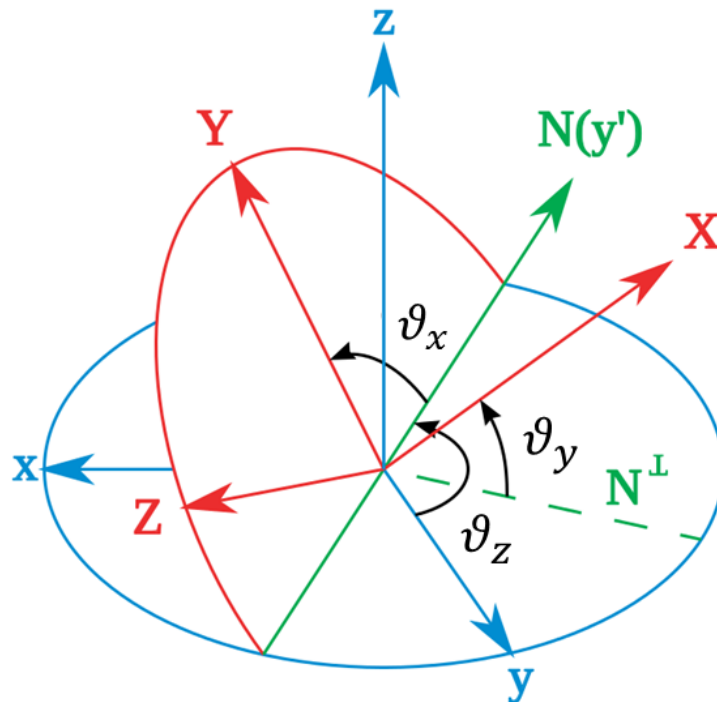


Figura 4-22. Misura accelerazione verticale grezza e filtrata con filtro passa-alto

Tale approccio risulta valido quando le variazioni di assetto che interessano il veicolo strumentato presentano angoli molto piccoli, per cui la componente dell'accelerazione verticale proiettata lungo l'asse z non varia durante il tempo di misura.

Il secondo metodo invece, presuppone la conoscenza degli angoli di Eulero necessari per determinare l'inclinazione del veicolo rispetto ad un sistema fisso (terna Est,Nord,Up), ottenibili tramite l'impiego di un giroscopio.



Euler angles – The xyz (fixed) system is shown in blue, the XYZ (rotated) system is shown in red.

Figura 4-23. Angoli di Eulero

Per effettuare la trasformazione dal sistema di riferimento mobile (x,y,z) a quello fisso (Est,Nord,Up) e viceversa, intervengono tre matrici di rotazione (Eq. 4.1), ciascuna delle quali corrisponde ad uno degli angoli di Eulero che determinano l'assetto del veicolo: rollio (*roll*), beccheggio (*pitch*) e imbardata (*yaw*).

$$\underline{R}_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \vartheta_x & -\text{sen } \vartheta_x \\ 0 & \text{sen } \vartheta_x & \cos \vartheta_x \end{bmatrix}$$

Eq. 4.1

$$\underline{R}_y = \begin{bmatrix} \cos \vartheta_y & 0 & \text{sen } \vartheta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\text{sen } \vartheta_y & 0 & \cos \vartheta_y \end{bmatrix}$$

$$\underline{R}_z = \begin{bmatrix} \cos \vartheta_z & -\sin \vartheta_z & 0 \\ \sin \vartheta_z & \cos \vartheta_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

La problematica principale in questo secondo approccio consiste nell'indeterminatezza del problema. Infatti, noti gli angoli di rotazione, a seconda dell'ordine con il quale vengono effettuate tali trasformazioni si ottengono risultati diversi. Tale affermazione si può facilmente verificare anche confrontando la matrice di trasformazione globale derivante dal prodotto delle singole matrici di rotazione, in funzione dell'ordine con cui si realizzano i prodotti matriciali (e.g. $\underline{R}_x \cdot \underline{R}_y \cdot \underline{R}_z \neq \underline{R}_y \cdot \underline{R}_x \cdot \underline{R}_z \neq \underline{R}_z \cdot \underline{R}_y \cdot \underline{R}_x$). Qualora però gli angoli di assetto varino entro intervalli alquanto ristretti, ad esempio 10° per il beccheggio e 5° per il rollio, in qualsiasi ordine vengano considerate le tre matrici di rotazione si ottengono risultati pressoché coincidenti. Nel presente studio, avendo verificato che nella zona ove sono state effettuate le misure in sito non si hanno variazioni eccedenti tali limiti, è stata impiegata la seguente matrice di trasformazione (Eq. 4.2), nota anche come DCM (*Direction Cosine Matrix*):

$$\underline{R} = \underline{R}_x \cdot \underline{R}_y \cdot \underline{R}_z = \begin{bmatrix} \cos \vartheta_y \cdot \cos \vartheta_z & -\cos \vartheta_y \cdot \sin \vartheta_z & \sin \vartheta_y \\ \cos \vartheta_z \cdot \sin \vartheta_y \cdot \sin \vartheta_x + \cos \vartheta_x \cdot \sin \vartheta_z & -\sin \vartheta_x \cdot \sin \vartheta_y \cdot \sin \vartheta_z + \cos \vartheta_x \cdot \cos \vartheta_z & -\sin \vartheta_x \cdot \cos \vartheta_y \\ -\cos \vartheta_x \cdot \sin \vartheta_y \cdot \cos \vartheta_z + \sin \vartheta_x \cdot \sin \vartheta_z & \cos \vartheta_x \cdot \sin \vartheta_y \cdot \sin \vartheta_z + \sin \vartheta_x \cdot \cos \vartheta_z & \cos \vartheta_x \cdot \cos \vartheta_y \end{bmatrix}$$

È possibile quindi determinare le proiezioni del vettore accelerazione di gravità lungo i tre assi del sistema di riferimento intrinseco del veicolo applicando la seguente formula (Eq. 4.3):

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \underline{R} \cdot \begin{bmatrix} E \\ N \\ Up \end{bmatrix} \quad \text{Eq. 4.3}$$

Essendo l'unica componente non nulla del vettore accelerazione di gravità quella lungo l'asse Up del sistema di riferimento locale fisso, le tre proiezioni sugli assi ortogonali del sistema di riferimento intrinseco al veicolo dipendono esclusivamente dalla terza colonna della matrice \underline{R} , e quindi solo dagli angoli di rollio e beccheggio. In particolare, la componente verticale lungo z si ottiene applicando semplicemente la seguente equazione (Eq. 4.4):

$$a_{g,z} = a_g \cdot \cos \vartheta_x \cdot \cos \vartheta_y \quad \text{Eq. 4.4}$$

Considerando sempre il segnale di accelerazione misurato riportato precedentemente in Figura 4-22, si può notare come utilizzando i due metodi sopra descritti si ottengono risultati quasi perfettamente sovrapponibili (Figura 4-24). Gli errori assoluti calcolati per i due segnali così ottenuti, sono caratterizzati dai parametri statistici riportati nella Tabella 4-3.

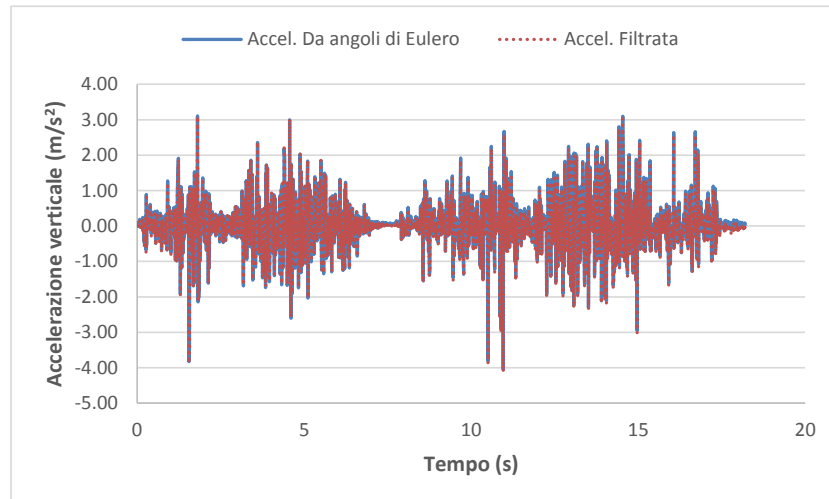


Figura 4-24. Confronto tra accelerazione filtrata con filtro high-pass e accelerazione depurata del vettore accelerazione di gravità tramite matrice DCM

Tabella 4-3. Parametri statistici dell'errore assoluto tra i segnali di accelerazione verticale ottenuti tramite i due diversi approcci

	[m/s ²]
<i>Media</i>	0.049
<i>RMSE</i>	0.056
<i>Deviazione standard</i>	0.027
<i>Minimo</i>	1.66E-04
<i>Massimo</i>	0.120

Anche qualora non vi sia una variazione significativa degli angoli di assetto del veicolo e tralasciando in questa fase l'errore associato alla misura di questi, le variazioni registrate derivano essenzialmente dal fatto che nel primo caso si associa alla componente dell'accelerazione di gravità da eliminare un valor medio, tenuto conto dell'errore associato all'accelerometro. Con il secondo approccio, invece, si considera un valore costante assegnato all'accelerazione di gravità (pari a circa 9.81 m/s²), ma vi saranno delle oscillazioni (più o meno lievi) dell'intensità della componente lungo z dell'accelerazione di gravità dovute all'effettiva variazione degli angoli di assetto, a cui si sommerà l'effetto dovuto all'accuratezza dei giroscopi.

4.5. Selezione Applicazione per cellulari smartphone

Come già anticipato in precedenza, in alcuni studi in letteratura si riporta come la frequenza massima di campionamento consentita dagli accelerometri montati attualmente sui cellulari smartphone sia pari a 100 Hz. Al fine di verificare tale comportamento, soprattutto in merito alla capacità di tali apparecchiature di mantenere un campionamento costante lungo l'intero periodo di misura, sono state eseguite alcune prove presso il laboratorio di Strade del Dipartimento di Ingegneria Civile Edile e Ambientale (DICEA), utilizzando il macchinario Shenck. In particolare, fissando il cellulare in posizione orizzontale su di una piastra, alla quale, tramite l'azione di un pistone verticale è stato imposto uno spostamento sinusoidale mono-frequenziale per circa 1 minuto. Nel dettaglio, sono state prese in esame tre frequenze pari a 10 Hz, 15 Hz e 20 Hz. Durante lo svolgimento delle prove, al fine di evitare possibili interferenze esterne, il dispositivo è stato impostato in modalità *offline/aereo*.

Come si può notare dai parametri statistici relativi all'incremento temporale registrato durante tali misure, riportati in Tabella 4-4, il valor medio del dt risulta essere pari proprio a 10 ms (0.01 s), con una variabilità alquanto contenuta (deviazione standard compresa tra tra 1.38 e 1.46 ms). Nonostante ciò, essendo necessario un segnale campionato con passo costante ai fini del calcolo dello spettro dell'accelerazione e quindi dell'indice a_{wz} , sarà opportuno interpolare il segnale accelerometrico adottando una opportuna legge di interpolazione.

Tabella 4-4. Analisi statistica incremento temporale dispositivo smartphone durante le prove di laboratorio

dt [ms]	Prove di laboratorio		
	Sinusoide 10 Hz	Sinusoide 15 Hz	Sinusoide 20 Hz
Media	10.17	10.16	10.18
Errore standard	0.019	0.018	0.020
Mediana	10.00	10.00	10.00
Moda	10.00	10.00	10.00
Deviazione standard	1.38	1.43	1.46
Intervallo	19.00	26.00	24.00
Minimo	4.00	4.00	5.00
Massimo	23.00	30.00	29.00
N. campioni	5527	6333	5163

Al fine di poter impiegare i dispositivi smartphone in sostituzione di piattaforme inerziali più costose e precise, occorre che le letture delle misure fornite dalle diverse strumentazioni (giroscopi, accelerometri, ricevitore GPS) siano tra loro sincronizzate. A tale scopo, sono state ricercate eventuali applicazioni gratuite per il sistema operativo Android già disponibili, che potessero soddisfare tali requisiti.

In particolare, ne sono state individuate tre denominate: OARS – IMU & GPS Data Logger (65), HyperIMU (66) e Sensor fusion app (67). Tutte queste applicazioni consentono di registrare ed esportare i dati misurati dalle varie strumentazioni con un *timing* tra loro

sincronizzato. È bene ricordare che il funzionamento del GPS è basato su di una frequenza di campionamento notevolmente inferiore (solitamente compresa tra 1 e 5 Hz) rispetto a quanto possibile per i dati accelerometrici, per cui benché sincronizzati, il rapporto tra il numero di letture fornite dagli accelerometri e dai giroscopi con quelle del GPS sarà pari a 10 o maggiore.

La principale discriminante ai fini della scelta dell'applicazione da impiegare durante le misure sperimentali, riguarda la capacità di utilizzare la frequenza massima di campionamento disponibile per i cellulari smartphone e mantenerla il più possibile costante durante l'intero periodo di misura. Come si può notare dai parametri statistici relativi all'incremento temporale registrato per le tre diverse applicazioni (Tabella 4-5), non tutte riescono a sfruttare la massima frequenza di campionamento pari a circa 100 Hz.

Tabella 4-5. Principali parametri statistici degli incrementi temporali registrati per le tre diverse applicazioni per Android

<i>dt in [ms]</i>	<i>App per Android</i>		
	<i>OARS</i>	<i>HyperIMU</i>	<i>SensorFusion</i>
<i>Media</i>	50.35	23.58	14.22
<i>Mediana</i>	43.00	23.00	10.00
<i>Moda</i>	42.00	23.00	10.00
<i>Deviazione standard</i>	73.00	1.74	9.54
<i>Minimo</i>	24.00	21.00	3.00
<i>Massimo</i>	1685.00	44.00	115.00

In particolare, l'unica che si avvicina a tale valore è risultata essere l'applicazione Sensor fusion app, la quale comunque presenta una variabilità non trascurabile dell'incremento temporale; confermando la necessità di interpolare il segnale registrato tramite dispositivi smartphone al fine di ottenere dati campionati con passo costante e quindi poter procedere con il calcolo dell'indice a_{wz} secondo quanto prescritto dalla ISO 2631-1.

Per quanto concerne l'operazione di interpolazione, questa è stata realizzata tramite la funzione predefinita presente in Matlab *interp1*, la quale consente di poter impiegare uno tra i vari metodi di interpolazione riportati nella Tabella 4-6. Tra tutti questi sono stati presi in esame i seguenti: *linear*, *spline* e *pchip/cubic*; al fine di verificare l'effettiva influenza del tipo di metodo di interpolazione prescelto sul valore finale dell'indice a_{wz} .

Tabella 4-6. Metodi di interpolazione utilizzabili tramite la funzione *interp1* di Matlab

Method	Description	Continuity	Comments
'linear'	Linear interpolation. The interpolated value at a query point is based on linear interpolation of the values at neighboring grid points in each respective dimension. This is the default interpolation method.	C^0	Requires at least 2 points. Requires more memory and computation time than nearest neighbor.
'nearest'	Nearest neighbor interpolation. The interpolated value at a query point is the value at the nearest sample grid point.	Discontinuous	Requires at least 2 points. Modest memory requirements. Fastest computation time.
'next'	Next neighbor interpolation. The interpolated value at a query point is the value at the next sample grid point.	Discontinuous	Requires at least 2 points. Same memory requirements and computation time as 'nearest'.
'previous'	Previous neighbor interpolation. The interpolated value at a query point is the value at the previous sample grid point.	Discontinuous	Requires at least 2 points. Same memory requirements and computation time as 'nearest'.
'pchip'	Shape-preserving piecewise cubic interpolation. The interpolated value at a query point is based on a shape-preserving piecewise cubic interpolation of the values at neighboring grid points.	C^1	Requires at least 4 points. Requires more memory and computation time than 'linear'.
'cubic'	Same as 'pchip'. It will change in a future release. This method will perform cubic convolution.	C^1	This method currently returns the same result as 'pchip'.
'spline'	Spline interpolation using not-a-knot end conditions. The interpolated value at a query point is based on a cubic interpolation of the values at neighboring grid points in each respective dimension.	C^2	Requires at least 4 points. Requires more memory and computation time than 'pchip'.

5. STRUMENTAZIONE PRESCELTA PER LE MISURE IN SITO

Durante la campagna di misure di misure in sito effettuate presso il comune di Valentano (VT), ci si è avvalsi delle seguenti strumentazioni:

- ✓ Piattaforma inerziale con antenna GPS denominata LandaMark 10 GPSA-150-10-200 (per brevità indicata nel seguito anche come LMRK10) fissata al supporto B tramite quattro viti.
- ✓ Due cellulari smartphone modello Samsung Galaxy S4 GT-19505, uno fissato al supporto B in prossimità della piattaforma inerziale e l'altro attaccato al parabrezza anteriore del veicolo tramite l'utilizzo di un comune supporto a ventosa per cellulari, disponibile in commercio.
- ✓ Videocamera Blackvue, impiegata essenzialmente per valutare eventuali punti o eventi singolari presenti lungo il tracciato durante le misure. Le riprese inoltre, sono state utilizzate per verificare lo stato della pavimentazione al momento del rilievo accelerometrico rispetto a quanto riscontrato durante il rilievo del PCI; quest'ultimo effettuato in un periodo antecedente. Occorre precisare che la videocamera Blackvue fornisce, in aggiunta alle riprese video, dati accelerometrici e di posizionamento GPS sincronizzati. Si è riscontrato però un passo medio di campionamento durante il periodo di misura pari a circa 93 ms a cui corrisponde una frequenza di campionamento di poco superiore a 10 Hz. Tale valore risulta incompatibile per le finalità prefissate per tale studio.

Per quanto concerne l'impiego di due cellulari smartphone di uguale modello, si è deciso di valutare e verificare la possibilità di effettuare le misure utilizzando direttamente uno dei vari supporti attualmente disponibili in commercio. Al fine di rendere maggiormente significativa la comparazione tra i due punti di osservazione sono stati utilizzati due dispositivi aventi specifiche tecniche identiche delle strumentazioni che li costituiscono (accelerometro, giroscopio, ricevitore GPS, etc.).

Di seguito si fornisce una breve descrizione delle principali caratteristiche prestazionali della piattaforma inerziale LMRK10 e dei cellulari smartphone.

5.1. Piattaforma Inerziale LandMark 10 GPSA-150-10-200

L'unità LandMark 10 GPSA-150-10-200 è un prodotto della *Gladiator Technologies* e si basa sulla tecnologia MEMS (Micro Electro Mechanical Systems). Nella nomenclatura identificativa dello strumento sono indicate le caratteristiche principali che lo contraddistinguono (Figura 5-1), quali l'intervallo di funzionamento dei giroscopi ($\pm 150^\circ/\text{sec}$) e degli accelerometri ($\pm 10g$'s), nonché il tipo di prodotto GPS/AHRS (Attitude Heading Reference System).

Le singole parti che compongono tale unità sono essenzialmente:

- L'unità di misura inerziale (*Inertial Measurement Unit – IMU*) (Figura 5-2a);
- Il ricevitore GPS integrato (Figura 5-2b);
- L'alimentatore da collegare ad un computer portatile (Figura 5-2c). Tale connessione consente anche di registrare i dati misurati dalle varie apparecchiature su di un file formato *.csv (*comma separated values*).

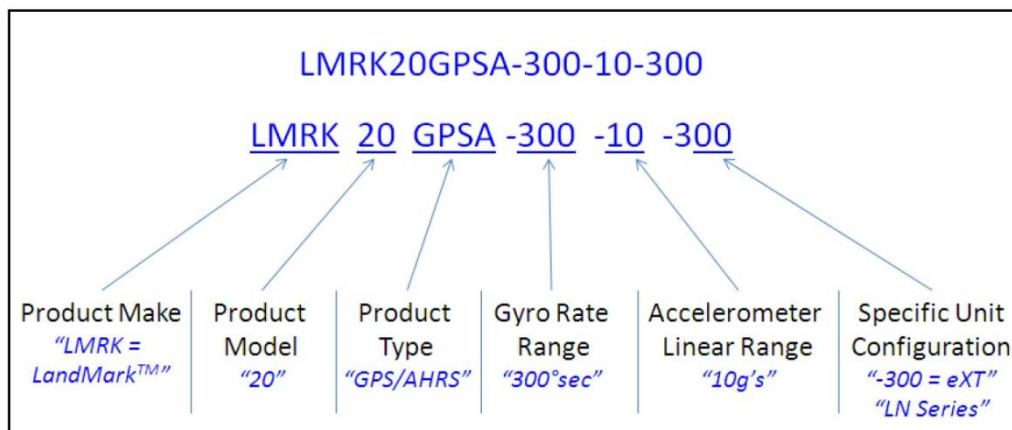


Figura 5-1. Significato nomenclatura identificativa del prodotto

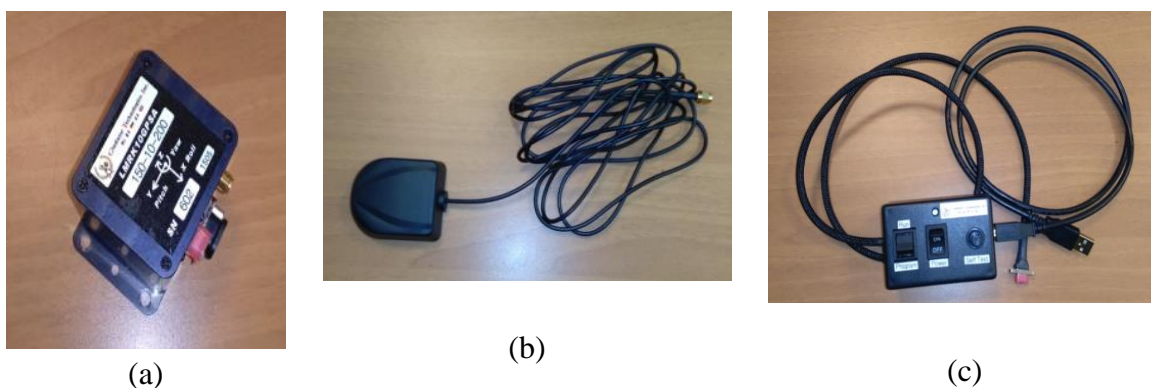


Figura 5-2. Elementi costitutivi l'unità inerziale LMRK10

In aggiunta al prodotto viene fornito anche un software (denominato *Glamr*) per l'acquisizione dei dati, da installare in un PC portatile; di cui un esempio sulla s.

Nella Tabella 5-1 sono quindi riportate le specifiche tecniche dell'unità inerziale e le prestazioni attese per il sistema GPS/AHRS. In particolare, si è verificato come l'incremento temporale dt non si mantenga sempre costante e pari a 0.01 s, ma presenti rare anomalie lungo il tempo di misura (Tabella 5-2), probabilmente dovute a problematiche inerenti alla sincronizzazione tra il *timing* del GPS e quello dell'unità inerziale. Durante le analisi, quindi, sono state ricercate tali anomalie in modo da riportare l'incremento temporale ad un valore costante. La frequenza con cui tali anomalie si presenta è di circa 150 eventi ogni 9000 registrazioni (circa 1.67%).

Tabella 5-1. Specifiche tecniche unità LMRK10

PARAMETER	RATE AXES			ACCEL AXES	
Power Requirements					
Input Voltage	+3.1V to +5.5VDC				
Power <i>Typical (Max)</i>	825mW (1100mW)				
Inertial Performance					
Standard Full Scale Ranges	±75°/sec	±150°/sec	±300°/sec	±2 g's	±10 g's
Bias (In-Run Stability) 1σ	25°/hour 1σ			0.1mg 1σ	0.25mg 1σ
Angle Random Walk 1σ	0.012° /sec/√Hz 1σ			0.07mg /√Hz 1σ	0.15mg 1σ
Bias Over Temp. 1σ	<0.1°/sec 1σ			<3mg 1σ	<5mg 1σ
Scale Factor Error %	≤0.2% (over temperature) 1σ				
Non-Linearity % of FS	0.05%	0.10%	0.50%	2%	0.05%
Sensor Resolution	0.007°/sec			0.035mg	0.25mg
Alignment	1mrad 1σ				
G-Sensitivity	≤0.03°/sec/g 1σ				
GPS/AHRS System Performance					
Channels	72 Channels				
GNSS Receiver	GPS L1C/A	GLONASS L1cf	BeiDou B1	GALILEO E1B/C	
SBAS	WAAS EGNOS QZSS				
Max Navigation Update Rate (GPS)	Up to 18 Hz				
Concurrent GPS/GLONASS or GPS/BeiDou	Up to 10 Hz				
GPS Horizontal Position Accuracy	Autonomous 2.5 m				
SBAS - EGNOS WAAS MSAS	2.0 m				
Velocity Accuracy	0.05 m/s				
Heading Accuracy (GPS)	0.3 degrees				
Heading (sole inertial)	± 0.5° stationary				
Pitch & Roll Angles (inertial)	± 0.25° stationary				
Altitude (<i>barometric</i>)	± 3m 1σ				
Start-Up Time (<i>inertial</i>)	< 0.65 sec				
Time-To-First-Fix					
GPS Acquisition (Cold start)	30 sec				
GPS Reacquisition (Aided start)	3 sec				
GPS Reacquisition (Hot start)	1 sec				
Sensitivity					
Tracking	-166 dBm				
Reacquisition	-159 dBm				
Cold start	-148 dBm				
Hot start	-148 dBm				
Accuracy of time pulse signal	RMS 30ns 99% 60ns				
Update Rate (<i>synced inertial</i>) GPS	100 Hz				
Physical					
Weight	< 160 grams				
Size	1.770 x 1.975 x 1.882 = 6.58 in ³ 4.5 x 5.0 x 4.78 = 107.6 cm ³				
Operating Life	10 Years <i>typical</i>				
Environments					
Operating Temperature	-40°C to +85°C				
Storage Temperature	-55°C to +100°C				
Dynamics (GPS)	≤ 4 g				
Altitude	50,000 m				
Velocity	500 m/s				
Vibration Operating (<i>inertial</i>)	6gRMS (20Hz to 2KHz ~ 10g accelerometers)				
Shock	500g's ½ sine 2 msec powered, any axis				

All'interno dell'unità LMRK10 è implementato in maniera automatica il filtro di Kalman, il quale è un efficiente filtro ricorsivo che valuta lo stato di un sistema dinamico a partire da una serie di misure soggette a rumore. Il suo impiego consente di eliminare parte del rumore di fondo che potrebbe interessare le misure.

Tabella 5-2. Analisi statistica incremento temporale dt della piattaforma inerziale LMRK10

<i>Parametro Statistico</i>	[ms]
<i>Media</i>	0.010
<i>Mediana</i>	0.010
<i>Moda</i>	0.010
<i>Deviazione standard</i>	0.0016
<i>Minimo</i>	0.000
<i>Massimo</i>	0.030

5.2. Cellulari Smartphone

Per quanto concerne i dispositivi smartphone, si è scelto di utilizzare il modello Samsung Galaxy S4 GT-19505, in quanto erano disponibili due unità; volendo valutare anche la possibilità di effettuare tali misure in corrispondenza del parabrezza anteriore dove generalmente vengono posizionati tali apparecchiature. In particolare, per il fissaggio si è scelto di utilizzare uno dei supporti a ventosa attualmente disponibili sul mercato, riportato in Figura 5-3. L'apparecchiatura collocata in tale posizione sarà indicata nel proseguo della tesi come smartphone A.



Figura 5-3. Supporto per il posizionamento del cellulare smartphone A sul parabrezza

Per quanto concerne invece il dispositivo collocato in prossimità della piattaforma inerziale LMRK10 (denominato smartphone B), si è deciso di fissare una piastra ad L al fine di garantire la verticalità del cellulare (Figura 5-4), nonché la corrispondenza degli assi verticali tra l'unità inerziale e lo smartphone B.

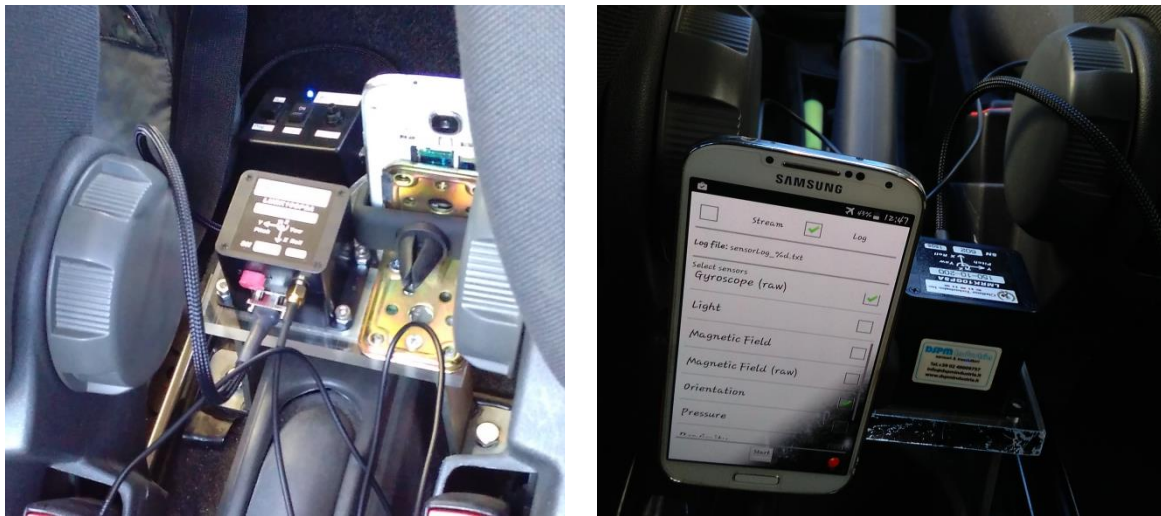


Figura 5-4. Posizionamento dello smartphone B in prossimità dell'unità inerziale LMRK10

Per quanto concerne invece la verifica della verticalità dello smartphone A, essa sarà determinata tramite comparazione dei valori registrati lungo i tre assi ortogonali durante una prima acquisizione statica con i corrispettivi valori misurati dallo smartphone B.

Per quanto concerne le specifiche tecniche dei singoli strumenti presenti in queste apparecchiature, si è fatto riferimento a quanto riportato nel menù impostazioni>sensor information, di cui si riporta una schermata esemplificativa in Figura 5-5.

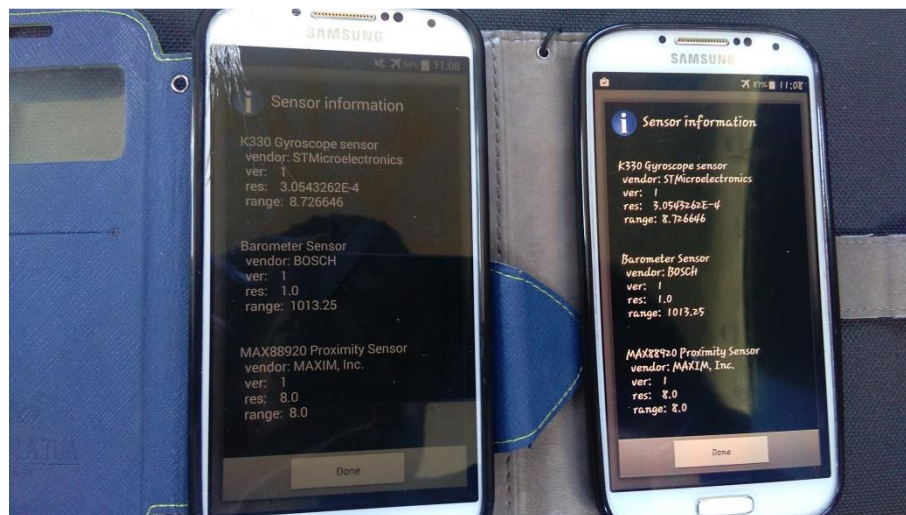


Figura 5-5. Schermata di esempio per il reperimento delle specifiche tecniche dei singoli sensori all'interno dei cellulari smartphone

Per quanto concerne l'elenco completo dei vari sensori che compongono tali apparecchiature è possibile far riferimento a quanto riportato nella Tabella 5-3.

Tabella 5-3. Specifiche tecniche dei sensori montati sui dispositivi smartphone

<i>Sensor List</i>	<i>Vendor</i>	<i>Version</i>	<i>Resolution</i>	<i>Range</i>
<i>K330 3-axis Accelerometer</i>	STMicroelectronics	1	5.985504E-04	19.6133
<i>YAS532 Magnetic Sensor</i>	Yamaha Corporation	1	0.06	1200.0
<i>K330 Gyroscope Sensor</i>	STMicroelectronics	1	3.0543262E-04	8.726646
<i>Barometer Sensor</i>	BOSCH	1	1.0	1013.25
<i>MAX 88920 Proximity Sensor</i>	MAXIM, Inc.	1	8.0	8.0
<i>CM3323 RGB Sensor</i>	Capella Microsystems, Inc.	1	1.0	60000.0
<i>SHTC1 Relative Humidity Sensor</i>	Sensirion	1	0.04	100.0
<i>SHTC1 Ambient Temperature Sensor</i>	Sensirion	1	0.01	165.0
<i>SAMSUNG Significant Motion Sensor</i>	Samsung Inc.	1	1.0	1.0
<i>SAMSUNG Step Detection Sensor</i>	Samsung Inc.	1	1.0	1.0
<i>SAMSUNG Step Counter Sensor</i>	Samsung Inc.	1	1.0	100000.0
<i>Uncalibrated Gyroscope Sensor</i>	Samsung Inc.	1	3.0543262E-04	8.726646
<i>Screen Orientation Sensor</i>	Samsung Electronics	1	0.0	255.0
<i>Rotation Vector Sensor</i>	AOSP	3	5.9604645E-08	1.0
<i>Gravity Sensor</i>	AOSP	3	5.985504E-04	19.6133
<i>Linear Acceleration Sensor</i>	AOSP	3	5.985504E-04	19.6133
<i>Orientation Sensor</i>	AOSP	1	3.90625E-03	360.0

5.3. Analisi delle prestazioni dell'unità LMRK10

L'unità LandMark 10 GPSA-150-10-200 è stata prescelta come strumentazione di precisione al fine di verificare la possibilità di impiego dell'indice a_{wz} , nonché come riferimento per l'attendibilità dei risultati ottenuti tramite cellulari smartphone. Per tale motivo, si è deciso di effettuare una serie di analisi preliminari atte alla valutazione e verifica delle prestazioni fornite da suddetta piattaforma inerziale. Nel dettaglio, sono stati esaminati i dati ottenuti dal ricevitore GPS (sia in termini di posizionamento sia di velocità rilevata), i dati accelerometrici di cui è stata valutata la ripetibilità e infine, è stata effettuata una misura lungo una sezione di prova con l'obiettivo di comparare le misure reali con i valori dell'indice a_{wz} ottenuti tramite simulazione numerica.

5.3.1. Analisi precisione dati GPS

Al fine di verificare la qualità e l'attendibilità dei dati forniti dal sistema GPS implementato all'interno dell'unità LandMark 10, si è deciso di effettuare una comparazione con i dati registrati in parallelo tramite il software VADASE in modalità cinematica sviluppato e brevettato dall'Area di Geodesia e Geomatica del Dipartimento di Ingegneria Civile Edile e Ambientale dell'Università degli Studi di Roma "La Sapienza".

L'algoritmo VADASE (*Variometric Approach for Displacement Analysis Stand-alone Engine*) si basa sulla stima degli spostamenti in tempo reale a partire dalle informazioni su orbite e orologi e da osservazioni raccolte tramite un ricevitore a frequenza singola o dop-

pia. La particolarità di tale approccio infatti, è che esso non richiede l'ausilio di dati provenienti da una stazione di riferimento (68). Tale software, nella modalità non cinematica, è già ampiamente utilizzato nel campo della sismologia per la valutazione degli spostamenti oscillatori dei ricevitori attorno ad una posizione di equilibrio (69).

Al fine di poter estendere l'applicazione di tale impostazione alla stima degli spostamenti e delle velocità di un mezzo in movimento, sono state implementate una serie di modifiche al software, da cui è scaturita la modalità cinematica denominata KIN-VADASE (70) (71). I risultati ottenuti durante un primo caso di studio descritto in (72), hanno evidenziato come, comparati con i corrispettivi valori ottenuti tramite acquisizione effettuata con un ricevitore geodetico a doppia frequenza della Leica Geosystems e *post-processing relative positioning algorithm* (Leica Geosystems Office, LGO), l'utilizzo del KIN-VADASE in modalità singola (L1) o doppia (L3) frequenza presenti un 3D RMSE (*Root Mean Square Error*) pari rispettivamente a 0.932 m e 0.123 m (Tabella 5-4) in termini di posizionamento. Per quanto concerne invece le differenze rilevate sulla velocità, esse sono state dell'ordine di poche unità di mm/s. È bene inoltre precisare che il calcolo delle velocità avviene in maniera indipendente dai dati di posizionamento, essendo ricavate direttamente dall'analisi della fase del segnale tramite l'algoritmo sviluppato presso il dipartimento di Geomatica e Geodesia.

Tabella 5-4. Confronto tra le soluzioni ottenute tramite KIN-VADASE (modalità L1 e L3) e LGO

Posizione [m]	L1				L3			
	E	N	Up	3D	E	N	Up	3D
St. dev.	0.023	0.059	0.426		0.032	0.033	0.086	
Average	0.031	0.080	-0.823		0.075	0.003	0.003	
RMSE	0.039	0.099	0.926	0.932	0.082	0.034	0.086	0.123

Per confrontare quindi i dati forniti dall'unità inerziale LMRK10 e quelli dal KIN-VADASE, sono stati effettuati diversi passaggi lungo le vie che circondano il Circo Massimo a Roma (via del Circo Massimo, viale Aventino, via dei Cerchi e via dell'Ara Massima di Ercole). Per ogni misura, sono stati effettuati due giri dell'anello risultante dall'intersezione di suddette strade.

Come si può notare dai grafici riportati in Figura 5-6, Figura 5-7 e Figura 5-8, le traiettorie rilevate dalle due distinte strumentazioni presentano una buona convergenza; benché nel caso delle coordinate Est-Nord ricavate tramite ricevitore GPS impiegato per l'implementazione dell'algoritmo KIN-VADASE, si riscontra una maggiore dispersione dei valori, soprattutto in corrispondenza di alcuni tratti specifici lungo il percorso evidenziati nelle Figure 5-6b, 5-7b e 5-8b. In particolare, la zona di maggior disturbo è risultata essere per tutti i passaggi, il tratto di via dell'Ara Massima di Ercole (Figura 5-6b) a causa della presenza del palazzo sede della caserma dei vigili urbani; il quale ha determinato la perdita del segnale di fase da parte dell'antenna GPS utilizzata per il KIN-VADASE. Di contro, si è verificato come durante tutto il periodo di misura il numero di satelliti in vista non sia mai sceso al di sotto delle 5 unità.

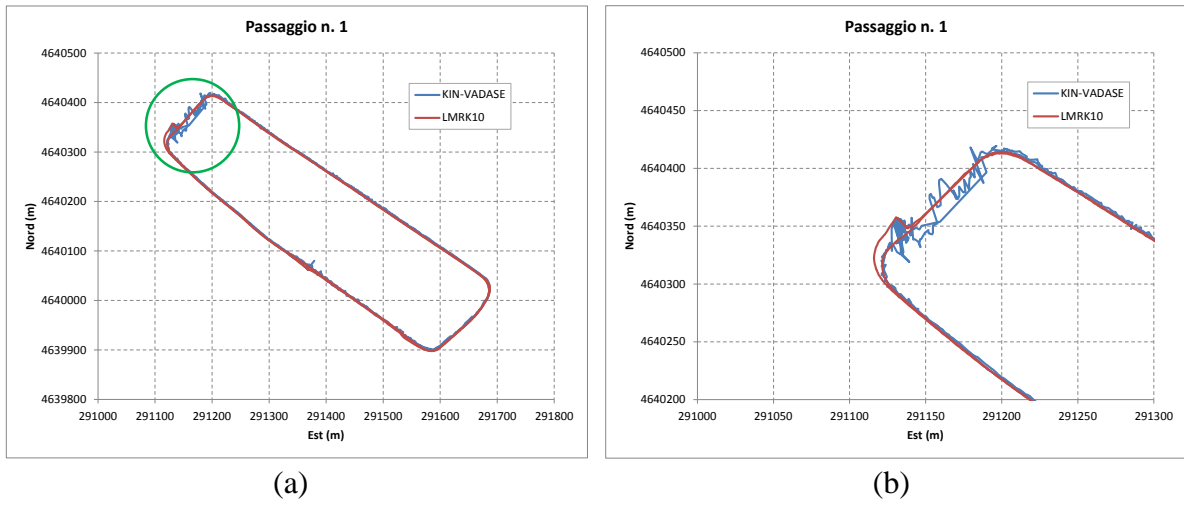


Figura 5-6. Comparazione traiettorie LMRK10 e KIN-VADASE: passaggio n. 1

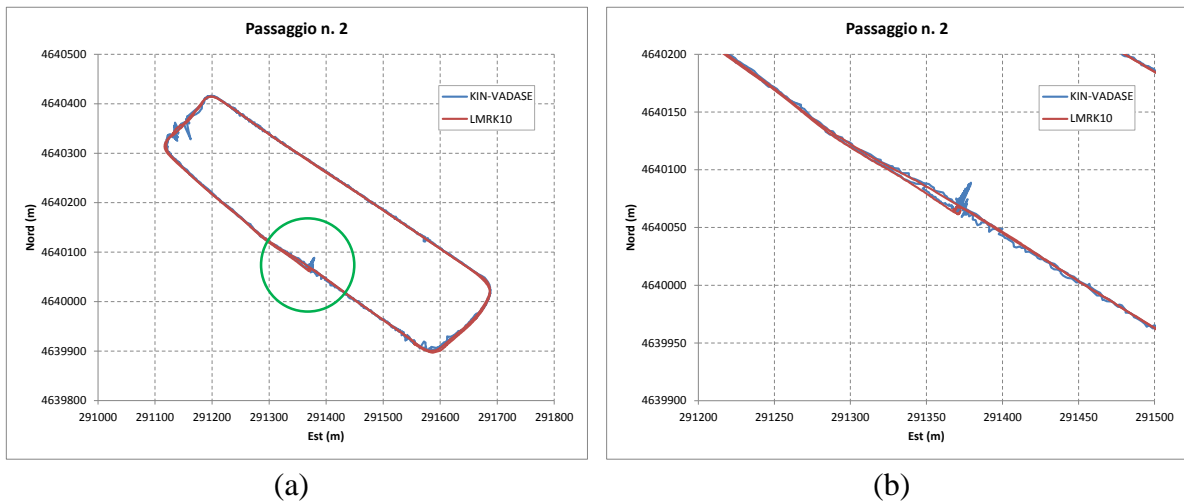


Figura 5-7. Comparazione traiettorie LMRK10 e KIN-VADASE: passaggio n. 2

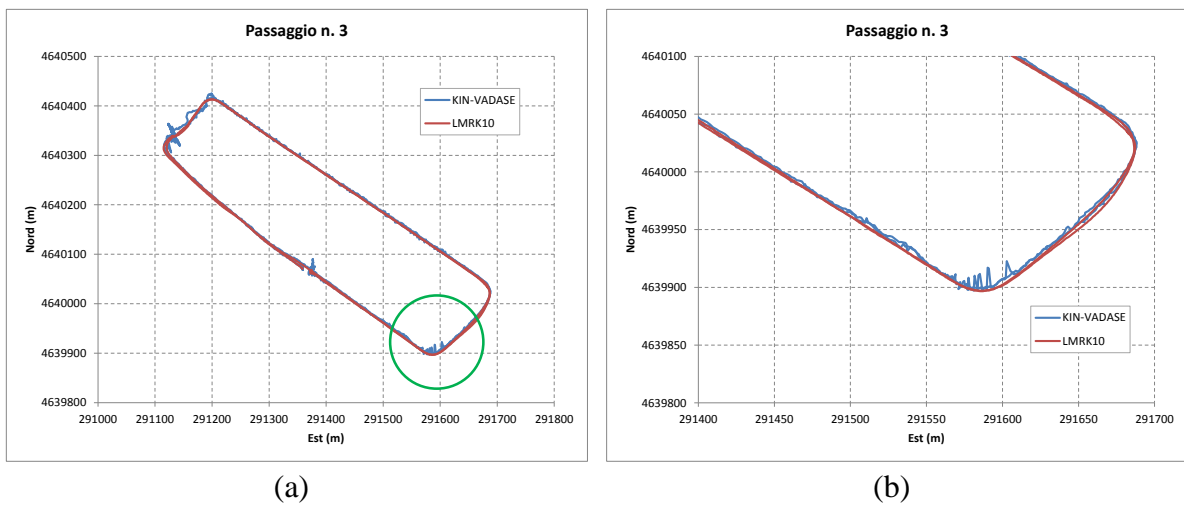


Figura 5-8. Comparazione traiettorie LMRK10 e KIN-VADASE: passaggio n. 3

Come si può notare dalle medesime figure, per quanto concerne i dati di posizionamento forniti dall'unità inerziale LMRK10, essi presentano un andamento più congruo con l'effettiva traiettoria percorsa dal veicolo strumentato lungo tutto l'anello di prova. Tale risultato lascia presagire un'integrazione ed eventuale correzione dei dati GPS con le misure accelerometriche e di assetto rilevate dalla piattaforma inerziale. In generale comunque, le differenze registrate tra le coordinate Est e Nord fornite dalle due strumentazioni (LMRK10 e antenna GPS impiegata per l'applicazione del KIN-VADASE) in corrispondenza della medesima epoca, risultano essere inferiori a un errore di posizionamento nel piano E-N pari a 5 m (Figura 5-9), nonostante i vari tratti in cui si è riscontrata una perdita del segnale di fase per il KIN-VADASE.

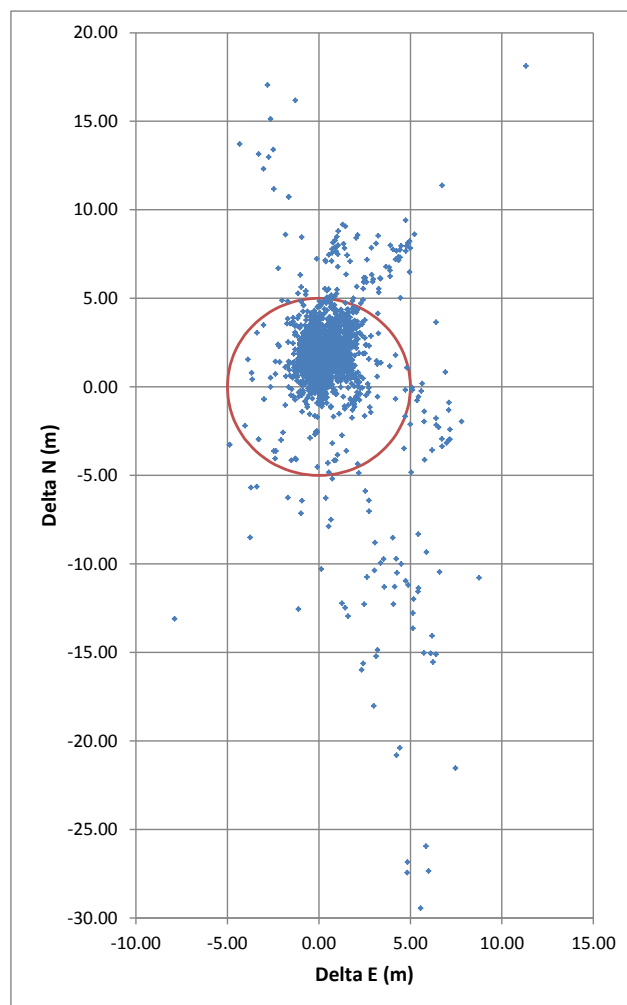


Figura 5-9. Differenze tra le coordinate Est e Nord rilevate con LMRK10 e ricevitore GPS per KIN-VADASE in corrispondenza di una medesima epoca

In particolare, la differenza media tra le coordinate Est e Nord rilevate dai due dispositivi è riportata nella Tabella 5-5. Per quanto concerne la ripetibilità del posizionamento fornito dall'unità LMRK10 nelle tre distinte misure, si è cercato di procedere seguendo

sempre la medesima corsia di riferimento per i vari tratti del circuito prescelto; benché nei limiti di quanto consentito dal traffico presente al momento dei rilievi.

Tabella 5-5. Analisi statistica differenze tra le coordinate Est e Nord tra singolo ricevitore GPS e LMRK10

	ΔE (m)	ΔN (m)
Media	0.55	1.50
Dev. St.	1.57	3.63
RMSE	1.66	3.92

Come si può notare dal grafico di Figura 5-10 e dal particolare riportato in Figura 5-11, la ripetibilità e la stabilità dei dati di posizionamento prodotti dalla piattaforma inerziale LMRK10 sono di buona qualità, e tali da consentirne l'uso per la georeferenziazione dei rilievi che si intendono effettuare ai fini della valutazione dello stato delle pavimentazioni in ambito urbano.

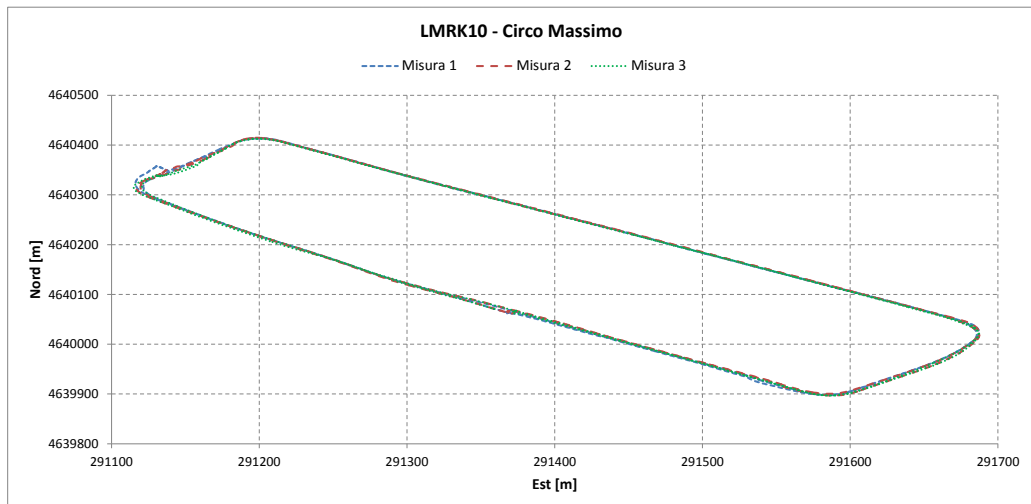


Figura 5-10. Confronto tra i diversi passaggi effettuati lungo l'anello intorno Circo Massimo

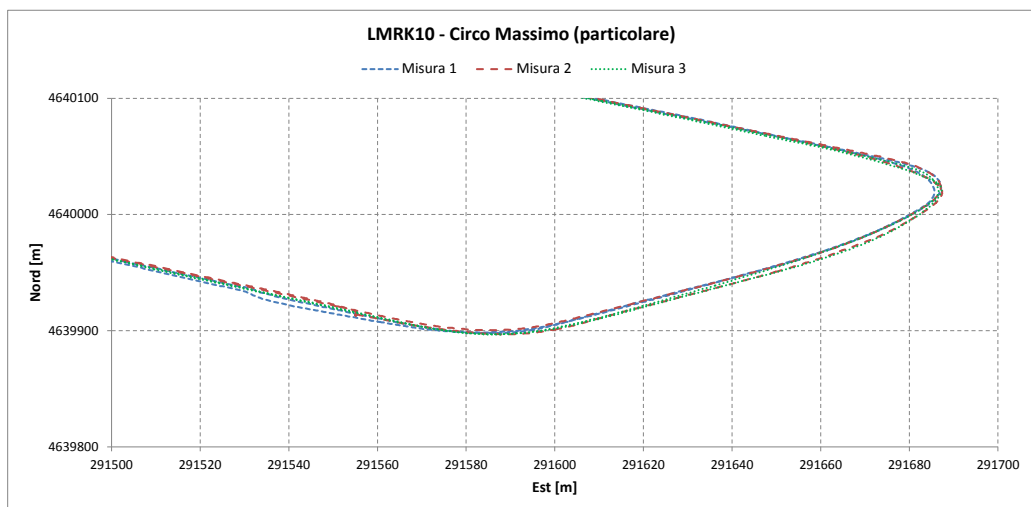


Figura 5-11. Confronto tra i diversi passaggi effettuati lungo l'anello intorno Circo Massimo: particolare del tratto di viale Aventino

Per quanto concerne quindi i dati di posizionamento, l'unità LMRK10 ha mostrato di fornire valori più stabili e rappresentativi della traiettoria del veicolo strumentato rispetto all'impiego di una generica singola antenna GPS. Verificata l'accuratezza dei dati di posizionamento forniti dalla piattaforma inerziale LMRK10, al fine di valutare seppur in maniera qualitativa la loro precisione, i dati di latitudine e longitudine sono stati importati all'interno della piattaforma GIS (*Geographic Information System*) denominata Q-GIS e sovrapposti con la mappa di OpenStreetMap, ottenendo il risultato riportato in Figura 5-12.

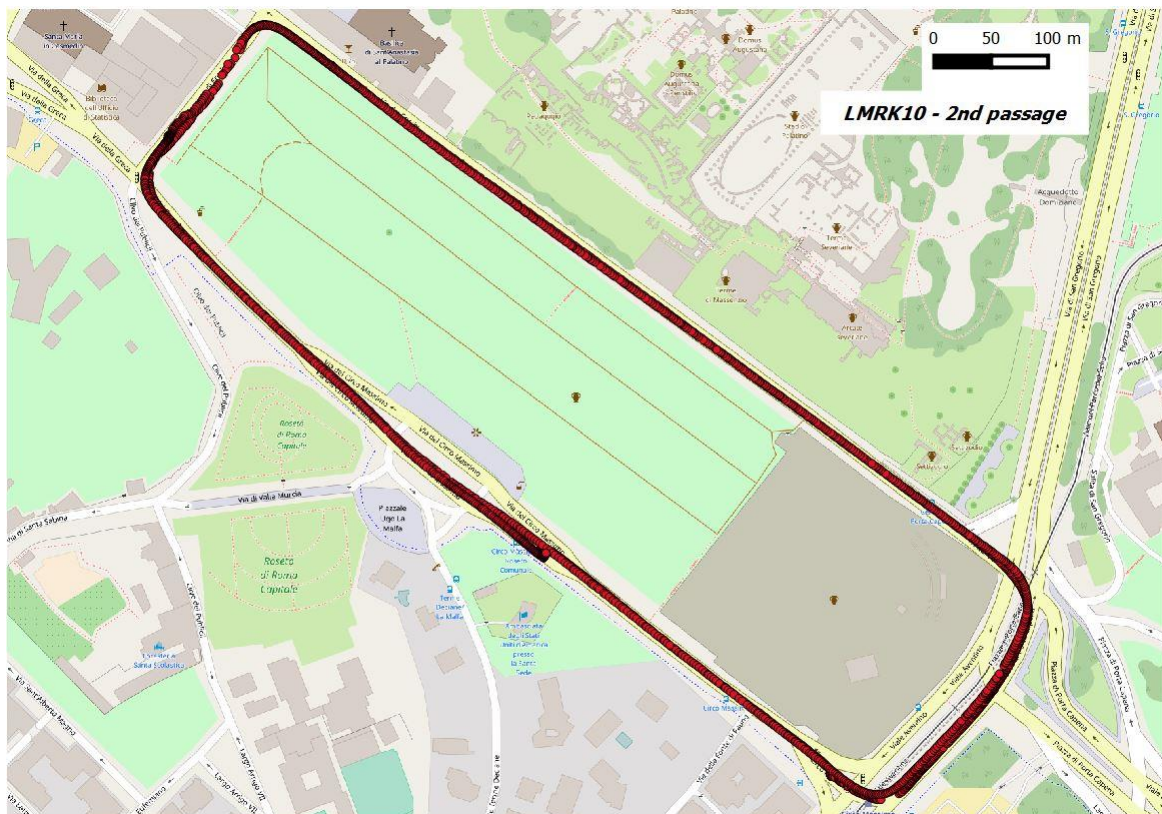


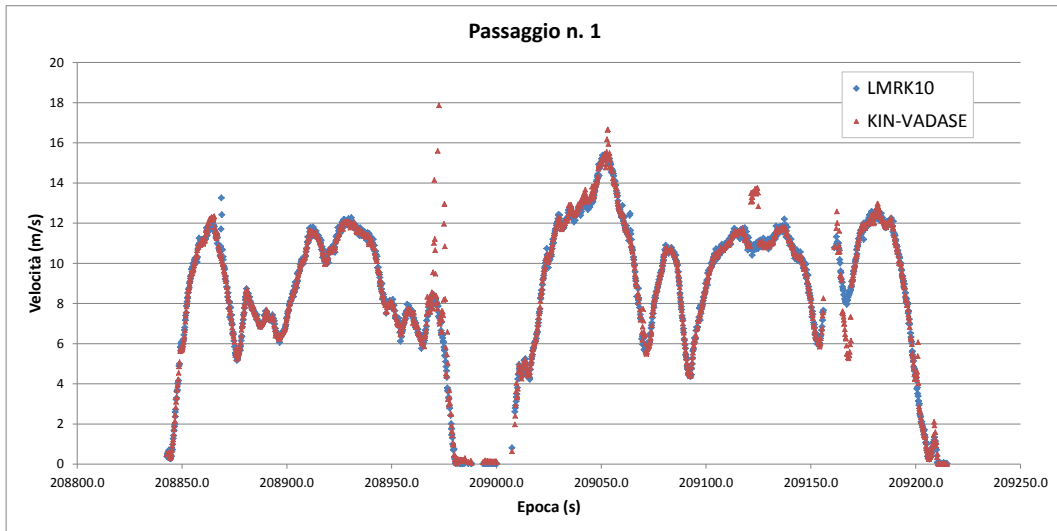
Figura 5-12. Sovrapposizione dei dati di posizionamento della piattaforma LMRK10 con OpenStreetMap in ambiente Q-GIS

Come si può notare in suddetta figura, il dato di posizionamento fornito dall'unità inerziale risulta essere pienamente soddisfacente ai fini della georeferenziazione dei dati accelerometrici misurati.

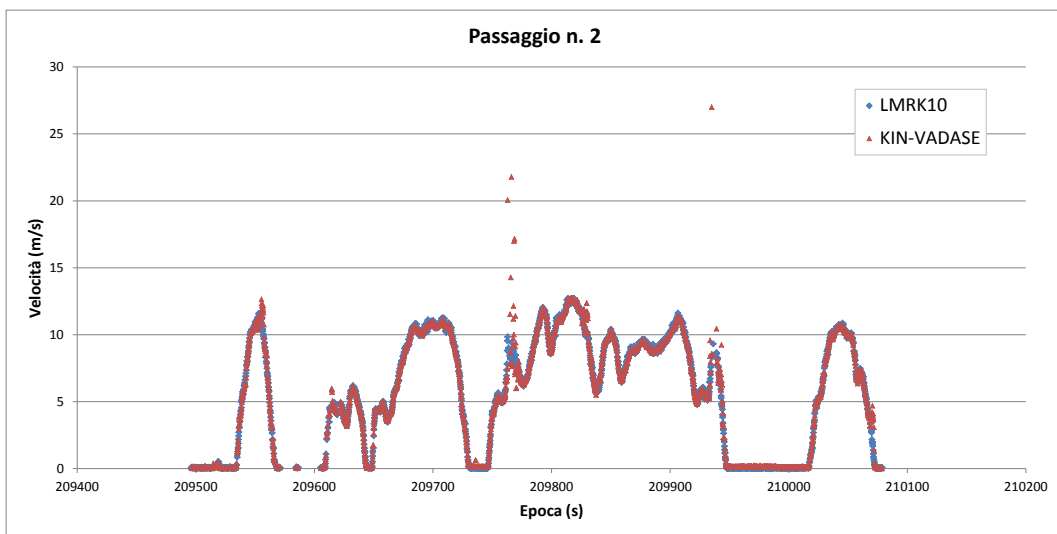
In aggiunta alla necessità di georeferenziazione dei rilievi, è di fondamentale importanza ottenere dei dati affidabili in merito alla velocità di marcia alla quale si stanno effettuando le misurazioni, avendo già comprovato tramite il modello numerico *full-car 8 d.o.f.* l'influenza di tale parametro sul valore dell'indice a_{wz} risultante.

Come si può notare dai grafici riportati in Figura 5-13, vi è una buona convergenza tra le misure di velocità fornite dall'algoritmo KIN-VADASE e quelle rilevate dall'unità LMRK10; testimoniata anche dai parametri statistici dei residui riepilogati nella Tabella 5-

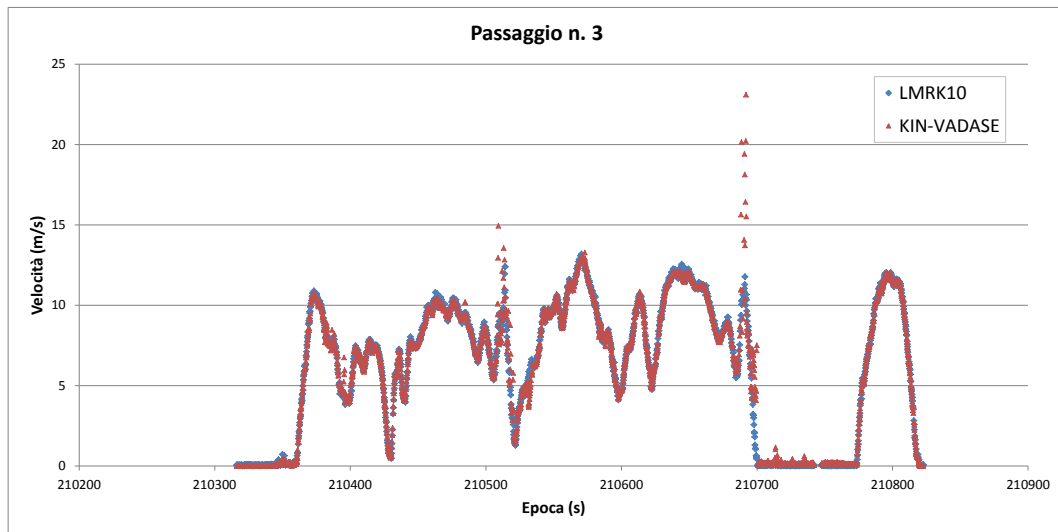
5. Eliminando i valori di *outliers* presenti lungo il periodo di misura tramite il metodo delle 3σ , si ottiene un valore medio dei residui pari a 0.09 m/s, una deviazione standard di 0.19 m/s e un RMSE pari a 0.189 m/s. In questo caso il campione di punti rimanente è pari a circa il 95.6% del campione originario.



(a)



(b)



(c)

Figura 5-13. Confronto velocità puntuale rilevata tramite KIN-VADASE e LMRK10

Tabella 5-6. Analisi statistica dei residui tra le velocità calcolate con KIN-VADASE e LMRK10

Velocità [m/s]	Misura 1	Misura 2	Misura 3
Media	0.02	0.16	0.18
Dev. Stand.	0.96	0.89	0.41
RMSE	0.95	0.91	0.44

L'accuratezza mostrata dalla piattaforma inerziale LMRK10 in merito ai dati di velocità, risulta essere pienamente accettabile rispetto alla finalità di impiego. L'obiettivo primario, infatti, è quello di andare a verificare che la velocità durante tutto il tragitto di misura ricada all'interno di una delle classi di velocità prefissate per il calcolo dell'indice a_{wz} in ambito urbano, riportate nella Tabella 5-7.

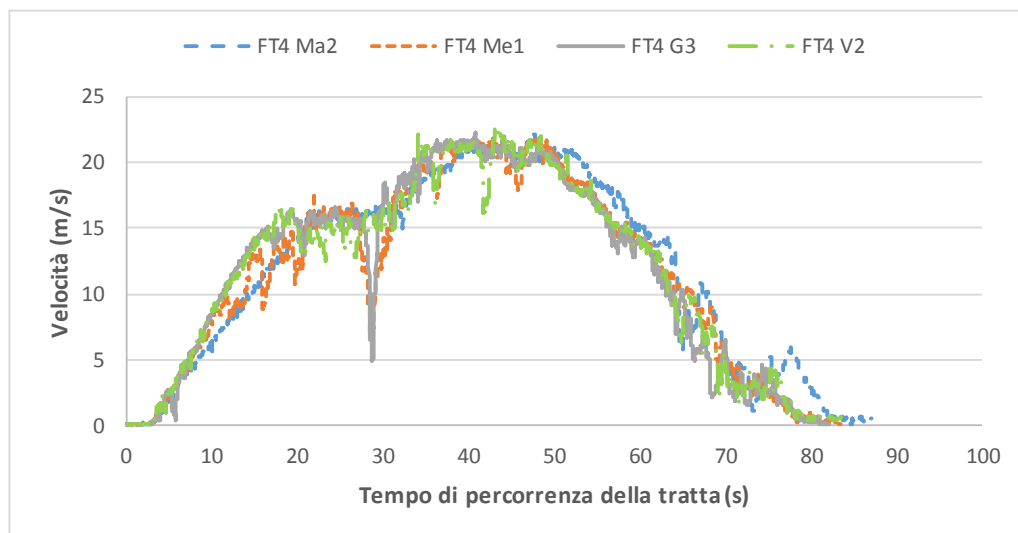
Tabella 5-7. Classi di velocità previsti per il calcolo dell'indice a_{wz} in ambito urbano

Classe di velocità [km/h]	Scarto ammissibile [km/h]
10	±5
20	±5
30	±5
40	±5
50	±5

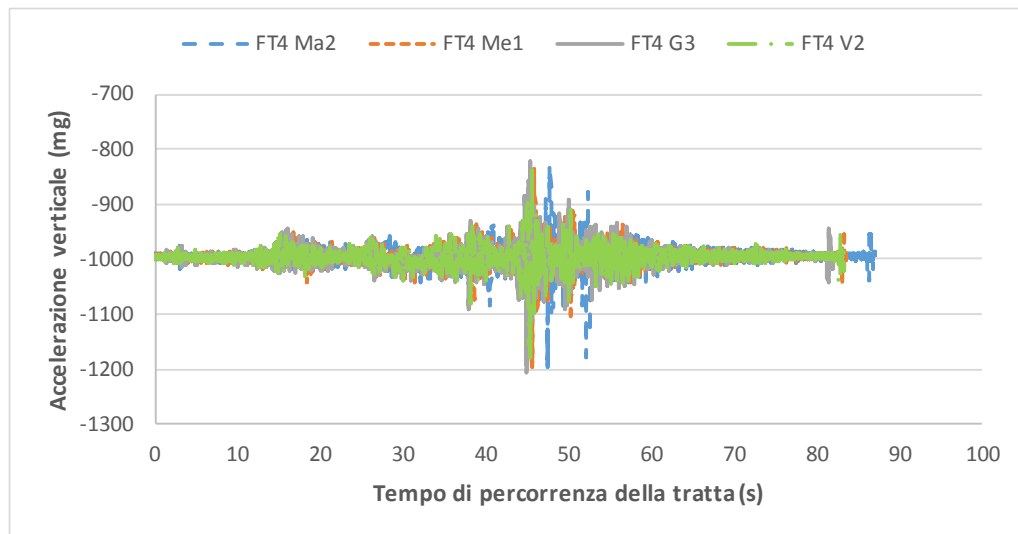
5.3.2. Analisi ripetibilità dati accelerometrici

Un aspetto importante ai fini dell'impiego dell'indice a_{wz} per la valutazione della regolarità delle pavimentazioni stradali, è la ripetibilità delle misure accelerometriche rilevate dall'unità inerziale LMRK10 e di conseguenza dello stesso indicatore di comfort descritto

nella ISO 2631-1. Con l'obiettivo di verificare tale comportamento, durante la tesi di laurea magistrale dell'Ing. Lupascu svoltasi da ottobre 2015 a marzo 2016 sono state effettuate una serie di misure accelerometriche all'interno di un convoglio metropolitano della metro C tramite l'utilizzo della piattaforma inerziale trattata nella presente tesi (73). La scelta dell'infrastruttura ferroviaria deriva dalle caratteristiche che la contraddistinguono rispetto a quella stradale. Essendo infatti un sistema di trasporto a guida vincolata, essa garantisce il transito lungo la medesima traiettoria per ripetizioni successive della misurazione. qualora inoltre i rilievi vengano realizzati con uno scarto temporale contenuto, come nel caso di suddetta tesi in cui le misure sono state completate in una settimana, è ammissibile supporre che sia la sovrastruttura che il materiale rotabile non siano interessati da una variazione significativa delle loro caratteristiche geometriche e meccaniche. In aggiunta, i convogli di tale linea sono privi di conducente, venendo controllati e guidati tramite il Sistema di Automazione Integrale "Driverless". Quest'ultimo, pertanto, garantisce entro certi limiti, una ripetibilità dei gradienti di accelerazione e frenatura durante l'esercizio metropolitano giornaliero. A conferma di ciò, in Figura 5-14a sono riportate le velocità puntuali rilevate per un medesimo tratto effettuate in giorni diversi, mentre in Figura 5-14b si può notare l'andamento delle accelerazioni verticali registrate dalla piattaforma inerziale in corrispondenza dei medesimi passaggi di misurazione. Come si può facilmente verificare, i valori rilevati presentano una buona ripetibilità in termini di durata del segnale nonché di posizione (lungo la tratta esaminata) e intensità delle grandezze misurate.



(a)



(b)

Figura 5-14. Misura per un medesimo tratto effettuata in giorni diversi: (a) velocità e (b) accelerazione verticale

Per quanto concerne i dati accelerometrici, si è deciso di suddividere ogni singola tratta in sezioni di 10 m, calcolando per ognuna di esse il corrispettivo valore dell'indice a_{wz} . Come si può notare dai valori riportati nella Tabella 5-8, nella quale per brevità sono presenti solo i dati relativi alla tratta Due Leoni-Grotte Celoni e rimandando alla tesi dell'Ing. Lupascu per una visione completa dei risultati ottenuti (73), i valori dell'accelerazione ponderata in frequenza per tutte e tre le direzioni ortogonali (a_{wx} , a_{wy} e a_{wz}) presentano una buona ripetibilità. A riprova di quanto affermato, si riportano inoltre in Figura 5-15 i valori dell'indice a_{wz} ottenuti per i vari transiti rilevati.

Tabella 5-8. Accelerazione ponderata in frequenza lungo le tre direzioni ortogonali calcolata per i singoli passaggi misurati (73)

giorno	passaggio	codice	a_{wx} [m/s ²]	a_{wy} [m/s ²]	a_{wz} [m/s ²]	a_v (vibration total value) [m/s ²]
Lunedì	1°	L1	0.042	0.121	0.166	0.209
Lunedì	2°	L2	0.041	0.163	0.176	0.243
Martedì	1°	Ma1	0.038	0.117	0.162	0.203
Martedì	2°	Ma2	0.032	0.128	0.179	0.222
Martedì	3°	Ma3	0.035	0.138	0.163	0.216
Mercoledì	1°	Me1	0.040	0.139	0.161	0.216
Mercoledì	2°	Me2	0.035	0.144	0.164	0.221
Mercoledì	3°	Me3	0.041	0.128	0.161	0.210
Giovedì	1°	G1	0.037	0.119	0.178	0.218
Giovedì	2°	G2	0.041	0.143	0.164	0.221
Giovedì	3°	G3	0.043	0.118	0.170	0.211
Venerdì	1°	V1	0.037	0.122	0.164	0.207
Venerdì	2°	V2	0.040	0.131	0.168	0.217
Venerdì	3°	V3	0.040	0.131	0.163	0.213
			media	media	media	media
			0.039	0.132	0.167	0.217
			sqm	sqm	sqm	sqm
			0.003	0.013	0.006	0.010

Less than 0.315 m/s ² :	not uncomfortable
0,315 m/s ² to 0,63 m/s ² :	a little uncomfortable
0,5 m/s ² to 1 m/s ² :	fairly uncomfortable
0,8 m/s ² to 1,6 m/s ² :	uncomfortable
1,25 m/s ² to 2,5 m/s ² :	very uncomfortable
Greater than 2 m/s ² :	extremely uncomfortable

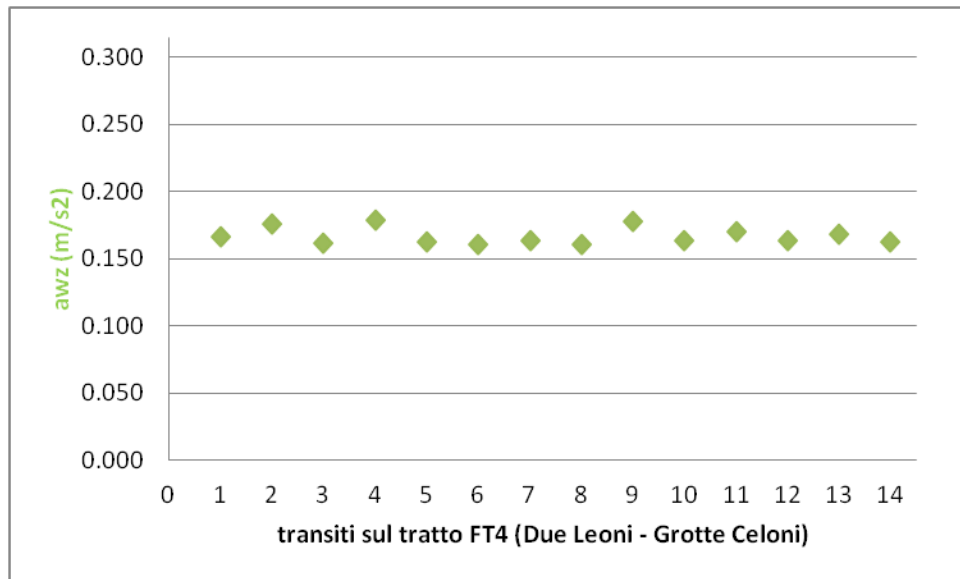
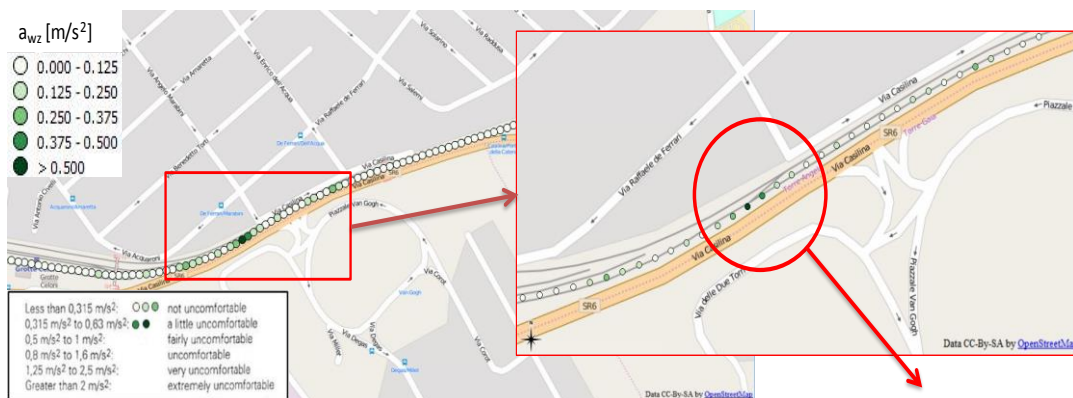


Figura 5-15. Valori dell'indice a_{wz} ottenuti per i singoli transiti sulla tratta Due Leoni-Grotte Celoni (73)

Un'ulteriore conferma della bontà delle misure fornite dall'unità inerziale, deriva dalla capacità di individuare la presenza di uno scambio lungo la tratta Due Leoni-Grotte Celoni (Figura 5-16), in corrispondenza del quale si determina un incremento dell'indice a_{wz} . Come si può notare dalle immagini in Figura 5-17, la localizzazione dello scambio e la conseguente intensità rilevata per l'indice a_{wz} si ripropongono con soddisfacente precisione per tutti i vari passaggi rilevati.



Presenza di uno scambio

Figura 5-16. Inserimento dei valori di a_{wz} all'interno di una piattaforma GIS con individuazione della presenza di uno scambio



Figura 5-17. Ripetibilità del livello di comfort registrato in corrispondenza dello scambio

5.3.3. Analisi misure Vigna di Valle

Una prima valutazione sull'implementazione effettiva di un sistema di monitoraggio basato sul rilievo delle accelerazioni all'interno di un veicolo stradale, è stata effettuata tramite una serie di misure presso la località di Vigna di Valle, frazione di Bracciano (RM). In tale zona, infatti, è stata individuata la strada provinciale 11b, la quale essendo una strada chiusa e interessata da un volume di traffico alquanto limitato (Figura 5-18) ha consentito di effettuare le varie misurazioni senza necessità di chiusura al traffico della medesima. In particolare, i rilievi hanno interessato la corsia in direzione sud, di cui sono stati rilevati i profili destro e sinistro tramite il profilometro a contatto Dipstick di proprietà dell'Area Strade del DICEA. Per quanto concerne il fissaggio dell'unità inerziale LMRK10, durante i rilievi eseguiti in tale località è stato utilizzato il supporto A, descritto al §4.3.1.

Al fine di poter confrontare i vari passaggi effettuati con il veicolo strumentato a diverse velocità di marcia e mantenere un riferimento con gli allineamenti rilevati con il Dipstick (passo di campionamento $dx=0.3m$), sono stati collocati quattro *marker* lungo il tracciato; delimitando l'effettivo tratto di interesse in rettilineo, caratterizzato da una lunghezza complessiva di circa 180 m e una pendenza longitudinale rilevata pari a circa 1.4% (Figura 5-19). I *marker* sono stati materializzati tramite l'impiego di 4 assi di legno disposti in corrispondenza delle ruote del veicolo (Figura 5-20), sia sull'allineamento destro sia sul sinistro, in modo da rappresentare delle irregolarità macroscopiche rispetto a quelle effettivamente presenti lungo il profilo stradale, a cui corrisponderanno dei picchi nel segnale dell'accelerazione (Figura 5-21).

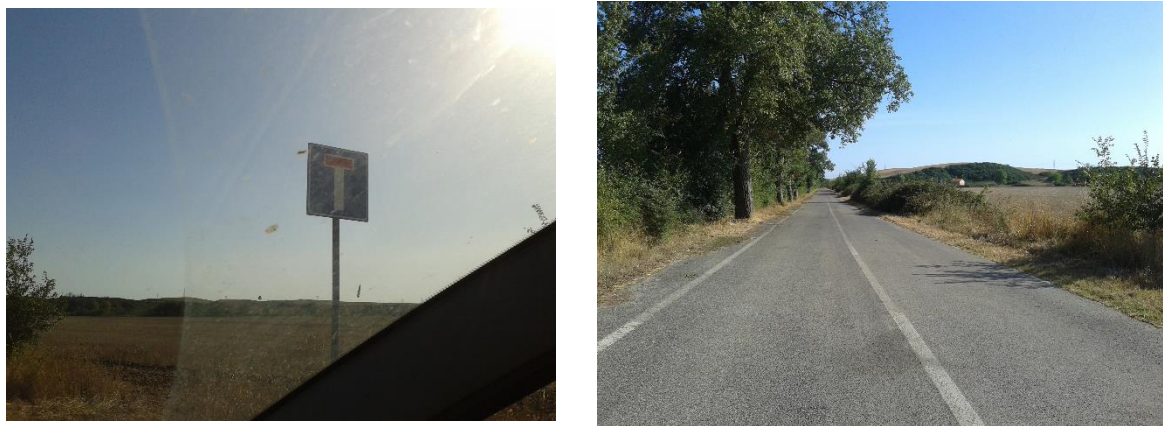
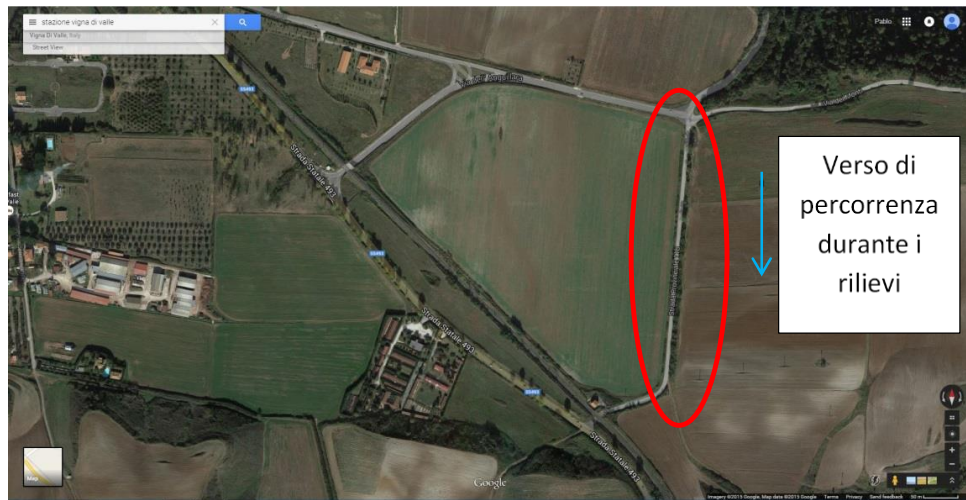
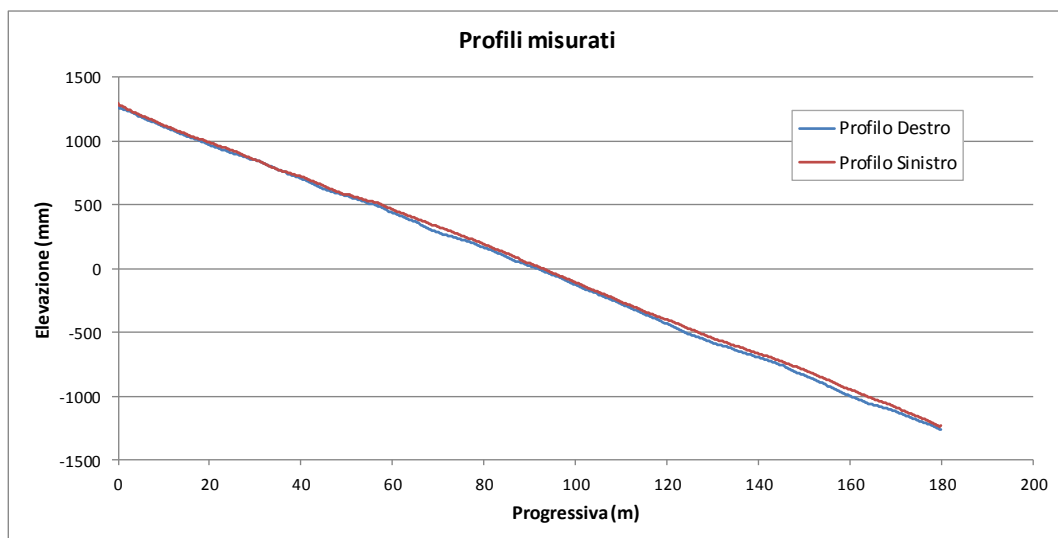
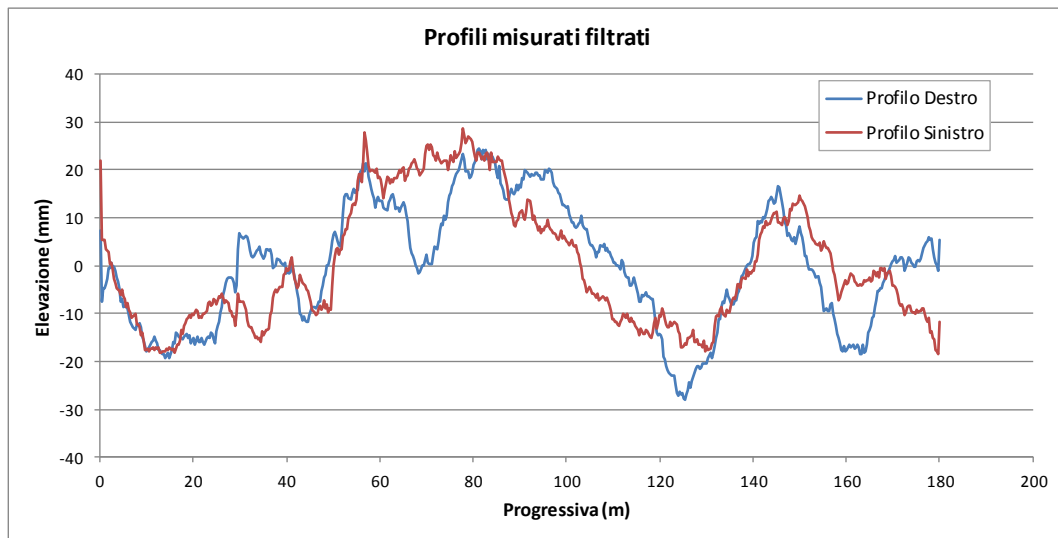


Figura 5-18. Strada provinciale 11b nella località di Vigna di Valle



(a)



(b)

Figura 5-19. Profili destro e sinistro misurati con il Dipstick (a) e filtrando la pendenza longitudinale della strada (b)

Individuati quindi i picchi nel segnale dell'accelerazione dovuti alla presenza dei marker lungo il profilo stradale esaminato, sono stati estrapolati i dati relativi alle varie grandezze fornite dall'unità inerziale (velocità, posizionamento, accelerazioni, etc.). Una prima verifica della correttezza di tale procedimento, ha riguardato il confronto delle lunghezze dei profili così ricavati; le quali, come si può notare dal grafico di Figura 5-22, presentano una variabilità contenuta entro limiti accettabili (180.64 ± 0.36 m).

I vari passaggi stati realizzati cercando di percorrere il tratto di prova mantenendo una velocità entro i limiti di accettabilità previsti per le varie classi riportate nella Tabella 5-7.





Figura 5-20. Posizionamento dei markers di riferimento per l'allineamento dei segnali accelerometrici

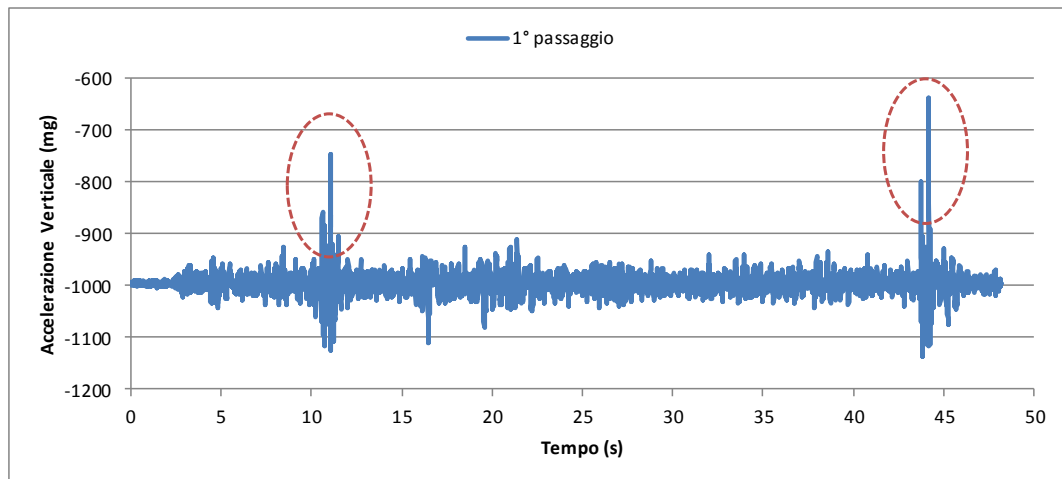


Figura 5-21. Accelerazione verticale rilevata durante il primo passaggio a 20 km/h

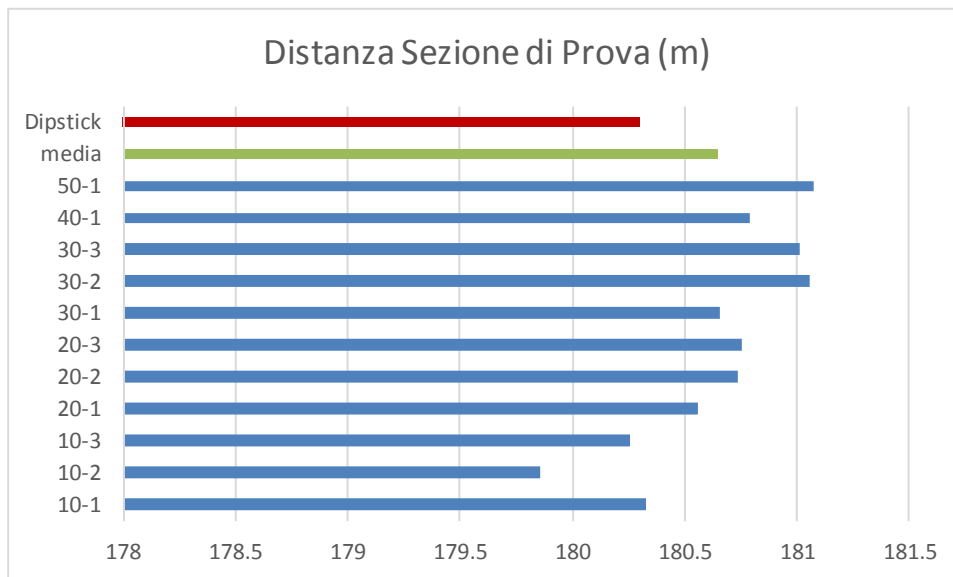
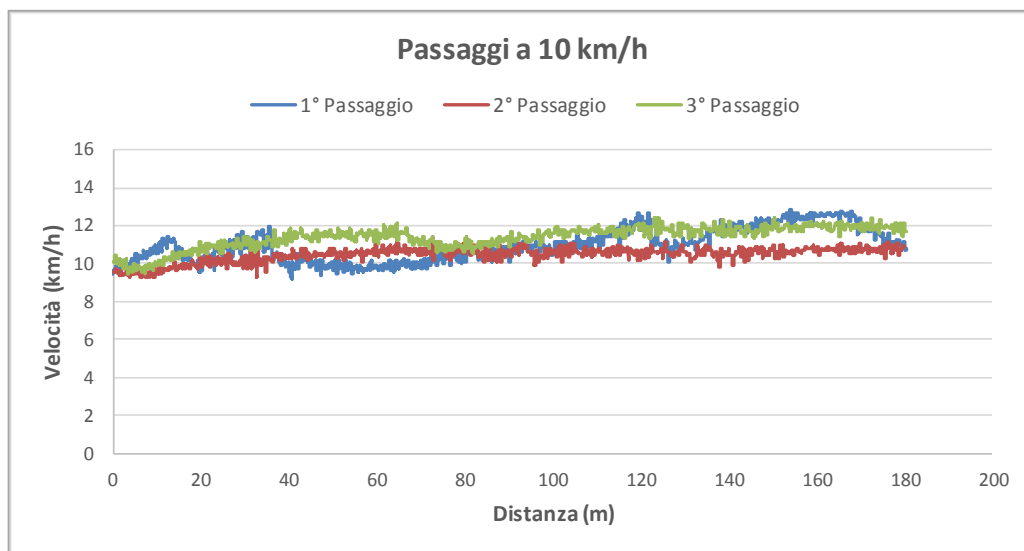
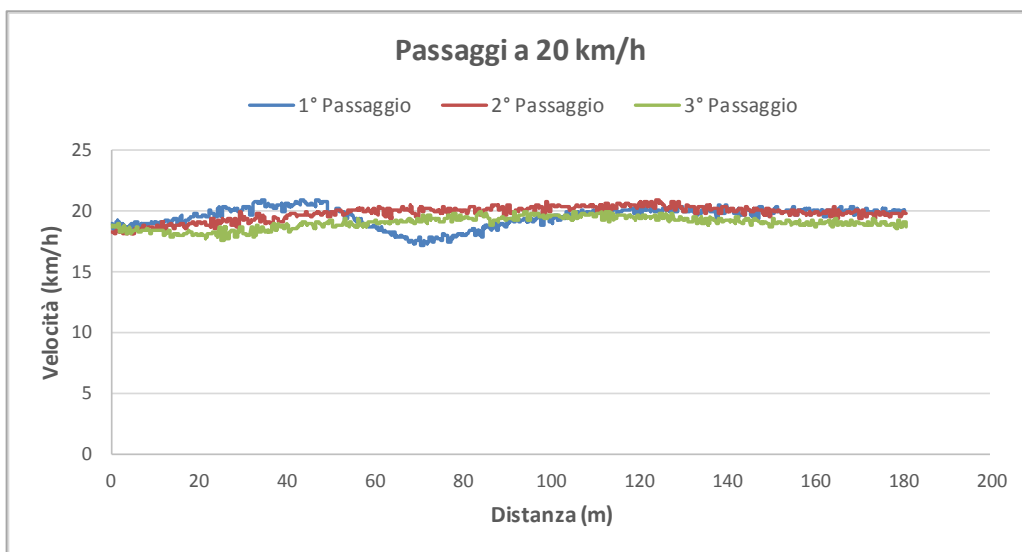


Figura 5-22. Distanza della sezione di prova calcolata a partire dalla localizzazione dei marker lungo il profilo percorso

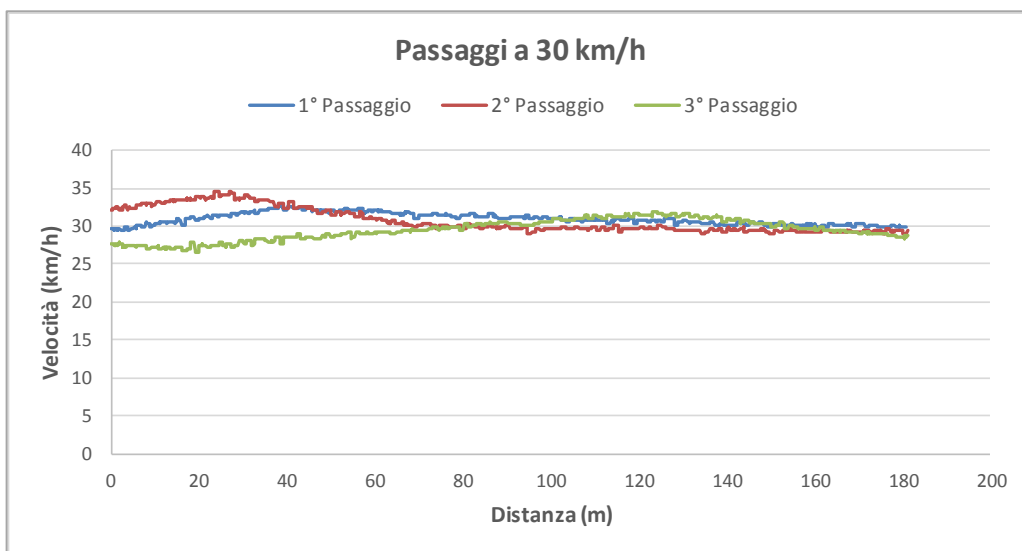
Per ogni singolo passaggio quindi, si è verificato che la velocità durante l'intero tratto di interesse si sia mantenuta all'interno dei limiti prefissati; in caso contrario, la misura è stata scartata. Di seguito in Figura 5-23, si riportano i diagrammi delle velocità corrispondenti ai passaggi che hanno soddisfatto tale requisito.



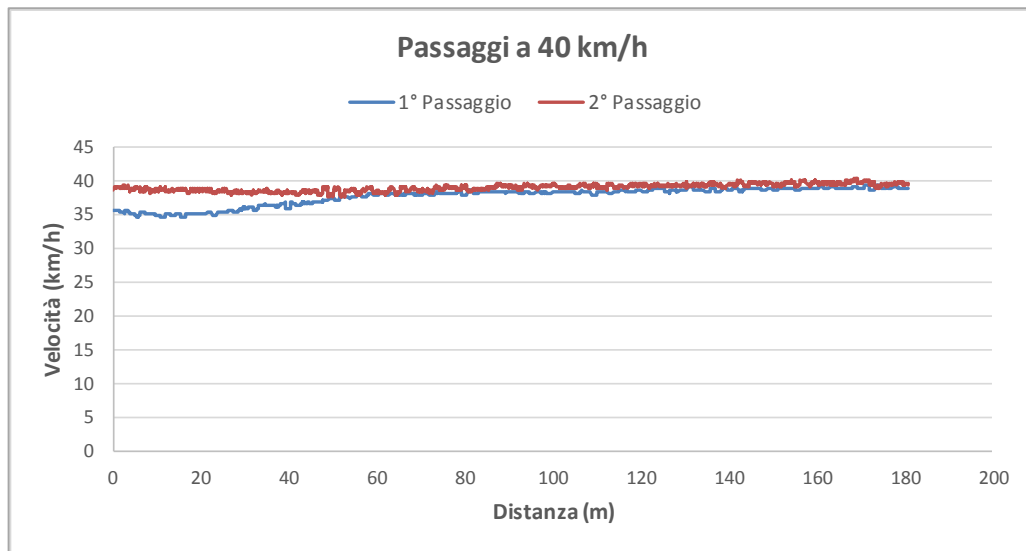
(a)



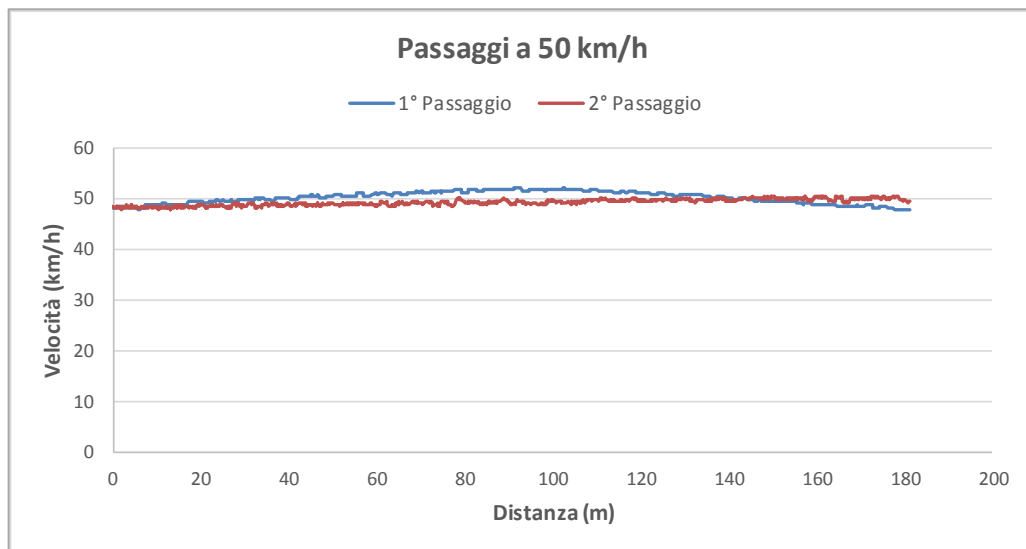
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 5-23. Passaggi per i quali è stato rispettato il requisito della velocità per le varie classi

Per suddette misure quindi, si è proceduto a calcolare l'indice a_{wz} corrispondente, il quale è stato successivamente confrontato con il valore atteso, alla luce delle relazioni trovate in precedenza tramite il modello numerico *full-car* tra a_{wz} e IRI in funzione della velocità di marcia. In particolare, sono stati impiegati i valori dello *slope* riportati precedentemente in Figura 3-41a e relativi all'intervallo di velocità tra 10 e 50 km/h (Tabella 5-9), nonché relativi alla lunghezza di riferimento di 100 m. Determinati quindi i valori dell'indice IRI relativi ai due profili destro e sinistro, è stato calcolato il valore medio conseguente (Tabella 5-10); il quale è stato preso come riferimento per la sezione stradale esaminata.

Tabella 5-9. Valori dello slope utilizzati per il calcolo dei valori stimati dell' a_{wz}

Velocità [km/h]	slope
10	0.024
20	0.038
30	0.055
40	0.075
50	0.093

Tabella 5-10. IRI calcolato per i profili rilevati destro e sinistro

	Profilo Destro	Profilo Sinistro	IRI medio
IRI (m/km)	3.02	3.27	3.15

Come si può notare dai risultati riportati in Figura 5-24, ad eccezione dei valori ottenuti per una velocità di transito pari a 30 km/h, vi è una buona convergenza tra i valori attesi e quelli effettivamente ottenuti dalle misure in sito; validando, per certi versi, i risultati delle analisi svolte preliminarmente tramite simulazione numerica.

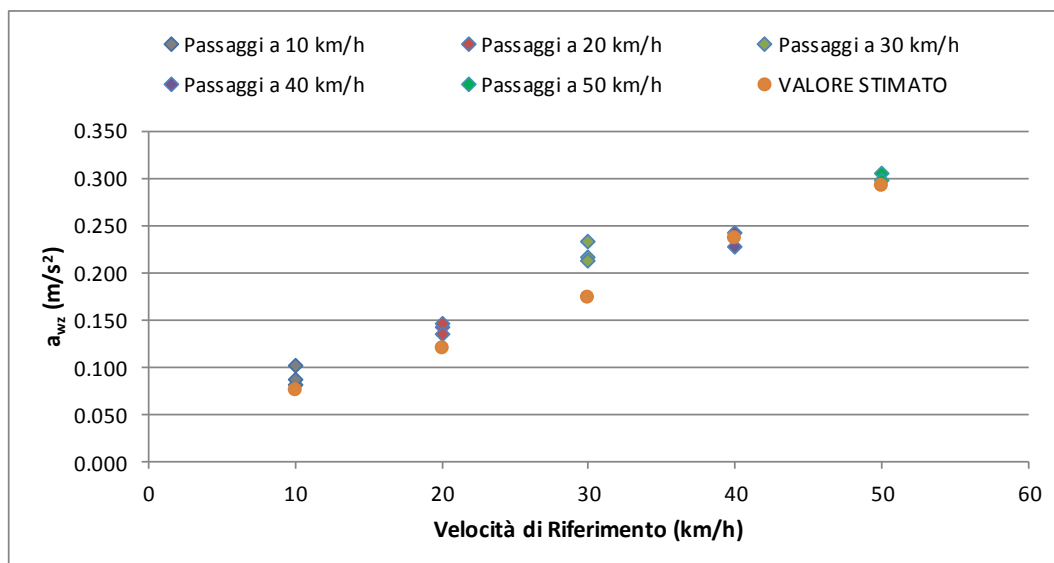


Figura 5-24. Confronto tra i valori di a_{wz} calcolati e quelli attesi rispetto alle analisi con il modello *full-car*

Occorre comunque ricordare come il modello numerico sia stato calibrato su di un veicolo diverso (FIAT Stilo) rispetto a quello impiegato per i rilievi (FIAT Panda), benché entrambi catalogabili come veicoli passeggeri. Un tale risultato in ogni caso, lascia presagire la possibilità, in futuro, di individuare alcune tipologie di veicoli per le quali sia possibile definire comuni scale di valutazione a parità di condizione di una pavimentazione stradale, da poter associare all'indice a_{wz} .

Indubbiamente però, la conseguenza principale di tali risultati riguarda la conferma delle ipotesi e dei requisiti applicati alle classi di velocità, mostrando una soddisfacente ripetibilità dei valori dell'indice a_{wz} ottenuti per i diversi passaggi (a parità di classe di velo-

cità di riferimento). Il medesimo criterio pertanto, sarà applicato alla campagna di misurazione eseguita presso il comune di Valentano (VT).

5.4. Principali problematiche emerse e comparazione acquisizione statica

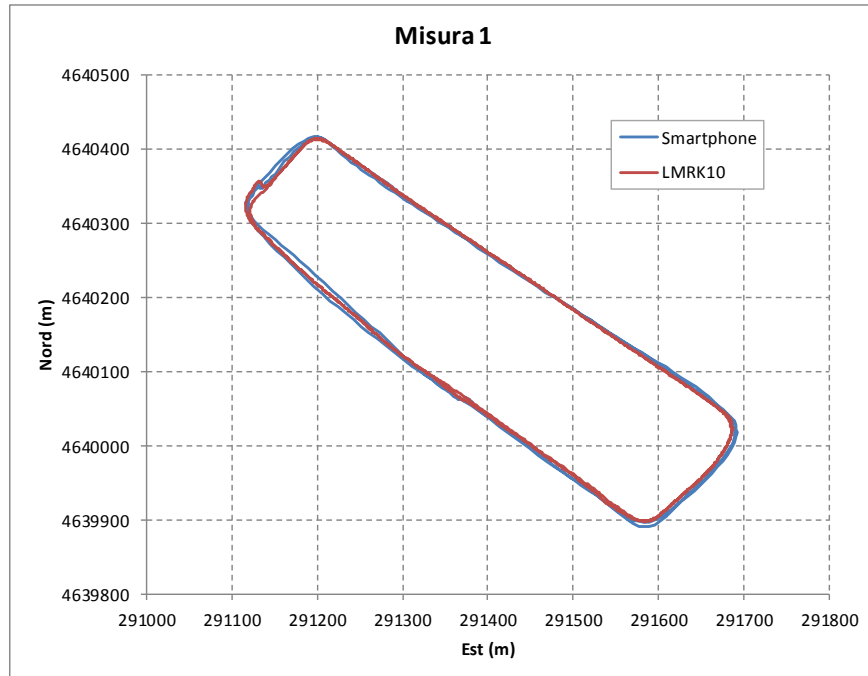
Dalle analisi preliminari precedentemente esposte e riferite all'impiego dell'unità inerziale LMRK10, è emersa la qualità e l'affidabilità dei dati da essa forniti. Nel caso relativo al confronto tra l'algoritmo KIN-VADASE e piattaforma inerziale, si sono potuti comparare i valori di posizionamento e di velocità in corrispondenza dei tag temporali (*GPS timing*) comuni alle due strumentazioni; potendo così effettuare una comparazione pressoché puntuale dei rilievi. Per quanto concerne invece il confronto tra LMRK10 e cellulari smartphone, non è stato possibile utilizzare tale approccio, in quanto l'applicazione Sensor Fusion prescelta per l'acquisizione sincronizzata dei dati accelerometrici e GPS, non fornisce per le grandezze di output un riferimento temporale comune, riferito al timing del GPS.

Accanto a questo a problema vi è l'impossibilità di materializzare dei marker fisici lungo la rete stradale da monitorare, i quali consentirebbero di allineare i vari segnali accelerometrici rilevati durante i vari passaggi effettuati in diversi periodi temporali. In tal senso infatti, risulta di maggiore praticità definire delle sezioni in funzione delle coordinate cartografiche WGS84 in modo da poter suddividere in fase di post-processing il segnale di accelerazione verticale rilevata all'interno del veicolo strumentato in maniera continua lungo la rete. La definizione di tali tratti, dovrà ovviamente soddisfare precisi requisiti, tra cui quello principale riguarda l'omogeneità. Per tale motivo, nella campagna di misura eseguita presso il comune di Valentano (VT), si è deciso di sfruttare la suddivisione di una parte della rete urbana secondo quanto previsto dal metodo del PCI, realizzata durante il lavoro di tesi magistrale dell'Ing. Rosati (22) svolta presso l'Area Strade del DICEA; di cui si fornirà una descrizione più particolareggiata nel prossimo capitolo.

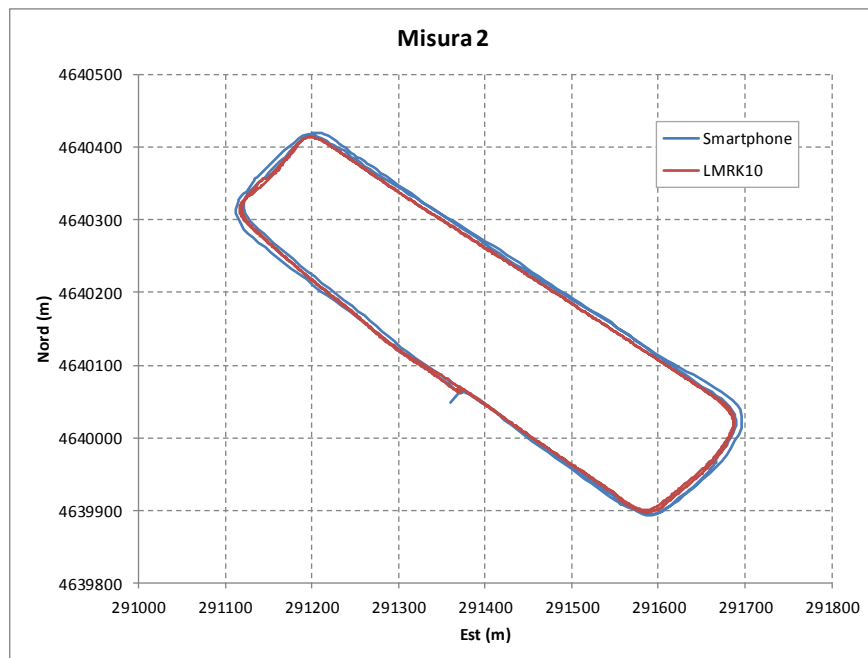
Per poter applicare un approccio di questo tipo, è necessario verificare che i dati di posizionamento forniti dal ricevitore GPS dei cellulari smartphone presentino una precisione e un'accuratezza paragonabile a quella dell'unità inerziale LMRK10. Sono quindi state eseguite una serie di misure presso Circo Massimo a Roma, avendo già verificato la qualità del segnale GPS dei satelliti presente in tale zona durante la precedente analisi comparativa tra l'algoritmo KIN-VADASE e la stessa piattaforma inerziale.

Come si può notare dai grafici riportati in Figura 5-25, i dati di posizionamento forniti dal dispositivo smartphone presentano uno scostamento non del tutto trascurabile rispetto a quelli rilevati tramite l'unità inerziale. Analogamente a quanto visto in precedenza, la zona maggiormente affetta da imprecisione risulta essere il tratto di via dell'Ara Massima di Ercole. Nonostante gli scostamenti rilevati, adottando le dovute accortezze, quale ad esempio la definizione del poligono identificativo di una sezione omogenea da monitorare tenendo conto di una sufficiente tolleranza trasversale rispetto alla sede stradale, è possibile riuscire

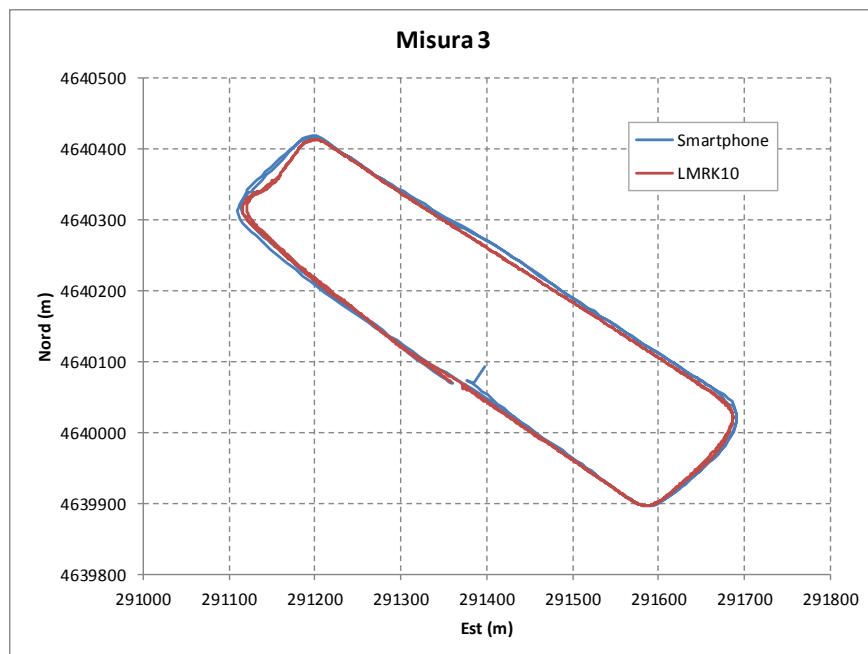
ad isolare il segmento di interesse del segnale dell'accelerazione verticale registrato dal dispositivo.



(a)



(b)



(c)

Figura 5-25. Confronto tra dati di posizionamento rilevati con cellulare smartphone e tramite LMRK10

Un ulteriore aspetto da non trascurare, deriva dall'accuratezza con cui le due strumentazioni rilevano l'intensità del vettore accelerazione di gravità. Al fine di verificare il corretto allineamento dei vari dispositivi, in particolare dello smartphone A posto in corrispondenza del parabrezza anteriore, viene eseguito un rilievo statico prima di procedere con il rilievo effettivo. Per l'unità inerziale il sistema di riferimento intrinseco è reso solido a quello del veicolo tramite il fissaggio al supporto imbullonato al telaio. In maniera analoga lo smartphone B viene posizionato tramite l'impiego della piastra ad L che garantisce il parallelismo tra le direzioni verticali delle due strumentazioni (sebbene una verifica di massima rispetto ai valori rilevati in modalità statica lungo i tre assi venga comunque eseguita). Per quanto concerne invece lo smartphone A, il quale viene fissato tramite l'impiego di un supporto a ventosa, questo viene regolato in funzione dei valori delle componenti anch'esse rilevate in modalità statica, verificando che risultino uguali a quelle fornite dallo smartphone B. In Figura 5-26 si riportano a titolo di esempio i valori delle tre componenti ortogonali del vettore accelerazione di gravità rilevate in modalità statica per lo smartphone A (Figura 5-26b), per lo smartphone B (Figura 5-26a) e per l'unità inerziale LMRK10 (schermata del software di acquisizione *Glamr*, Figura 5-26c). In aggiunta, in Figura 5-26d, viene mostrata una immagine con tutti e tre i dispositivi posizionati all'interno del veicolo utilizzato per le varie misure.

Al fine di verificare la convergenza tra i dati forniti dai diversi dispositivi, sono state comparate le principali grandezze di interesse rilevate durante una prima acquisizione statica di prova realizzata con le strumentazioni funzionanti in parallelo. Come si può notare dal grafico in Figura 5-27, le coordinate WGS84 fornite dall'antenna GPS della piattaforma

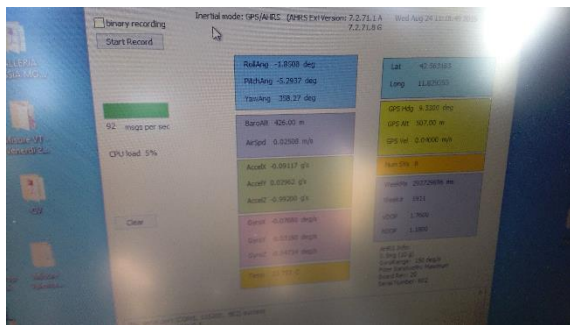
ma inerziale LMRK10 risultano essere stabili fin dal primo momento dell'acquisizione, mostrando una buona precisione (deviazione standard rispetto ai valori medi pari a 0.15 m per la coordinata Est e 0.22 m per la Nord) durante tutto il periodo di misura (circa 1 minuto). Per quanto concerne i dati di posizionamento rilevati tramite i due cellulari smartphone, si può facilmente verificare come vi sia una maggiore dispersione dei valori e in aggiunta, come la misura diventa più precisa con il passare del tempo, avvicinandosi alle coordinate ottenute tramite l'unità LMRK10. In ogni caso, dopo circa 1 minuto, la differenza di posizionamento rispetto a quest'ultima risulta compresa tra 2.5 m e 5 m.



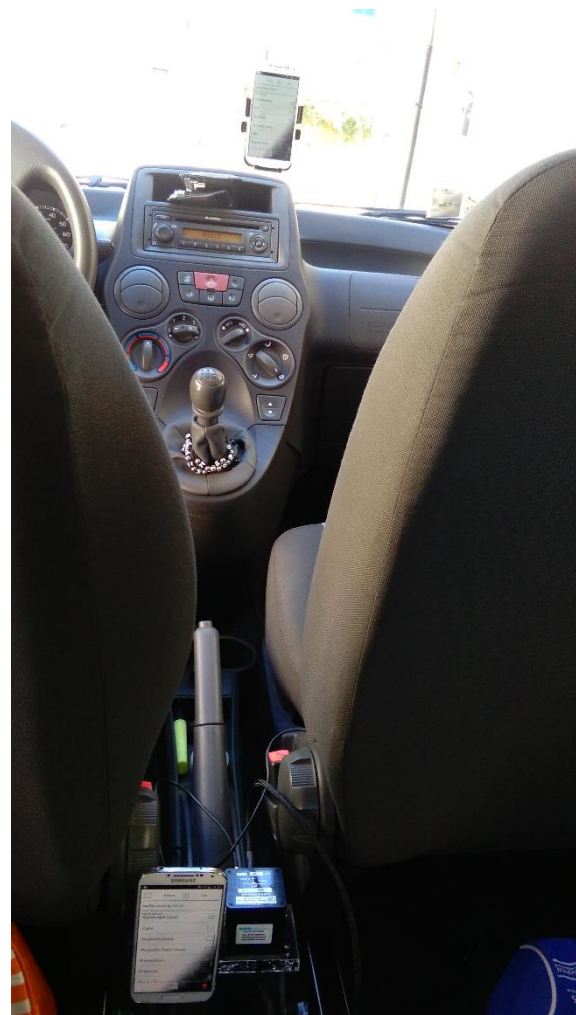
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5-26. Acquisizione statica tramite i diversi dispositivi: (a) smartphone B, (b) smartphone A, (c) LMRK10 e (d) posizione delle tre strumentazioni a bordo del veicolo

Benché i due cellulari smartphone siano dello stesso modello (Samsung Galaxy S4 GT-19505) si è verificato come durante l'acquisizione statica, il modulo del vettore accelerazione di gravità rilevato da due dispositivi sia stato differente, come evidenziato in Figura 5-28. Ripetendo successivamente la misura per i soli cellulari, si è ottenuto invece, un andamento pressoché coincidente. Alla luce della variabilità mostrata, al fine di eliminare la componente lungo l'asse verticale del sistema di riferimento intrinseco al veicolo del vettore accelerazione di gravità, si è scelto pertanto di utilizzare per i dispositivi smartphone la procedura che prevede l'impiego di un filtro passa-alto, precedentemente descritta al paragrafo §4.4 invece di quella basata sulla matrice di rotazione. In quest'ultimo caso infatti, occorre inserire il valore del modulo del vettore accelerazione di gravità supposto noto a priori. Inserendo però indiscriminatamente il valore comunemente adottato pari a 9.81 m/s^2 si correrebbe il rischio di eliminare quota parte dell'accelerazione verticale indotta dalle irregolarità stradali.

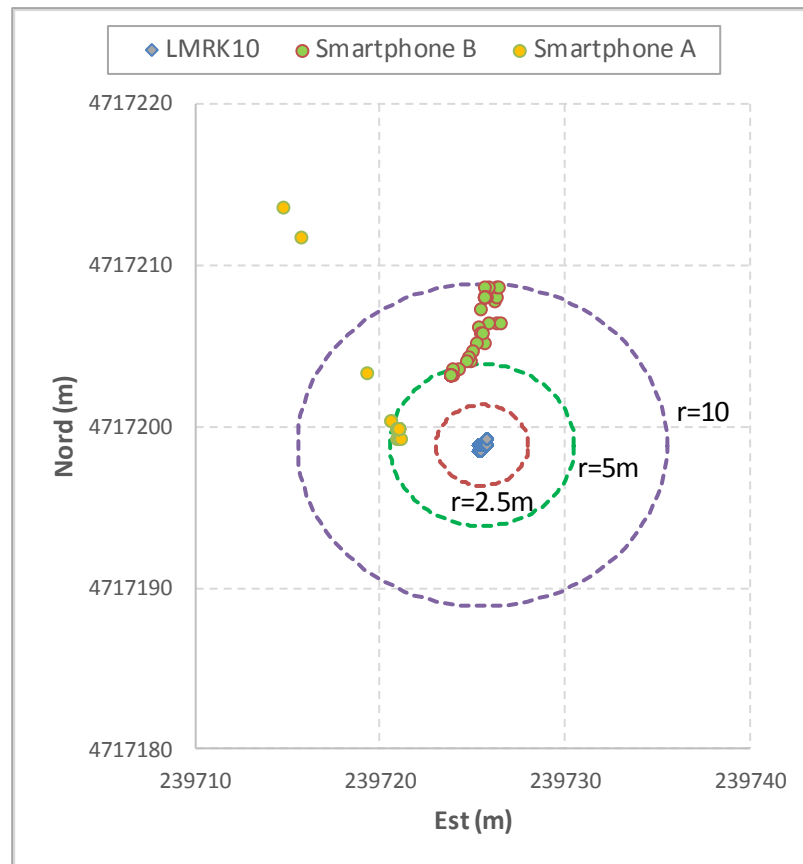


Figura 5-27. Confronto tra le coordinate WGS84 fornite dai tre dispositivi durante l'acquisizione statica

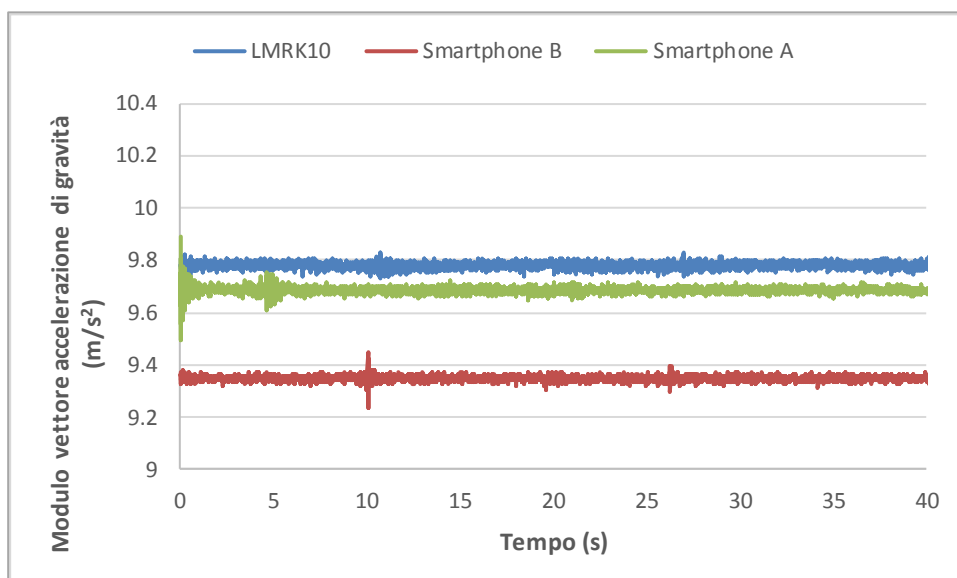


Figura 5-28. Confronto modulo del vettore accelerazione di gravità misurato con i tre dispositivi durante l'acquisizione statica

6. CAMPAGNA DI MISURAZIONI IN SITO

L'effettiva possibilità di utilizzare l'indice a_{wz} quale approccio per la valutazione dello stato di una pavimentazione stradale in ambito urbano, è stata valutata tramite l'implementazione di una campagna di misure sperimentali realizzata presso il comune di Valentano (VT). La scelta di tale località deriva dalla disponibilità di rilievi relativi al metodo PCI di una porzione della rete stradale che la contraddistingue; effettuati durante il lavoro di tesi magistrale dell'Ing. Rosati (22). Tali misure hanno quindi consentito una comparazione tra il livello di comfort rilevato tramite transito con il veicolo strumentato e lo stato di ammaloramento indicato dal valore del PCI stesso.

Il comune è costituito da tre distinte frazioni denominate Valentano Centro, Villa Fontane e Felceti, indicate in Figura 6-1; nella quale si riporta la carta tecnica comunale resa disponibile durante suddetto studio.

L'estensione complessiva della rete stradale del comune di Valentano è pari a circa 21.5 km, suddivisi in tre livelli principali di rete in funzione dei seguenti parametri: dati di traffico, tipologia di pavimentazione, funzione assoluta e importanza strategica rispetto alla viabilità urbana del paese (Figura 6-2). In particolare, nella presente tesi, ci si occuperà solo della rete 1 definita "principale" e caratterizzata da un'estensione pari a circa 5.47 km e contraddistinta unicamente da pavimentazioni flessibili. Tale rete ha la funzione di raccogliere il traffico proveniente dalle strade provinciali presenti nelle zone limitrofe al comune di Valentano. Essa inoltre, è contraddistinta dalle condizioni di carico da traffico più gravose dell'intera rete stradale del comune, in quanto è interessata dal transito del servizio di trasporto pubblico (linee autobus) che collega il paese ai centri abitati siti nelle vicinanze. Per tale motivo, un eventuale stato non ottimale della rete 1 avrà delle ripercussioni anche sugli altri livelli di rete ad essa subordinati.

Il metodo PCI impiegato nella precedente tesi (22) richiede la suddivisione in sezioni omogenee dei singoli rami della rete da analizzare. Ogni singola sezione successivamente, viene ulteriormente divisa in un certo numero di unità campione (*sample unit*), la quale rappresenta la più piccola componente della rete; nonché l'area di riferimento per l'ispezione della pavimentazione e la successiva valutazione dello stato di ammaloramento. La notazione prescelta in suddetto studio prevede il nome del ramo (coincidente con la denominazione della via) seguito da Si per l'indicazione della i -esima sezione definita su tale ramo e da UCj per la j -esima unità campione che la costituisce. Un esempio della notazione completa è quindi data dalla seguente stringa di caratteri: *Stradina S1-UC3*.

La forma e le dimensioni sia delle sezioni che delle unità campione che le compongono non sempre uniformi, anzi presentano una notevole variabilità lungo la rete stradale analizzata, come si può verificare nelle Figure 6-3, 6-4 e 6-5, nelle quali sono rispettivamente raffigurate le frazioni di Valentano Centro (nel proseguo individuata dalla sigla V.C.), Villa Fontane (sigla V.F.) e Felceti (sigla FEL.).

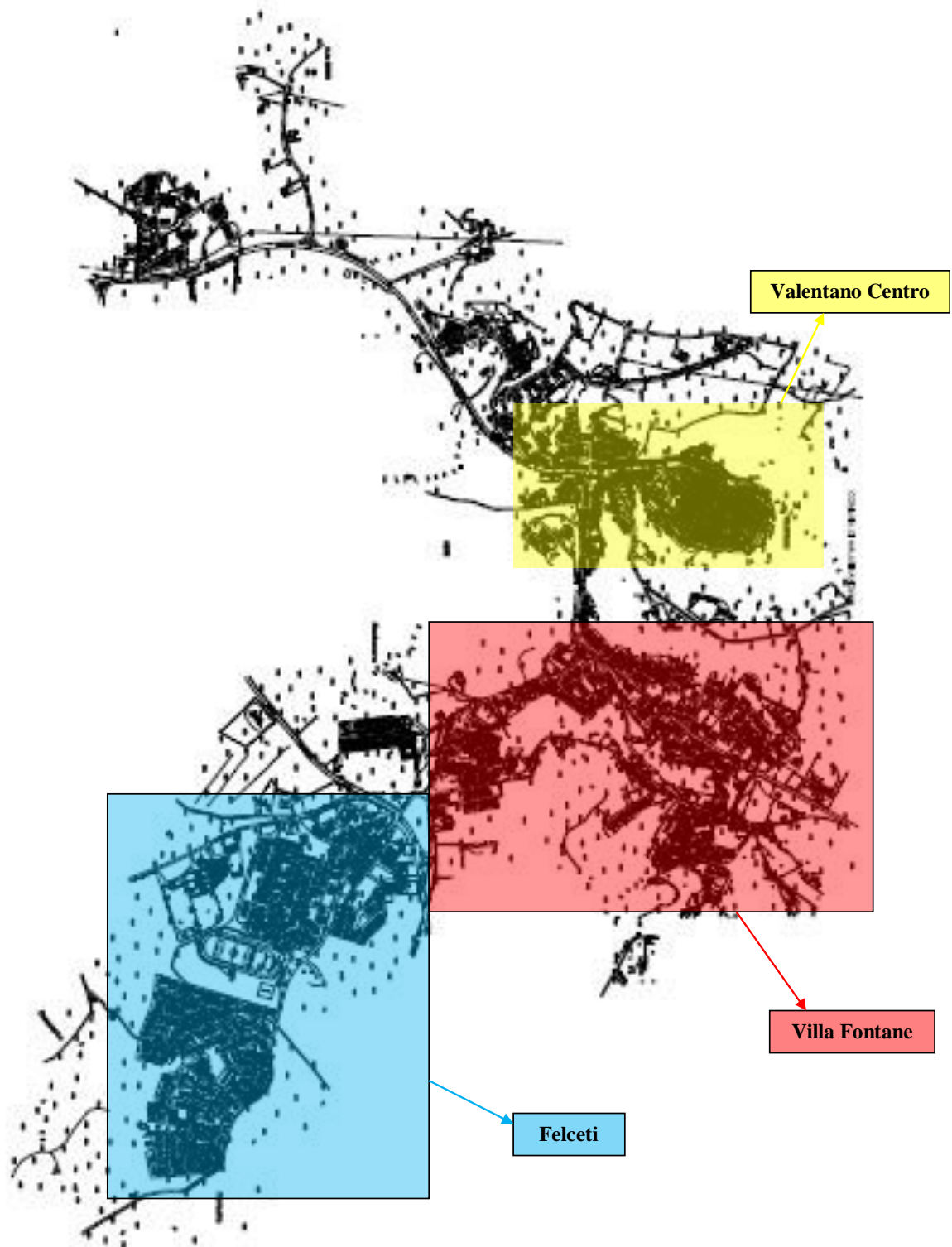


Figura 6-1. Carta tecnica comunale con individuazione delle frazioni di interesse



Figura 6-2. Individuazione dei tre livelli di rete principali

Partendo quindi dalle sezioni e dalle unità campione definita nello studio dell'Ing. Rosati, si è deciso, laddove necessario ai fini della definizione di tratti stradali il più possibile omogenei in termini di lunghezza, di definire nuove sezioni; accorpando le unità campione in maniera differente rispetto a quanto definito precedentemente, ma perseguendo comunque i criteri di omogeneità delle unità campione all'interno di una singola sezione secondo quanto previsto dal metodo PCI.

Nelle Tabelle da 6-1 a 6-3 quindi si riportano le sezioni definite per ciascuna delle tre frazioni per un totale complessivo di 59, congiuntamente alla loro lunghezza e alle unità campione che le costituiscono. Dall'analisi dei valori riportati in suddette tabelle, emerge chiaramente l'eterogeneità delle estensioni dei vari tratti per i quali sarà calcolato l'indice a_{wz} , dovuto essenzialmente alla necessità di rispettare i vincoli imposti dal metodo PCI e soprattutto dalla suddivisione in unità campione precedentemente effettuata. Qualora si decida di utilizzare l'impiego della stima del comfort tramite indice a_{wz} quale approccio per la valutazione dello stato delle pavimentazioni urbane, sicuramente occorrerà affiancare nuovi criteri (o semplici accorgimenti) a quelli previsti dal metodo PCI per la definizione delle sezioni omogenee da analizzare.

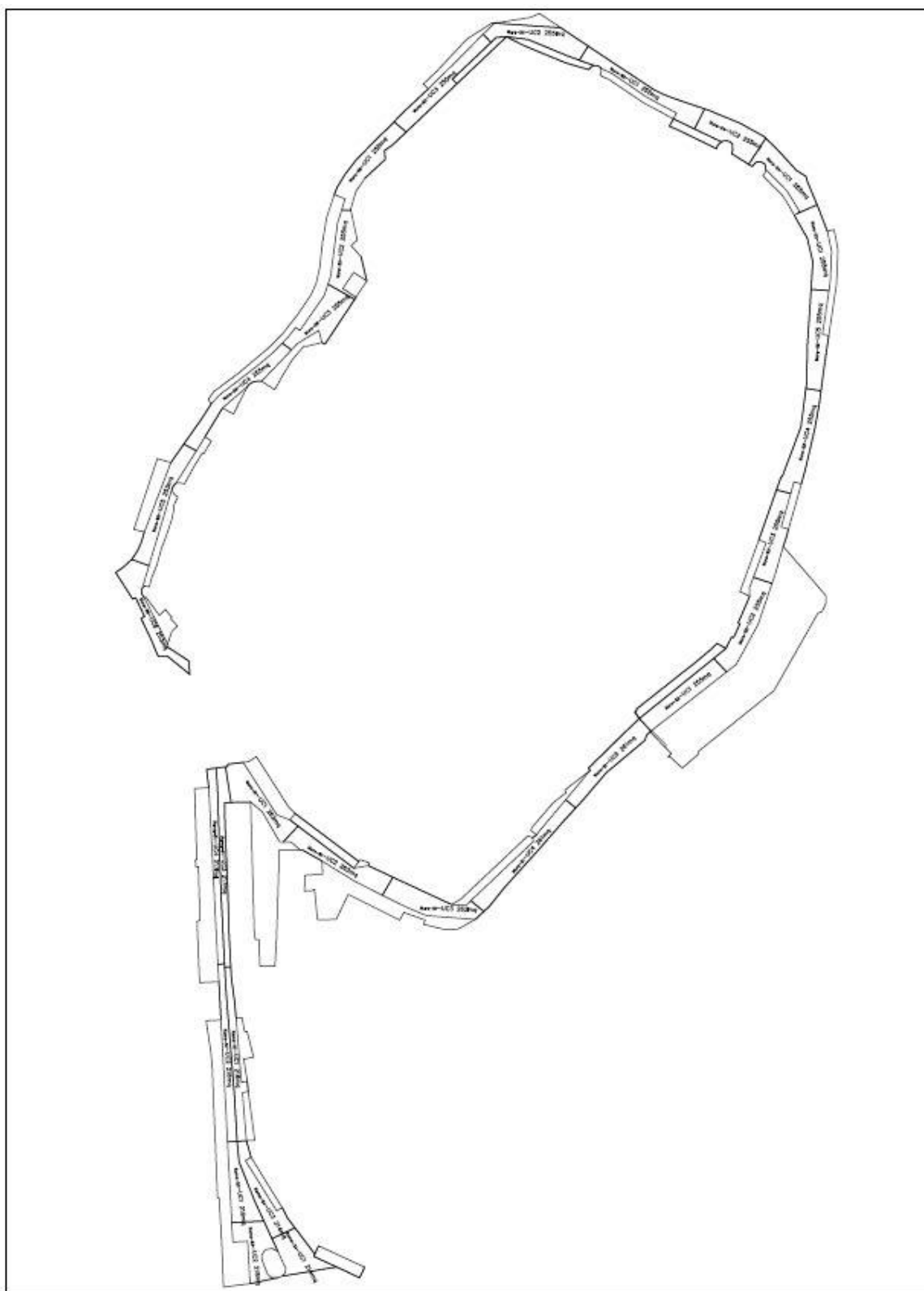


Figura 6-3. Suddivisione in sezioni e unità campione della frazione di Valentano Centro (V.C.)

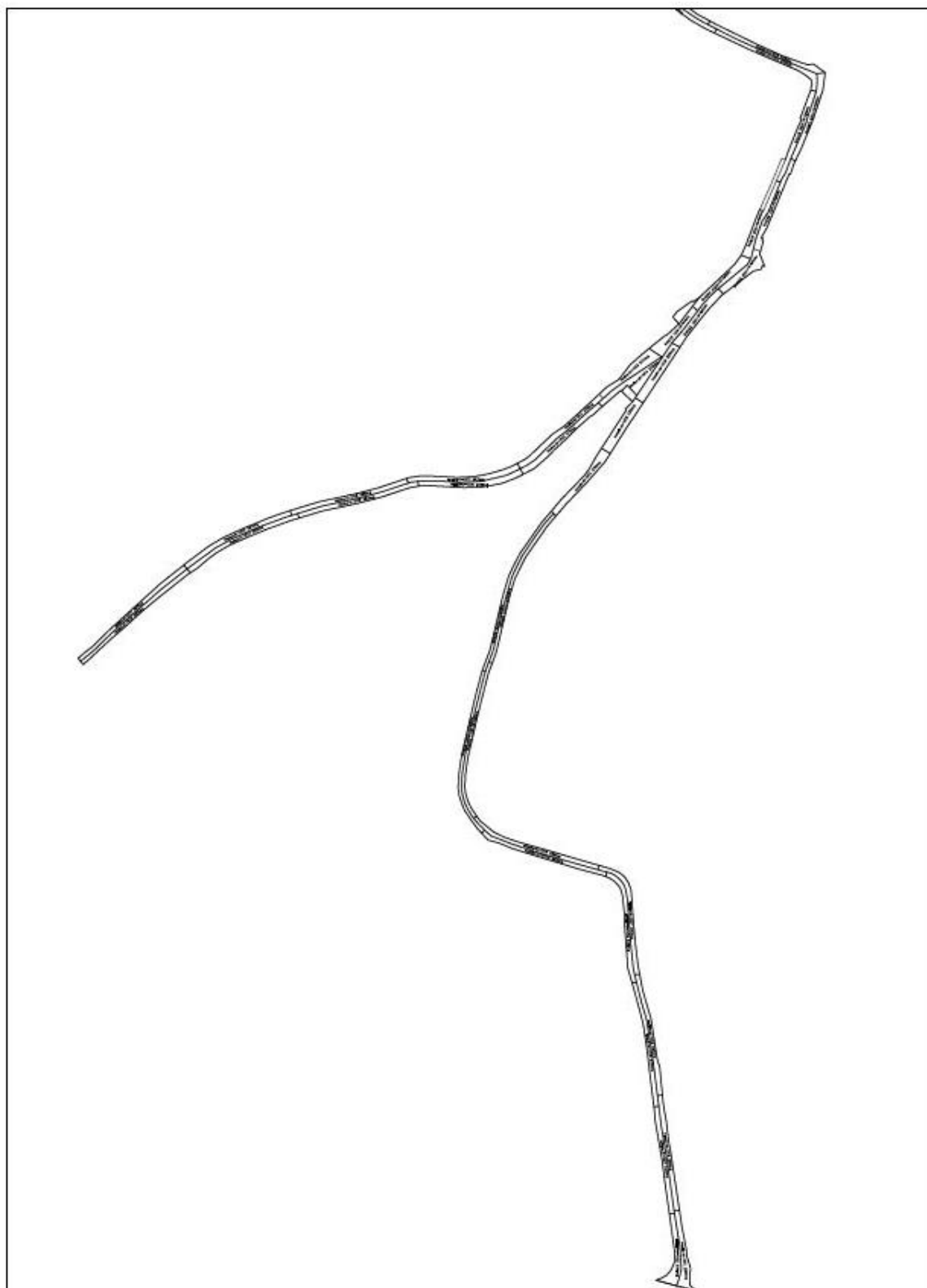


Figura 6-4. Suddivisione in sezioni e unità campione della frazione di Villa Fontane (V.F.)

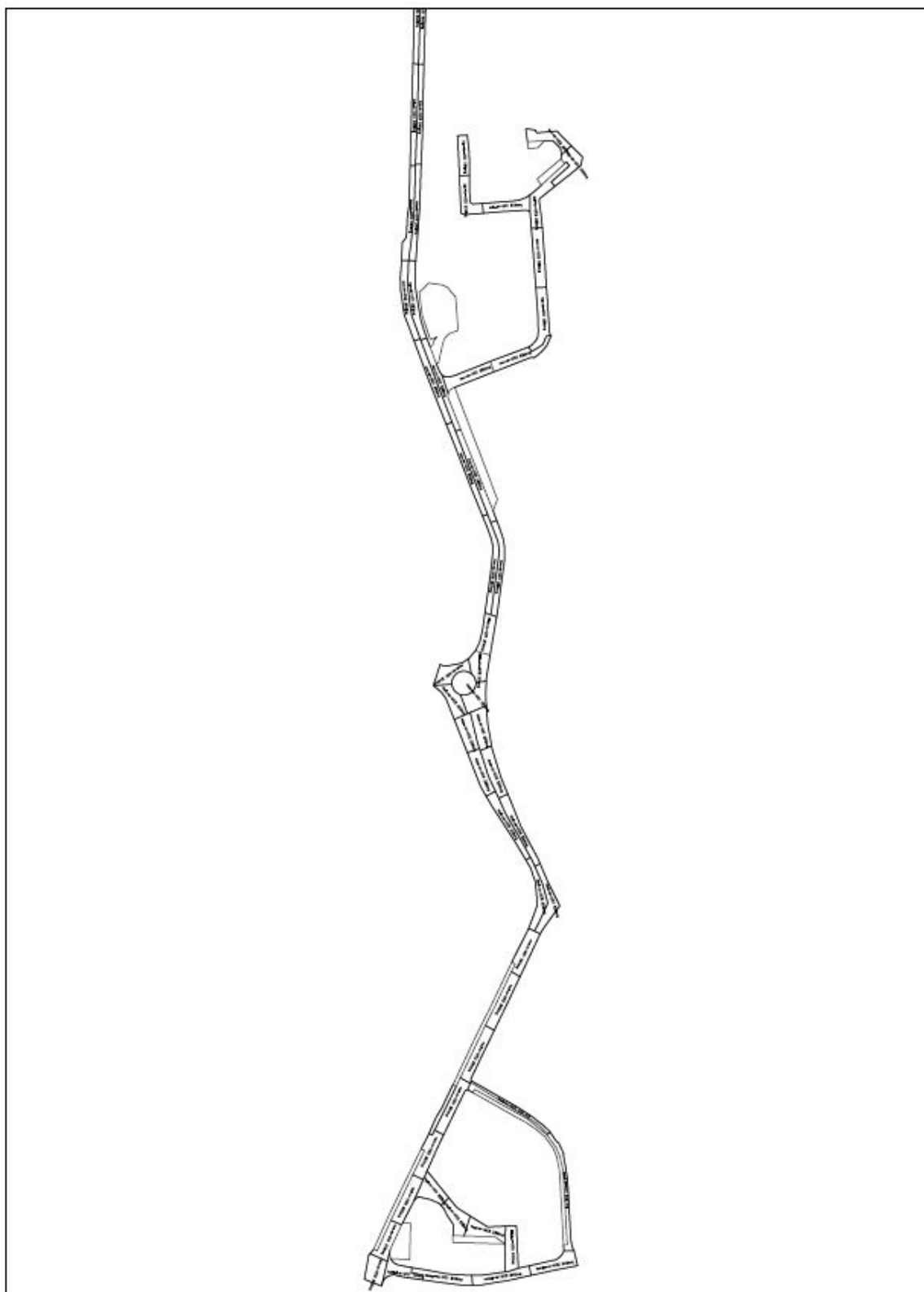


Figura 6-5. Suddivisione in sezioni e unità campione della frazione di Felceti (FEL.)

Tabella 6-1. Sezioni definite per la frazione di Valentano Centro

<i>ID. Sezione</i>	<i>Lunghezza (m)</i>	<i>Unità Campione (UC)</i>
V.C. SEZ. 01	79	MURA S1 UC2+UC3
V.C. SEZ. 02	95	MURA S1 UC4+UC5
V.C. SEZ. 03	74	MURA S2 UC1+UC2
V.C. SEZ. 04	76	MURA S2 UC3+UC4
V.C. SEZ. 05	55	MURA S4 UC1+UC2
V.C. SEZ. 06	91	MURA S5 UC1+UC2
V.C. SEZ. 07	87	MURA S5 UC2+UC3
V.C. SEZ. 08	61	MURA S6 UC2+UC3
V.C. SEZ. 09	42	ROMA S4 UC1+UC3
V.C. SEZ. 10	67	ROMA S1 UC1
V.C. SEZ. 11	68	ROMA S1 UC2
V.C. SEZ. 12	68	ROMA S1 UC3
V.C. SEZ. 13	75	ROMA S1 UC4

Tabella 6-2. Sezioni definite per la frazione di Villa Fontane

<i>ID. Sezione</i>	<i>Lunghezza (m)</i>	<i>Unità Campione (UC)</i>
V.F. SEZ. 01	94	Stradina S1 UC1
V.F. SEZ. 02	80	Stradina S1 UC3
V.F. SEZ. 03	82	Stradina S1 UC4
V.F. SEZ. 04	80	Stradina S1 UC5
V.F. SEZ. 05	77	Stradina S1 UC7
V.F. SEZ. 06	70	Stradina S1 UC8
V.F. SEZ. 07	72	Stradina S2 UC1
V.F. SEZ. 08	70	Stradina S2 UC2
V.F. SEZ. 09	90	Stradina S2 UC3+UC4
V.F. SEZ. 10	77	Fontanile S1 UC3
V.F. SEZ. 11	84	Fontanile S1 UC6
V.F. SEZ. 12	78	Fontanile S1 UC8
V.F. SEZ. 13	90	Fontanile S1 UC9
V.F. SEZ. 14	113	Fontanile S1 UC12
V.F. SEZ. 15	108	Fontanile S1 UC13
V.F. SEZ. 16	94	Fontanile S2 UC1+UC2
V.F. SEZ. 17	63	Fontanile S4 UC1
V.F. SEZ. 18	67	Fontanile S4 UC2
V.F. SEZ. 19	81	Fontanile S4 UC3
V.F. SEZ. 20	60	Fontanile S4 UC5
V.F. SEZ. 21	65	Fontanile S4 UC6
V.F. SEZ. 22	65	Fontanile S4 UC7
V.F. SEZ. 23	102	Fontanile S4 UC8+UC10

Tabella 6-3. Sezioni definite per la frazione di Felceti

<i>ID. Sezione</i>	<i>Lunghezza (m)</i>	<i>Unità Campione (UC)</i>
<i>FEL. SEZ. 01</i>	80	CASTAGNI S2 UC1+UC2
<i>FEL. SEZ. 02</i>	73	CASTAGNI S2 UC2+UC3
<i>FEL. SEZ. 03</i>	97	FAGGI S1 UC1+UC2+UC3+UC4
<i>FEL. SEZ. 04</i>	109	FELCI S1 UC1+UC2+UC3
<i>FEL. SEZ. 05</i>	71	FELCI S1 UC4+UC5
<i>FEL. SEZ. 06</i>	63	MORO S1 UC1
<i>FEL. SEZ. 07</i>	63	MORO S1 UC2
<i>FEL. SEZ. 08</i>	67	MORO S1 UC3
<i>FEL. SEZ. 09</i>	67	MORO S1 UC4
<i>FEL. SEZ. 10</i>	63	MORO S1 UC6
<i>FEL. SEZ. 11</i>	113	MORO S2 UC2+UC4
<i>FEL. SEZ. 12</i>	65	MORO S2 UC3
<i>FEL. SEZ. 13</i>	65	MORO S2 UC5
<i>FEL. SEZ. 14</i>	65	MORO S2 UC6
<i>FEL. SEZ. 15</i>	66	MORO S2 UC8
<i>FEL. SEZ. 16</i>	67	MORO S3 UC1+UC2
<i>FEL. SEZ. 17</i>	76	MORO S4 UC1+UC2
<i>FEL. SEZ. 18</i>	66	MORO S7 UC1+UC2
<i>FEL. SEZ. 19</i>	80	ONTANI S1 UC1
<i>FEL. SEZ. 20</i>	62	ONTANI S1 UC2
<i>FEL. SEZ. 21</i>	110	STADIO S3 UC1+UC3+UC5
<i>FEL. SEZ. 22</i>	81	STADIO S3 UC4+UC6
<i>FEL. SEZ. 23</i>	100	STADIO S3 UC6+UC8

Stabiliti quindi i singoli tratti su cui si andrà a calcolare l'indice a_{wz} , occorre definire la procedura con la quale saranno tagliati i segnali dell'accelerazione verticale misurati. Come già anticipato, non avendo la possibilità di comparare i dati acquisiti dai tre diversi dispositivi (unità inerziale LMRK10, smartphone A e smartphone B) in corrispondenza del medesimo tag temporale riferito al *GPS timing*, si è deciso di andare a definire il contorno di ciascuna sezione tramite un opportuno poligono con i vertici espressi in coordinate UTM-WGS84. Successivamente, è stato implementato un codice in Matlab nel quale, dopo aver convertito le coordinate geografiche WGS84 (latitudine e longitudine) fornite dalle singole strumentazioni nelle rispettive coordinate cartografiche UTM-WGS84, viene utilizzata la funzione predefinita *inpolygon* grazie alla quale è possibile individuare i punti ricadenti all'interno del poligono sopra definito (lati compresi). Per ogni singola sezione pertanto, saranno presi in considerazione esclusivamente i dati accelerometrici riferiti a tali punti.

Per poter applicare siffatta procedura, si è reso necessario georeferenziare in coordinate UTM-WGS84 la carta tecnica comunale su cui è stata basata la suddivisione delle unità campione (disponibile in formato digitale *.dwg); la quale però, come spesso accade per molti piccoli comuni, fa riferimento al sistema catastale italiano.

Quest'ultimo, ha origine dalla legge n. 3682 del 1° marzo 1886 e prevede l'adozione del sistema di rappresentazione cartografica di Cassini-Soldner, la quale anzitutto si basa sull'approssimazione della superficie terrestre con un ellissoide di riferimento; nel caso specifico quello di Bessel. Il sistema catastale italiano in particolare, ha tre datum principali ognuno orientato in un dato punto (detto *punto o centro di emanazione*), in corrispondenza del quale si impongono opportune condizioni geometriche. Nello specifico per l'Italia centro-nord l'ellissoide di Bessel è orientato a Genova, per l'Italia meridionale a Castanea delle Furie e per parte dell'Italia centrale a Roma M. Mario; ma esistono anche altre definizioni valide per zone circoscritte. Successivamente viene applicata la proiezione di Cassini-Soldner al fine di rappresentare la superficie terrestre su di un piano. Essa è una rappresentazione equivalente ma non conforme, cioè fornisce un esatto dimensionamento delle superfici ma non conserva esattamente le forme.

Al fine di evidenziare la complessità e l'eterogeneità delle mappe catastali in Italia, si riporta uno stralcio dal sito <http://www.catastomatic.it/>: *“La Proiezione di Cassini-Soldner fu adottata nel sistema catastale italiano come segue: (a) coordinate riferite al centro di riferimento (origine catastale); (b) per maggior parte del territorio italiano, le coordinate catastali hanno come origine (centro della proiezione) 31 diversi vertici (grandi origini), che danno quindi origine a 31 diversi sistemi di coordinate; (c) la superficie di proiezione è il cilindro trasverso tangente lungo il meridiano passante per il centro di riferimento.”* A partire dal 1942 iniziò la conversione della cartografia catastale con l'adozione della rappresentazione conforme di Gauss-Boaga sull'ellissoide internazionale. Purtroppo questa operazione non è ancora ultimata e quindi in alcuni casi vi possono essere problemi nell'uso congiunto di carte catastali e regionali (queste ultime, più recenti, sono tutte nel sistema Gauss-Boaga).

Per poter effettuare correttamente la conversione dalla rappresentazione cartografica Cassini-Soldner alle coordinate cartografiche UTM-WGS84, è necessario determinare i parametri di trasformazione. A tal scopo, sono disponibili una serie di punti dislocati in tutto il territorio nazionali denominati *punti fiduciali* dei quali sono note (e rese disponibili sul portale <http://www.globogis.it/fiduciali.it>) le coordinate nei diversi sistemi di riferimento (Cassini-Soldner, Gauss-Boaga e geografiche WGS84).

Per quanto concerne la zona di Valentano, sono stati individuati quattro punti fiduciali poste nelle immediate vicinanze della rete stradale da analizzare (Figura 6-6). Per ognuno di essi, si riportano nella Tabella 6-4 le coordinate nei vari sistemi di riferimento fornite dal portale menzionato in precedenza.

Note quindi le coordinate geografiche WGS84, sono state calcolate le coordinate cartografiche UTM-WGS84 per tutti e quattro i punti fiduciali. Considerando l'elevato quantitativo di dati da convertire, si è scelto di adottare una procedura semplificata, che prevede l'utilizzo del comando *adrsheet* (*Rubber Sheet command*) presente su AutoCAD Map 3D, tramite il quale si determina una deformazione elastica. Per poter applicare correttamente tale procedura occorre conoscere le coordinate doppie di almeno tre punti.

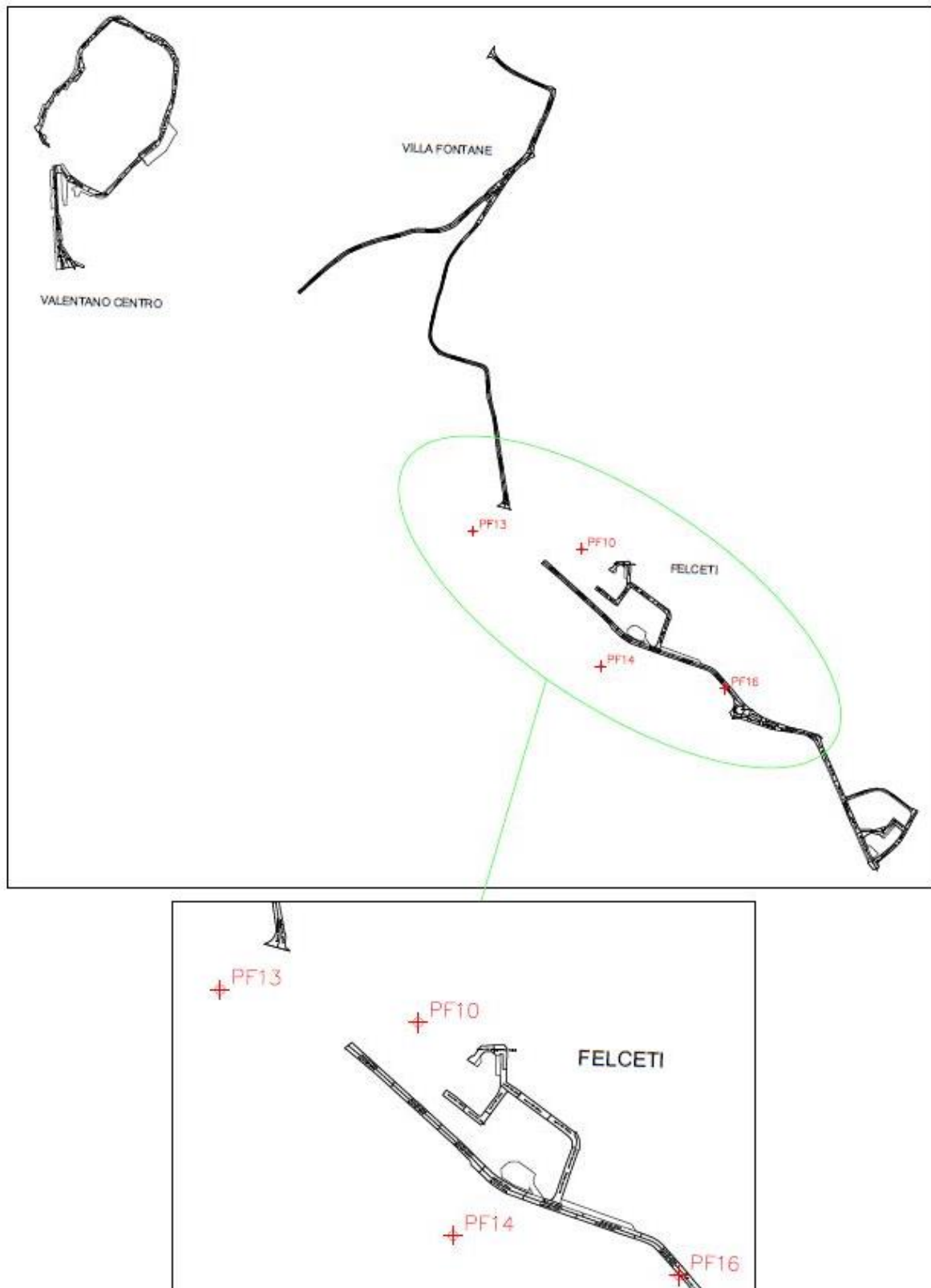


Figura 6-6. Posizione dei punti fiduciali utilizzati come riferimento per la conversione dalla rappresentazione in coordinate cartografiche Cassini-Soldner a quella UTM-WGS84

Tabella 6-4. Coordinate dei punti fiduciali nei diversi sistemi di riferimento

Id. punto fiduciale	Cassini-Soldner		Gauss-Boaga		WGS84	
	x (m)	y (m)	E (m)	N (m)	lat. φ	long. λ
PF10/0270/L569	-51022.362	71002.373	1732409.41	4716056.86	42.56185	11.83085
PF13/0270/L569	-51233.270	71030.821	1732193.47	4716075.21	42.56208	11.82823
PF14/0270/L569	-50978.434	70777.030	1732456.35	4715832.74	42.55982	11.83133
PF16/0270/L569	-50737.662	70741.885	1732704.36	4715814.36	42.55958	11.83434

Nel presente studio, per effettuare tale trasformazione sono stati utilizzati tutti e quattro i punti fiduciali descritti in precedenza.

Al fine di verificare la qualità del risultato ottenuto, tenuto anche conto delle approssimazioni introdotte, si mostrano le traiettorie georeferenziate fornite dalla piattaforma inerziale LMRK10 durante alcuni rilievi effettuati nelle tre diverse frazioni, sovrapponendole alla rete stradale presente nella carta tecnica comunale i cui elementi sono stati georeferenzati rispetto al sistema di riferimento cartografico UTM-WGS84 (Figure 6-7, 6-8 e 6-9).

Completato quindi tale passaggio, si è proceduto con la definizione dei vertici dei poligoni impiegati per il taglio dei segnali accelerometrici. Inoltre, tenuto conto della precisione dei dati di posizionamento forniti dai cellulari smartphone e dalle imprecisioni introdotte tramite il processo di conversione della carta tecnica comunale descritto in precedenza, si è deciso di introdurre una tolleranza trasversale (rispetto all'asse della strada) compresa tra 2.0-2.5 m e una piccola zona di sovrapposizione tra due sezioni di calcolo contigue di circa 1.5 m; come mostrato a titolo esemplificativo in Figura 6-10.

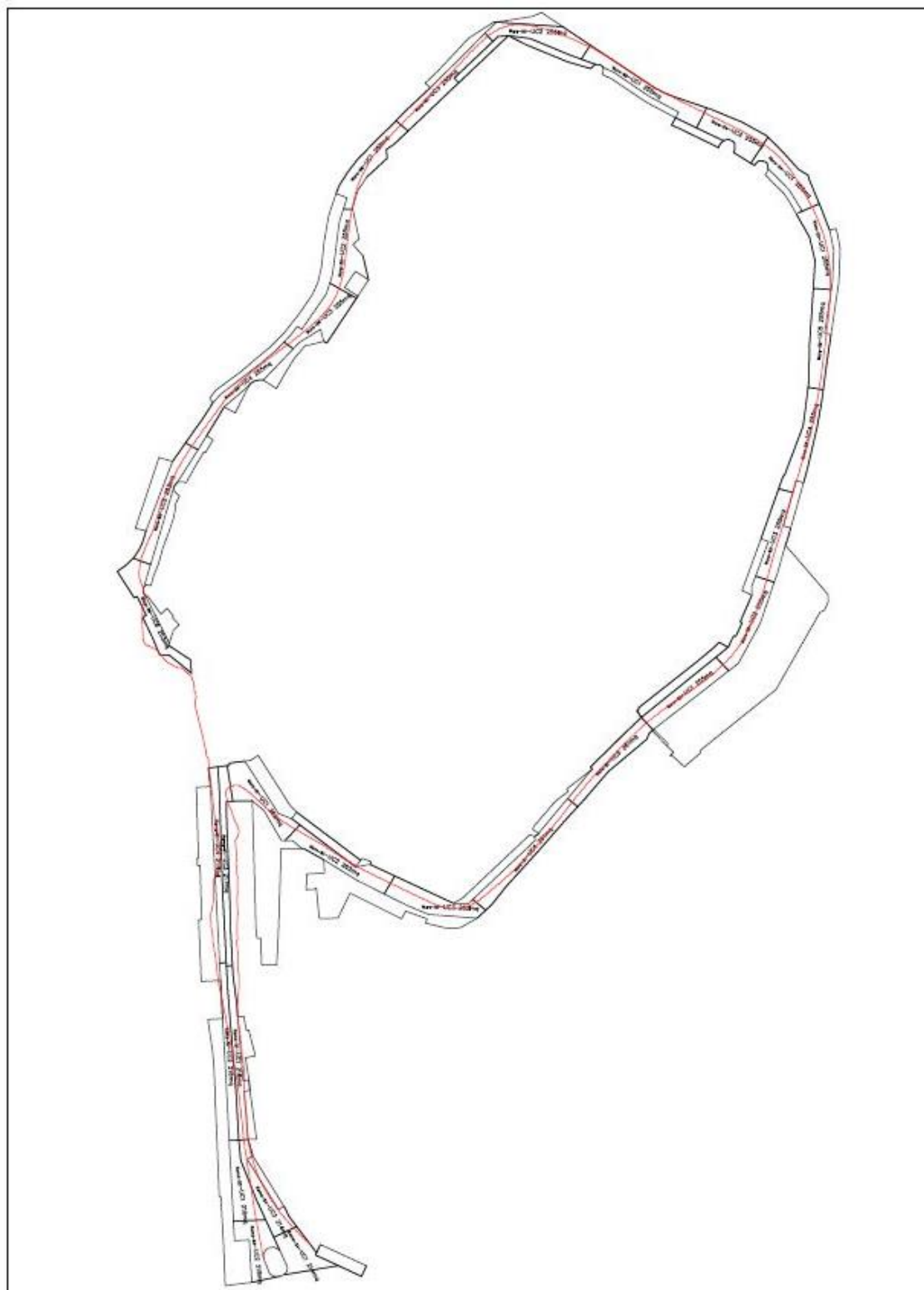


Figura 6-7. Traiettoria georeferenziata in coordinate cartografiche UTM-WGS84 LMRK10 - frazione di Valentano Centro

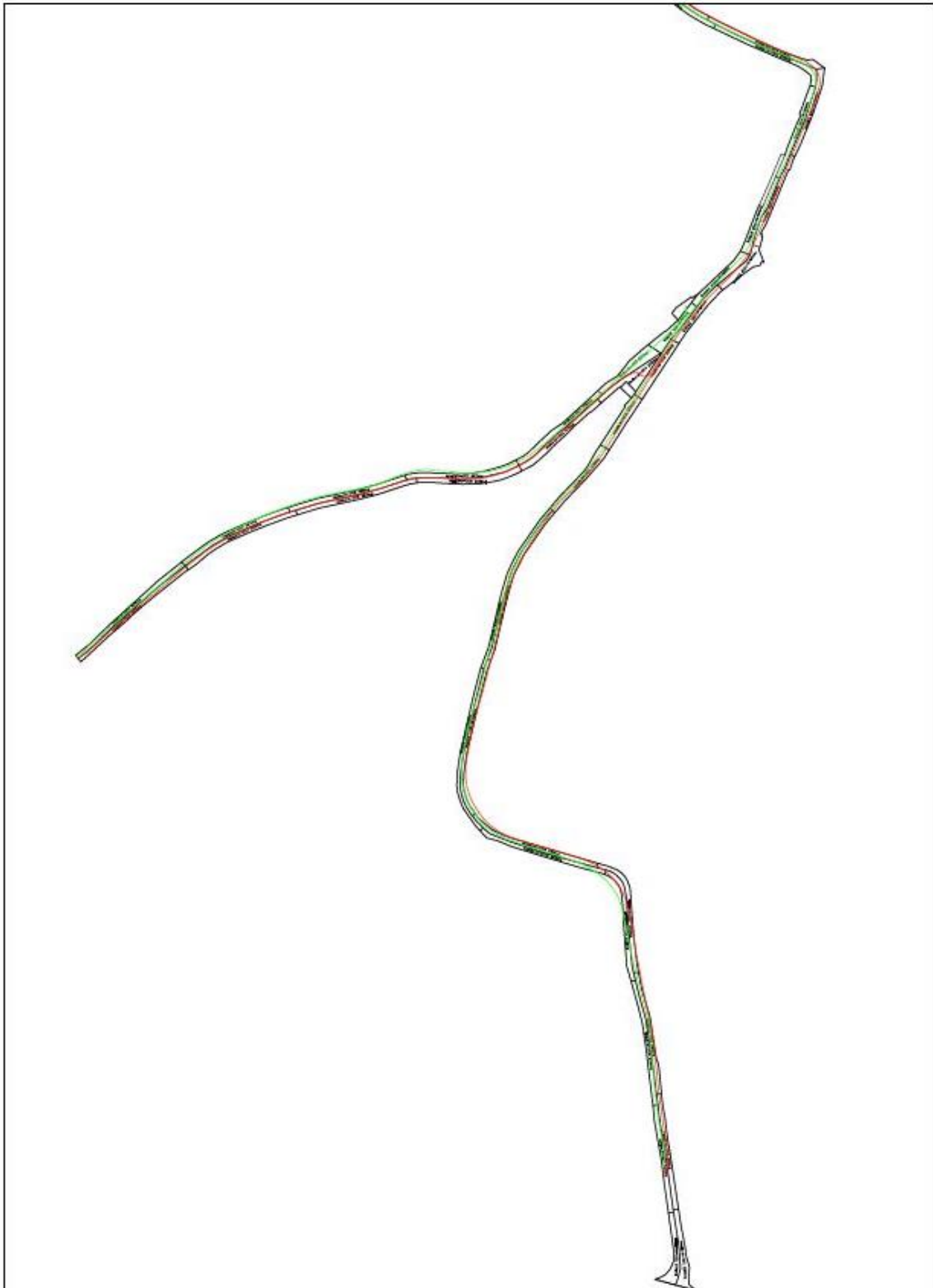


Figura 6-8. Traiettoria georeferenziata in coordinate cartografiche UTM-WGS84 LMRK10 - frazione di Villa Fontane: in rosso tratto percorso in direzione nord; in verde tratto percorso in direzione sud



Figura 6-9. Traiettoria georeferenziata in coordinate cartografiche UTM-WGS84 LMRK10 - frazione di Felci

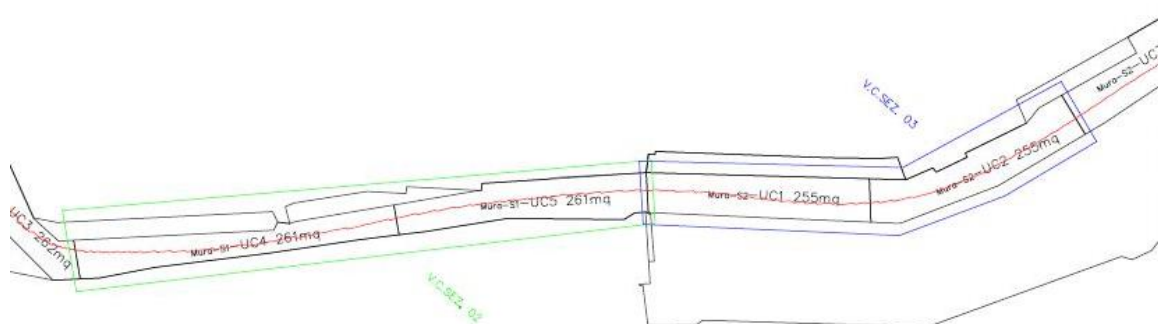


Figura 6-10. Esempio dei poligoni utilizzati per il taglio dei segnali accelerometrici in corrispondenza delle varie sezioni di calcolo

La presente campagna di misure presso il comune di Valentano (VT) è stata effettuata in presenza di traffico ordinario, prediligendo le fasce orarie della giornata in corrispondenza delle quali si registra una riduzione più o meno accentuata dei flussi di traffico che interessano le tre frazioni esaminate. A causa delle difficoltà riscontrate nel mantenere una velocità di marcia il più possibile prossima ai 10 km/h e dell'aumento del rischio di interferenze con gli altri utenti stradali dovuto all'allungarsi dei tempi di misura, si è deciso di scartare tale classe di velocità ($V_{\text{misura}}=10 \text{ km/h} \pm 5 \text{ km/h}$). Analogamente, data la presenza di diverse intersezioni stradali e delle caratteristiche planimetriche della porzione di rete presa in esame, a cui si somma la presenza di limiti di velocità di 30 e 40 km/h in alcuni tratti stradali, non è stato possibile effettuare rilievi alla velocità massima inizialmente prevista (pari a $50 \text{ km/h} \pm 5 \text{ km/h}$) ad eccezione di un numero alquanto limitato di sezioni (n. 5). Sono quindi state considerate le classi di velocità di 20, 30 e 40 km/h ($\pm 5 \text{ km/h}$) per le frazioni di Felceti e Villa Fontane mentre per Valentano Centro sono state prese in esame solamente le prime due, essendo presente nelle strade afferenti a tale frazione un limite di velocità imposto dall'amministrazione comunale pari a 30 km/h.

Nella suddivisione del segnale dell'accelerazione in corrispondenza della sezione *FEL.SEZ.20* (parte terminale di via Ontani) in aggiunta all'utilizzo dei dati di posizionamento forniti dalla piattaforma inerziale utilizzati per individuare il tratto relativo a tale sezione, si è deciso di imporre un ulteriore vincolo sulla velocità. Essendo infatti presente all'incrocio tra via Ontani e via Felci l'obbligo di fermarsi (segnale di STOP), non è stato possibile percorrere l'intero tratto a velocità omogenea e per tale motivo è stata eliminata la parte del segnale ricadente all'interno della sezione stessa, per la quale si è registrata una velocità inferiore a 15 km/h. In tal modo, si è inoltre evitato di considerare un segnale più lungo a causa dei tempi di attesa variabili ai fini dell'immissione nell'altro flusso di traffico.

7. ELABORAZIONE DATI

Le varie misure effettuate utilizzando le diverse strumentazioni sono state analizzate sia in termini di ripetibilità dei risultati ottenuti per le singole sezioni, sia comparando tra loro i valori dell'indice a_{wz} ottenuti tramite i tre dispositivi installati: piattaforma inerziale LMRK10, smartphone A (parabrezza) e smartphone B (in prossimità dell'unità inerziale). In quest'ultimo caso, non essendoci un riferimento temporale comune tra le acquisizioni fornite dalle varie apparecchiature, in quanto l'applicazione SensorFusion non utilizza come riferimento temporale il *timing* del sistema GPS a differenza della piattaforma inerziale LMRK10, non è stato possibile confrontare i valori rilevati puntualmente delle accelerazioni verticali misurate durante i vari passaggi, limitando l'analisi comparativa unicamente al valore dell'indice a_{wz} calcolato in corrispondenza di ciascuna sezione di analisi.

Successivamente i valori ottenuti per tale indicatore di comfort sono stati messi in relazione ai valori di PCI precedentemente calcolati per ciascuna sezione, al fine di verificare la capacità dell'approccio proposto a cogliere lo stato di degrado complessivo caratterizzante ciascun tratto esaminato, oltre a descriverne e stimarne la qualità di marcia percepita dagli utenti stradali.

7.1. Risultati unità LMRK10

In considerazione della condizione di accettabilità delle misure, che prevede una tolleranza massima di ± 5 km/h rispetto alla classe di velocità presa in esame (20, 30 e 40 km/h) lungo l'intero periodo di misura che caratterizza ciascuna sezione analizzata, non è stato possibile effettuare il medesimo numero di ripetizioni per tutte le sezioni di prova. Prendendo quindi in esame le sole misure rispettose della condizione imposta sulla velocità ed effettuate tramite l'unità inerziale LMRK10, si è riscontrata una buona ripetibilità dei valori dell'indice a_{wz} , come testimoniato dalle tabelle da 7-1 a 7-8. Si può verificare infatti, che la deviazione standard in tutte le sezioni per le quali sono state effettuate più di due misure valide, risulta essere sempre inferiore a 0.1 m/s^2 , in accordo tra l'altro con i risultati ottenuti durante le analisi di ripetibilità realizzate all'interno dei convogli della Metro C e descritti in precedenza al paragrafo §5.3.2.

Come si poteva preventivare, all'aumentare della velocità di marcia durante le misure il numero di sezioni percorribili soddisfacendo il criterio di 'omogeneità' (tolleranza ± 5 km/h) imposto sulla velocità si riduce. Ad esempio, si può verificare come per velocità di misura pari a 30 o 40 km/h, non è stato possibile ottenere dei rilievi accettabili per le sezioni dalla 17 alla 20 nella frazione di Villa Fontane. Osservando la localizzazione di tali sezioni evidenziata in Figura 7-1, si può notare come essendo comprese tra una curva con angolo di deviazione prossimo a 90° e un'intersezione a raso con obbligo di fermata (STOP), l'effettiva velocità di transito sarà difficilmente prossima a tali velocità, bensì verosimilmente risulterà compresa tra 20 e 30 km/h.

Tabella 7-1. Valori a_{wz} ottenuti in diversi passaggi a 20 km/h nella frazione di Felceti

ID SEZIONE	$a_{wz} (m/s^2) - \text{Velocità di misura pari a } 20 \pm 5 \text{ km/h}$							Media	Dev. Stand.
	Misura 01	Misura 02	Misura 03	Misura 04	Misura 05	Misura 06	Misura 07		
FEL. SEZ. 01	0.216	0.222	0.228	-	0.208	0.208	0.198	0.213	0.010
FEL. SEZ. 02	-	-	-	-	-	-	-	-	-
FEL. SEZ. 03	0.208	-	-	-	0.197	-	0.191	0.199	0.007
FEL. SEZ. 04	-	-	-	-	-	-	-	-	-
FEL. SEZ. 05	0.150	0.144	0.147	0.103	0.111	0.107	0.112	0.125	0.019
FEL. SEZ. 06	-	0.258	0.239	0.178	0.181	-	0.169	0.205	0.036
FEL. SEZ. 07	0.154	-	0.170	0.107	0.131	0.146	0.131	0.140	0.020
FEL. SEZ. 08	-	0.155	0.179	0.126	0.093	0.094	0.091	0.123	0.034
FEL. SEZ. 09	0.137	0.195	-	0.126	0.159	0.149	0.116	0.147	0.026
FEL. SEZ. 10	0.149	0.165	0.177	0.115	0.112	scartata (0.869)	0.109	0.138	0.027
FEL. SEZ. 11	0.296	-	0.396	0.286	0.251	-	0.281	0.302	0.049
FEL. SEZ. 12	0.409	0.391	0.311	0.362	-	scartata (0.778)	0.288	0.352	0.046
FEL. SEZ. 13	0.319	0.453	0.423	0.312	0.276	0.180	0.331	0.328	0.084
FEL. SEZ. 14	0.247	0.249	-	0.245	0.228	0.221	0.235	0.237	0.010
FEL. SEZ. 15	0.366	0.393	-	0.333	0.346	0.310	0.288	0.339	0.034
FEL. SEZ. 16	-	-	-	-	-	-	-	-	-
FEL. SEZ. 17	0.165	0.166	-	0.129	-	0.137	0.149	0.149	0.015
FEL. SEZ. 18	0.472	0.405	-	-	-	-	-	0.439	0.034
FEL. SEZ. 19	0.212	0.186	0.191	-	0.138	0.146	0.155	0.171	0.027
FEL. SEZ. 20	0.189	0.170	0.180	0.141	0.134	0.134	0.124	0.153	0.024
FEL. SEZ. 21	0.163	0.179	0.189	-	0.138	0.160	0.142	0.162	0.018
FEL. SEZ. 22	0.175	0.156	0.185	0.132	0.140	0.119	-	0.151	0.023
FEL. SEZ. 23	0.252	0.234	0.231	-	0.207	0.174	-	0.220	0.027

Tabella 7-2. Valori a_{wz} ottenuti in diversi passaggi a 20 km/h nella frazione di Valentano Centro

ID SEZIONE	$a_{wz} (m/s^2) - \text{Velocità di misura pari a } 20 \pm 5 \text{ km/h}$						Media	Dev. Stand.
	Misura 01	Misura 02	Misura 03	Misura 04	Misura 05	Misura 06		
V.C. SEZ. 01	-	0.220	0.195	-	0.196	-	0.204	0.014
V.C. SEZ. 02	0.148	0.157	0.144	0.172	0.171	-	0.158	0.013
V.C. SEZ. 03	0.335	0.388	0.373	-	0.484	-	0.395	0.063
V.C. SEZ. 04	-	0.309	0.285	-	0.330	-	0.308	0.023
V.C. SEZ. 05	0.285	0.284	0.307	-	-	-	0.292	0.013
V.C. SEZ. 06	0.420	0.368	0.416	0.529	0.476	0.481	0.448	0.058
V.C. SEZ. 07	0.391	0.449	0.394	0.474	0.478	0.448	0.439	0.038
V.C. SEZ. 08	0.294	0.270	0.229	0.262	0.338	-	0.279	0.041
V.C. SEZ. 09	0.123	0.143	0.152	0.194	-	-	0.153	0.030
V.C. SEZ. 10	-	0.257	0.211	0.268	0.262	-	0.249	0.026
V.C. SEZ. 11	-	-	-	0.183	0.170	-	0.177	0.009
V.C. SEZ. 12	-	-	0.175	-	-	-	0.175	-
V.C. SEZ. 13	-	-	-	0.168	0.157	-	0.162	0.008

Tabella 7-3. Valori a_{wz} ottenuti in diversi passaggi a 20 km/h nella frazione di Villa Fontane

ID SEZIONE	$a_{wz} (m/s^2) - \text{Velocità di misura pari a } 20 \pm 5 \text{ km/h}$					
	Misura 01	Misura 02	Misura 03	Misura 04	Media	Dev. Stand.
V.F. SEZ. 01	-	-	-	-	-	-
V.F. SEZ. 02	0.273	0.326	0.341	-	0.313	0.036
V.F. SEZ. 03	0.342	0.411	0.404	-	0.386	0.038
V.F. SEZ. 04	0.258	0.342	0.312	-	0.304	0.042
V.F. SEZ. 05	0.445	0.360	0.446	0.467	0.430	0.048
V.F. SEZ. 06	0.395	0.567	0.449	-	0.470	0.088
V.F. SEZ. 07	0.236	0.270	0.271	0.254	0.258	0.016
V.F. SEZ. 08	0.261	0.240	0.301	0.240	0.261	0.029
V.F. SEZ. 09	-	-	-	-	-	-
V.F. SEZ. 10	0.188	0.195	0.182	0.180	0.186	0.007
V.F. SEZ. 11	-	0.323	0.301	0.240	0.288	0.043
V.F. SEZ. 12	0.169	0.240	-	-	0.204	0.050
V.F. SEZ. 13	0.274	0.262	0.316	-	0.284	0.028
V.F. SEZ. 14	0.205	0.237	-	-	0.221	0.022
V.F. SEZ. 15	0.296	0.271	0.285	-	0.284	0.013
V.F. SEZ. 16	0.290	0.368	0.384	-	0.347	0.050
V.F. SEZ. 17	-	-	-	-	-	-
V.F. SEZ. 18	-	0.166	0.182	-	0.174	0.011
V.F. SEZ. 19	0.141	0.180	-	-	0.161	0.028
V.F. SEZ. 20	0.155	-	0.192	-	0.174	0.026
V.F. SEZ. 21	-	-	-	-	-	-
V.F. SEZ. 22	0.167	0.205	0.212	0.179	0.191	0.022
V.F. SEZ. 23	0.176	0.200	-	0.183	0.186	0.012

Tabella 7-4. Valori a_{wz} ottenuti in diversi passaggi a 30 km/h nella frazione di Felceti

ID SEZIONE	$a_{wz} (m/s^2) - \text{Velocità di misura pari a } 30 \pm 5 \text{ km/h}$						Media	Dev. Stand.
	Misura 01	Misura 02	Misura 03	Misura 04	Misura 05	Misura 06		
FEL. SEZ. 01	0.302	0.302	-	-	-	-	0.302	0.000
FEL. SEZ. 02	-	-	-	-	-	-	-	-
FEL. SEZ. 03	-	-	-	-	-	-	-	-
FEL. SEZ. 04	-	-	-	-	-	-	-	-
FEL. SEZ. 05	0.201	0.201	0.148	0.150	0.159	0.151	0.162	0.022
FEL. SEZ. 06	-	-	-	-	-	-	-	-
FEL. SEZ. 07	0.235	0.200	0.200	-	-	-	0.212	0.020
FEL. SEZ. 08	0.253	0.228	0.167	0.130	0.155	0.146	0.180	0.049
FEL. SEZ. 09	0.217	0.191	0.155	0.212	0.175	0.209	0.193	0.024
FEL. SEZ. 10	0.208	0.200	0.150	0.145	0.173	0.159	0.172	0.026
FEL. SEZ. 11	0.473	-	0.335	-	0.393	0.411	0.403	0.057
FEL. SEZ. 12	0.341	0.455	0.445	0.399	0.480	0.344	0.411	0.059
FEL. SEZ. 13	0.484	0.528	0.319	-	0.427	0.386	0.429	0.082
FEL. SEZ. 14	0.363	0.376	0.247	0.332	0.326	0.308	0.325	0.046
FEL. SEZ. 15	0.396	0.421	0.361	0.385	0.335	0.351	0.375	0.032
FEL. SEZ. 16	-	-	-	-	-	-	-	-
FEL. SEZ. 17	0.235	0.238	-	-	-	-	0.236	0.003
FEL. SEZ. 18	-	-	-	-	-	-	-	-
FEL. SEZ. 19	-	-	-	-	-	-	-	-
FEL. SEZ. 20	-	-	0.203	0.191	0.200	0.174	0.192	0.013
FEL. SEZ. 21	0.252	0.263	0.249	0.205	0.215	0.220	0.234	0.024
FEL. SEZ. 22	0.244	0.236	0.209	0.171	0.174	0.179	0.202	0.033
FEL. SEZ. 23	0.372	0.412	0.337	0.313	0.309	0.344	0.348	0.039

Tabella 7-5. Valori a_{wz} ottenuti in diversi passaggi a 30 km/h nella frazione di Valentano Centro

ID SEZIONE	$a_{wz} (m/s^2)$ - Velocità di misura pari a $30 \pm 5km/h$						Media	Dev. Stand.
	Misura 01	Misura 02	Misura 03	Misura 04	Misura 05	Misura 06		
V.C. SEZ. 01	-	-	-	-	-	-	-	-
V.C. SEZ. 02	-	-	0.265	-	-	-	0.265	-
V.C. SEZ. 03	0.614	0.621	0.609	0.513	0.448	0.520	0.554	0.071
V.C. SEZ. 04	-	0.502	0.416	0.393	0.460	0.367	0.428	0.054
V.C. SEZ. 05	-	-	-	-	0.440	0.394	0.417	0.032
V.C. SEZ. 06	-	-	-	-	-	-	-	-
V.C. SEZ. 07	-	-	-	-	-	-	-	-
V.C. SEZ. 08	-	-	-	-	-	0.363	0.363	-
V.C. SEZ. 09	0.261	0.278	-	0.237	0.227	0.232	0.247	0.022
V.C. SEZ. 10	0.509	0.452	0.499	0.256	-	0.209	0.385	0.142
V.C. SEZ. 11	0.236	0.280	0.241	-	-	-	0.253	0.024
V.C. SEZ. 12	-	-	-	-	-	-	-	-
V.C. SEZ. 13	0.215	-	-	-	-	-	0.215	-

Tabella 7-6. Valori a_{wz} ottenuti in diversi passaggi a 30 km/h nella frazione di Villa Fontane

ID SEZIONE	$a_{wz} (m/s^2)$ - Velocità di misura pari a $30 \pm 5km/h$						Media	Dev. Stand.	
	Misura 01	Misura 02	Misura 03	Misura 04	Misura 05	Misura 06			Misura 07
V.F. SEZ. 01	-	-	-	-	-	-	-	-	
V.F. SEZ. 02	0.489	0.445	0.370	0.343	0.366	-	-	0.403	0.062
V.F. SEZ. 03	0.508	0.494	0.456	0.414	0.447	-	-	0.464	0.038
V.F. SEZ. 04	0.446	0.424	0.367	0.358	0.342	-	-	0.387	0.045
V.F. SEZ. 05	-	-	-	-	-	-	-	-	-
V.F. SEZ. 06	0.659	0.741	0.570	0.526	0.605	-	-	0.620	0.083
V.F. SEZ. 07	0.355	-	0.320	0.319	0.318	-	-	0.328	0.018
V.F. SEZ. 08	0.386	0.433	0.334	0.331	0.293	-	-	0.355	0.055
V.F. SEZ. 09	-	-	-	-	-	-	-	-	-
V.F. SEZ. 10	0.265	0.248	-	-	0.218	0.193	0.235	0.232	0.028
V.F. SEZ. 11	0.458	0.471	0.283	0.284	0.325	0.349	0.344	0.359	0.077
V.F. SEZ. 12	0.284	0.298	0.215	0.230	0.229	0.218	0.222	0.242	0.034
V.F. SEZ. 13	-	0.457	-	0.397	-	-	0.421	0.425	0.031
V.F. SEZ. 14	0.341	0.353	-	0.290	0.348	0.284	0.303	0.320	0.031
V.F. SEZ. 15	0.397	0.452	0.355	0.342	0.333	-	-	0.376	0.049
V.F. SEZ. 16	0.503	0.463	0.383	0.423	0.425	-	0.382	0.430	0.047
V.F. SEZ. 17	-	-	-	-	-	-	-	-	-
V.F. SEZ. 18	-	-	-	-	-	-	-	-	-
V.F. SEZ. 19	-	-	-	-	-	-	-	-	-
V.F. SEZ. 20	-	-	-	-	-	-	-	-	-
V.F. SEZ. 21	0.459	0.288	-	-	-	-	-	0.374	0.121
V.F. SEZ. 22	0.265	0.275	0.202	0.217	scartato (0.928)	0.276	-	0.247	0.035
V.F. SEZ. 23	0.290	0.290	0.251	-	-	-	0.238	0.267	0.027

Tabella 7-7. Valori a_{wz} ottenuti in diversi passaggi a 40 km/h nella frazione di Felceti

ID SEZIONE	$a_{wz} (m/s^2)$ - Velocità di misura pari a 40 ± 5 km/h							Media	Dev. Stand.
	Misura 01	Misura 02	Misura 03	Misura 04	Misura 05	Misura 06	Misura 07		
FEL. SEZ. 01	-	-	-	-	-	-	-	-	-
FEL. SEZ. 02	-	-	-	-	-	-	-	-	-
FEL. SEZ. 03	-	-	-	-	-	-	-	-	-
FEL. SEZ. 04	-	-	-	-	-	-	-	-	-
FEL. SEZ. 05	-	-	0.155	0.149	-	0.166	-	0.157	0.008
FEL. SEZ. 06	-	-	-	-	-	-	-	-	-
FEL. SEZ. 07	-	-	-	-	-	-	-	-	-
FEL. SEZ. 08	0.275	0.273	0.151	0.170	-	0.184	-	0.210	0.059
FEL. SEZ. 09	0.261	0.281	0.270	0.258	0.318	0.285	0.275	0.278	0.020
FEL. SEZ. 10	0.234	0.218	scartato (1.376)	0.187	0.213	0.204	0.220	0.213	0.016
FEL. SEZ. 11	0.544	0.547	0.502	0.449	0.457	-	-	0.500	0.047
FEL. SEZ. 12	0.418	0.489	0.457	0.448	0.463	0.578	-	0.475	0.055
FEL. SEZ. 13	0.518	0.555	0.521	0.553	0.582	0.549	-	0.546	0.024
FEL. SEZ. 14	0.375	0.376	0.338	0.323	0.327	0.331	0.322	0.342	0.024
FEL. SEZ. 15	0.467	0.484	-	0.399	0.434	-	0.507	0.458	0.042
FEL. SEZ. 16	-	-	-	-	-	-	-	-	-
FEL. SEZ. 17	-	-	-	-	-	-	-	-	-
FEL. SEZ. 18	-	-	-	-	-	-	-	-	-
FEL. SEZ. 19	-	-	-	-	-	-	-	-	-
FEL. SEZ. 20	-	-	-	-	-	-	-	-	-
FEL. SEZ. 21	0.272	-	0.277	0.265	0.272	-	-	0.271	0.005
FEL. SEZ. 22	0.262	0.306	0.241	0.217	0.266	0.296	-	0.265	0.033
FEL. SEZ. 23	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabella 7-8. Valori a_{wz} ottenuti in diversi passaggi a 40 km/h nella frazione di Villa Fontane

ID SEZIONE	$a_{wz} (m/s^2)$ - Velocità di misura pari a 40 ± 5 km/h					Media	Dev. Stand.
	Misura 01	Misura 02	Misura 03	Misura 04	Misura 05		
V.F. SEZ. 01	-	-	-	-	-	-	-
V.F. SEZ. 02	0.500	0.512	0.461	0.428	0.421	0.464	0.041
V.F. SEZ. 03	0.631	0.612	0.705	0.624	0.592	0.633	0.043
V.F. SEZ. 04	0.514	0.514	0.514	0.514	0.509	0.513	0.002
V.F. SEZ. 05	-	-	-	-	-	-	-
V.F. SEZ. 06	0.764	0.739	0.631	0.762	0.708	0.721	0.055
V.F. SEZ. 07	0.486	0.488	0.489	0.454	0.502	0.484	0.018
V.F. SEZ. 08	-	0.474	0.418	0.398	0.428	0.430	0.032
V.F. SEZ. 09	-	-	-	-	-	-	-
V.F. SEZ. 10	0.315	-	-	-	0.331	0.323	0.011
V.F. SEZ. 11	0.547	0.508	0.324	0.304	-	0.421	0.124
V.F. SEZ. 12	0.385	0.351	0.262	0.273	0.275	0.309	0.055
V.F. SEZ. 13	-	-	-	-	0.592	0.592	-
V.F. SEZ. 14	0.395	-	0.335	0.332	-	0.354	0.036
V.F. SEZ. 15	0.470	0.503	0.424	0.465	0.489	0.470	0.030
V.F. SEZ. 16	0.599	-	-	0.492	-	0.545	0.076
V.F. SEZ. 17	-	-	-	-	-	-	-
V.F. SEZ. 18	-	-	-	-	-	-	-
V.F. SEZ. 19	-	-	-	-	-	-	-
V.F. SEZ. 20	-	-	-	-	-	-	-
V.F. SEZ. 21	-	-	-	-	-	-	-
V.F. SEZ. 22	-	0.329	0.294	0.317	0.348	0.322	0.023
V.F. SEZ. 23	-	0.424	0.299	-	0.315	0.346	0.068

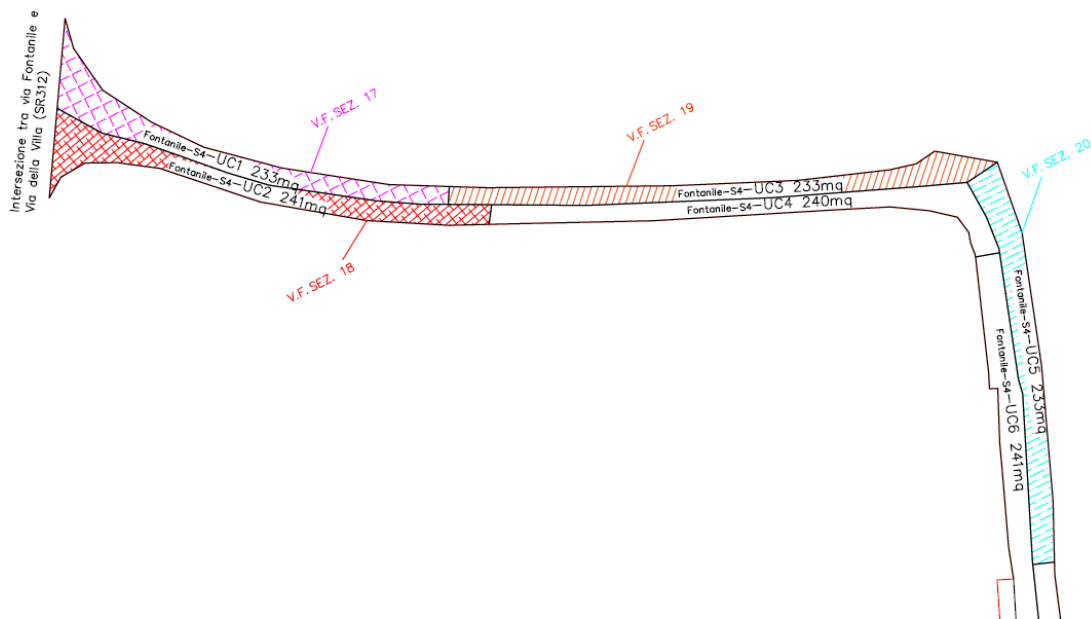


Figura 7-1. Particolare delle sezioni da 17 a 20 nella frazione di Villa Fontane

Nel presente studio, avendo tra gli obiettivi quello di confrontare i valori dell'indice a_{wz} con i corrispettivi valori calcolati utilizzando il metodo PCI, come già detto nel precedente capitolo, le sezioni di calcolo sono state definite con riferimento alle unità campione e alle sezioni individuate per il metodo del PCI. Per tale motivo si è scelto di non considerare una sezione intermedia, ad esempio, tra la 17 e la 19 posta sufficientemente distante dall'intersezione e dalla curva, consentendo quindi di prendere in esame i rilievi effettuati a velocità superiore. Problematiche analoghe sono state riscontrate per altre sezioni site nelle porzioni di rete afferenti alle frazioni di Felceti e Valentano Centro.

Osservando le precedenti tabelle inoltre, è possibile verificare come sia stato necessario in alcuni casi scartare il valore dell'indice a_{wz} misurato, anche se veniva rispettata la condizione sulla velocità. Come si può notare infatti dai valori riportati tra parentesi per le seguenti sezioni:

- *FEL. SEZ. 10*, Misura 06 per classe di velocità di 20 km/h (Tabella 7-1);
- *FEL. SEZ. 12*, Misura 06 per classe di velocità di 20 km/h (Tabella 7-1);
- *V.F. SEZ. 22*, Misura 05 per classe di velocità di 30 km/h (Tabella 7-6);
- *FEL. SEZ. 10*, Misura 03 per classe di velocità di 40 km/h (Tabella 7-7);

i valori ottenuti in questi casi per l'indice a_{wz} erano marcatamente non in linea con quanto indicato dagli altri rilievi per la medesima soluzione. In particolare, si registrava un valore significativamente più grande. Ricercando una possibile motivazione a tali risultati, non trovandola nella presenza di discontinuità lungo i tratti percorsi né in un comportamento anomalo del guidatore, si è passati ad analizzare il segnale dell'accelerazione verticale registrato dalla piattaforma inerziale in corrispondenza di tali sezioni. È stata così riscontrata un'anomalia nei quattro segnali dovuta probabilmente ad un temporaneo malfunzionamen-

to del dispositivo, il che ha comportato un incremento istantaneo dell'accelerazione misurata per un breve tratto, come mostrato in Figura 7-2.

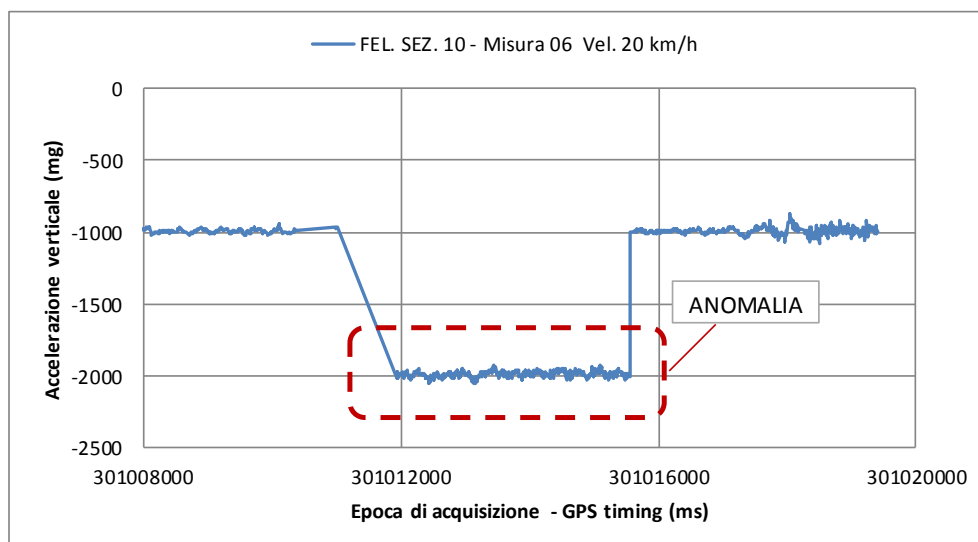


Figura 7-2. Anomalia durante il rilievo dell'accelerazione verticale dovuta a un probabile temporaneo mal-funzionamento dell'unità inerziale LMRK10

Ai fini della valutazione del livello di qualità di marcia percepita dagli utenti stradali nel transitare lungo ciascuna sezione di calcolo, è stato preso come riferimento il valore medio dell'indice a_{wz} ottenuto dai vari rilievi effettuati. Successivamente tali valori, sono stati confrontati con le soglie per il trasporto pubblico riportate nella norma ISO 2631-1 (si veda la Tabella 2-2). Essendo prevista una zona di sovrapposizione tra due livelli di comfort adiacenti, al fine di evitare il possibile insorgere di ambiguità nella determinazione della qualità di marcia stimata per i tratti esaminati ad una data velocità, si è scelto di considerare come limite tra due livelli di comfort consecutivi il punto medio della corrispondente zona di sovrapposizione.

I risultati così ottenuti infine, sono stati importati all'interno della piattaforma GIS (*Geographic Information System*) gratuita e *opensource* denominata Q-GIS, attraverso la quale è possibile visionare in maniera molto chiara e veloce lo stato della rete così monitorata. Di seguito, dalla Figura 7-3 alla Figura 7-10, si riportano quindi i risultati ottenuti per le frazioni di Felceti e Villa Fontane effettuando i rilievi alle tre classi di velocità di 20, 30 e 40 km/h, e solo per le prime due classi di velocità per la frazione di Valentano Centro, quest'ultima caratterizzata per l'appunto da un limite di 30 km/h.

In celeste si possono notare le sezioni per le quali non sono state registrate misure accettabili in termini di velocità durante il rilievo oppure non transitabili alla velocità prescelta per la misurazione.



Figura 7-3. Livello di comfort rilevato a 20 km/h nella frazione di Felceti



Figura 7-4. Livello di comfort rilevato a 30 km/h nella frazione di Felceti



Figura 7-5. Livello di comfort rilevato a 40 km/h nella frazione di Felceti



Figura 7-6. Livello di comfort rilevato a 20 km/h nella frazione di Valentano Centro

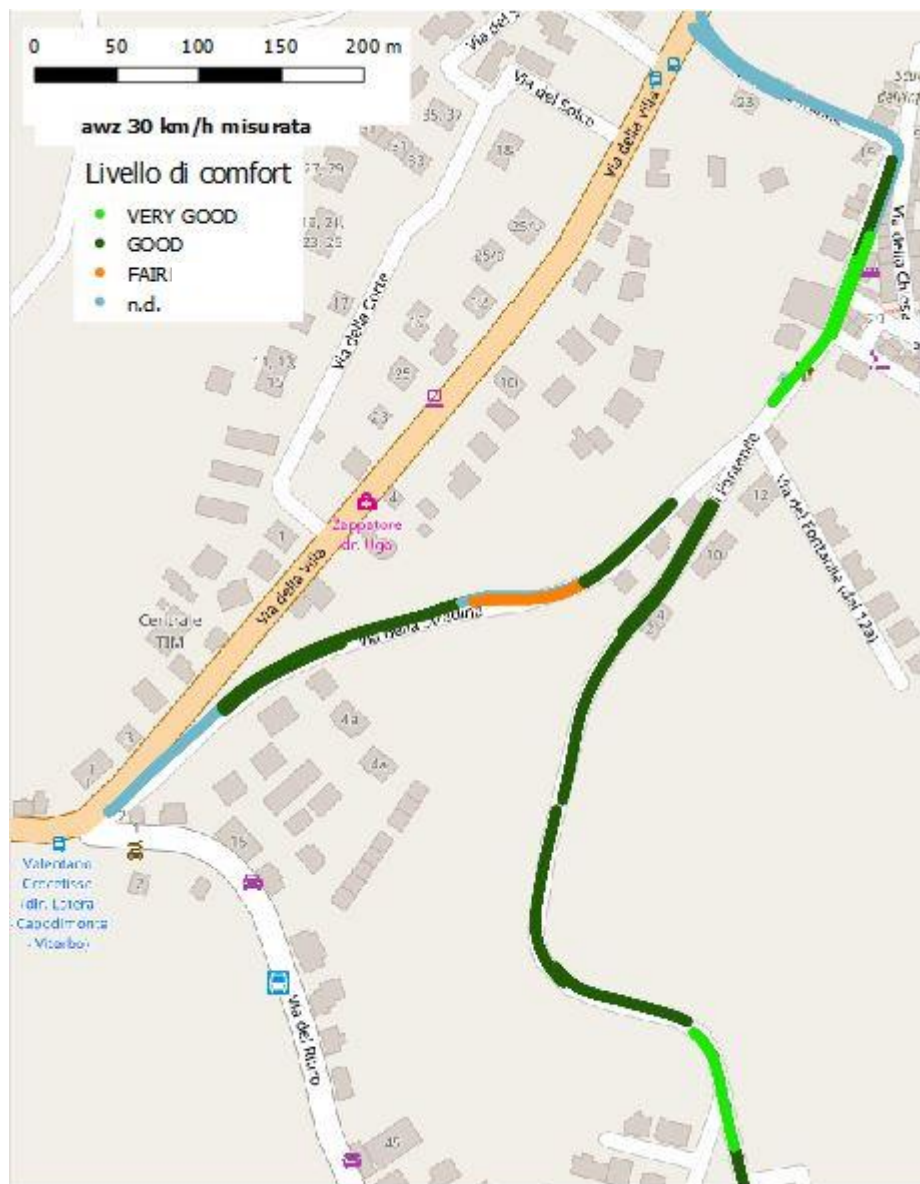


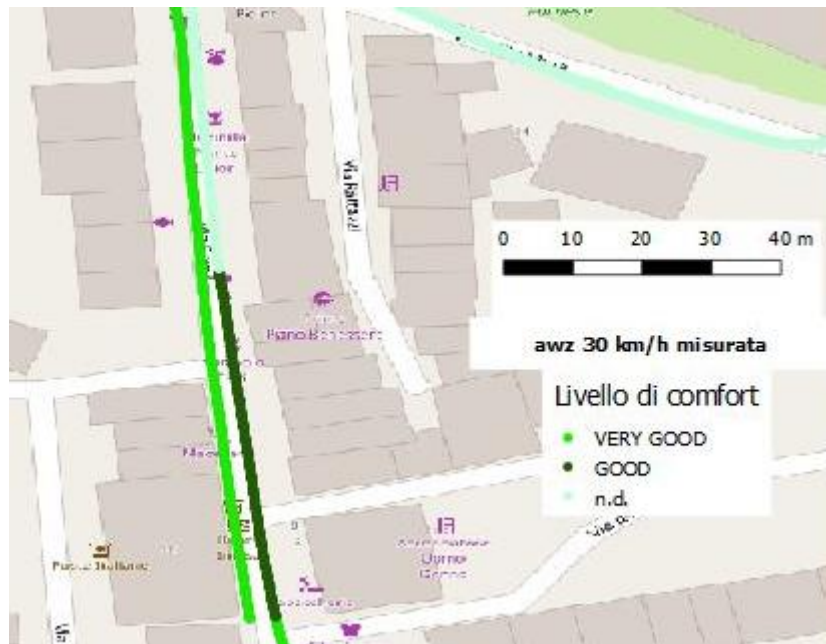
Figura 7-9. Livello di comfort rilevato a 30 km/h nella frazione di Villa Fontane



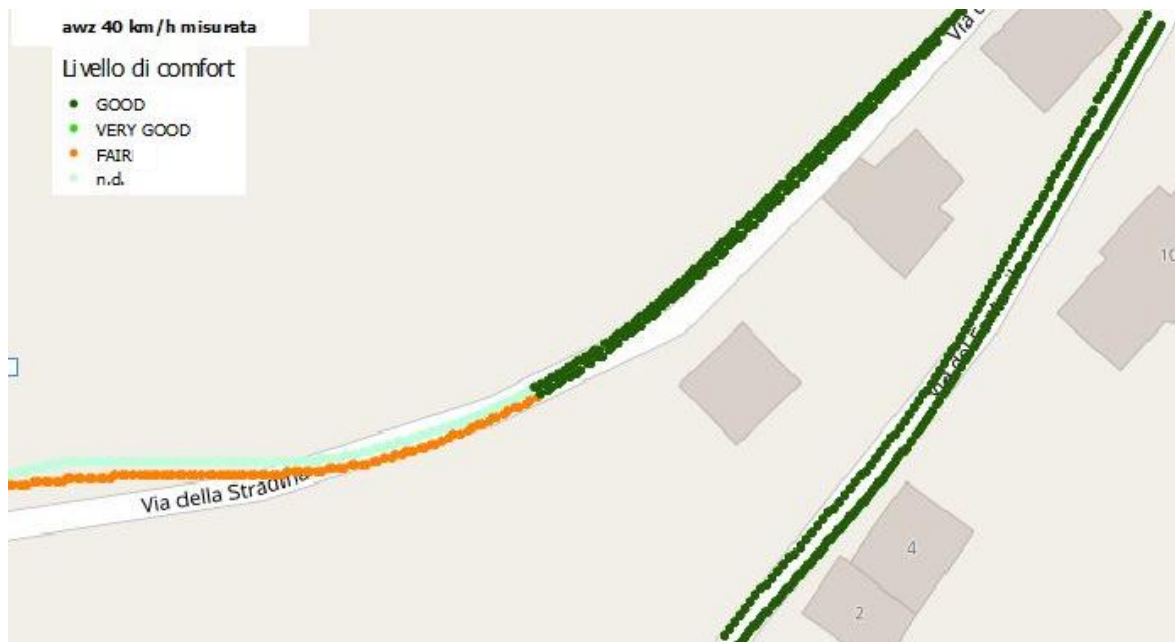
Figura 7-10. Livello di comfort rilevato a 40 km/h nella frazione di Villa Fontane

Nelle figure su menzionate inoltre, si possono riscontrare parziali sovrapposizioni dei colori assegnati ai diversi livelli di comfort in corrispondenza di alcuni tratti. Ciò è dovuto a una diversa classificazione delle corsie dei due sensi di marcia, come è possibile verificare in Figura 7-11, in cui si riportano due particolari dei rilievi effettuati presso la frazione di Valentano Centro con velocità di riferimento pari a 30 km/h (Figura 7-11a) e presso Villa Fontane con velocità di riferimento di 40 km/h (Figura 7-11b).

Confrontando quindi i risultati complessivi ottenuti per le diverse velocità di riferimento in tutte le strade afferenti alle tre diverse frazioni, è possibile individuare come priorità di intervento la rete sottorete di Villa Fontane, al netto ovviamente delle sezioni non rilevabili e quindi contrassegnate nelle figure con la notazione 'n.d.'.



(a)



(b)

Figura 7-11. Particolare dei rilievi effettuati presso (a) Valentano Centro con $V_{ref}=30$ km/h e (b) Villa Fontane con $V_{ref}=40$ km/h

Al fine di poter effettuare una comparazione ancor più significativa, appare evidente la necessità di determinare la velocità effettiva di transito da parte dell'utenza oppure considerare il limite massimo stabilito dalle singole amministrazioni, tenuto conto dell'incidenza della velocità di marcia nella classificazione della qualità di marcia, come

visibile in Figura 7-12 in cui si riporta il risultato di un'analisi effettuata tramite simulazione numerica su un campione di profili reali.

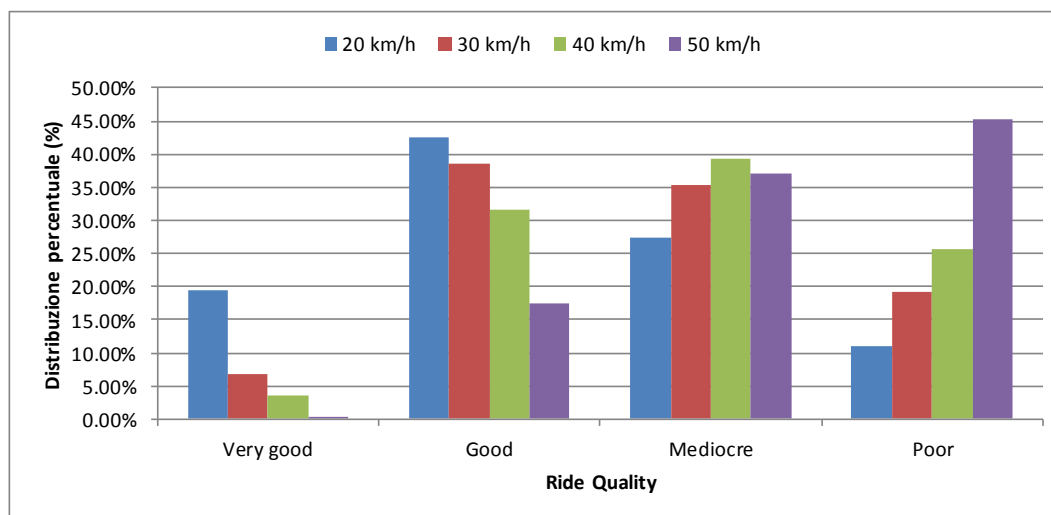
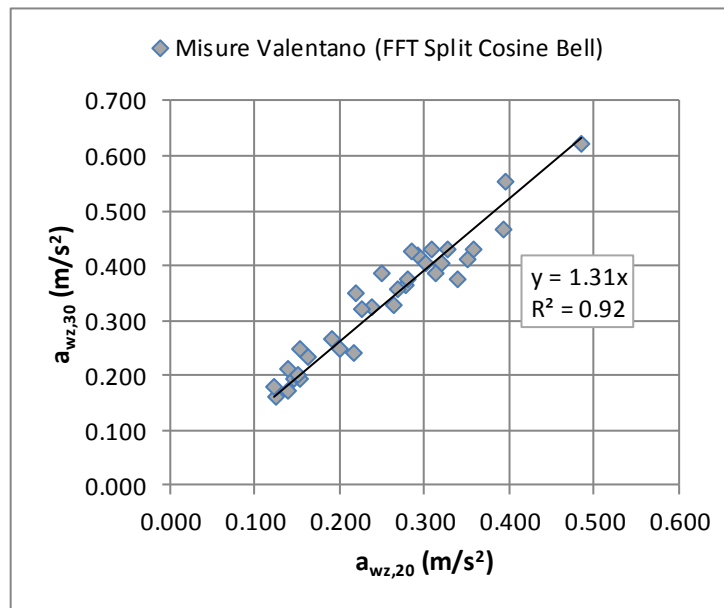


Figura 7-12. Ripartizione percentuale tra i vari livelli di qualità di marcia di un campione di profili reali in funzione della velocità di marcia considerata per il calcolo dell'indice a_{wz}

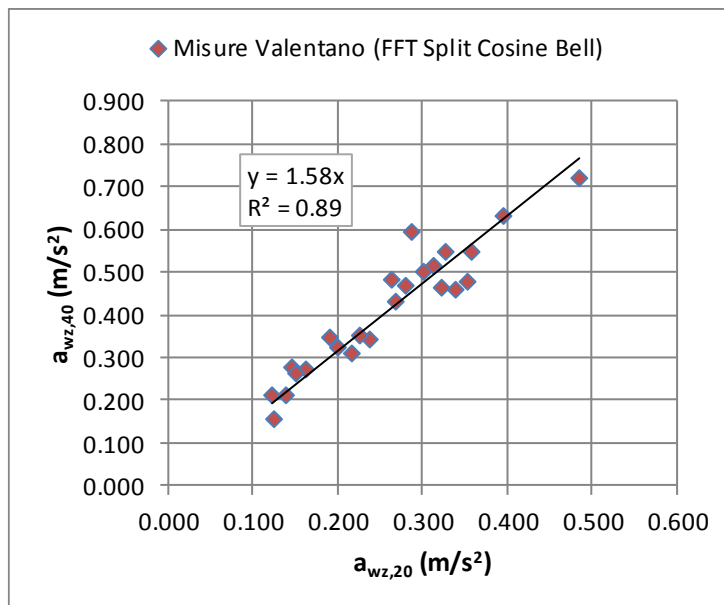
In aggiunta, è di fondamentale importanza verificare l'esistenza di una correlazione tra i valori dell'indice a_{wz} calcolati per le diverse velocità di riferimento. In tal modo infatti, è possibile evitare di effettuare i rilievi alle varie velocità ma soprattutto, ottenere una stima della qualità di marcia alla velocità desiderata a partire da misure effettuate con una diversa velocità, la quale potrebbe risultare più pratica per particolari condizioni al contorno presenti al momento del rilievo.

A tal fine, sono stati comparati fra loro i valori delle accelerazioni verticali ponderate in frequenza calcolate per le tre velocità di riferimento in corrispondenza delle sezioni comuni. Come si può osservare nei grafici di Figura 7-13, è stata riscontrata una buona correlazione tra i vari valori dell'indice a_{wz} , trovando un valore minimo del coefficiente di correlazione R^2 pari a 0.89 nel caso di regressione lineare tra l' a_{wz} calcolata a 30 km/h e quella a 40 km/h (Figura 7-13b). Utilizzando tali relazioni è possibile ad esempio stimare la qualità di marcia in corrispondenza delle sezioni della porzione della rete esaminata, per le quali non è stato possibile effettuare rilievi a velocità di riferimento superiore a 20 km/h. A partire quindi dai valori ottenuti per tale classe di velocità, sono stati stimati i valori dell'indice a_{wz} in corrispondenza delle velocità di riferimento di 30 e 40 km/h, ottenendo i risultati riportati nelle Figure da 7-14 a 7-18.

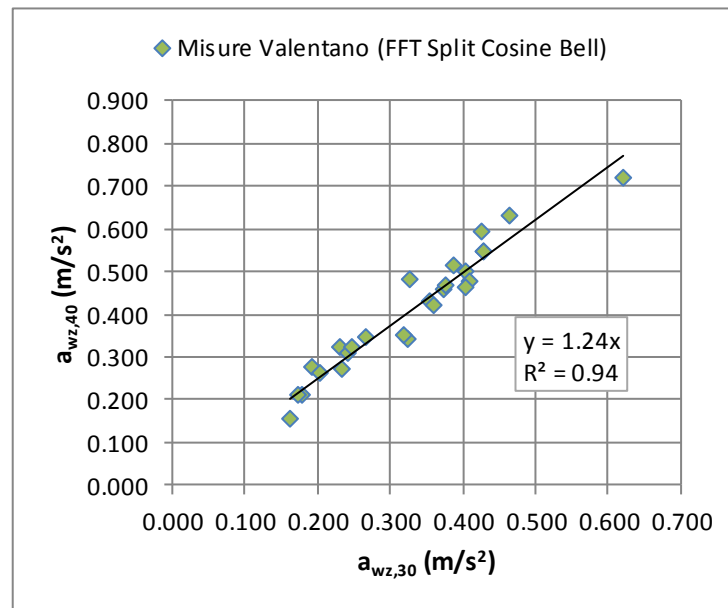
Come si può notare comparando tali figure con quelle precedentemente riportate e relative ai valori dell' a_{wz} misurata, si riscontra una buona corrispondenza tra i livelli di comfort misurati e stimati, benché per alcune sezioni vi sia una leggera sovra- o sottostima dovuta ai valori dell'indice misurati prossimi alla soglia tra due livelli di comfort adiacenti.



(a)



(b)



(c)

Figura 7-13. Correlazione tra i valori dell'indice a_{wz} alle varie velocità: (a) $a_{wz,20}$ - $a_{wz,30}$; (b) $a_{wz,20}$ - $a_{wz,40}$ e (c) $a_{wz,30}$ - $a_{wz,40}$

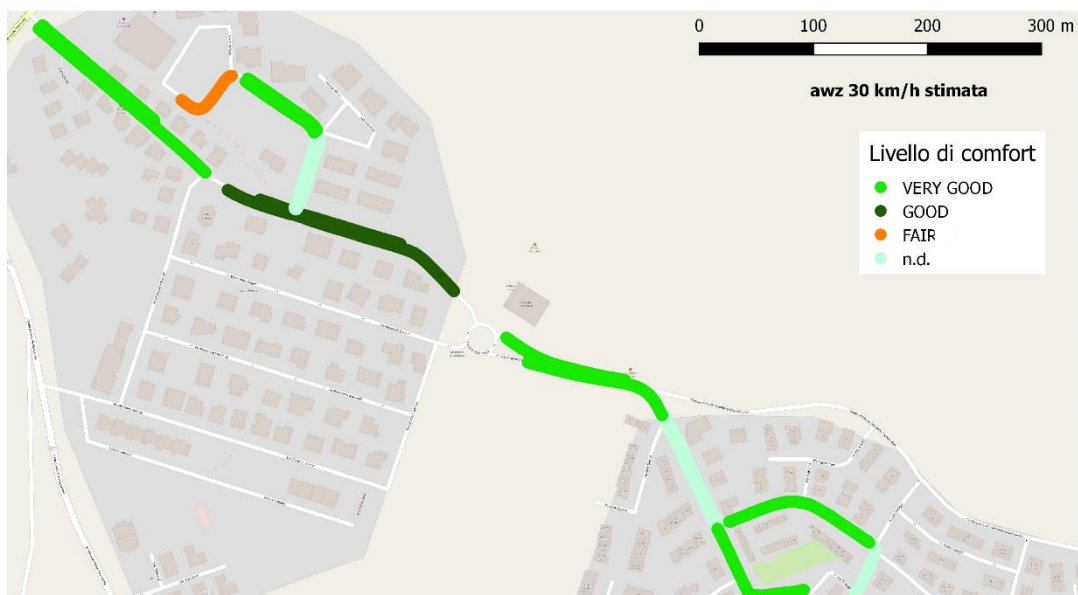
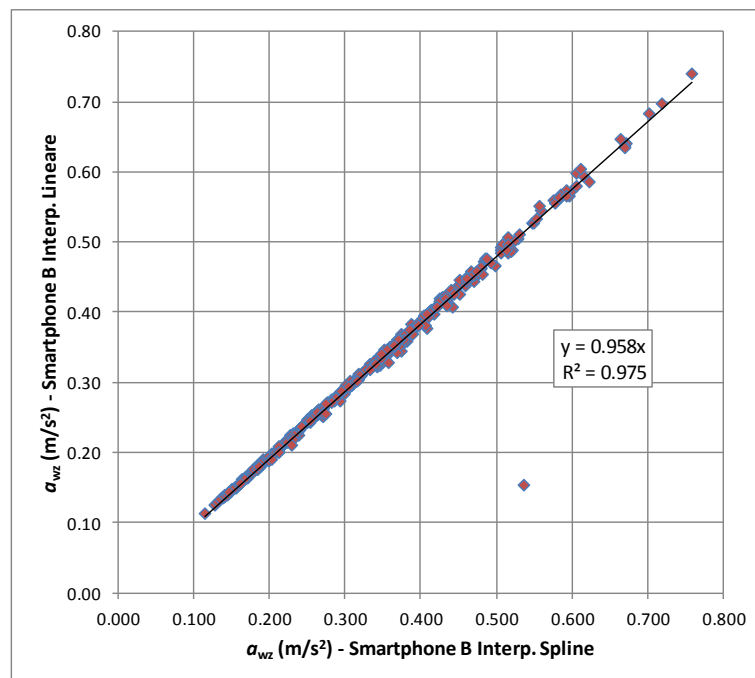
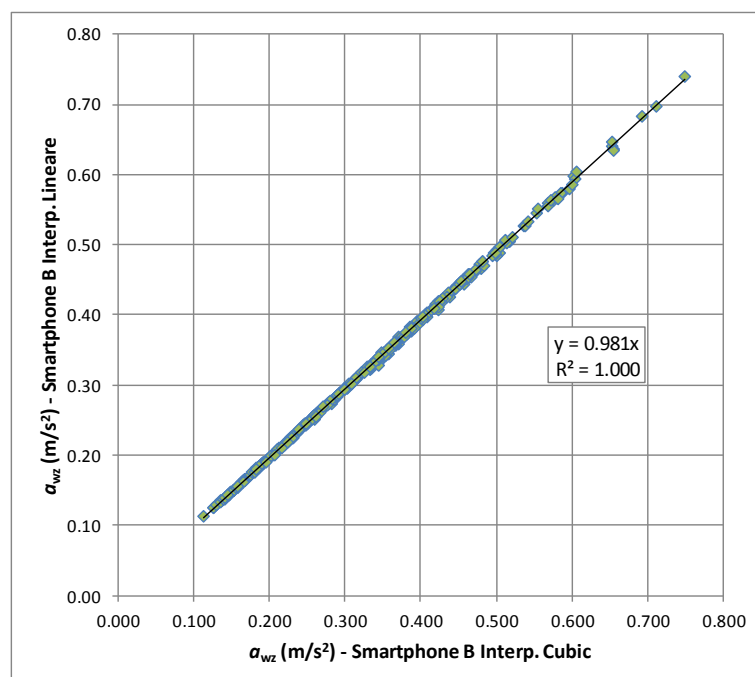


Figura 7-14. Livello di comfort stimato per $V_{ref}=30$ km/h per la frazione di Felceti

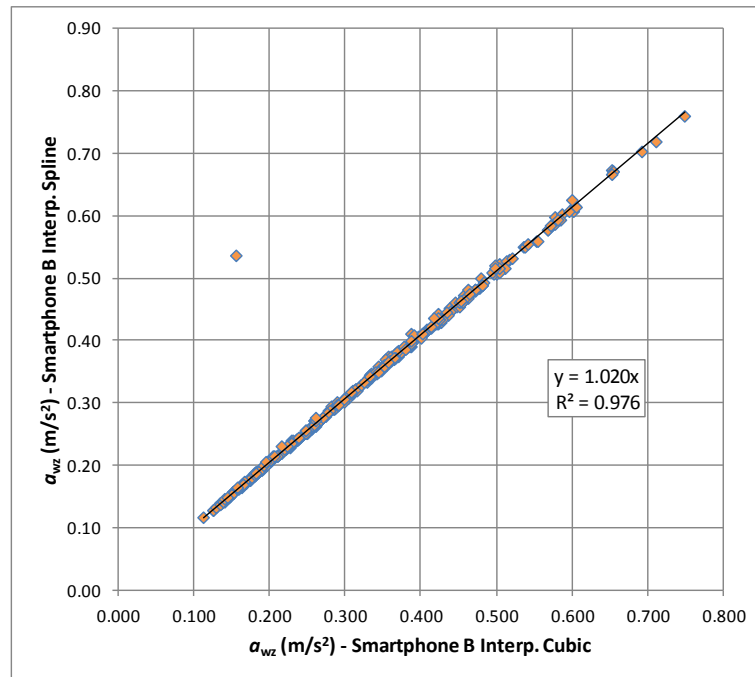
Dai grafici riportati in Figura 7-19, si può verificare come la scelta della funzione di interpolazione non sembri incidere in maniera significativa sui valori finali dell'indice a_{wz} calcolati per ciascun passaggio di misura; ad eccezione di una singola misura, per la quale la funzione *spline* fornisce un valore divergente rispetto alle altre due funzioni di interpolazione.



(a)



(b)

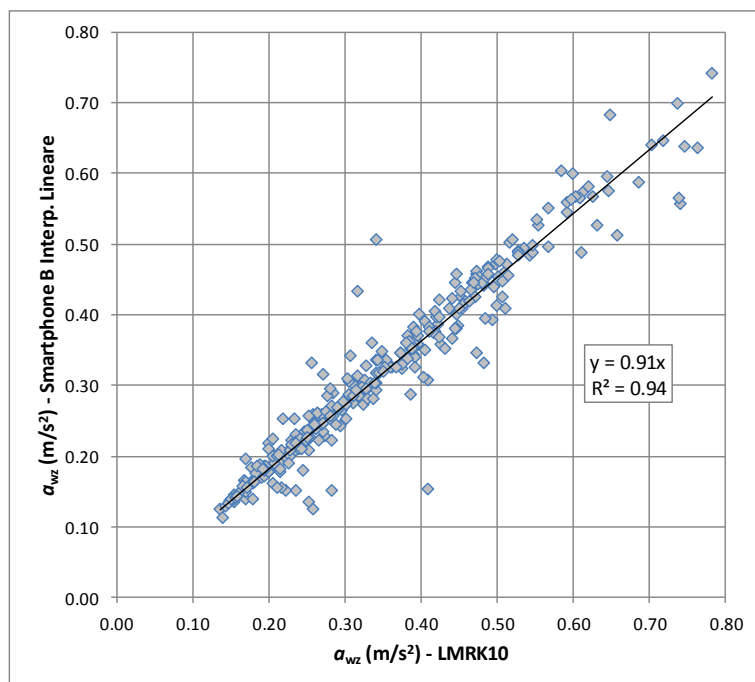


(c)

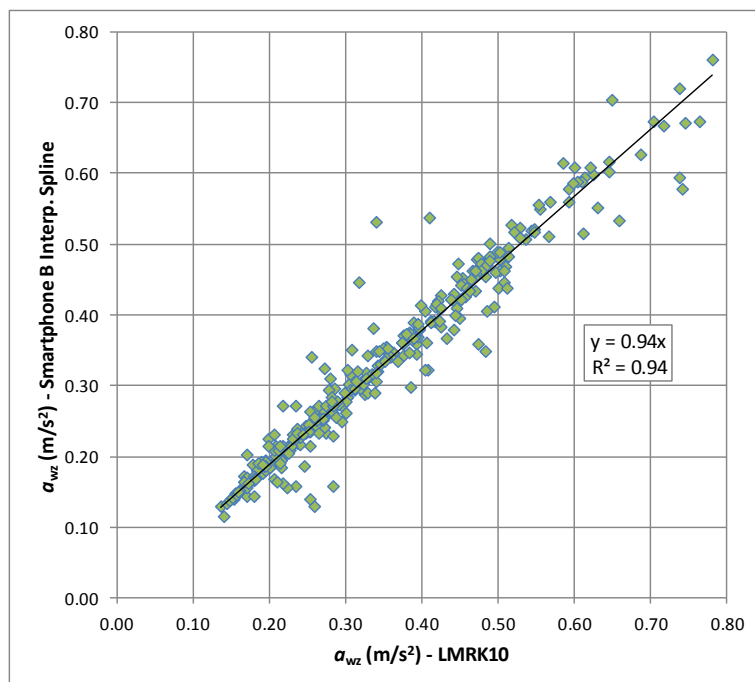
Figura 7-19. Confronto tra i valori dell'indice a_{wz} calcolati impiegando diverse funzioni di interpolazione

Confrontando quindi i valori di a_{wz} ottenuti per le varie misure e alle varie velocità con lo smartphone B e la piattaforma inerziale LMRK10, si è riscontrato come sussista in generale una buona correlazione tra le due misurazioni, benché mediamente i valori ottenuti a partire dalle misure accelerometriche del cellulare smartphone B risultino leggermente inferiori di circa un 5-10% per qualsivoglia funzione di interpolazione impiegata (Figura 7-20). La buona convergenza dei risultati forniti dalle due strumentazioni è inoltre testimoniata dall'analisi statistica dei residui riportata nella Tabella 7-9, dalla quale si evince inoltre come un miglior risultato sembrerebbe ottenersi nel caso di utilizzo della funzione di interpolazione *spline*, essendo quest'ultima caratterizzata dai valori più piccoli in termini di media (-0.018 m/s^2), deviazione standard (0.034 m/s^2) e RMSE (0.038 m/s^2) delle differenze registrate tra i valori di a_{wz} dei due dispositivi.

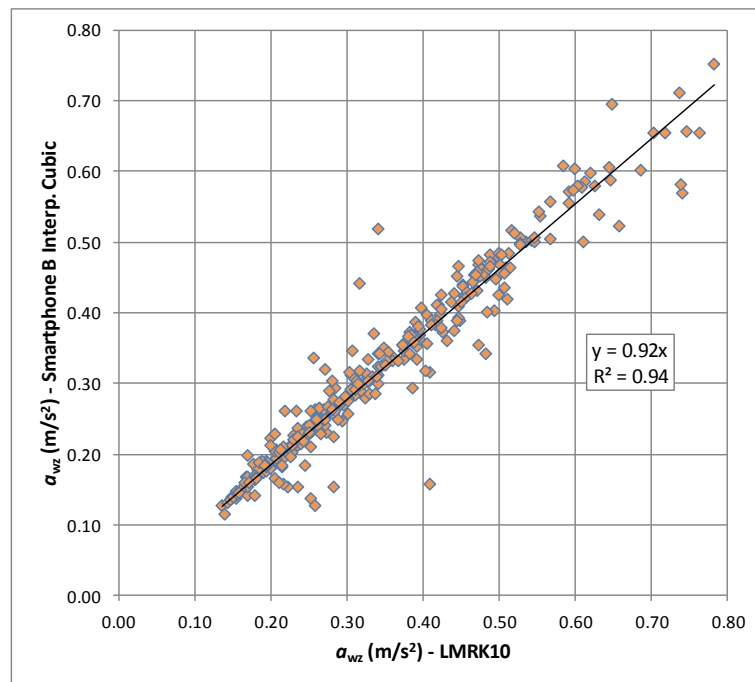
Anche in termini di ripetibilità della misura su di una singola sezione di calcolo, sono stati riscontrati dei valori delle deviazioni standard dello stesso ordine di grandezza di quanto ottenuto per i dati accelerometrici della piattaforma inerziale LMRK10. Infatti, indipendentemente dalla velocità di riferimento i valori delle deviazioni standard risultano essere tutte inferiori a 0.12 m/s^2 .



(a)



(b)



(c)

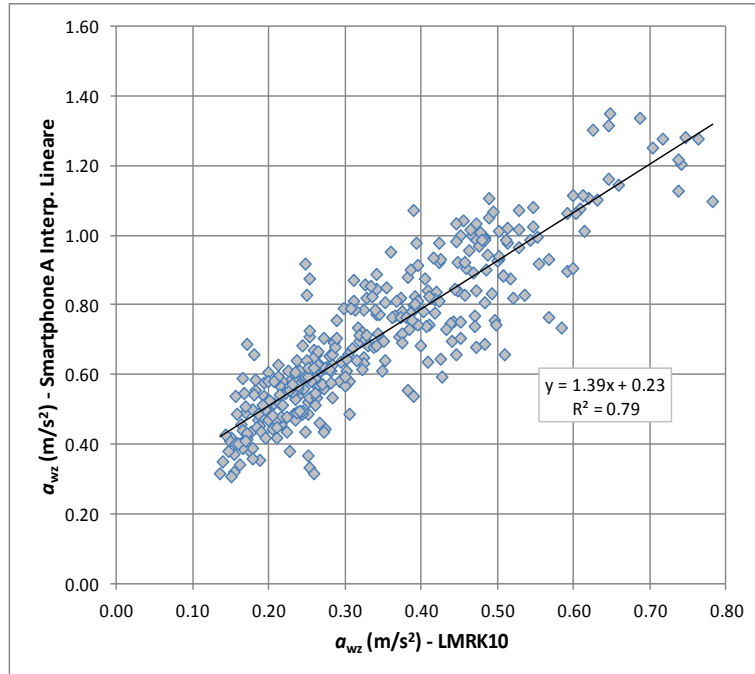
Figura 7-20. Confronto tra i valori di a_{wz} ottenuti tramite unità inerziale LMRK10 e smartphone B per diverse funzioni di interpolazione: (a) lineare, (b) spline e (c) pchip/cubica

Tabella 7-9. Analisi statistica dei residui tra a_{wz} LMRK10 e smartphone B

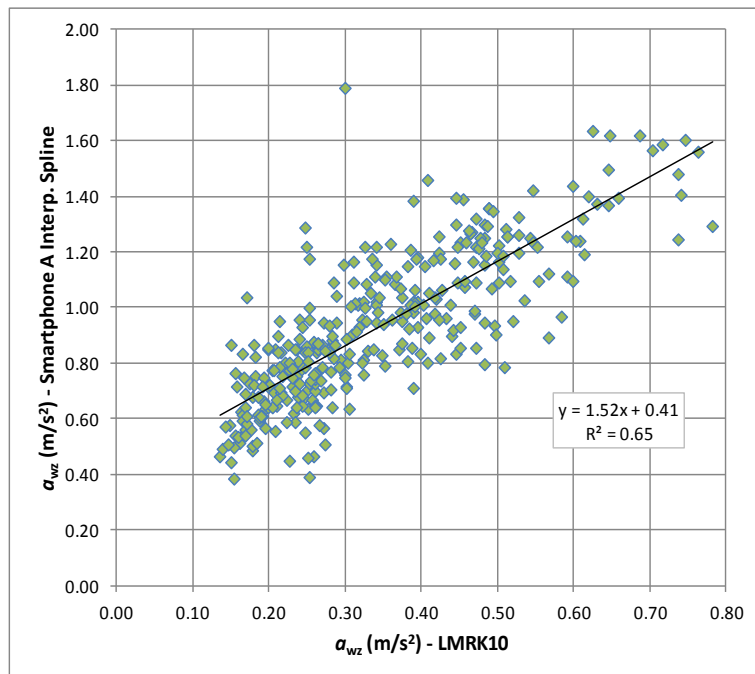
[m/s ²]	Funzione di interpolazione utilizzata		
	Lineare	Spline	Cubica/pchip
Media	-0.032	-0.018	-0.026
Dev. Stand.	0.037	0.034	0.036
RMSE	0.048	0.038	0.044

Per quanto concerne le misure effettuate tramite lo smartphone A fissato al parabrezza anteriore, sono stati riscontrati dei valori significativamente più elevati rispetto al punto di osservazione posto in prossimità del baricentro del veicolo, come testimoniato dai grafici di raffronto con i valori dell'indice a_{wz} ottenuto a partire dalle misure accelerometriche della piattaforma inerziale LMRK10 riportati in Figura 7-21. Come si può notare infatti, i valori registrati in corrispondenza del parabrezza risultano essere mediamente maggiori di almeno un 30-40% rispetto alle medesime misure ottenute con l'unità inerziale. Si può verificare inoltre, come vi sia una maggiore variabilità dei risultati a seconda della funzione di interpolazione prescelta, come testimoniato dai grafici di confronto mostrati in Figura 7-22 caratterizzati da una maggiore dispersione dei dati ($R^2 < 0.8$), nonché dall'analisi dei residui riportata nella Tabella 7-10. In quest'ultima inoltre, si può notare come a fronte di un valore della deviazione standard relativamente contenuto, il valore medio delle differenze

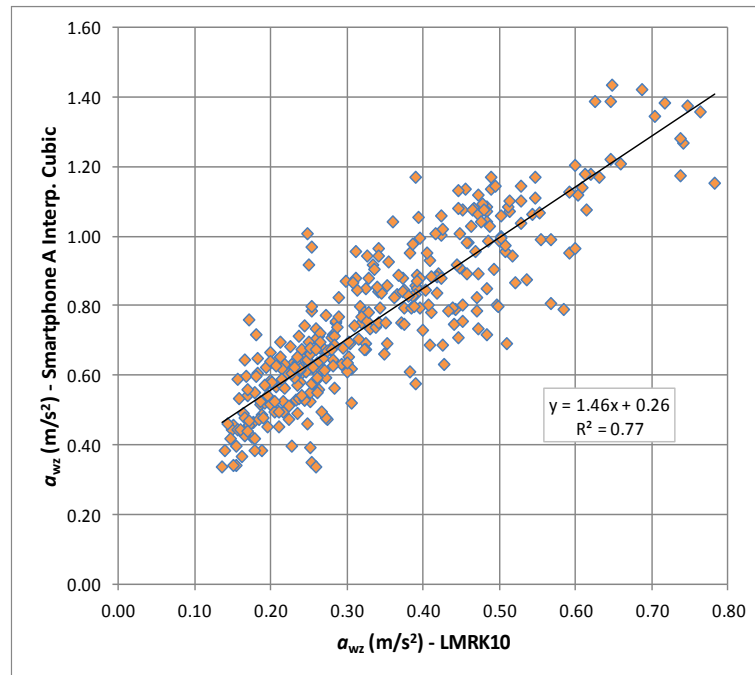
si aggiri intorno ai 0.3-0.5 m/s² considerando i risultati ottenuti per tutte e tre le funzioni di interpolazione considerate.



(a)

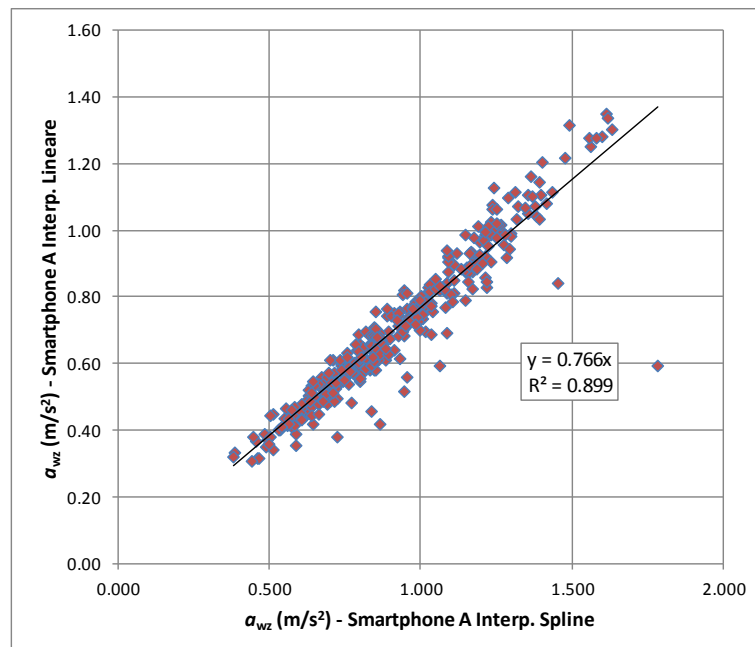


(b)

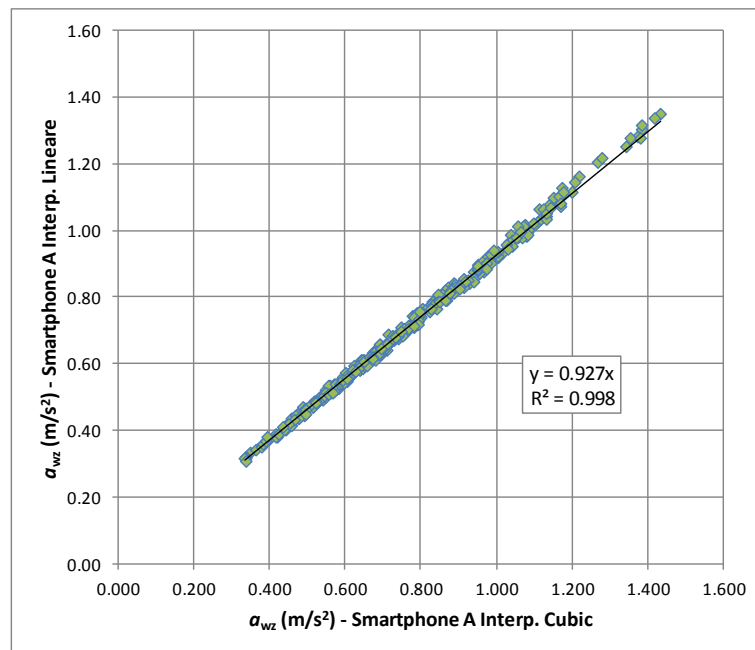


(c)

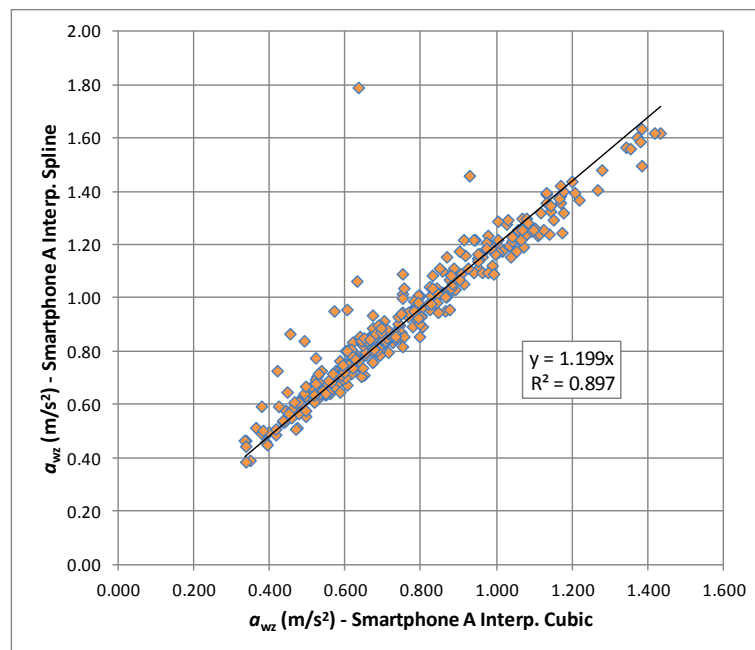
Figura 7-21. Confronto tra i valori di a_{wz} ottenuti tramite unità inerziale LMRK10 e smartphone A per diverse funzioni di interpolazione: (a) lineare, (b) spline e (c) pchip/cubica



(a)



(b)



(c)

Figura 7-22. Confronto tra i valori dell'indice a_{wz} calcolati impiegando diverse funzioni di interpolazione

Tabella 7-10. Analisi statistica dei residui tra a_{wz} LMRK10 e smartphone A

[m/s ²]	Funzione di interpolazione utilizzata		
	Lineare	Spline	Cubica/pchip
Media	0.365	0.583	0.422
Dev. Stand.	0.115	0.173	0.130
RMSE	0.383	0.608	0.442

I risultati ottenuti erano preventivabili, considerando la diversa sensibilità dei due punti di osservazione considerati (parabrezza e in prossimità del freno a mano) al transito sopra le singole irregolarità stradali. Come si può notare infatti dalla Figura 7-23, al passaggio dell'asse anteriore sopra la discontinuità rappresentata, corrisponde un'accelerazione verticale rilevata di magnitudine maggiore nel punto di osservazione posto sul parabrezza, il quale a sua volta risente in maniera meno marcata del transito del secondo asse. In tal senso, il punto di osservazione posto sul parabrezza consente di individuare in maniera più precisa la localizzazione delle discontinuità puntuali, mentre il rilievo in prossimità del freno a mano, consente una valutazione più attendibile del livello di comfort percepito dagli utenti stradali; essendo i sedili del guidatore e del passeggero anteriore posti in prossimità di tale punto di osservazione.

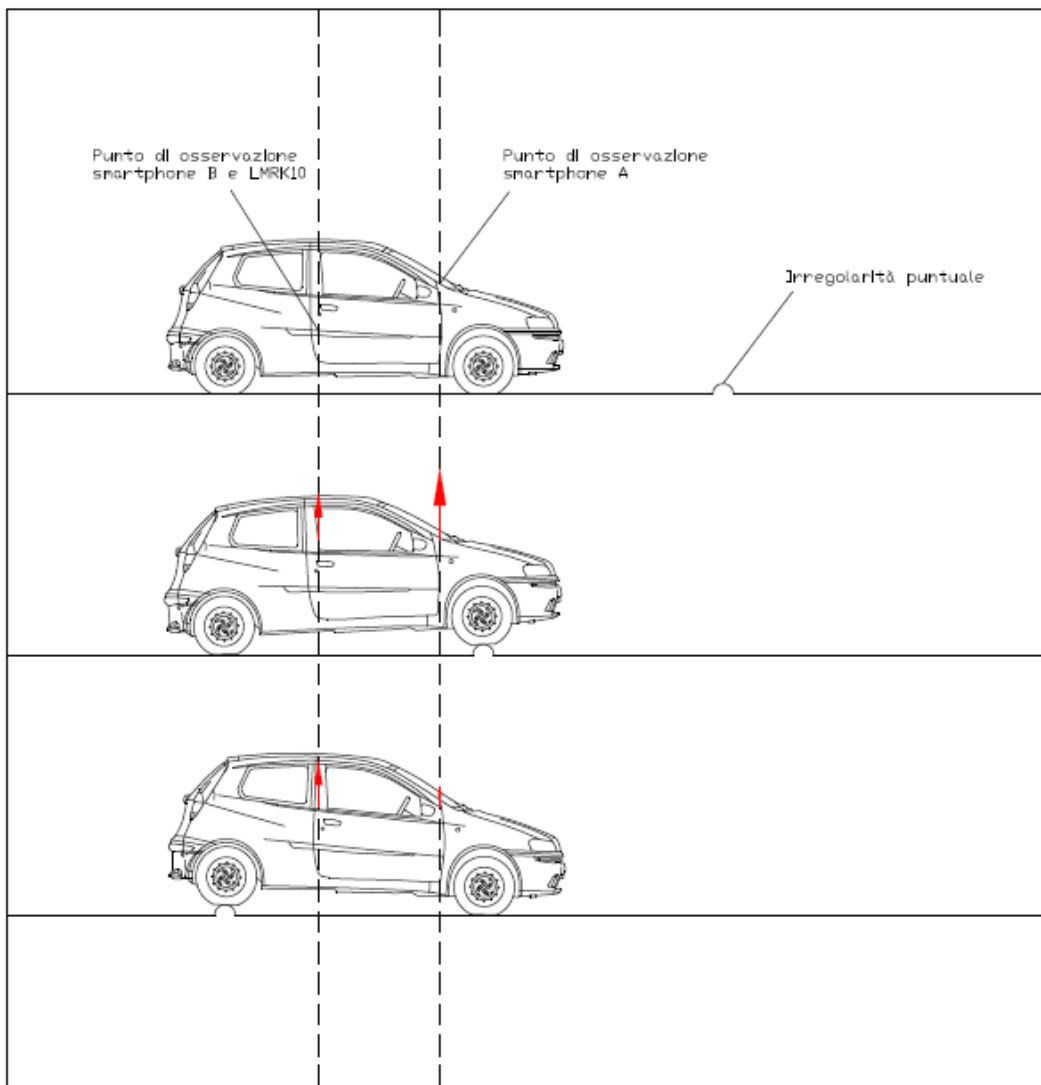


Figura 7-23. Sensibilità del punto di osservazione rispetto al transito dei due assi su di una singola irregolarità puntuale

Per quanto concerne invece la ripetibilità riscontrata per le misure effettuate su ciascuna sezione di calcolo utilizzando lo smartphone A, vi è una maggiore variabilità della deviazione standard in funzione del tipo di interpolazione adottata (Tabella 7-11). In aggiunta, seppur limitato a un paio di sezioni, tale dispositivo presenta un valore massimo della deviazione standard per uno stesso tratto di analisi maggiore rispetto a quanto ottenuto per le misurazioni effettuate con lo smartphone B. È bene comunque sottolineare come tale valore più alto rispetto a quanto ottenuto per il dispositivo cellulare B e per la piattaforma inerziale LMRK10, deve essere messo in relazione ai valori mediamente più alti dell'indice a_{wz} caratterizzanti il punto di osservazione prossimo al parabrezza anteriore, come mostrato nelle precedenti analisi comparative tra le diverse strumentazioni.

Tabella 7-11. Analisi statistica della deviazione standard ottenuta per le varie sezioni utilizzando i due smartphone A e B

[m/s ²]	Smartphone A (parabrezza)			Smartphone B (freno a mano)		
	Interp. lineare	Interp. Spline	Interp. Cubica/pchip	Interp. lineare	Interp. Spline	Interp. Cubica/pchip
Massimo	0.255	0.433	0.282	0.124	0.128	0.127
Media	0.050	0.067	0.054	0.022	0.024	0.023
Dev. Stand.	0.050	0.072	0.053	0.023	0.025	0.024

Come si può comunque notare dai valori medi delle deviazioni standard, anche nel caso dello smartphone A è stata riscontrata una buona ripetibilità.

Per quanto riguarda i valori più alti registrati con quest'ultimo dispositivo, sicuramente essi dipendono da una maggiore sensibilità nei riguardi del transito sopra irregolarità puntuali, come già evidenziato in precedenza in Figura 7-23. Sarà comunque opportuno verificare nelle future analisi, l'eventuale influenza sulle misure accelerometriche della tipologia di supporto utilizzato per il fissaggio al parabrezza, il quale indubbiamente presenta una minore rigidità rispetto al supporto impiegato per l'unità inerziale LMRK10 e lo smartphone B.

7.3. Confronto a_{wz} -PCI

Uno degli obiettivi del presente studio, è quello di andare a verificare, oltre che l'effettiva possibilità di impiegare l'accelerazione verticale ponderata in frequenza per la valutazione della regolarità superficiale delle pavimentazioni stradali, la capacità di tale indice di comfort (a_{wz}) di cogliere e descrivere qualitativamente, lo stato complessivo di ammaloramento presente su di una data pavimentazione. A tale scopo, come già più volte riportato nella presente tesi, è stata effettuata una comparazione tra i valori dell'indice a_{wz} ottenuti dalla campagna di misure descritta nelle precedenti sezioni, che ha interessato la porzione della rete comunale di Valentano (VT) per un'estensione di circa 5.6 km.

Ai fini di tale confronto, sono stati considerati i valori medi dell' a_{wz} calcolati per ciascuna sezione di calcolo a partire dai valori registrati durante i diversi passaggi. Per quanto concerne invece i valori del PCI, si è fatto riferimento a quanto riportato nello studio della

tesi di laurea dell'Ing. Rosati (22), utilizzando la videocamera Blackvue (collocata in corrispondenza del parabrezza anteriore come riportato in Figura 7-24) al fine di comprovare l'effettiva congruenza tra lo stato descritto in suddetto studio e quello effettivamente presente in sito al momento delle misure accelerometriche realizzate a distanza di un paio di mesi l'uno dall'altro. Tale dispositivo infatti, consente di georeferenziare le riprese, dalle quali è possibile inoltre esportare i singoli fotogrammi di interesse in modo da poterli associare alle rispettive sezioni di calcolo e quindi ai valori misurati dell'indice a_{wz} .



Figura 7-24. Posizionamento videocamera Blackvue

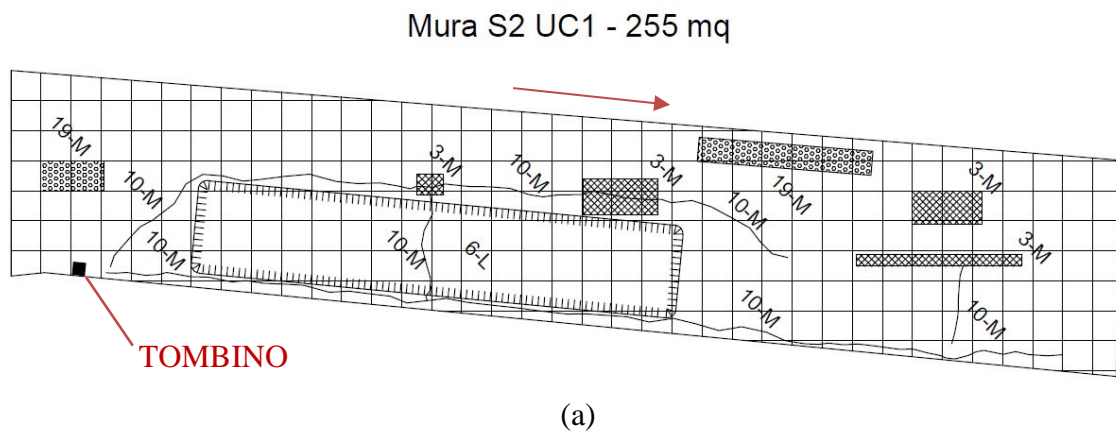
Da una rapida comparazione tra le schede di valutazione utilizzate per il metodo PCI, nelle quali sono riportati tutti gli ammaloramenti presenti nella singola unità campione esaminata, con le immagini riferite alle corrispettive sezioni, sono state trovate alcune incongruenze, che hanno portato a scartare dalla comparazione le seguenti sezioni: *V.C. SEZ. 03*, *V.C. SEZ. 10*, *V.F. SEZ. 05* e *V.F. SEZ. 06*.

Al fine di poter rendere più immediata la comparazione tra le schede con l'indicazione degli ammaloramenti e le immagini ricavate dalle riprese, si riporta nella Tabella 7-12 un breve elenco degli ammaloramenti tipici delle pavimentazioni flessibili con la notazione numerica che li contraddistingue nel metodo PCI. La lettera accanto al numero identificativo presente nelle schede di rilievo indica la severità con la quale ciascun ammaloramento si presenta (*L=low*, *M=medium*, *H=high*).

Per quanto riguarda la sezione *V.C. SEZ. 03*, si verifica facilmente confrontando le immagini riportate in Figura 7-25a e Figura 7-25b come, prendendo come riferimento il tombino posto sul lato destro della strada, risultino ben visibili nel fotogramma della ripresa video le due ormaie (a destra e a sinistra) che contraddistinguono tale tratto; nessuna delle quali è riportata nella scheda del rilievo degli ammaloramenti. In quest'ultima invece, è indicata la presenza predominante di una depressione di severità bassa (*6-L*) nella parte centrale della strada, la quale probabilmente è stata interessata da un rifacimento dello strato superficiale.

Tabella 7-12. Elenco degli ammaloramenti nelle pavimentazioni flessibili secondo il metodo PCI

CODICE	ELENCO DEGLI AMMALORAMENTI NELLE PAVIMENTAZIONI FLESSIBILI
1	FESSURE RAMIFICATE (<i>Alligator Cracking</i>)
2	RISALITA DI BITUME (<i>Bleeding</i>)
3	FESSURE A BLOCCHI (<i>Block Cracking</i>)
4	RIGONFIAMENTI E DEPRESSIONI LOCALIZZATI (<i>Bumps and Sags</i>)
5	CORRUGAMENTI (<i>Corrugation</i>)
6	DEPRESSIONI (<i>Depression</i>)
7	FESSURE DI BORDO (<i>Edge Cracking</i>)
8	FESSURE DI RICHIAMO DEI GIUNTI (<i>Joint Reflection Cracking from longitudinal and transversal PCC slabs</i>)
9	SCALINAMENTO TRA CORSIA E BANCHINA (<i>Lane/Shoulder Drop-Off</i>)
10	FESSURE LONGITUDINALI E TRASVERSALI (<i>Longitudinal and Transverse Cracking</i>)
11	RAPPEZZI (<i>Patching and Util Cut Patching</i>)
12	LEVIGATURA DEGLI INERTI (<i>Polished Aggregate</i>)
13	BUCHE (<i>Potholes</i>)
14	ATTRAVERSAMENTI FERROVIARI (<i>Railroad Crossing</i>)
15	ORMAIE (<i>Rutting</i>)
16	SCORRIMENTI (<i>Shaving</i>)
17	FESSURE DA SCORRIMENTO (<i>Slippage Cracking</i>)
18	RIGONFIAMENTI (<i>Swell</i>)
19	DISGREGAZIONE (<i>Raveling</i>)
20	SGRANAMENTO (<i>Weathering</i>)

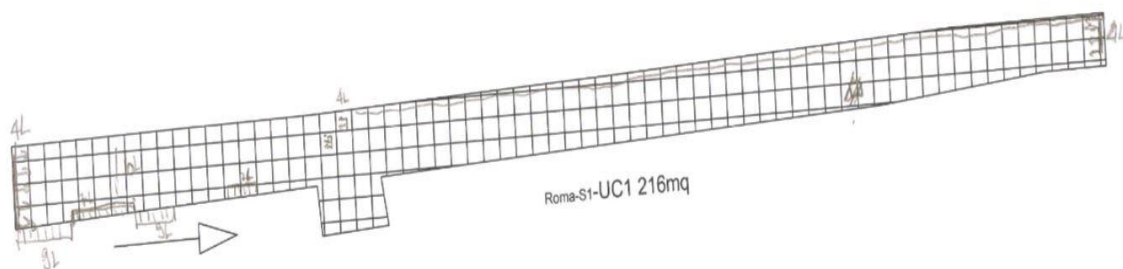




(b)

Figura 7-25. Sezione V.C. SEZ. 03: (a) scheda del rilievo degli ammaloramenti e (b) ripresa video durante le misure accelerometriche

Nel caso della sezione V.C. SEZ. 10, è stata riscontrata l'assenza di due tombini nella scheda cartaceo del rilievo PCI (Figura 7-26a), i quali, essendo in traiettoria (Figura 7-26b), incidono in maniera significativa sui livelli di accelerazione verticali rilevati all'interno del veicolo stradale.



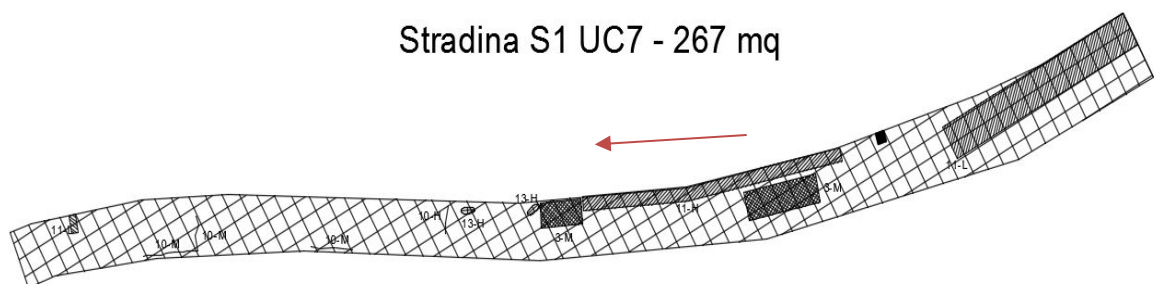
(a)



(b)

Figura 7-26. Sezione V.C. SEZ. 10: (a) scheda del rilievo degli ammaloramenti e (b) ripresa video durante le misure accelerometriche

Per quanto concerne invece la sezione di Villa Fontane *V.F. SEZ. 05*, l'incongruenza rilevata riguarda lo stato della pavimentazione, la quale presenta un marcato scalinamento tra la corsia e la 'banchina' (Figura 7-27b), quest'ultima caratterizzata da una stesa in calcestruzzo. Tali scalino, è inoltre presente in piena traiettoria e quindi ha delle ripercussioni sulle accelerazioni rilevate in tale tratto.



(a)

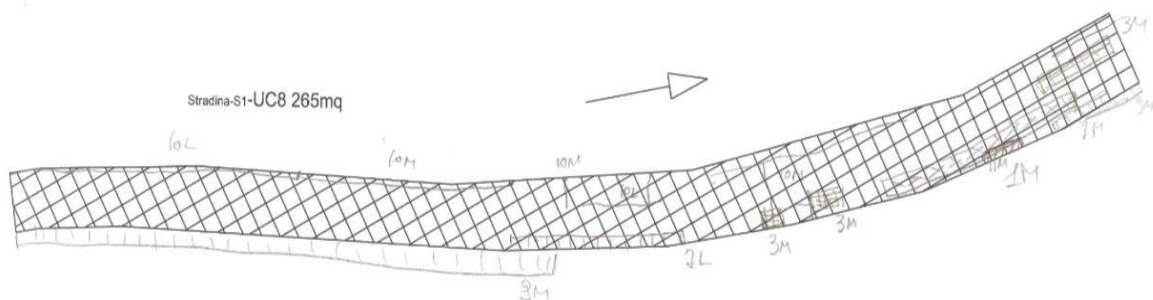


(b)

Figura 7-27. Sezione V.F. SEZ. 05: (a) scheda del rilievo degli ammaloramenti e (b) ripresa video durante le misure accelerometriche

La quarta sezione esclusa dal confronto tra PCI e indice a_{wz} , V.F. SEZ. 06, presenta una zona di ammaloramento diffusa (non ben visibile a causa del riflesso sul parabrezza) prima della curva sinistrorsa (Figura 7-28b), la quale manca completamente nella scheda cartacea compilata durante il precedente rilievo del PCI.

Infine, i valori di quest'ultimo indice ottenuti per le varie sezioni di calcolo sono riportati nella Tabella 7-13.



(a)



(b)

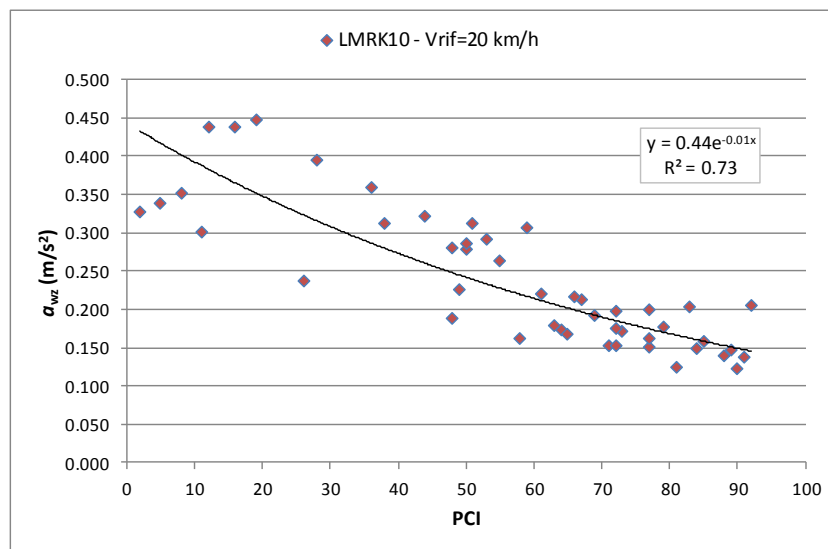
Figura 7-28. Sezione V.F. SEZ. 06: (a) scheda del rilievo degli ammaloramenti e (b) ripresa video durante le misure accelerometriche

Tabella 7-13. Riepilogo valori PCI per ciascuna sezione di calcolo

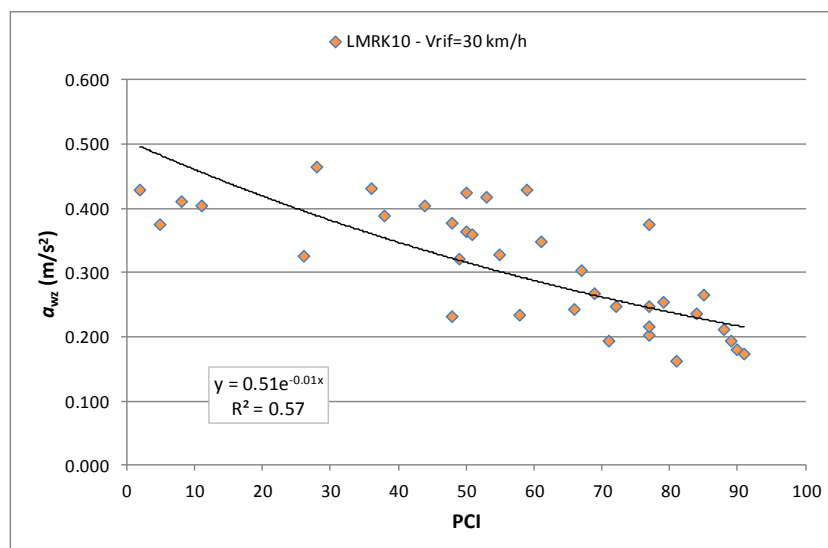
Frazione di Felceti		Frazione di Valentano Centro		Frazione di Villa Fontane	
ID SEZIONE	PCI	ID SEZIONE	PCI	ID SEZIONE	PCI
FEL. SEZ. 01	67	V.C. SEZ. 01	83	V.F. SEZ. 01	53
FEL. SEZ. 02	70	V.C. SEZ. 02	85	V.F. SEZ. 02	44
FEL. SEZ. 03	72	V.C. SEZ. 03 (scartata)	41	V.F. SEZ. 03	28
FEL. SEZ. 04	72	V.C. SEZ. 04	59	V.F. SEZ. 04	38
FEL. SEZ. 05	81	V.C. SEZ. 05	53	V.F. SEZ. 05 (scartata)	32
FEL. SEZ. 06	92	V.C. SEZ. 06	19	V.F. SEZ. 06 (scartata)	53
FEL. SEZ. 07	88	V.C. SEZ. 07	12	V.F. SEZ. 07	55
FEL. SEZ. 08	90	V.C. SEZ. 08	50	V.F. SEZ. 08	84
FEL. SEZ. 09	89	V.C. SEZ. 09	72	V.F. SEZ. 10	48
FEL. SEZ. 10	91	V.C. SEZ. 10 (scartata)	80	V.F. SEZ. 11	51
FEL. SEZ. 11	11	V.C. SEZ. 11	79	V.F. SEZ. 12	66
FEL. SEZ. 12	8	V.C. SEZ. 12	72	V.F. SEZ. 13	50
FEL. SEZ. 13	2	V.C. SEZ. 13	77	V.F. SEZ. 14	49
FEL. SEZ. 14	26			V.F. SEZ. 15	48
FEL. SEZ. 15	5			V.F. SEZ. 16	36
FEL. SEZ. 16	22			V.F. SEZ. 17	56
FEL. SEZ. 17	84			V.F. SEZ. 18	64
FEL. SEZ. 18	16			V.F. SEZ. 19	65
FEL. SEZ. 19	73			V.F. SEZ. 20	63
FEL. SEZ. 20	71			V.F. SEZ. 21	77
FEL. SEZ. 21	58			V.F. SEZ. 22	77
FEL. SEZ. 22	77			V.F. SEZ. 23	69
FEL. SEZ. 23	61				

Confrontando quindi i valori dell'indice a_{wz} calcolati a partire dalle misure accelerometriche effettuate con la piattaforma inerziale LMRK10 alle varie velocità, riportati in Fi-

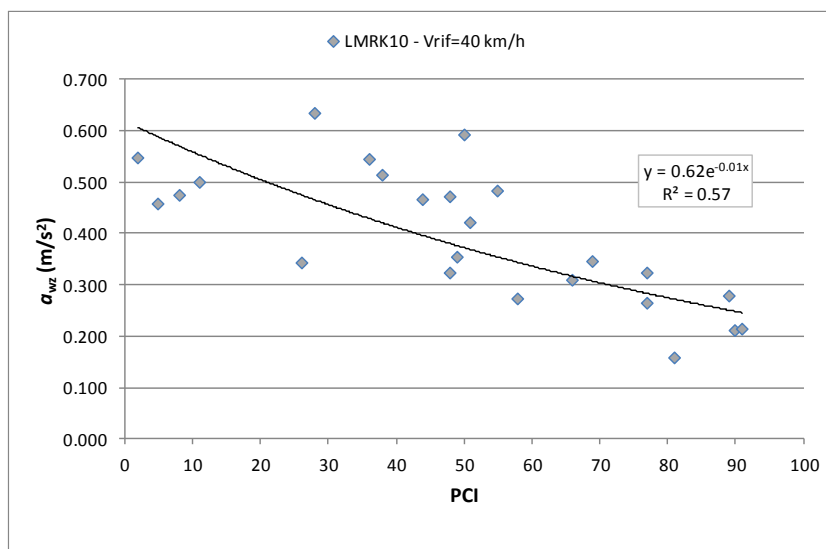
gura 7-29, è stata riscontrata una bassa correlazione tra i due indici ($R^2=0.57-0.73$) e in particolare il valore più alto del coefficiente di correlazione è stato trovato per le misure effettuate a una velocità di riferimento di 20 km/h. Alla luce dei risultati ottenuti da suddetto confronto, appare opportuno evidenziare come ad alcune tipologie di ammaloramenti presenti nel rispettivo catalogo impiegato nel metodo PCI non corrisponda necessariamente una variazione significativa della regolarità superficiale della pavimentazione stradale, come facilmente verificabile nel caso di fessure longitudinali di bassa severità.



(a)



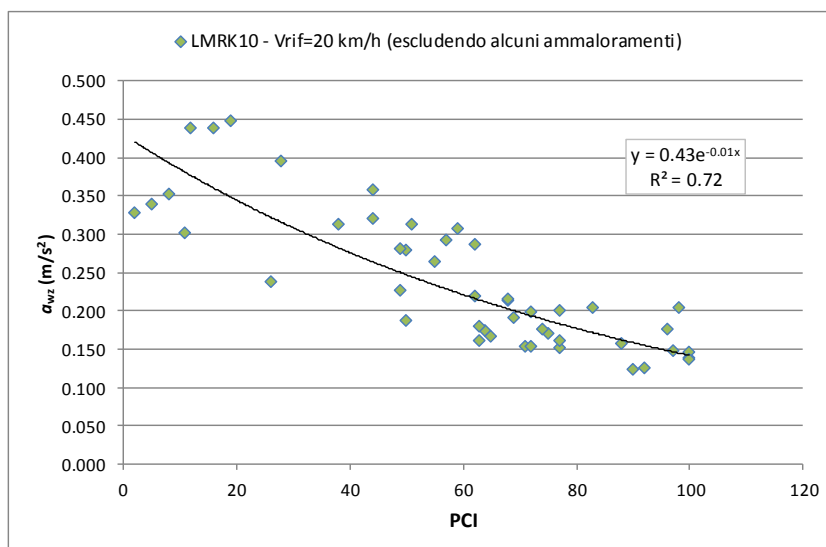
(b)



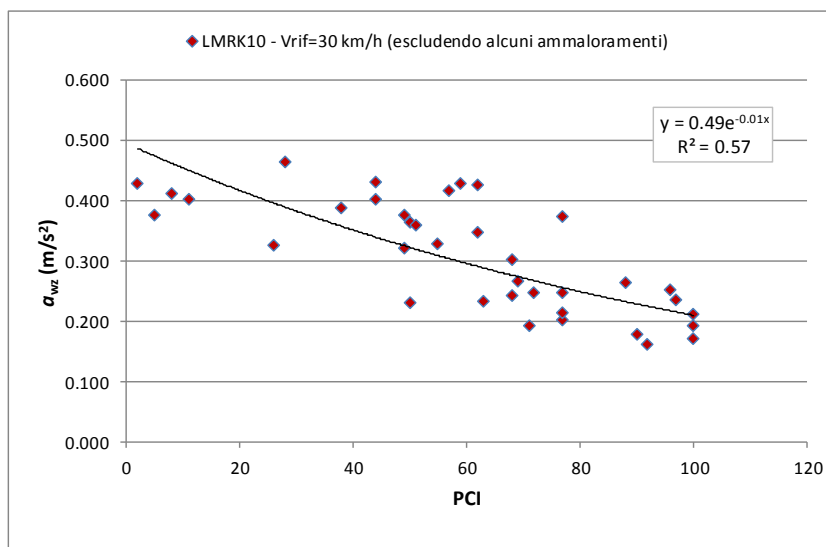
(c)

Figura 7-29. Correlazione tra il PCI e l'indice a_{wz} per diverse velocità di riferimento: (a) 20 km/h, (b) 30 km/h e (c) 40 km/h

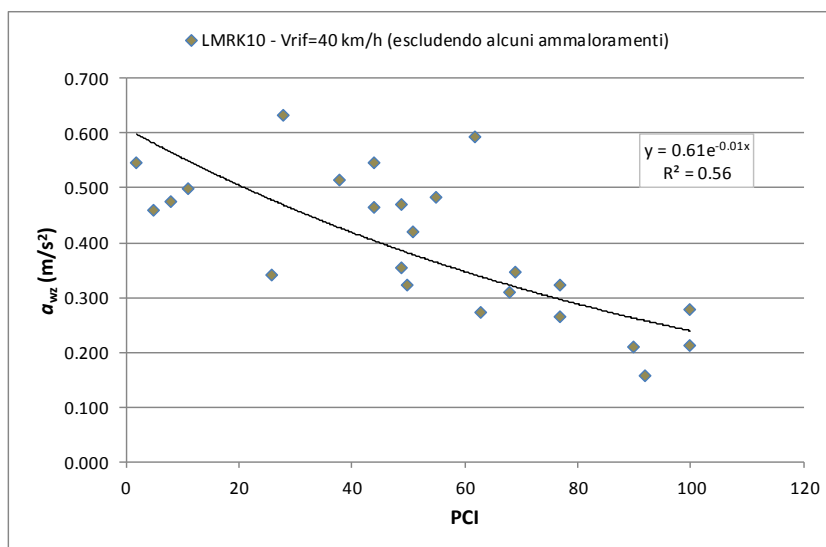
In aggiunta, il metodo PCI prevede un'accurata analisi dell'intera estensione delle unità campione, e di conseguenza dell'intera sezione trasversale del tratto esaminato, a differenza della metodologia proposta per la valutazione del comfort percepito dagli utenti stradali, il quale richiede necessariamente il transito sopra le irregolarità sulla superficie del manto stradale al fine di coglierne la presenza. Per tale motivo, è stato ripetuto il calcolo del PCI per le varie sezioni non considerando le seguenti tipologie di ammaloramenti di severità bassa: *fessure ramificate (1-L)*, *fessure a blocchi (3-L)*, *fessure di bordo (7-L)*, *fessure longitudinali e trasversali (10-L)* e *fessure di scorrimento (17-L)*; le quali, soprattutto quando si presentano con un grado di severità molto basso, non inducono una deformazione della superficie della pavimentazione tale da poter essere rilevato durante il transito con un veicolo. Come si può notare dai grafici riportati in Figura 7-30, anche ricalcolando il PCI non considerando suddetti ammaloramenti, le variazioni che si riscontrano in termini di coefficiente di correlazione risultano essere trascurabili o comunque poco significativi (R^2 invariato). Ciò dipende, tra le altre cose, dalla procedura di calcolo per la determinazione del valore finale dell'indice PCI, il quale considera e pesa la presenza dei vari ammaloramenti non in senso assoluto, ma in funzione di quali ammaloramenti si presentino simultaneamente.



(a)



(b)



(c)

Figura 7-30. Correlazione tra il PCI ricalcolato non considerando gli ammaloramenti 1-L, 3-L, 7-L, 10-L e 17-L e l'indice a_{wz} per diverse velocità di riferimento: (a) 20 km/h, (b) 30 km/h e (c) 40 km/h

La ricerca di un'eventuale correlazione tra i due metodi, mira a valutare la possibilità di impiegare l'indice a_{wz} non in sostituzione del metodo PCI ma approccio integrativo; consentendo una valutazione qualitativa dell'intera rete stradale urbana in tempi brevi e l'individuazione delle principali criticità della rete stessa, sulle quali andare successivamente ad effettuare rilievi specifici, atti all'individuazione delle problematiche della pavimentazione ivi presenti e a definire i migliori interventi per il ripristino delle condizioni ottimali. In aggiunta, l'utilizzo dell'approccio proposto basato sull'indice a_{wz} può risultare utile nella fase di avvio del metodo PCI, il quale, a causa dei tempi necessari per il reperimento delle varie informazioni (sovente non note alle varie amministrazioni), spesso e volentieri rappresenta un disincentivo all'adozione di tale metodo, tramite il quale è possibile implementare un efficiente Piano di Manutenzione Stradale (PMS).

In quest'ottica, non serve necessariamente determinare una relazione che consenta di calcolare il valore di PCI a partire da quelli dell'accelerazione verticale ponderata in frequenza, bensì è di fondamentale importanza definire delle soglie di accettabilità per l'indice a_{wz} che consentano di valutare lo stato delle pavimentazioni in corrispondenza di ciascuna sezione, in analogia e accordo con quanto espresso e ottenuto tramite il metodo PCI. Le soglie per i vari livelli di comfort fornite dalla ISO 2631-1 infatti, non possono essere adottate in quanto indipendenti dalla velocità considerata durante le misure; mentre appare evidente come al fine di poter fornire una medesima valutazione concorde con il metodo PCI per i valori di a_{wz} calcolati alle varie velocità, sia necessario determinare delle soglie diverse per ciascuna velocità di riferimento.

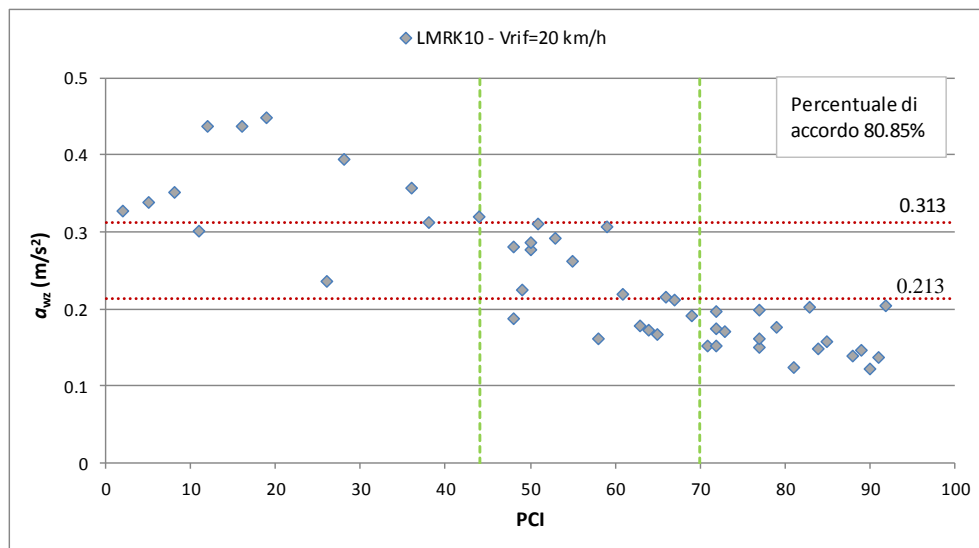
In considerazione della valutazione puramente qualitativa dello stato delle pavimentazioni stradali che si intende fornire tramite l'impiego dell'indice a_{wz} , è stato implementato un codice Matlab atto alla ricerca delle soglie di a_{wz} per ciascuna velocità di riferimento

(20, 30 e 40 km/h), per le quali si determini la maggiore percentuale di accordo tra i due metodi, nella valutazione dello stato delle pavimentazioni delle sezioni campione analizzate. In particolare, sono stati definiti tre livelli di valutazione, i cui limiti in termini di PCI sono riportati nella Tabella 7-14.

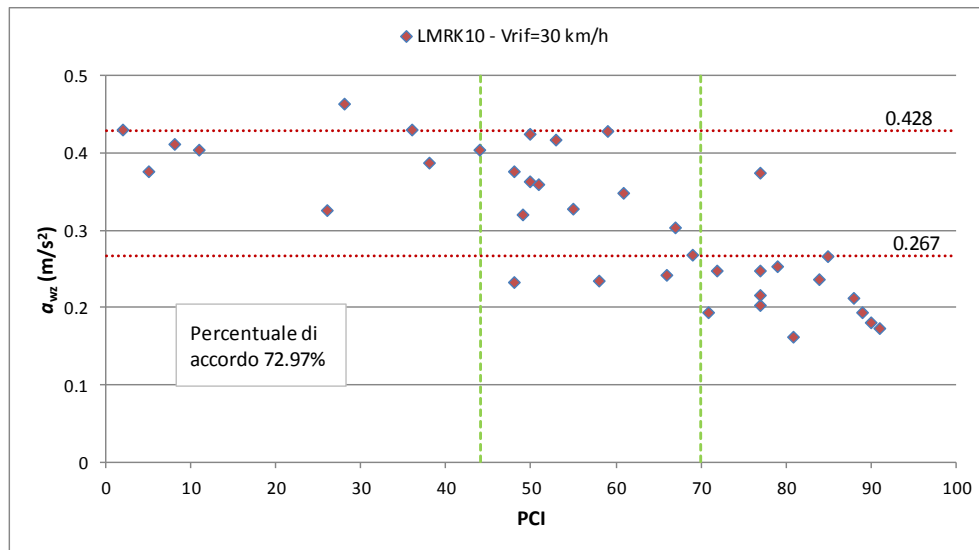
Tabella 7-14. Soglie PCI e livelli di giudizio della pavimentazione

PCI	Stato pavimentazione
0-44	POOR
44-70	FAIR
>70	GOOD

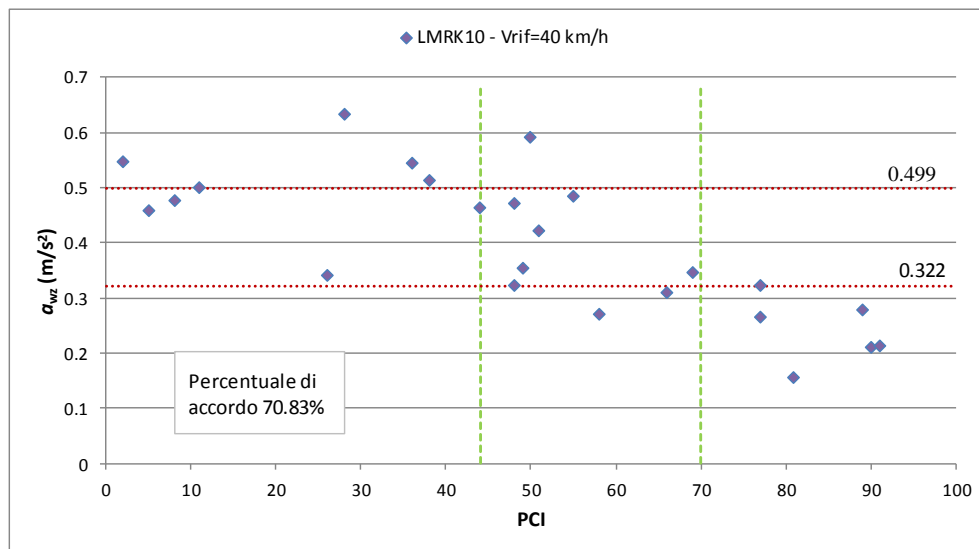
Avendo a disposizione un numero alquanto limitato di campioni (47 per $V_{rif}=20$ km/h, 37 per $V_{rif}=30$ km/h e 24 per $V_{rif}=40$ km/h) in funzione dei quali poter andare a determinare le soglie per massimizzare la percentuale di accordo tra i due metodi esaminati (PCI e a_{wz}), il codice sviluppato fornisce una molteplicità di soluzioni entro un certo intervallo di variabilità dell'indice a_{wz} ; avendo tra le altre cose preso in esame un passo di incremento pari a 0.001 m/s². Per tale motivo, essendo la finalità di tale studio quella di valutare la possibilità di impiego dell'approccio proposto e non già la definizione precisa di tali soglie, si riporta per ciascuna velocità di riferimento per il calcolo dell'indice a_{wz} una soluzione di esempio in corrispondenza della quale si ottiene la massima percentuale di *agreement* (Figura 7-31).



(a)



(b)



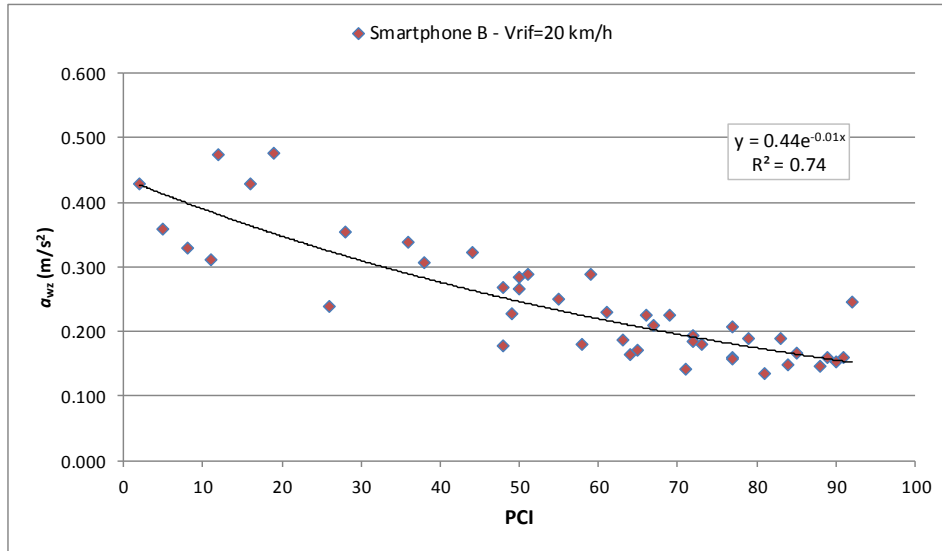
(c)

Figura 7-31. Percentuale di accordo massima tra PCI e a_{wz} per il campione di sezioni esaminate: (a) $V_{rif}=20$ km/h, (b) $V_{rif}=30$ km/h e (c) $V_{rif}=40$ km/h

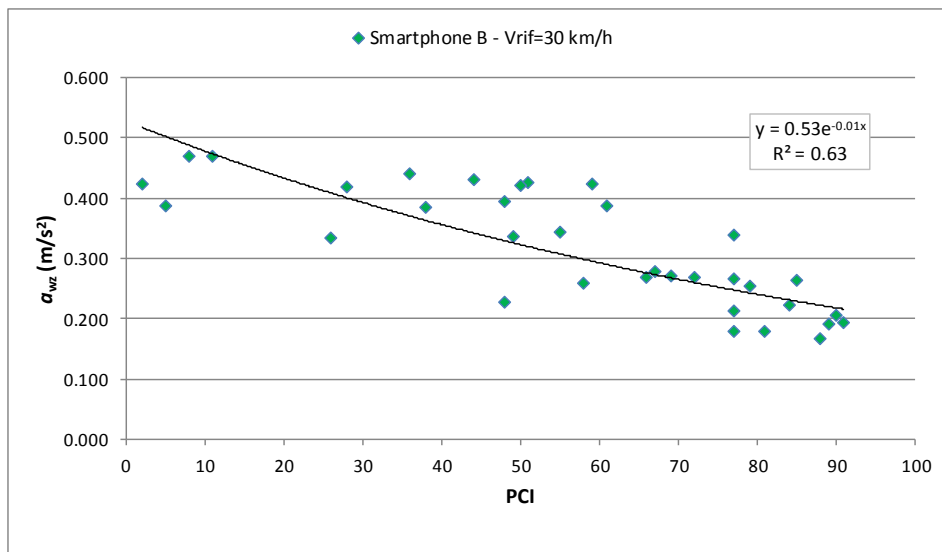
Come si evince dai grafici su riportati, per tutte e tre le classi di velocità si raggiunge una percentuale di accordo tra i due metodi superiore al 70%. Appare evidente comunque, come tale risultato benché lasci presagire la possibilità di impiegare l'indice a_{wz} per tale fine, richieda necessariamente una ricerca più approfondita su di un campione di sezioni sicuramente più numeroso ed eterogeneo ai fini dell'individuazione delle soglie da adottare per l'indice di comfort prescelto.

A margine di tale studio, si riportano inoltre le relazioni trovate tra il PCI delle varie sezioni esaminate e i corrispettivi valori dell'accelerazione verticale ponderata in frequenza, calcolati a partire dai dati accelerometrici rilevati con l'impiego dello smartphone B (Figura 7-32) e smartphone A (Figura 7-33). Non avendo inoltre riscontrato variazioni si-

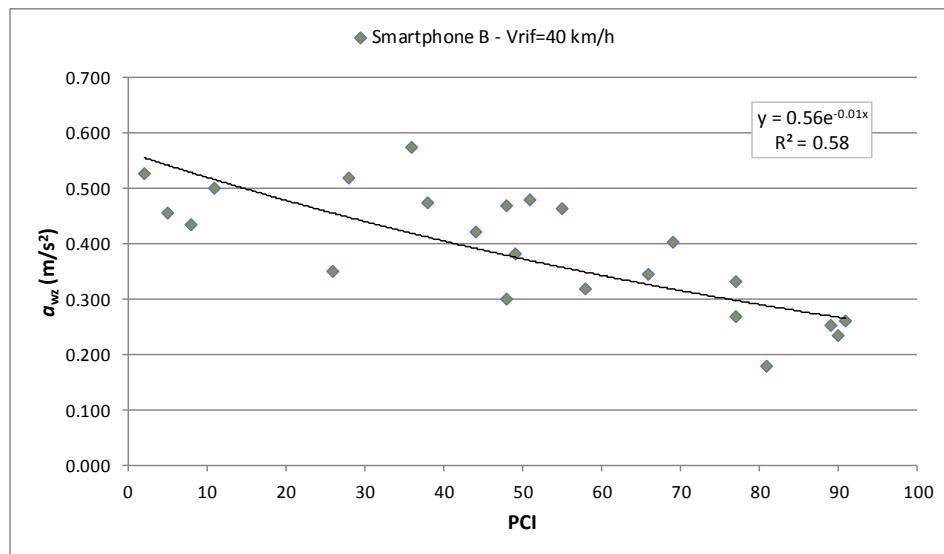
gnificative in termini di coefficiente di correlazione al variare della funzione di interpolazione utilizzata, si riportano per brevità i soli grafici relativi ai risultati ottenuti adottando la funzione di interpolazione cubica/pchip.



(a)

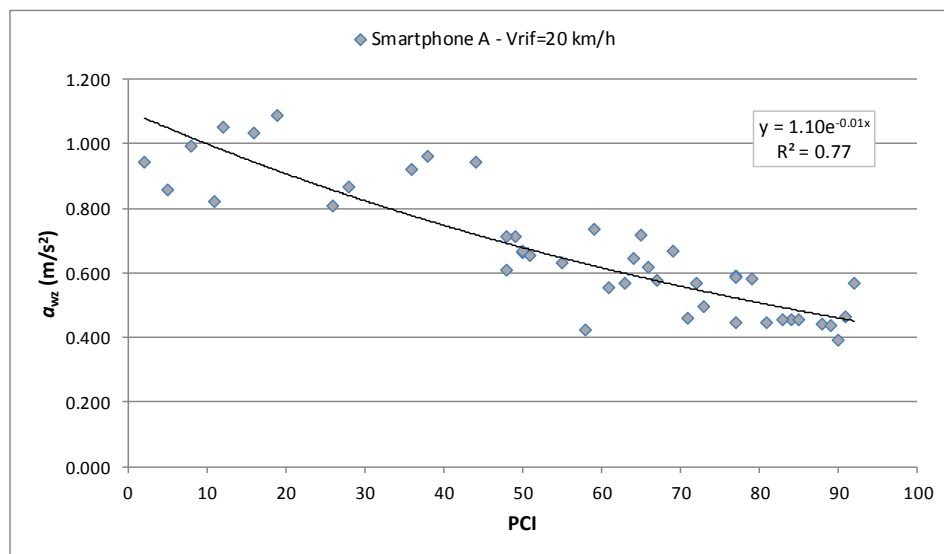


(b)

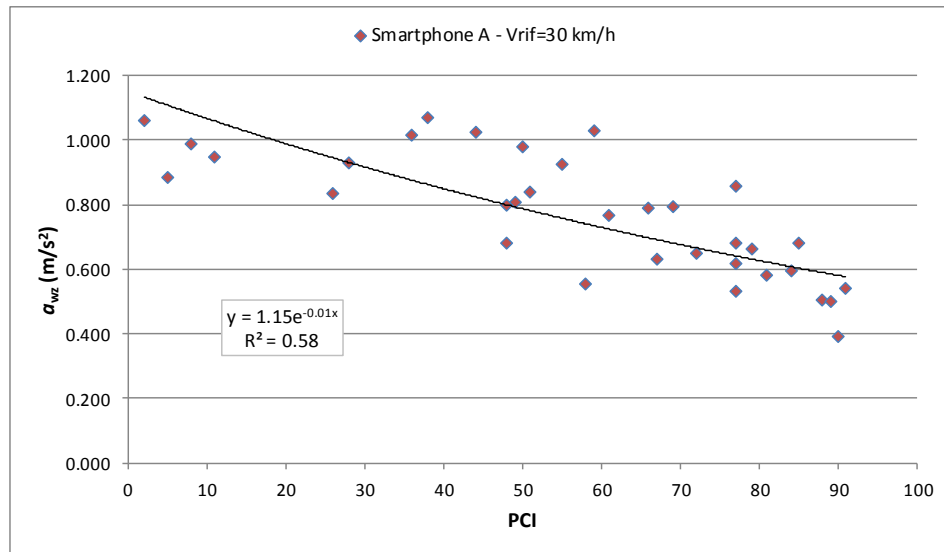


(c)

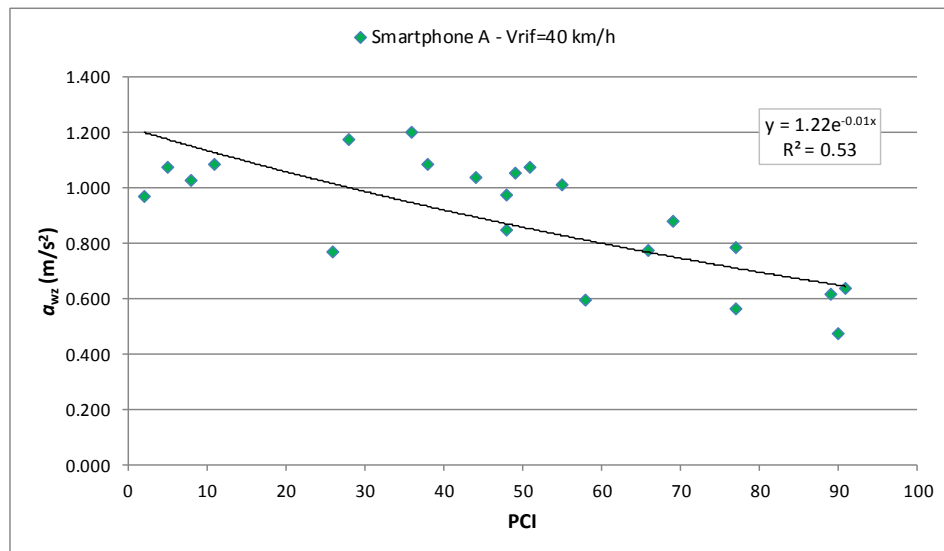
Figura 7-32. Correlazione tra il PCI e l'indice a_{wz} (Smartphone B) per diverse velocità di riferimento: (a) 20 km/h, (b) 30 km/h e (c) 40 km/h



(a)



(b)



(c)

Figura 7-33. Correlazione tra il PCI e l'indice a_{wz} (Smartphone A) per diverse velocità di riferimento: (a) 20 km/h, (b) 30 km/h e (c) 40 km/h

8. CONCLUSIONI E FUTURI SVILUPPI

Nel presente studio è stata esaminata la possibilità di utilizzare l'indicatore di comfort a_{wz} descritto nella ISO 2631-1, quale indice per la valutazione della regolarità delle pavimentazioni stradali. Attraverso una serie di analisi preliminari, è stato verificato il comportamento di tale indice nei confronti delle irregolarità puntuali e diffuse; individuando altresì la migliore procedura di trasformazione dal dominio del tempo a quello della frequenza (FFT con applicazione della funzione di finestrazione Split-cosine bell) del segnale accelerometrico rilevato all'interno di un veicolo stradale. Contemporaneamente, il metodo proposto è stato comparato con i metodi consolidati utilizzati per la valutazione della regolarità superficiale delle pavimentazioni stradali, con particolare riferimento all'indice più utilizzato al mondo, l'*International Roughness Index (IRI)*. I risultati ottenuti hanno mostrato come l'accelerazione verticale ponderata in frequenza presenti delle buone correlazioni non solo con quest'ultimo, ma anche con altri indicatori attualmente utilizzati, quali il *Ride Number (RN)* e il *Michigan Ride Quality Index (RQI_{Mich})* impiegati per stimare e valutare la qualità di marcia percepita dagli utenti stradali; nonché con la classificazione dei profili stradali fornita dalla norma ISO 8608, basata sull'analisi dei profili dell'elevazioni (criterio geometrico). Dalla comparazione con l'indice a_{wz} inoltre, si è voluto mettere in evidenza come tutti i suddetti indici siano stati sviluppati e implementati al fine di valutare lo stato di pavimentazioni stradali caratterizzate da velocità di transito maggiori di 70-80 km/h, risultando difficilmente applicabili nel caso di analisi di reti stradali urbane.

Al fine di ovviare a tale carenza, è stata valutata la possibilità di impiegare l'indice a_{wz} per la valutazione, seppur qualitativa, dello stato delle pavimentazioni stradali in ambito urbano. In particolare, una volta definite le caratteristiche prestazionali richieste alla strumentazione di misura, è stata presa in esame la possibilità di utilizzare, accanto ai dispositivi di precisione (e.g. piattaforma inerziale LandMark 10), i cellulari smartphone; il cui impiego consentirebbe di abbattere notevolmente i costi del rilievo. È stata quindi implementata una campagna di misure in sito finalizzata all'analisi di una porzione della rete stradale presso il comune di Valentano (VT), la quale ha richiesto la definizione di 5 classi di velocità di riferimento (da 10 a 50 km/h con passo di 10 km/h), rispetto alle quali poter definire l'indice a_{wz} ; calcolato a partire dalle misure accelerometriche effettuate in corrispondenza di tali velocità. Una delle principali problematiche di siffatto approccio, riguarda infatti la difficoltà di mantenere una velocità costante durante tutta la durata della misurazione. Dall'analisi dei risultati ottenuti durante tale campagna comunque, è emersa la buona ripetibilità delle misure effettuate sulle singole sezioni di calcolo, anche ammettendo una variabilità della velocità durante il rilievo pari a ± 5 km/h. Ai fini dell'impiego dell'indice a_{wz} per la valutazione e il monitoraggio della regolarità stradale, essendo quest'ultimo sensibile alla velocità impiegata durante i rilievi, è di fondamentale importanza definire delle relazioni tra i valori di tale indicatore calcolati in corrispondenza di diverse velocità di riferimento. In tal senso, i risultati ottenuti hanno mostrato una buona correlazione tra le tre classi di velocità esaminate (20, 30 e 40 km/h), fornendo coefficienti di

correlazione per regressioni lineari comprese tra 0.89 e 0.94. Tramite l'utilizzo di tali relazioni, è possibile non solo comparare i valori dell' a_{wz} determinate a diverse velocità, ma anche stimare la qualità di marcia di un tratto stradale per velocità differenti da quella di rilievo. In tal modo, sarà possibile definire e programmare opportunamente i rilievi per il monitoraggio della rete, senza avere l'obbligo di effettuare le misure alla massima velocità operativa registrata sui singoli tratti stradali da esaminare.

La comparazione delle misure accelerometriche effettuate in prossimità del medesimo punto di osservazione tramite l'unità inerziale e il cellulare smartphone Samsung Galaxy S5, ha evidenziato la buona qualità dei dati accelerometrici forniti da quest'ultimo, i quali determinano una leggera sottostima dell'indice a_{wz} , comunque compresa entro uno scarto medio pari al 5-10%. L'utilizzo del secondo dispositivo cellulare posto in corrispondenza del parabrezza anteriore invece, ha messo in evidenza l'importanza della scelta del punto di osservazione per il rilievo delle accelerazioni all'interno del veicolo. In questo caso infatti, si sono registrati livelli di accelerazione costantemente superiori rispetto alla posizione sita in prossimità del freno mano.

Infine, è stata verificata l'esistenza di una correlazione tra PCI e a_{wz} , la quale seppur caratterizzata da una bassa correlazione ($R^2=0.52-0.73$), consente, una volta individuati tre livelli qualitativi dello stato di una pavimentazione stradale (buono, mediocre e insufficiente), di ottenere una convergenza nella classificazione delle singole sezioni tra i due metodi comunque sempre superiore al 70%. In tal caso ovviamente, non è più possibile adottare le soglie per i vari livelli di comfort forniti dalla ISO 2631-1, bensì occorre definire opportune soglie per l'indice a_{wz} in funzione della velocità di riferimento impiegata durante le misure accelerometriche.

In conclusione, la metodologia proposta ha sicuramente evidenziato dei buoni margini di applicazione per il monitoraggio della regolarità delle pavimentazioni stradali urbane, consentendone una valutazione qualitativa, utile per l'individuazione delle criticità e delle priorità di intervento. Tale aspetto, è di fondamentale importanza ai fini di una gestione oculata delle risorse a disposizione delle amministrazioni locali, fornendo altresì un valido supporto per l'implementazione e l'aggiornamento di un opportuno *Piano di Manutenzione Stradale (PMS)*. Indubbiamente, ai fini di una completa validazione della metodologia proposta, sarà necessario incrementare i dati rilevati sia in termini di accelerazione ponderata in frequenza sia in termini di PCI.

Tra gli sviluppi futuri, sicuramente occorrerà valutare l'influenza delle diverse tipologie di veicolo sui valori dell'indice a_{wz} , ricercando tra loro opportune correlazioni o semplicemente raggruppando per macro insiemi i vari veicoli ammessi sulla rete esaminata; con la possibilità di individuare di volta in volta la tipologia veicolare critica o di maggiore interesse. Sarà necessario inoltre, valutare l'influenza dell'usura delle varie parti meccaniche dei veicoli stradali impiegati per i rilievi.

In aggiunta, ai fini di consentire il rilievo tramite utilizzo dei dispositivi smartphone, è di fondamentale importanza verificare il miglior punto di osservazione in cui collocarli, garantendo che la direzione degli assi di tale strumento risulti coincidente con il sistema di

riferimento intrinseco al veicolo. Inoltre, appare evidente la necessità di approfondire l'effettiva influenza del tipo di supporto utilizzato per il loro fissaggio sulle misure delle accelerazioni verticali.

BIBLIOGRAFIA

1. **ASTM E867-02**. Terminology Relating to Vehicle-Pavement Systems. West Conshohoken, Pa : American Society for Testing and Materials, 2002.
2. **PIARC**. *World Road Association: Report of the Committee on Surface Characteristics*. Brussels, Belgium : s.n., 1987.
3. **Loprencipe, G. e Cantisani, G.** Unified analysis of road pavement profiles for evaluation of surface characteristics. *Modern Applied Science*. 2013. 7(8), p. 1.
4. **Sayers, M.W., Gillespie, T.D. e Paterson, W.D.O.** *Guidelines for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurements*. World Bank Technical Paper Number 46. 1986. p. 87.
5. **ASTM E950-98**. Standard Test Method for Measuring the Longitudinal Profile of Traveled Surfaces with an Accelerometer Established Inertial Profiling Reference. West Conshohocken, Pa : American Society for Testing and Materials, 1998.
6. **Sayers, M.W. e Karamihis, S.M.** *The Little Book of Profiling*. Ann Arbor, MI, USA : University of Michigan, Transportation Research Institute, September 1998.
7. **ISO 8608:1995**. Mechanical Vibration - Road Surface Profiles - Reporting of Measured Data. Geneva : The International Organization for Standardization, 1995 (confirmed in 2016).
8. **Chatti, K. e Lee, D.** Development of new profile-based truck dynamic load index. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2002. Vol. 1806, p. 149-159.
9. **Sayers, M.W.** On the calculation of international roughness index from longitudinal road profiles. *Transportation Research Record* . Washington, D.C. : National Research Council, 1995. 1501, p. 1-12.
10. **ASTM E1926-08**. Standard practice for computing international roughness index of roads from longitudinal profile measurements. West Conshohoken, Pa : American Society for Testing and Materials, 2008.
11. **The Transtec Group**. ProVAL version 3.4 User's Guide. Austin, Texas : s.n., 2012. <http://roadprofile.com>.
12. **Můčka, P.** International Roughness Index specifications around the world. *Road Materials and Pavement Design*. 2016. p. 1-37.
13. **Unidad de Investigación, Lanamme UCR**. Determinación de un procedimiento de ensayo para el cálculo del IRI. *Informe UI-03-08*. 2008.
14. **ASTM E1489-98**. Standard Practice for Computing Ride Number of Roads from Longitudinal Profile Measurements Made by an Inertial Profile Measuring Device. West Conshohoken, Pa : American Society for Testing and Materials, 1998 (Reapproved 2003).
15. **Karamihis, S.M.** Critical Profiler Accuracy Requirements. *UMTRI-2005-24*. Ann Arbor, Michigan : The University of Michigan Transportation Research Institute, September 2005.

16. **Lee, D., Chatti, K. e Baladi, G.** Use of distress and ride quality data to determine roughness thresholds for smoothing pavements as a preventive maintenance action. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2002. Vol. 1816, p. 43-55.
17. **Minnesota Department of Transportation (Mn/DOT).** 2015 - Pavement Condition Annual Report. December 2015. p. Available from http://www.dot.state.mn.us/materials/pvmtmgmtdocs/AnnualReport_2015.pdf.
18. **Minnesota Department of Transportation.** An Overview of Mn/DOT's Pavement Condition Rating Procedures and Indices. 9 May 2006. p. Available from http://www.dot.state.mn.us/materials/pvmtmgmtdocs/Rating_Overview_State.pdf.
19. **Kropáč, O. e Múčka, P.** Deterioration Model of Longitudinal Road Unevenness Based on its Power Spectral Density Indices. *Road Materials and Pavement Design*. 2008. 9:3, p. 389-420.
20. **O., Kropáč e P., Múčka.** Relations between characteristics of longitudinal unevenness of roads: a review. *Strojnícky časopis*. 2003. 54(1/3), p. 49-64.
21. **ASTM D6433-03.** Standard Practice for R pads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys. west Conshohoken, Pa : American Society for Testing and Materials, 2003.
22. **Rosati, D.** Applicazione del Metodo ASTM-6433 per la Valutazione di una Rete Stradale Comunale. *Tesi di Laurea Magistrale*. s.l. : Università degli Studi di Roma - La Sapienza, A.A. 2015/2016.
23. **Ahrin, S. A.; Williams, L. N.; Ribbiso, A.; Anderson, M. F.** Predicting Pavement Condition Index Using International Roughness Index in a Dense Urban Area. *Journal of Civil Engineering Research*. 2015. 5(1), p. 10-17.
24. **Uys, P.E., Els, P.S. e 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(2), p. 163-175.
25. **Pazooki, A., Rakheja, S. e Cao, D.** Modeling and validation of off-road vehicle ride dynamics. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 28, p. 679-695.
26. **Andrén, P.** Power spectral density approximation of longitudinal road profiles. *Int. J. Veh. Des.* 2006. 40(1/2/3), p. 2-14.
27. **Múčka, P.** Longitudinal road profile spectrum approximation by split straight lines. *Journal of Transportation Engineering*. s.l. : ASCE, 2012. Vol. 138, 2, p. 243-251.
28. **Múčka, P.** Correlation among Road Unevenness Indicators and Vehicle Vibration Response. *Journal of Transportation Engineering*. s.l. : ASCE, 2013. 139(8), p. 771-786.
29. **Loizos, A. e Plati, C.** An alternative approach to pavement roughness evaluation. *International Journal of Pavement Engineering*. 2008. 9(1), p. 69-78.
30. **Yu, J., Chou, E. e Yau, J.T.** Development of speed-related ride quality thresholds using international roughness index. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2006. 1974, p. 47-53.
31. **Cantisani, G. e Loprencipe, G.** Road roughness and whole body vibration: Evaluation tools and comfort limits. *Journal of Transportation Engineering*. 2010. 136(9), p. 818-826.

32. **Arhin, S.A., Noel, E.C. e Ribbiso, A.** Acceptable International Roughness Index Thresholds based on Present Serviceability Rating. *Journal of Civil Engineering Research*. 2015. 5(4), p. 90-96.
33. **Můčka, P.** Road Roughness Limit Values Based on Measured Vehicle Vibration. *Journal of Infrastructure Systems*. 2016. 04016029.
34. **Můčka, P. e Granlund, J.** Comparison of longitudinal unevenness of old and repaired highway lanes. *Journal of Transportation Engineering*. 2012. 138(3), p. 371-380.
35. **Kropáč, O. e Můčka, P.** Be careful when using the international roughness index as an indicator of road unevenness. *Journal of sound and vibration*. 2005. 287(4), p. 989-1003.
36. **Galoni, A.** Metodologie di rilievo e di valutazione delle pavimentazioni in sampietrini. *Tesi di Laurea Magistrale*. s.l. : Università degli Studi di Roma - La Sapienza, A.A. 2015/2016.
37. **Ngwangwa, H. M., et al.** Reconstruction of road defects and road roughness classification using vehicle responses with artificial neural networks simulation. *Journal of Terramechanics*. 2010. 47(2), p. 97-111.
38. **Ngwangwa, H. M., et al.** Reconstruction of road defects and road roughness classification using Artificial Neural Networks simulation and vehicle dynamic responses: Application to experimental data. *Journal of Terramechanics*. 2014. 53, p. 1-18.
39. **Harris, N. K., et al.** Characterisation of pavement profile heights using accelerometer readings and a combinatorial optimisation technique. *Journal of Sound and Vibration*. 2010. 329(5), p. 497-508.
40. **O'Brien, E. J., McGetrick, P. e González, A.** Identification of Road Irregularities via Vehicle Accelerations. *Transport Research Arena Europe 2010, 7-10th June*. Brussels, Belgium : s.n., 2010.
41. **Douangphachanh, V. e Oneyama, H.** A study on the use of smartphones under realistic settings to estimate road roughness condition. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*. 2014. (1).
42. **Douangphachanh, V. and Oneyama, H.** Estimation of road roughness condition from smartphones under realistic settings. *ITS Telecommunications (ITST), 2013 13th International Conference on*. s.l. : IEEE, November 2013. pp. 433-439.
43. **Forslöf, L.** Roadroid–smartphone road quality monitoring. *Proceedings of the 19th ITS World Congress*. October 2012.
44. **Eriksson, J., et al.** The pothole patrol: using a mobile sensor network for road surface monitoring. *Proceedings of the 6th international conference on Mobile systems, applications, and services*. s.l. : ACM, June 2008. p. 29-39.
45. **Tai, Y.C., Chan, C.W. e Hsu, J.Y.J.** Automatic road anomaly detection using smart mobile device. *In conference on technologies and applications of artificial intelligence*. Hsinchu, Taiwan : s.n., November 2010.
46. **Mednis, A., et al.** Real time pothole detection using android smartphones with accelerometers. *In 2011 International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems and Workshops (DCOSS)*. s.l. : IEEE, 2011. p. 1-6.

47. **Perttunen, M., et al.** Distributed road surface condition monitoring using mobile phones. In *International Conference on Ubiquitous Intelligence and Computing*. s.l. : Springer Berlin Heidelberg, September 2011.
48. **Astarita, V., et al.** A mobile application for road surface quality control: UNIquALroad. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*. 2012. 54, p. 1135-1144.
49. **ISO 2631-1:1997**. Mechanical vibration and shock -- Evaluation of human exposure to whole-body vibration -- Part 1: General requirements. Geneva : The International Organization for Standardization, Confirmed in 2014.
50. **Ahlin, K. e Granlund, N.J.** Relating road roughness and vehicle speeds to human whole body vibration and exposure limits. *International Journal of Pavement Engineering*. 2002. 3(4), p. 207-216.
51. **Prof. N. Locci**. Dispense del corso di Misure Elettriche. s.l. : Dipartimento di Ingegneria Elettrica ed Elettronica dell'Università di Cagliari, A.A. 2010/2011.
52. **Heinzel, G., Rüdiger, A., & Schilling, R.** Spectrum and spectral density estimation by the Discrete Fourier transform (DFT), including a comprehensive list of window functions and some new at-top windows. *Internal Report, Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik*. Hannover : s.n., 2002.
53. **Welch P.D.** The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms. *IEEE Transactions on audio and electroacoustics*. 1967. 15(2), p. 70-73.
54. **Bloomfield, P.** Fourier analysis of time series: an introduction. second edition New York : John Wiley & Sons, Inc., 2000. p. 261.
55. **prEN 13036-5**. Surface characteristics of road and airfield pavements – Test methods – Part 5: Determination of longitudinal unevenness indices. Brussels : European Committee for Standardization, 2006. 13036-5.
56. **Sbrolli, M.** Esposizione alle vibrazioni dei conducenti professionisti per effetto delle irregolarità stradali in area urbana. *Tesi di Laurea Specialistica*. s.l. : Università degli Studi di Roma - La Sapienza, A.A. 2004/2005.
57. **Bonin, G., Cantisani, G., Loprencipe, G., Sbrolli, M., & Coop, E. C. S.** Ride quality evaluation: 8 dof vehicle model calibration. In *4th International SIIV Congress*. Palermo, Italy : s.n., September 2007.
58. **ASTM E 1170-97**. Standard Practices for Simulating Vehicular Response to Longitudinal Profiles of Traveled Surfaces. West Conshohoken, Pa : American Society for Testing and Materials, 1997 (Reapproved 2012).
59. **Tyan, F., Hong, Y. F., Tu, S. H., & Jeng, W. S.** Generation of random road profiles. *Journal of Advanced Engineering*. 2009. Vol. 4(2), p. 1373-1378.
60. **Kropáč, O., & Můčka, P.** Effects of longitudinal road waviness on vehicle vibration response. *Vehicle system dynamics*. 2009. 47(2), p. 135-153.
61. **Můčka, P., & Granlund, J.** Is the road quality still better? *Journal of Transportation Engineering*. 2012. 138(12), p. 1520-1529.

62. **Granlund, J.** Ride vibration and road condition. <http://www.roadex.org/wp-content/uploads/2014/01/11.-Ride-vibration-and-road-condition-J-Granlund.pdf>. [Online] 2012.
63. **Boccia, A.** Ricostruzione di profili di pavimentazioni stradali da misure ad alto rendimento. *Tesi di Laurea Magistrale*. s.l. : Università degli Studi di Roma - La Sapienza, A.A. 2015/2016.
64. **Localzo, A.** Misura e caratterizzazione della regolarità in ambito urbano, ed in particolare per le pavimentazioni lapidee della città di Napoli. *Tesi di dottorato in Ingegneria dei Sistemi Idraulici di Trasporto e Territoriali*. s.l. : Università degli Studi di Napoli Federico II, XXI CICLO.
65. **OARS-IMU&GPSDataLogger**.
<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.oars&hl=en>.
66. **HyperIMU**.
https://play.google.com/store/apps/details?id=com.ianovir.hyper_imu&hl=en.
67. **Sensorfusionapp**.
<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.hiq.sensor&hl=en>.
68. **Colosimo, G.** VADASE - Variometric Approach for Displacement Analysis Stand-alone Engine. *Tesi di Dottorato in Infrastrutture e Trasporti*. s.l. : Università degli Studi di Roma - La Sapienza, 2012. XXIV CICLO.
69. **Colosimo, G., Crespi, M., & Mazzoni, A.** Real-time GPS seismology with a stand-alone receiver: A preliminary feasibility demonstration. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2011. 116(B11).
70. **Belloni, V.** Analisi preliminare per la determinazione dell'assetto di una barca a vela tramite dati GPS acquisiti nel progetto Roma Ocean World. *Tesi di Laurea Triennale in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio*. s.l. : Università degli Studi di Roma - La Sapienza. A.A. 2013/2014.
71. **Tagliacozzi, C.F.** Analisi preliminare per il posizionamento cinematico tramite dati GPS acquisiti nel progetto Roma Ocean World. *Tesi di Laurea Triennale in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio*. s.l. : Università degli Studi di Roma - La Sapienza. A.A. 2013/2014.
72. **Branzanti, M., Colosimo, G., & Mazzoni, A.** Variometric approach for real-time GNSS navigation: First demonstration of Kin-VADASE capabilities. *Advances in Space Research*. s.l. : <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2016.09.026>, 2016.
73. **Lupascu, R. C.** Trattamento di misure a bordo di veicoli ferroviari. *Tesi di Laurea Magistrale*. s.l. : Università degli Studi di Roma - La Sapienza. A.A. 2015/2016.