

UNIVERSITÀ DELLA CALABRIA



UNIVERSITÀ DELLA CALABRIA

Dipartimento di Ingegneria Civile

Dottorato di Ricerca in
Ingegneria Civile e Industriale

CICLO

XXIX

**LO SVILUPPO DEI SISTEMI DI TRASPORTO COLLETTIVO: STUDIO DI UN INDICE
PER LA DETERMINAZIONE DEL COMFORT A BORDO**

Settore Scientifico Disciplinare: ICAR/05 - Trasporti

Coordinatore: Ch.mo Prof. Franco Furgiuele

Firma

Supervisore/Tutor: Ch.mo Prof. Vittorio Astarita

Firma

Dottorando: Dott. Antonio Tassitani

Firma

INDICE

1. Premessa	3
2. Il trasporto collettivo	7
2.1. Introduzione	7
2.2. La classificazione dei sistemi di trasporto collettivo	7
2.3. Gli indicatori di prestazione nei trasporti collettivi	14
2.4. Misura della qualità del servizio	17
2.4.1. Misure soggettive della qualità del servizio	19
2.4.2. Misure oggettive della qualità del servizio	21
3. Il rumore e le vibrazioni a bordo veicolo	24
3.1. Caratteristiche del rumore	24
3.2. Comportamento del suono	30
3.3. Potenza sonora, energia acustica e pressione sonora	35
3.4. Direttività delle sorgenti	42
3.5. Analisi spettrale, curve di ponderazione e tipologie di rumore	44
3.6. Fenomeni di propagazione negli spazi chiusi	50
3.7. Caratteristiche delle vibrazioni	53
3.7.1. Caso delle vibrazioni libere non smorzate	54
3.7.2. Caso delle vibrazioni libere smorzate	56
3.8. Impatti sulla salute umana prodotti da rumore e vibrazioni	60
3.8.1. Effetti prodotti dall'esposizione al rumore	60
3.8.2. Effetti prodotti dalle vibrazioni	63
3.9. Comfort acustico e vibrazionale nei mezzi di trasporto	66
4. Strumentazione e software per l'analisi sperimentale	84
4.1. Introduzione	84
4.2. Strumentazione	84
4.3. Software	93
5. I sistemi di trasporto collettivo oggetto di studio	98
5.1. Introduzione	98
5.2. I treni oggetto di studio	98
5.3. Gli autobus oggetto di studio	103

6. Analisi sperimentale ed identificazione dell'indice di comfort	106
6.1. Introduzione	106
6.2. Analisi a campione preliminare	106
6.2.1. Definizione delle soglie di rumore sui treni	107
6.2.2. Definizione delle soglie di rumore sugli autobus	109
6.2.3. Definizione delle soglie di vibrazione su treni e autobus	112
6.3. I test-sites di riferimento	116
6.3.1. Il test site ferroviario	116
6.3.2. Il test site per gli autobus	118
6.4. L'indagine a campione sui test site	121
6.4.1. Introduzione	121
6.4.2. La scheda di rilevazione	121
6.4.3. Elaborazione dell'indagine a campione sui treni	123
6.4.4. Metodologia di calcolo del Comfort Index (CI) per i treni	132
6.4.5. Elaborazione dell'indagine a campione sugli autobus	133
6.4.6. Metodologia di calcolo del Comfort Index (CI) per gli autobus	140
6.5. Il grado di affollamento a bordo e la misura del ritardo	142
7. Analisi dei dati, sperimentazione a bordo veicolo e calcolo dell'indice di comfort	153
7.1. Introduzione	153
7.2. Analisi dei dati ottenuti dalle sperimentazioni	153
7.2.1. Analisi dei dati sperimentali sui treni	153
7.2.2. Analisi dei dati sperimentali sugli autobus	165
7.3. Calcolo del Comfort Index e validazione della metodologia proposta per la determinazione del comfort a bordo veicolo	185
8. Conclusioni	214
Bibliografia	216

1. Premessa

Il presente lavoro di tesi è finalizzato a riassumere i contenuti che sono stati sviluppati nel corso dei tre anni di Dottorato di Ricerca in Ingegneria Civile ed Industriale presso l'Università della Calabria. L'attività di ricerca si è sviluppata in collaborazione con diverse aziende private che hanno fornito la strumentazione, i mezzi sui quali effettuare le sperimentazioni e il know-how di base per indirizzare il lavoro verso un modello innovativo in ambito scientifico.

La domanda pubblica può costituire una leva per stimolare l'innovazione e la competitività e quindi la crescita del sistema e l'occupazione. Queste sono le considerazioni emerse a valle del documento *Europa 2020, Innovazione come priorità strategica per la crescita e l'occupazione*.

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo con il fine di creare un sistema sostenibile e di qualità, può garantire il raggiungimento degli obiettivi prefissati nel progetto Europa 2020 dalla Commissione Europea. Infatti, il progetto Europa 2020 (Commissione Europea, 2010) si propone di raggiungere tre grandi priorità, fortemente connesse fra di loro al fine di assicurare una crescita:

- **intelligente**: ovvero, capace di investire nei settori dell'istruzione, dell'innovazione e della ricerca;
- **sostenibile**: ovvero, vigile sulle politiche di risparmio energetico e rispettosa dei cambiamenti climatici;
- **inclusiva**: ovvero, pronta a promuovere tutte le iniziative che garantiscano la coesione sociale e territoriale e a migliorare il mercato del lavoro.

Al fine di raggiungere tali priorità sono stati individuati cinque obiettivi principali per misurare l'avanzamento e il livello della programmazione delineata, ovvero:

- **occupazione**: la strategia prevista dal documento prevede l'innalzamento del tasso di occupazione;
- **ricerca e innovazione**: si deve investire maggiormente nella ricerca e nello sviluppo;
- **cambiamento climatico ed energia**: la strategia prevede una maggiore attenzione ai cambiamenti climatici, riducendo le emissioni dei gas causa dell'effetto serra, e alle politiche energetiche, migliorando l'efficienza energetica e innalzando la quota delle fonti provenienti da energie rinnovabili;
- **istruzione**: si prevede il miglioramento dei livelli di istruzione e la riduzione della dispersione scolastica;
- **lotta contro la povertà**: si prevede la promozione dell'inclusione sociale.

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto garantisce una crescita economica nel settore dei trasporti, rispettando di fatto uno dei criteri che stanno alla base del progetto Europeo. La

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

crescita, tuttavia, non deve intendersi come sola crescita economica, in quanto lo sviluppo dei sistemi di trasporto e il loro continuo miglioramento permette una maggiore sostenibilità e di conseguenza un risparmio energetico, sia in termini di consumi sia in termini di emissioni di gas inquinanti.

L'utilizzo del trasporto collettivo è fortemente influenzato dalla qualità del servizio offerto. Uno dei fattori preponderanti che influenzano il processo di trasferimento modale è la qualità del servizio dei sistemi di trasporto. Per aumentare l'attrattiva dei servizi di trasporto collettivo e pertanto diminuire l'utilizzo dell'automobile, le amministrazioni in collaborazione con le società di trasporto dovrebbero attivarsi al fine di assicurare un'elevata qualità del servizio nel sistema di trasporto pubblico. La qualità del servizio (UNI EN 13816, 2002), distingue quattro tipi di livello di servizio: dal punto di vista del cliente/utente la qualità attesa e la qualità percepita; dal punto di vista dell'organizzazione che eroga il servizio la qualità progettata e la qualità erogata.

Rispetto a qualche decennio fa, i sistemi di trasporto collettivo e più in generale i sistemi di trasporto, hanno avuto un rapido sviluppo e una vertiginosa crescita in termini di tecnologie presenti sui mezzi di trasporto. Tali tecnologie, hanno consentito di progettare sistemi di trasporto più sicuri, più comodi, meno rumorosi e meno inquinanti. Tuttavia, tali misure non risultano, tuttora, sufficienti per raggiungere gli obiettivi prefissati dalla Comunità Europea.

Secondo gli ultimi dati emersi, a livello europeo il consumo energetico del sistema di trasporti (pubblico e privato) si assesta sul 31%, ovvero solo dietro al consumo dovuto al settore terziario e residenziale.

Dai dati europei si evince come la riduzione dei consumi del settore dei trasporti, garantirebbe un risparmio economico e un miglioramento delle condizioni ambientali.

Misurare la qualità dei servizi di trasporto collettivo, risulta essere un tema di fondamentale importanza sia per garantire una qualità sempre maggiore agli utenti che utilizzano i mezzi pubblici sia per renderlo competitivo rispetto al sistema di trasporto privato.

La qualità dei servizi di trasporto collettivo è funzione di molti aspetti, alcuni più facilmente individuabili e misurabili, come ad esempio la frequenza del servizio, il ritardo della corsa, il costo del viaggio, etc., altri, invece, più soggettivi e di conseguenza più difficilmente individuabili e misurabili, come ad esempio, il comfort a bordo, il grado di pulizia, la sicurezza etc. Le tecniche che in letteratura si utilizzano per misurare la qualità dei sistemi di trasporto sono principalmente due:

- customer-based: le misure sono basate solo sulle percezioni degli utenti che utilizzano il servizio di trasporto;
- operational approaches: rappresentano misure più oggettive sulla qualità del sistema di trasporto considerato.

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

In quest'ottica, il progetto di ricerca presentato nel seguente lavoro intende sviluppare alcuni di questi temi e prendendo spunto da tali considerazioni affrontare in modo innovativo la sistematizzazione dei processi di info-mobilità al fine di migliorare i servizi al cittadino, i livelli di sicurezza a bordo e la sostenibilità dei sistemi di trasporto collettivo (TC).

L'idea di base consiste nel coinvolgere gli utenti nel processo di referenziazione della qualità dei servizi e del servizio di trasporto, ribaltando il concetto di customer satisfaction attualmente utilizzato dai gestori dei servizi pubblici, con lo scopo di misurare la qualità e la soddisfazione dei cittadini a partire dalle informazioni e dalle scelte effettuate direttamente dagli utenti.

La ricerca vuole portare alla determinazione del comfort a bordo veicolo, misurandolo con due indicatori di tipo oggettivo, ovvero le vibrazioni, nello specifico si misurerà l'accelerazione trasmessa al corpo dal moto del veicolo, ed il rumore, nello specifico si misurerà il Livello di Pressione Sonora Equivalente Leq (A). Lo scopo della ricerca è quello di progettare e validare un indice che permetta di determinare il grado di comfort a bordo partendo da alcuni valori oggettivi misurati a bordo veicolo.

Nel secondo capitolo verrà affrontato lo studio e la classificazione dei sistemi di trasporto collettivo secondo le principali classificazioni proposte in letteratura. Allo stesso modo verrà affrontato lo studio delle metodologie più note in letteratura per la definizione della qualità del servizio, mediante misure oggettive e soggettive.

Nel terzo capitolo si affronterà lo studio del rumore e delle vibrazioni, descrivendo le caratteristiche e i principali fenomeni fisici delle due grandezze.

Nel quarto capitolo verrà descritta la strumentazione utilizzata a bordo veicolo durante le varie sperimentazioni e i software utilizzati per l'estrapolazione ed elaborazione dei dati.

Nel quinto capitolo verranno descritti i sistemi di trasporto oggetto delle sperimentazioni, ovvero gli autobus e i treni di Ferrovie della Calabria.

Nel sesto capitolo verranno descritte le analisi svolte per l'identificazione delle soglie utili alla determinazione dell'indice di comfort a bordo, i test-sites di riferimento per i due sistemi di trasporto oggetto di studio ed infine l'indagine a campione svolta sugli stessi sistemi di trasporto utili a definire, mediante una scheda di rilevazione, l'indice di comfort CI. Nello stesso capitolo, verrà affrontato il problema del grado di affollamento a bordo utile a capire, in fase di elaborazione, se esiste una stretta correlazione tra comfort vibrazione/acustico e affollamento a bordo.

Nel settimo, ed ultimo, capitolo, verranno analizzati i risultati ottenuti nella fase sperimentale a bordo veicolo, verrà calcolato il valore del Comfort Index CI dei mezzi di trasporto oggetto di studio e verrà mostrato l'utilizzo del GIS per l'elaborazione grafica dei dati. Infine, si validerà la metodologia proposta mediante la comparazione del Comfort Index misurato a bordo veicolo con un Comfort Perceived, ovvero un comfort

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

percepito dall'utente, determinato dal questionario proposto a bordo durante le sperimentazioni.

2. Il trasporto collettivo

2.1. Introduzione

I sistemi di trasporto collettivo sono l'insieme dei mezzi di trasporto che consentono agli utenti, ovvero ai cittadini, di effettuare uno spostamento senza servirsi di veicoli propri. Su tale tema la letteratura scientifica è molto ampia, sono state proposte da vari ricercatori e studiosi diverse classificazioni dei sistemi di trasporto collettivo. Inoltre, in letteratura, molti sono stati gli studi per definire degli indicatori di performance dei sistemi di trasporto collettivo. Sono stati, allo stesso modo, condotti numerosi studi sui metodi di analisi della qualità del servizio offerto ai cittadini e sulle motivazioni che portano un utente ad utilizzare i sistemi di trasporto collettivo a discapito del sistema di trasporto individuale o proprio.

Le nuove tecnologie e il loro continuo miglioramento ha permesso lo sviluppo e la progettazione di sistemi di trasporto collettivo sempre più tecnologici e maggiormente performanti, garantendo di fatto una sostenibilità sempre crescente.

2.2. La classificazione dei sistemi di trasporto collettivo

I sistemi di trasporto collettivo, come noto dalla letteratura scientifica, si possono classificare in funzione di una serie di parametri quali:

- *capacità della linea*: ovvero il numero massimo di unità di trasporto che possono transitare lungo una determinata linea;
- *capacità del veicolo*: ovvero il numero massimo di unità di trasporto che possono essere trasportate da un determinato mezzo di trasporto collettivo;
- *frequenza del servizio*: ovvero il numero di unità di trasporto che transitano ad una stazione/fermata della linea in un'ora;
- *velocità*;
- *posizione del motore*: ovvero se il motore è di tipo a trazione a bordo o è un mezzo di trasporto con motore a terra;
- *tipologia di guida*: ovvero se la guida è libera, semi-vincolata o vincolata;
- *sede viaria su cui avviene lo spostamento*: ovvero se si tratta di sede promiscua (sede viaria parzialmente o totalmente sottoposta ad interferenze del trasporto privato) o sede riservata;
- *tipologia di alimentazione*: ovvero se si tratta di sistemi con alimentazione elettrica, termica, ibrida, etc.

Una prima classificazione tiene conto del tipo di uso dei veicoli. (Vuchic, 1981,1992)
Nella sua classificazione Vuchic, distingue i sistemi di trasporto in:

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

- **sistemi di trasporto collettivo:** indicati con il termine *transit* o *mass transit* consistono in un servizio di trasporto a pagamento rivolto alla collettività con orari e percorsi stabiliti dai gestori del servizio stesso;
- **sistemi di trasporto privato:** sono il sistema più utilizzato e consiste nell'uso di veicoli di proprietà dei singoli utenti;
- **sistemi di trasporto a noleggio:** indicati con il termine *paratransit* consistono nei sistemi di trasporto a pagamento, caratterizzato, tuttavia, da orari e percorsi che sono flessibili e variabili in base alle esigenze degli utenti.

Nello specifico, Vuchic classifica il sistema di trasporto collettivo in quattro sotto-classi, ovvero:

1. **sistemi di trasporto collettivo urbani:** indicati con il termine *street transit*, sono tutti i sistemi di TC che operano in sede promiscua e caratterizzati, spesso, da interferenze esterne dovute al traffico privato (es. autobus, filobus, tram);
2. **sistemi di trasporto collettivo semirapidi:** tali sistemi includono sia quelli in sede promiscua e/o riservata (es. autobus), sia in sede riservata e protetta (es. metropolitane leggere);
3. **sistemi di trasporto collettivo rapidi:** sono tutti i sistemi di trasporto collettivo che operano su sede propria offrendo sicurezza, affidabilità e velocità elevate (es. metropolitane, treni);
4. **sistemi di trasporto collettivo speciali:** consistono nei sistemi di TC che hanno guida completamente automatica (es. funicolari, nastri trasportatori).

Nella Figura 1 si riporta uno schema della classificazione di Vuchic.

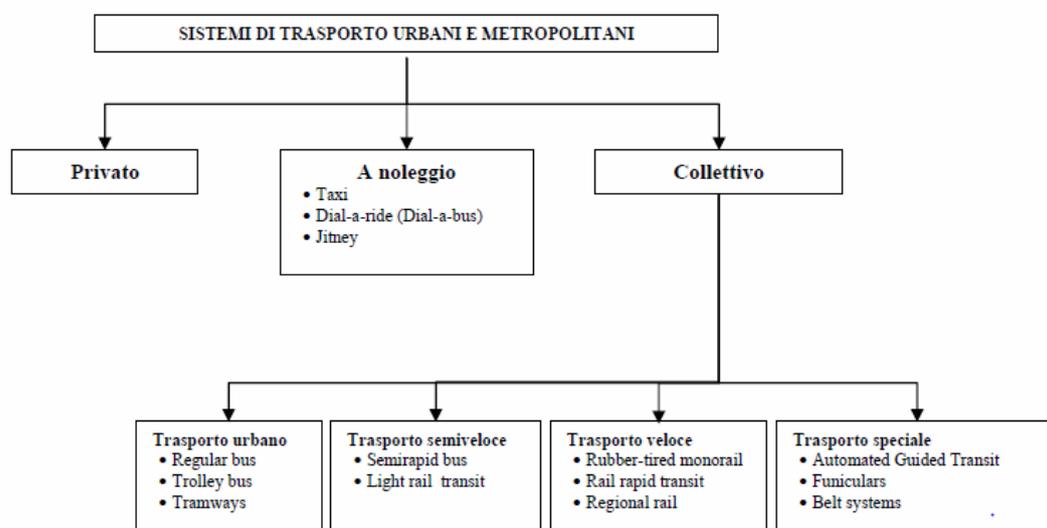


Figura 1: Classificazione dei sistemi di Trasporto Urbani e Metropolitani – Vuchic 1981,1992

Lo stesso Vuchic caratterizza e classifica i sistemi di trasporto collettivo anche in base a:

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

- tipo di sede viaria;
- tecnologia;
- tipo di servizio.

Infine, Vuchic mostra nei grafici di Figura 2 le relazioni elaborate rispettivamente tra:

- capacità del veicolo, frequenza massima e capacità della linea;
- capacità della linea, velocità commerciale e capacità produttiva.

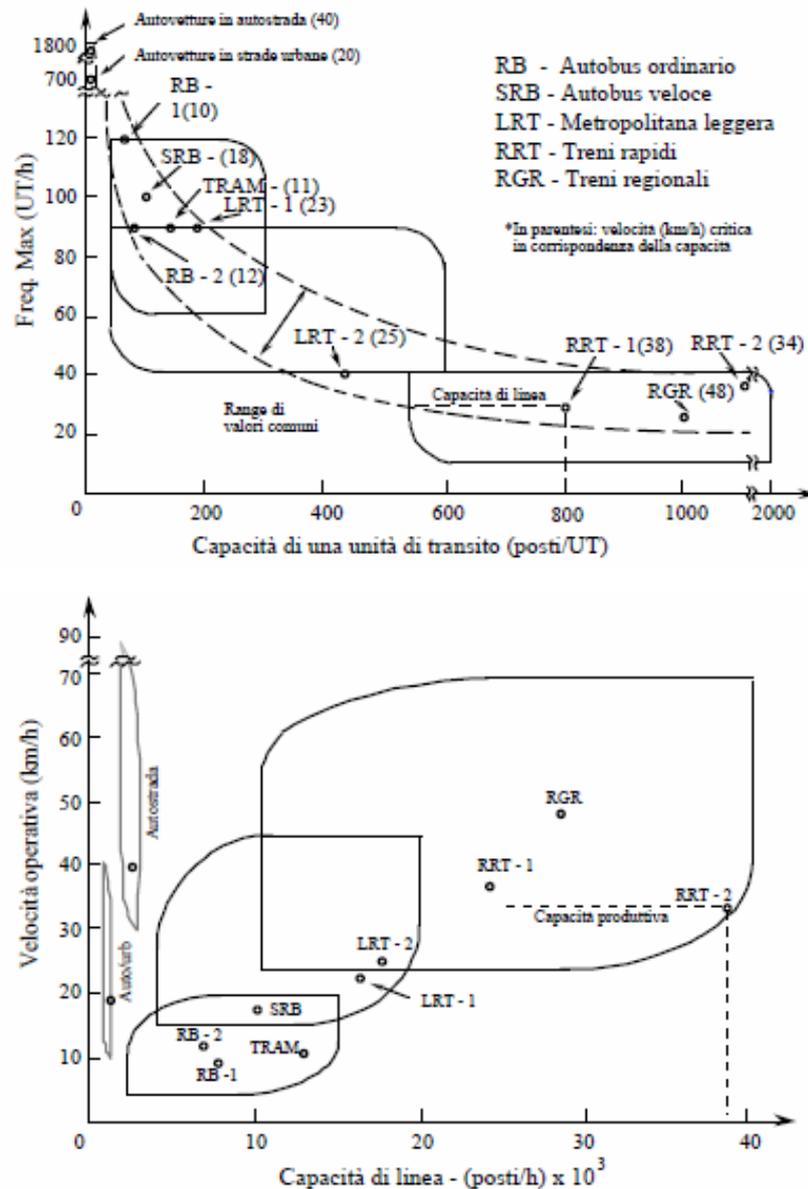


Figura 2: Parametri tecnico-operativi per classi di sistemi di trasporto – Vuchic 1981

Una seconda classificazione (Gelmini, 1988), mette in evidenza le principali caratteristiche dei diversi sistemi di trasporto urbano e metropolitano, classificandoli in:

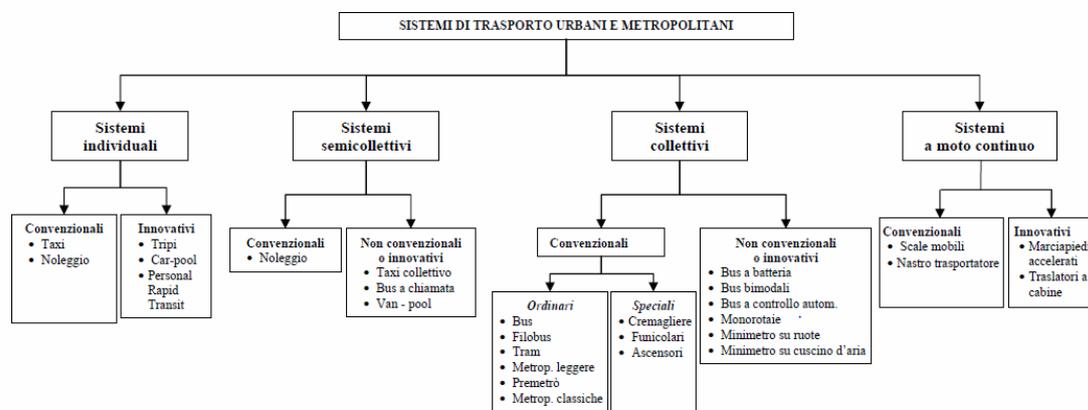
Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

- **sistemi di trasporto individuali:** sono tutti quei sistemi che consentono agli utenti di scegliere orari, origine e destinazione dello spostamento;
- **sistemi di trasporto semi-collettivi:** sono quei sistemi che si differenziano dai precedenti in quanto gli utenti devono pre-accordarsi sul percorso oppure sull'orario e/o sull'origine e destinazione;
- **sistemi di trasporto collettivi:** sono quei sistemi utilizzabili da più utenti contemporaneamente, con orari fissi e specifiche zone di fermata;
- **sistemi di trasporto a moto continuo:** sono tutti quei sistemi che consentono agli utenti di usufruire del servizio in modo continuo, senza attese.

Per ognuna delle categorie, Gelmini distingue i sistemi in sistemi convenzionali e sistemi innovativi. Nello specifico, Gelmini, classifica i sistemi di trasporto collettivo in:

- **sistemi convenzionali ordinari:** autobus, metropolitane leggere, treni regionali, metropolitane;
- **sistemi convenzionali speciali:** ascensori, linee con cremagliera, funicolari;
- **sistemi innovativi:** autobus a batteria, autobus a controllo automatico di guida, monorotaie.

Nella Figura 3 si riporta uno schema della classificazione secondo Gelmini (1988).



Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

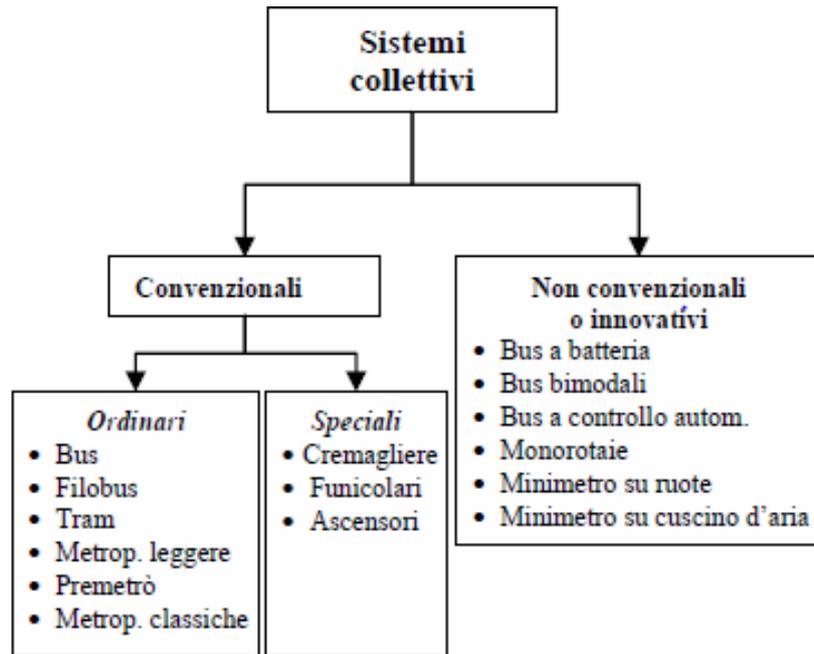


Figura 3: Classificazione dei sistemi di Trasporto Urbano e Metropolitano – Gelmini, 1988

Una terza classificazione è stata proposta, in modo simile a quanto fatto da Vuchic, in rapporto a diverse caratteristiche (Liberatore, 1994):

- **tipo di sede viaria:** viene fatta una distinzione tra sistemi su strade a traffico misto, sistemi completamente indipendenti dal traffico veicolare e sistemi protetti ma con incroci con altro traffico;
- **tecnologie utilizzate:** viene fatta una distinzione tra i sistemi sulla base del tipo di contatto tra veicolo e sede stradale, del tipo di propulsione, del tipo di controllo e del tipo di guida;
- **tipologia di servizio:** viene distinto in base al tipo di viaggio operato (servizio a media distanza, servizio per la città, servizio extraurbano, etc.), al tipo di servizio svolto (servizio locale, servizio celere, etc.), ai periodi di servizio (giornaliero regolare, irregolare, speciale, etc.).

Lo stesso Liberatore punta l'attenzione sui sistemi di trasporto collettivo di massa, rappresentati da sistemi su ferro ad elevata potenzialità come le metropolitane, siano esse classiche o leggere.

Un'ulteriore classificazione (Gattuso, 2001) è stata presentata sulla base di quattro parametri diversi, ovvero:

1 **posizione del motore (Figura 4):**

- motore di trazione a bordo (autobus, filo bus, tram-bus, etc.);
- motore di trazione a terra (funicolare, sistemi con cremagliera, cabinovia, etc.).

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo



Figura 4: Posizione del motore – motore a terra o a bordo – Gattuso,2001

2 tipologia di guida (Figura 5):

- **guida libera:** sono tutti i sistemi di trasporto, quali gli autobus, che non sono vincolati lungo il percorso;
- **guida vincolata:** sono tutti quei sistemi che durante il percorso sono vincolati alla sede viaria, quali metropolitane, tram, etc.;
- **guida semi-vincolata:** sono tutti quei sistemi che ricadono nella categoria intermedia tra le due sopracitate, come ad esempio i filo-bus, i tram, bus, etc.



Figura 5: Tipologia di guida – guida libera, semivincolata o vincolata – Gattuso,2001

3 *grado di separazione della sede viaria (Figura 6):*

- sede promiscua e/o riservata;
- sede riservata e protetta.



Figura 6: Grado di separazione della sede viaria – sede promiscua e/o riservata o sede riservata e protetta – Gattuso, 2001

4 *Tipologia di alimentazione (Figura 7):*

- **alimentazione termica:** sono tutti i sistemi di trasporto con alimentazione diesel o benzina;
- **alimentazione elettrica a bordo:** sono tutti i sistemi di trasporto con motore elettrico;
- **alimentazione elettrica da rete:** sono tutti i sistemi di trasporto che acquisiscono la corrente dalla rete, come i tram;
- **alimentazione ibrida:** sono tutti quei sistemi di trasporto che utilizzano sistemi combinati benzina-elettrico, etc.;
- **alimentazione bi o trimodale:** sono tutti quei sistemi che possono passare da una tipologia di alimentazione ad un'altra.

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo



Figura 7: Tipologia di alimentazione – termica, elettrica a bordo o dalla rete, ibrida, bi o trimodale – Gattuso, 2001

Di seguito (Figura 8), si riporta uno schema riassuntivo della classificazione proposta da Gattuso.

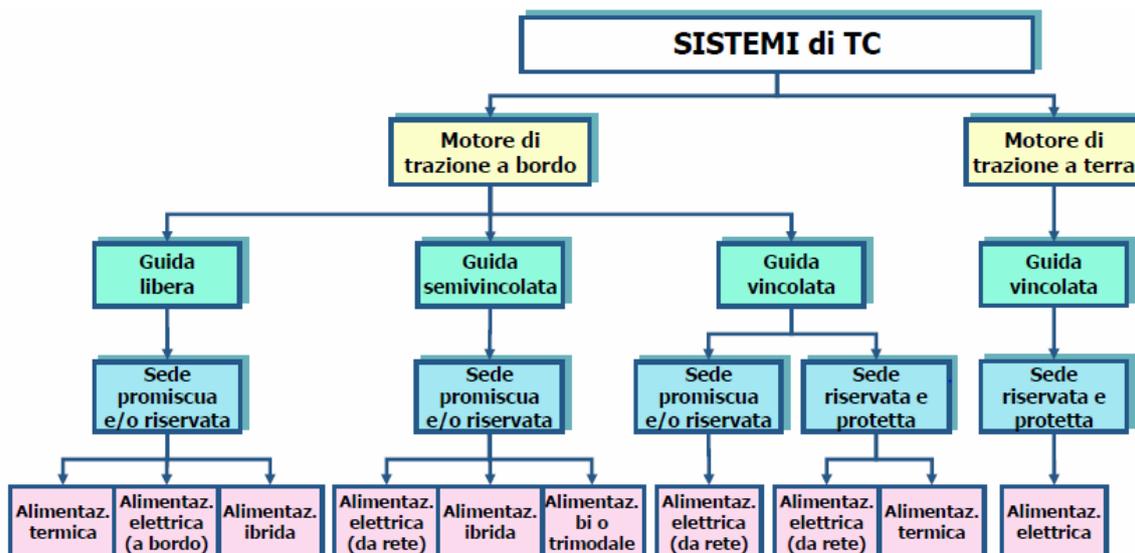


Figura 8: Classificazione dei sistemi di Trasporto Collettivo – Gattuso, 2001

2.3. Gli indicatori di prestazione nei trasporti collettivi

Gli indicatori di prestazioni vengono utilizzati per descrivere e/o misurare uno specifico aspetto del funzionamento di un'azienda di trasporto o di una specifica linea o corsa. Tali indicatori, devono possedere delle caratteristiche particolari che consentono un utilizzo semplice ed affidabile, essendo in grado di interpretare le variazioni nel tempo delle caratteristiche del sistema di trasporto e la differenza tra diverse condizioni.

Gli indicatori sono, altresì, utili e necessari per prevedere (in fase di pianificazione o di progettazione dell'esercizio) e verificare (in fase di controllo della gestione

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

dell'esercizio) le prestazioni del sistema di trasporto. Nel primo caso, vengono *calcolati a priori* in base a previsioni quindi mediante una simulazione, nel secondo caso, invece, sono *misurati o calcolati* in relazione all'effettivo funzionamento del sistema, quindi durante l'esercizio del sistema stesso.

Gli indicatori usati per misure di prestazione di un sistema di trasporto collettivo possono essere ricondotti a tre concetti del servizio:

- *efficienza*: misurata come rapporto tra una quantità di output prodotto e una quantità di input consumato nel processo;
- *produttività*: misurata in base al tempo che si impiega per produrre un determinato servizio;
- *consumo e produzione*: misurato come il rapporto tra la quantità di risorsa (input) utilizzata nel processo di produzione e la quantità di output prodotti.

Le principali prestazioni di un sistema di trasporto collettivo sono:

- *capacità di trasporto*: rappresenta il numero massimo di passeggeri/ora che il sistema di trasporto riesce a trasportare lungo un senso di marcia;
- *velocità commerciale*: rappresenta l'effettivo tempo speso per compiere un dato percorso, includendo tutti i tempi accessori e le soste del viaggio;
- *sicurezza*: rappresenta il grado di sicurezza a bordo del sistema di trasporto collettivo;
- *impatto ambientale*: si intende il grado di intrusione fisica e visiva, l'inquinamento acustico e/o atmosferico prodotto dal mezzo, etc.;
- *costi di esercizio*: sono i costi necessari per garantire il servizio;
- *costi di investimento*: sono i costi necessari per realizzare il sistema di trasporto collettivo.

Le prestazioni di un sistema di trasporto collettivo possono essere valutate da diversi soggetti, quali gli operatori del servizio di trasporto, gli utenti (passeggeri del servizio di trasporto) e i non-utenti (cittadini che non utilizzano il servizio di trasporto collettivo). Ciò implica che la percezione delle prestazioni è diversa anche in funzione dell'operatore, in particolare l'utente sarà indirizzato a dare maggior peso alla durata del viaggio, alla regolarità del servizio, alla sicurezza a bordo o alla frequenza del servizio, invece, l'operatore del servizio di trasporto sarà indirizzato a dare maggior peso al costo di viaggio e alla capacità di trasporto.

La letteratura scientifica definisce l'affidabilità del servizio di trasporto uno degli aspetti maggiormente importanti nella definizione della prestazione del servizio. Un primo studio (Turnquist & Blume, 1980), definisce l'affidabilità del servizio come "*l'abilità di un sistema di trasporto collettivo di rispettare l'orario programmato e di mantenere intertempi e tempi di viaggio regolari*". Altre ricerche (Koenig, 1980) e (Murray & Wu, 2003), mostrano come l'affidabilità del servizio sia strettamente correlata all'accessibilità al trasporto collettivo, ovvero alla capacità di un sistema di trasportare dei passeggeri, a

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

costi ragionevoli, da un punto di origine ad un punto di destinazione. Allo stesso tempo, l'affidabilità di un servizio di trasporto può incrementare l'attrazione di nuovi utenti, invece, al contrario un servizio inaffidabile comporta incrementi di tempi di viaggio e di attesa di passeggeri, portando alla perdita di passeggeri (El-Geneidy, Horning, & Krizek, 2007).

Un ulteriore studio (Wachs, 1976) spiega come i tempi di attesa alle fermate, di accesso/egresso, di trasbordo vengono percepiti dai passeggeri come più onerosi del tempo a bordo. In quest'ottica, maggiore sarà la frequenza del servizio, minore sarà il tempo di attesa alle fermate e migliore sarà la percezione dell'utente della qualità del servizio (Transportation Reserch Board TRB, 2003a)

Come già detto in precedenza, per l'utente, il costo di viaggio non viene percepito come fattore rilevante nella scelta del mezzo di trasporto, infatti come mostrato da alcuni studi (Beirão & Sarsfield-Cabral, 2007) il mezzo di trasporto collettivo viene percepito dall'utente come meno costoso del mezzo di trasporto privato. Tale teoria è corroborata da altri studi effettuati anche in precedenza (Wallin Rex & Wright, 1974), i quali hanno dimostrato, infatti, che il costo monetario del viaggio non è particolarmente influente nella scelta del mezzo di trasporto.

Il TRB (Transportation Reserch Board TRB, 2003a), mostra come le attrezzature fornite all'utente del sistema di trasporto collettivo, quali panchine, pensiline, etc., sono considerati aspetti aggiuntivi e non necessariamente richiesti e di conseguenza non fondamentali nella definizione della qualità del servizio.

Uno degli aspetti che, ad oggi, maggiormente incide sulla scelta del sistema di trasporto, e sul quale questa ricerca si vuole soffermare, è il comfort a bordo percepito dagli utenti durante un viaggio. Nello specifico, per gli utenti, il viaggio confortevole è funzione di alcuni fattori, quali presenza di aria condizionata, pulizia dei posti a sedere, comodità dei posti a sedere, poca rumorosità all'interno del mezzo, basso grado di affollamento a bordo.

Una delle problematiche che maggiormente risultano importanti per gli utenti dei servizi di trasporto collettivo, anche se per assurdo non è considerata una delle componenti principali per la scelta della modalità di trasporto, è rappresentata dalla sicurezza a bordo. La sicurezza del passeggero a bordo di un sistema di trasporto collettivo è intesa come la probabilità per un utente di essere coinvolto in un incidente stradale oppure come la probabilità di subire furti e/o molestie. L'importanza di tale fattore è ampiamente sottolineata in numerosi articoli scientifici. In alcuni studi (Solomon, Solomon, & Sillien, 1968) si mostrano i risultati ottenuti sui mezzi di trasporto urbano della città di New York in merito alle dinamiche psicologiche degli utenti del servizio di trasporto collettivo.

Lo studio prodotto da Eboli L. e Mazzulla G. (Eboli & Mazzulla, 2010), mostra l'uso di una nuova metodologia per l'identificazione dei parametri che maggiormente incidono nella qualità del servizio secondo gli utenti.

2.4. Misura della qualità del servizio

La normativa UNI EN 13816 regola i requisiti per la definizione, determinazione e misurazione della qualità di un servizio di trasporto pubblico di passeggeri, fornendo le linee guida per la selezione di metodi di misurazione (UNI EN 13816, 2002). L'obiettivo di tale norma è quello di promuovere un approccio di gestione ed assicurazione della qualità nel settore del trasporto pubblico focalizzando l'attenzione sulle esigenze e/o le aspettative dei clienti, specificando dei procedimenti che siano in grado di:

- attirare l'attenzione delle parti responsabili su determinate questioni;
- condurre a decisioni rilevanti e ben fondate;
- consentire ai clienti e/o ad altri di confrontare, in modo affidabile, la qualità del servizio offerto con quello offerto da fornitori alternativi;
- contribuire ad un miglioramento continuo del sistema di trasporto pubblico.

I vantaggi offerti dall'attuazione della norma UNI EN 13816 consistono nel garantire una maggiore capacità nella destinazione delle risorse disponibili alle attività che, in modo reale, migliorano la soddisfazione del cliente e il ritorno economico dei fornitori dei servizi.

La suddetta normativa si basa su un concetto chiaro, ovvero il concetto di *ciclo della qualità del servizio*, che viene schematizzato, nella stessa norma, in Figura 9.

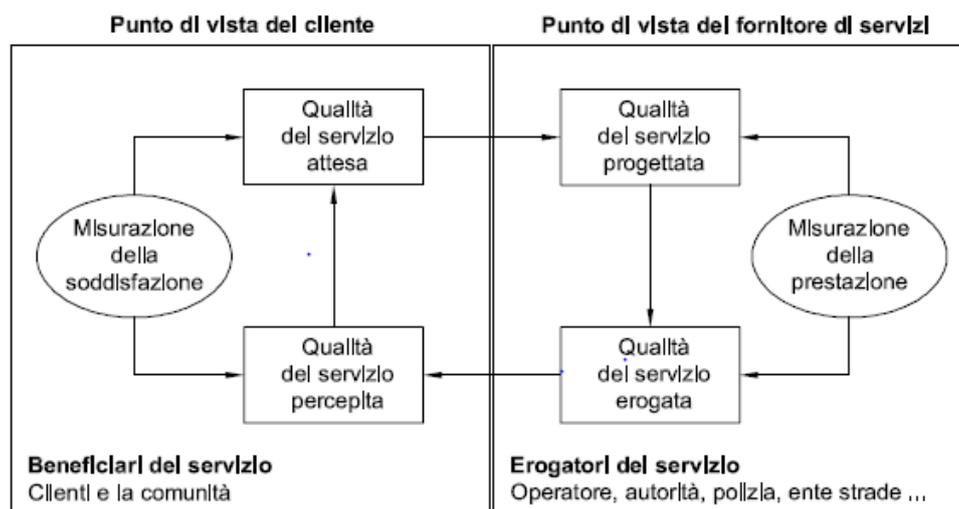


Figura 9: Ciclo della qualità del servizio - UNI EN 13816

Come mostrato dalla Figura 9, esistono quattro differenti punti di vista sulla qualità di un servizio di trasporto pubblico e il rapporto tra questi quattro punti di vista è di massima importanza ed il mancato riconoscimento di questi quattro punti di vista, riferito allo stesso servizio, può ostacolare l'operatore nel suo tentativo di erogare una qualità del

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

servizio pari a quella attesa dagli utenti. Gli elementi determinanti del ciclo della qualità del servizio sono:

1. **qualità del servizio attesa:** rappresenta il livello di qualità esplicitamente o implicitamente richiesto dal cliente. Tale livello di qualità può essere considerato come la somma di un numero di criteri di qualità ponderati;
2. **qualità del servizio progettata:** rappresenta il livello di qualità che il fornitore di servizi intende erogare per i propri clienti. Tale livello di qualità è fortemente influenzato dalla qualità attesa dai clienti, da pressioni interne e/o esterne, da limiti tecnici e/o economici e dalle prestazioni di altri fornitori del servizio di trasporto;
3. **qualità del servizio erogata:** rappresenta il livello di qualità ottenuto su base giornaliera ed è misurata dal punto di vista del cliente;
4. **qualità del servizio percepita:** rappresenta il livello di qualità percepito dagli utenti; la percezione che gli utenti hanno dipende dall'esperienza personale del servizio, dalle informazioni e dall'ambiente personale.

La qualità complessiva del trasporto pubblico è determinata da un grande numero di criteri, quali:

1. **disponibilità:** ambito del servizio erogato in termini di area geografica, orari, frequenza e modalità di trasporto;
2. **accessibilità:** accesso al sistema di trasporto pubblico, incluso l'interazione con altre modalità di trasporto;
3. **informazioni:** diffusione sistematica di notizie sul sistema di trasporto al fine di facilitarne la pianificazione e l'esecuzione del viaggio da parte degli utilizzatori;
4. **tempo:** aspetti temporali (tempi di percorrenza, ritardi etc.) rilevanti l'esecuzione dei viaggi e la pianificazione degli stessi;
5. **attenzione del cliente:** elementi del servizio introdotti per soddisfare le esigenze dei clienti;
6. **comfort:** elementi del servizio introdotti per rendere i viaggi sui mezzi di trasporto più rilassanti e piacevoli;
7. **sicurezza:** grado di protezione avvertito dagli utenti, derivante da misure attuate e da attività volte a garantire che i clienti siano informati di tali misure;
8. **impatto ambientale:** effetto sull'ambiente che deriva dall'erogazione del servizio di trasporto pubblico.

La stessa normativa definisce come gli erogatori del servizio di trasporto, siano essi autorità pubbliche, società, operatori e/o terze parti, debbano adottare un sistema di gestione per la qualità del servizio. La UNI EN 13816 indica tutte le azioni da tenere in considerazione per la definizione della qualità del servizio:

1. identificare le aspettative implicite ed esplicite del cliente in merito alla qualità del servizio di trasporto;
2. tenere in considerazione i vincoli legali, politici, finanziari, tecnici e/o di altra natura;

3. identificare i livelli qualitativi esistenti;
4. esportare i dati ricavati in criteri di qualità misurabili;
5. misurare la prestazione;
6. intraprendere eventuali azioni correttive per migliorare la prestazione e più in generale la qualità del servizio;
7. valutare la percezione del cliente sulla qualità erogata;
8. elaborare ed attuare dei piani di azione per ridurre il divario tra qualità erogata e qualità percepita e tra qualità attesa e qualità percepita.

Le principali tipologie di indagini, riportate nella UNI EN13816, che possono essere svolte per misurare la qualità del servizio sono:

1. **Indagini sulla Soddisfazione del Cliente (ISC):** si tratta di uno strumento atto a misurare la soddisfazione degli utenti (customer satisfaction). Tali indagini sono progettate per valutare il grado di soddisfazione del cliente in relazione all'erogazione del servizio. L'indagine di customer satisfaction non è una misura precisa e si riferisce alla parte sinistra del ciclo della qualità. Gli utenti danno una definizione del loro grado di soddisfazione in base ad una scala definita a priori, gli stessi utenti, devono essere intervistati in modo tra loro indipendente in modo da non influenzare il loro giudizio.
2. **Indagine Cliente Misterioso (ICM):** si tratta di un'indagine che misura la qualità del servizio, basandosi su osservazioni obiettive condotte in modo indipendente da osservatori "addestrati". Tale tipologia di indagine, permette di monitorare elementi specifici del servizio che riguardano degli aspetti di maggiore rilevanza per il cliente.
3. **Misure Dirette della Prestazione (MDP):** si tratta di misure che monitorano la prestazione effettiva del servizio di trasporto, sia in modo continuativo sia a campione. In tali indagini è necessario definire in modo appropriato le misure da realizzare in modo che il risultato sia finalizzato all'impatto sulla prestazione vista nell'ottica dell'utente finale.

Al fine di migliorare la qualità del servizio di trasporto è necessario, come già ampiamente detto, misurarne la qualità. In letteratura esistono due metodi di misura della qualità, il primo si basa su *misure di tipo soggettivo*, il secondo si basa su *misure di tipo oggettivo*.

2.4.1. Misure soggettive della qualità del servizio

Le misure soggettive sono basate sull'analisi di percezioni degli utenti, che utilizzano il sistema di trasporto, su diversi aspetti che lo caratterizzano. In particolare, le misure soggettive si basano sull'analisi di dati rilevati su utenti che utilizzano il sistema di trasporto mediante delle interviste di customer satisfaction, nelle quali gli utenti esprimono un proprio giudizio, in merito a particolari aspetti del sistema di trasporto, sulla qualità percepita a bordo, assegnando un voto di soddisfazione e/o importanza. In

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

quest'ottica la letteratura scientifica ha più volte studiato la soggettività degli utenti nella definizione della qualità del servizio.

I risultati presentati da Beirao e Sarsfield-Cabral (Beirão & Sarsfield-Cabral, 2007) sono figli di uno studio qualitativo rivolto agli utenti del servizio di trasporto pubblico, abituali e/o occasionali, con lo scopo di ottenere una migliore comprensione degli atteggiamenti degli utenti stessi, verso il sistema di trasporto per individuare quali aspetti incidono nella definizione della qualità del servizio. Da tale studio, emerge come per incrementare l'utilizzo del servizio di trasporto collettivo bisognerebbe progettare tali servizi per migliorare la qualità prevista dagli utenti con lo scopo di attrarre nuova utenza. Nello studio, si esplicita, inoltre, come la scelta del sistema di trasporto sia strettamente legata allo stile di vita dell'utente (ad esempio, un utente più ricco è meno portato all'uso di sistemi di trasporto collettivo), al tipo di viaggio e/o alle prestazioni del servizio (ad esempio tempo di attesa, tempo di viaggio, etc.). Gli stessi autori, in un altro studio (Beirão & Sarsfield-Cabral, 2006), mostrano come secondo gli utenti, i servizi di trasporto collettivo debbano essere più flessibili per rispondere alle diverse esigenze degli utenti.

Un altro studio Europeo (Friman, 2004), propone una ricerca basata sull'analisi degli effetti dovuti ai miglioramenti portati alla qualità del servizio del sistema di trasporto collettivo, basandosi sulla soddisfazione di utenti abituali che usufruiscono del servizio. Tale studio, svolto in Svezia, ha dimostrato come la soddisfazione degli utenti non è strettamente correlata ai miglioramenti della qualità del servizio.

Nel 2008, viene condotto uno studio sugli utenti della metropolitana di Los Angeles (USA), con lo scopo di analizzare la percezione degli utenti sulla qualità dei servizi alle fermate/stazioni della metropolitana. Lo studio mostra una calibrazione di un modello di regressione logistica ordinale per misurare l'influenza di 16 fattori relativi alle fermate/stazioni sulla soddisfazione generale dell'utente (Iseki & Taylor, 2008).

Analisi statistiche più complesse (Joewono & Kubota, 2007), hanno esaminato un servizio di trasporto collettivo Indonesiano, usando la path analys, per capire le relazioni tra le variabili e per studiare il potere predittivo delle stesse, metodi di regressione binomiale, per distinguere gli utenti abituali. In un ulteriore studio (Nurul-Habib, Kattan, & Islaam, 2009), si mostra lo sviluppo di un modello MNL (MultiNomial Logit) combinato con altri modello con lo scopo di recuperare i fattori inosservati nella definizione della percezione e dell'attitudine dell'utente. Lo studio viene condotto su un campione di utenti ai quali viene richiesto di esprimere un giudizio di soddisfazione, in scala da 1 a 5, e di identificare le principali ragioni che spingono gli stessi utenti a preferire il sistema di trasporto considerato rispetto ad altri, definendo percezioni e attitudini degli utenti verso i sistemi di trasporto collettivo.

Molti studi utilizzano delle indagini di tipo SP (Stated Preferences), nelle quali gli utenti intervistati forniscono un proprio giudizio su alcuni aspetti del servizio di trasporto

collettivo considerato, con lo scopo di calibrare dei modelli di tipo Logit per la stima dell'importanza di ciascun attributo considerato sulla qualità del servizio complessivo. Studi del genere sono stati condotti da numerosi ricercatori in molti articoli scientifici (Prioni & Hensher, 2000), (Hensher, Stopper, & Bullock, 2003), (Eboli & Mazzulla, 2008a) e (Eboli & Mazzulla, 2008b). In tali studi si propongono varie tipologie di modelli come Multinomial Logit oppure mixed Logit.

2.4.2. Misure oggettive della qualità del servizio

Secondo il TRB (Transportation Research Board TRB, 1999) le misure di tipo oggettivo, al contrario delle precedenti, si basano sulla valutazione di alcune misure disaggregate di performance, con lo scopo di verificare l'abilità degli operatori del servizio di trasporto collettivo ad accogliere le esigenze dei propri clienti, siano essi passeggeri abituali (attuali) oppure potenziali. Nei metodi oggettivi, si confronta il valore numerico assunto dall'indicatore misurato con un valore standardizzato o con il valore medio con lo scopo di ottenere una stima oggettiva della qualità di quel particolare parametro considerato. In tali metodi i parametri da considerare, detti "criteri di prestazione", sono indicatori definiti a priori. Per realizzare misure oggettive i criteri di valutazione devono avere le seguenti caratteristiche:

- ***appropriatezza***: la misura deve essere realmente influente nella percezione della qualità degli utenti;
- ***misurabilità***: la misura deve essere facilmente misurabile con un definito grado di accuratezza e di affidabilità;
- ***realismo***: i dati raccolti devono essere raccolti, estrapolati e/o creati senza troppa difficoltà e perdita di tempo;
- ***difendibilità***: la misura deve essere chiara, decisa ed inconfutabile;
- ***universalità***: ogni parametro si deve poter generalizzare senza soffermarsi sul singolo caso.

Gli studi condotti dal TRB, (Transportation Research Board TRB, 2003a), (Transportation Research Board TRB, 1999) e (Transportation Research Board TRB, 2003b), si riconducono alla definizione di cinque aspetti della qualità del servizio di trasporto collettivo:

1. ***disponibilità del servizio di trasporto***: facilità per i passeggeri di accedere al servizio;
2. ***monitoraggio del servizio***;
3. ***tempi di viaggio***;
4. ***sicurezza dei passeggeri a bordo***: possibilità reale o percepita dagli utenti di essere coinvolti in un incidente e/o essere vittima di un crimine;
5. ***manutenzione***.

Per ciascuno di questi aspetti si fa riferimento ad alcuni indicatori di livelli di performance.

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

Nel manuale del TRB (Transportation Research Board TRB, 2003b), si introduce il concetto di LoS (Livello di Servizio, Level of Service) come misura della qualità del servizio di trasporto collettivo. Tali livelli sono misurati, così come per le intersezioni stradali, con una scala che va dal livello “A” (alta qualità) al livello “F” (bassa qualità).

Uno studio pubblicato nel 1997 (Nakanishi, 1997), propone una misura di due soli indicatori di performance dei bus, ovvero la puntualità e la regolarità del servizio. Invece, Bertini e El-Geneidy (Bertini & El-Geneidy, 2003) raccomandano alcuni indicatori legati all’accessibilità del servizio, ai livelli di mobilità e allo sviluppo economico, per definire la qualità del servizio di trasporto collettivo, come ad esempio la durata media del viaggio, tempo medio di trasferimento/ritardo, frequenza del servizio, tempo medio di attesa per salire/scendere, numero di viaggi, tempo di trasbordo, etc.

Lo studio condotto da due autori (Tyrinopoulos & Aifadopoulou, 2008), propone una metodologia per la definizione e il controllo della qualità dei servizi offerti agli utenti di una azienda di trasporto pubblico. In questo studio, sviluppato dall’Istituto Ellenico dei Trasporti, si sono analizzati 39 indicatori, classificati in sette categorie:

1. **sicurezza-comfort-pulizia:** si sono analizzati attributi di qualità legati alla sicurezza dei viaggi, la sicurezza nei punti di arresto/fermata, il comfort a bordo degli utenti, la pulizia dei veicoli e la pulizia dei terminali/fermate;
2. **informazione-comunicazione con i passeggeri:** si sono analizzati attributi relativi alla qualità, alla completezza delle informazioni fornite agli utenti e alla tempestività con cui le informazioni vengono fornite;
3. **accessibilità:** si sono analizzati attributi relativi alla facilità di accesso per persone anziane e/o disabili, alla distanza tra i punti di vendita dei biglietti con il punto di origine e/o di arresto, la distanza e il tempo tra i punti di interscambio;
4. **performance dei terminali/fermate:** si sono analizzati attributi relativi alla qualità dei punti di fermata e/o dei terminali, con particolare attenzione ai tempi di attesa nelle fermate/terminali;
5. **performance delle linee:** si sono analizzati dati relativi alle linee come ad esempio la velocità media dei veicoli, il carico dei veicoli, la frequenza della linea etc.;
6. **indicatori generali del sistema di trasporto pubblico:** si sono analizzati tutti quelli indicatori propri del sistema di trasporto, come le ore di fornitura del servizio, il tempo di attesa per l’acquisto del biglietto, la copertura della rete locale, i tipi di biglietti/abbonamento disponibili, le condizioni delle fermate e dei terminali, etc.;
7. **indicatori composti:** sono indicatori ottenuti combinando una serie di indicatori descritti nelle precedenti categorie. Si considera una misura di customer satisfaction per tener conto delle percezioni degli utenti.

Gli stessi autori, suggeriscono l’utilizzo di tecniche statistiche di analisi fattoriale e regressione logistica per indagare sulle relazioni esistenti tra customer satisfaction e indicatori di performance operativi del sistema di trasporto.

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

Un'ulteriore metodologia (Nathanail, 2008), è stata proposta con lo scopo di monitorare la qualità dei servizi ferroviari ellenici. La metodologia sviluppata è basata sulla stima di 22 indicatori raggruppati in 6 criteri:

1. *sistema di sicurezza;*
2. *pulizia;*
3. *comfort dei passeggeri;*
4. *manutenzione;*
5. *informazione ai passeggeri;*
6. *accuratezza dell'itinerario.*

Lo studio propone un indice di performance, ottenuto combinando indicatori oggettivi e giudizi soggettivi degli utenti. Tale indice è ottenuto mediante l'uso di parametri qualitativi e quantitativi ricavati dalle banche dati dell'operatore ferroviario oppure ottenuti mediante un'indagine campionaria rivolta agli stessi utenti.

3. Il rumore e le vibrazioni a bordo veicolo

3.1. Caratteristiche del rumore

Viene definito “rumore” ogni tipo di suono capace di disturbare, infastidire o addirittura intaccare l’integrità fisica e psichica dell’individuo (Termolan, 2016). Esso è, nell’epoca odierna, una delle maggiori cause di stress e di danni alla salute umana. Per tale ragione, al fine di assicurare un’alta qualità della vita, è necessario considerarlo come uno degli aspetti primari da tenere sotto controllo. Molto spesso, il concetto di tranquillità e di comfort vengono associati all’assenza di elementi di disturbo associato a rumori. Nel corso degli anni, il problema dell’inquinamento acustico è stato posto al centro dell’attenzione al punto tale da essere stato oggetto di provvedimenti legislativi sempre più restrittivi e vincolanti. Le norme europee in materia, accanto all’emanazione di leggi nazionali e regionali, hanno di fatto messo al centro dell’attenzione la problematica del rumore associata a diverse tipologie di sorgenti.

La definizione di “suono”, settorialmente appartenente alla fisica, è legata alla propagazione di onde “acustiche” nei mezzi elastici (gas, liquidi, solidi). In assenza di materia, quindi in condizioni di “vuoto”, non si ha alcuna emissione sonora. Il suono aereo è generato da molteplici fenomeni: quando un gas muta in maniera improvvisa il suo volume (in caso di esplosione, detonazione, scoppio di aria compressa), quando un flusso di gas o movimenti veloci impressi a corpi solidi generano vortici (nel caso di fuoriuscita di aria compressa, rumori associati a masse d’aria in movimento), quando colonne d’aria sono sottoposte a oscillazioni (nel caso, ad esempio, di strumenti musicali a fiato), quando le oscillazioni di corpi solidi si trasmettono all’aria circostante (nel caso di movimenti di campane, diapason, membrane di altoparlanti). Il suono, come mostrato in Figura 10, è associato ai movimenti delle particelle di aria.

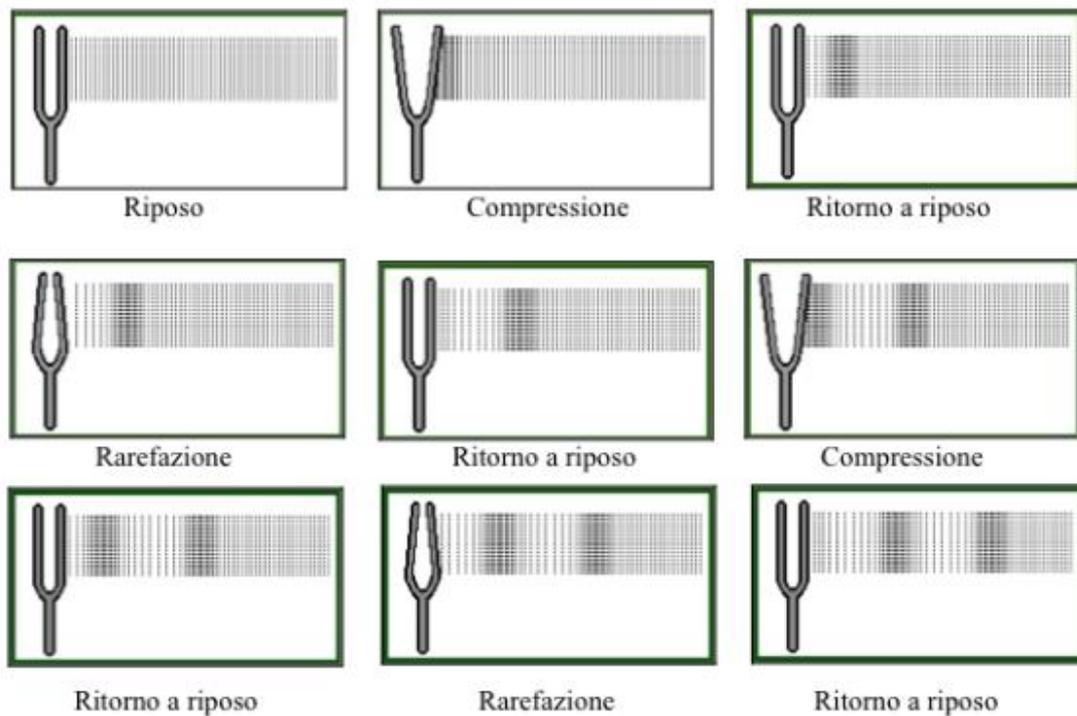


Figura 10: Generazione e propagazione del suono (Fonte: <https://emotionalvoice.wordpress.com/fisica-della-voce/>)

Per approfondire il concetto di rumore, è necessario fare riferimento al concetto di frequenza, grandezza associata al fenomeno periodico che si ripete nell'unità di tempo, che corrisponde al numero delle vibrazioni sonore registrabili in un determinato arco temporale. Un modo per calcolare la frequenza consiste nel fissare un intervallo di tempo, contare il numero di occorrenze dell'evento che si ripete in tale intervallo di tempo e nel dividere quindi il risultato di questo conteggio per l'ampiezza dell'intervallo di tempo. In alternativa, si può misurare l'intervallo di tempo tra gli istanti iniziali di due eventi successivi (periodo T) e quindi calcolare la frequenza (f) come grandezza inversa di questa durata. In termini matematici:

$$f = \frac{1}{T}$$

Il risultato è dato nell'unità di misura chiamata Hertz [Hz], dal fisico tedesco Heinrich Rudolf Hertz, corrispondente al numero di oscillazioni che si verificano in un secondo. Raddoppiando o dimezzando la frequenza, si ha rispettivamente un aumento o una diminuzione pari a un'ottava.

In acustica si considera un tono di 1.000 Hz, a partire dal quale si ottengono per ottava le frequenze centrali (31.5, 63, 125, 250, 500, 1.000, 2.000, 4.000, 8.000, 16.000 Hz). Le frequenze inferiori ai 20 Hz si trovano nel campo degli infrasuoni e quelle superiori ai 20.000 Hz nel campo degli Ultrasuoni (Figura 11).

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

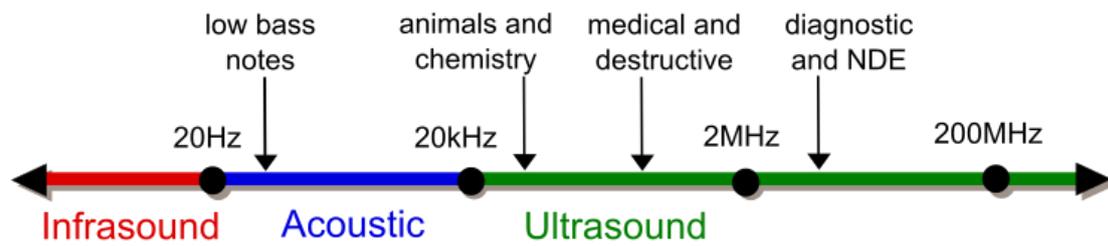


Figura 11: Frequenze approssimate corrispondenti agli Infrasuoni e agli Ultrasuoni (Fonte: <https://it.wikipedia.org/wiki/Ultrasuoni>)

Per periodo dell'oscillazione sonora (T), si intende l'intervallo di tempo che intercorre tra due stati di oscillazione uguali, come mostrato in Figura 12.

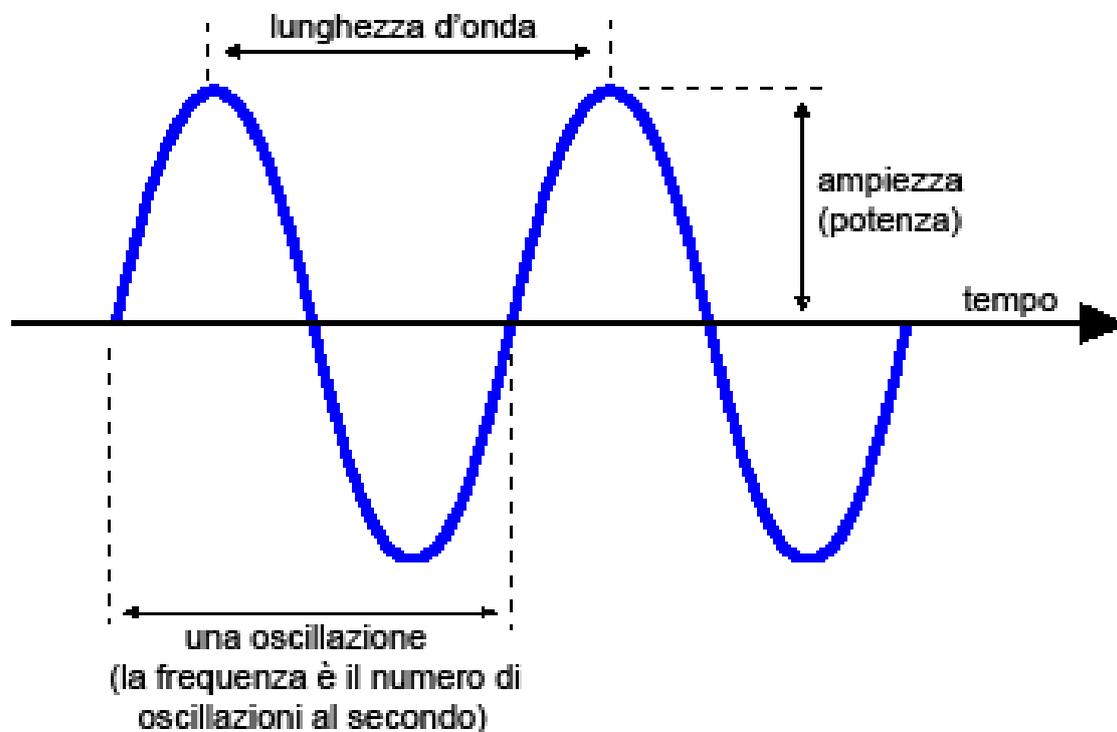


Figura 12: Periodo dell'oscillazione sonora (Fonte: <http://www.elemania.altervista.org/filtri/fourier/fourier7.html>)

Il numero di volte con cui si ripetono tali fenomeni periodici nell'unità di tempo è chiamato frequenza (f) e determina l'altezza tonale del suono. Le oscillazioni o vibrazioni di pressione nell'aria si propagano in tutte le direzioni, secondo un fenomeno definito "propagazione sferica". La velocità di propagazione delle onde sonore varia in funzione di parametri quali la temperatura e le caratteristiche del mezzo, ma è indipendente dalla frequenza.

La lunghezza d'onda λ è la distanza tra due stati uguali di un'onda sonora. A differenza dell'oscillazione sonora, che rappresenta le condizioni di un punto in funzione del tempo,

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

L'onda sonora è il termine che sta ad indicare il comportamento nello spazio e nel tempo della pressione sonora. L'intero treno d'onda si muove alla velocità del suono, per cui si ammettono le relazioni:

$$\lambda = \frac{C}{f} \text{ o } f = \frac{C}{\lambda} \text{ o } C = f * \lambda$$

dove:

- **C**: velocità del suono [m/s];
- **λ** : lunghezza d'onda [m].

L'orecchio umano è sensibile ad un campo di frequenze specifico, che varia tra i 16 Hz e i 20.000 Hz. Pertanto, le lunghezze delle onde sonore percepibili dall'orecchio umano variano da alcuni metri a pochi centimetri (Tabella 1).

Tabella 1: Lunghezze di onde sonore nel campo delle frequenze percepibili dall'uomo

<i>Frequenza f [Hz]</i>	<i>Lunghezza d'onda λ [m]</i>
20.000	0.017
16.000	0.021
10.000	0.034
8.000	0.042
4.000	0.085
2.000	0.17
1.000	0.34
500	0.68
250	1.36
125	2.72
63	5.41
31.5	10.82
16	21.31

I movimenti delle singole particelle d'aria generano oscillazioni di pressione che si sovrappongono alla pressione atmosferica, anche se messe a confronto con essa sono infinitamente più deboli (Figura 13).

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

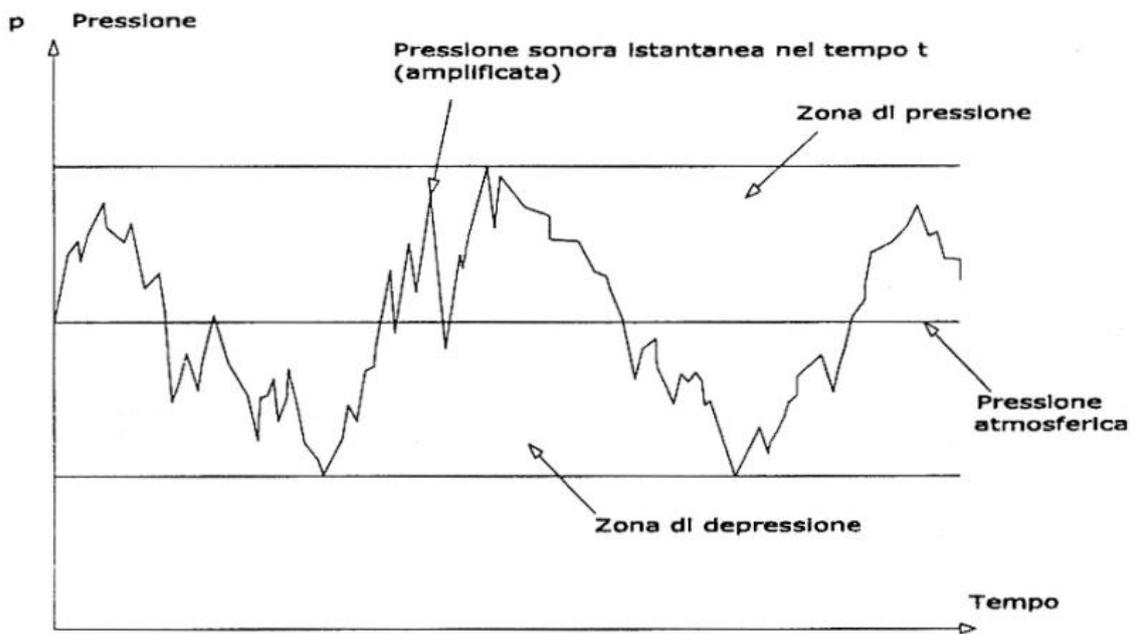


Figura 13: Rapporto tra pressione sonora e pressione acustica

A titolo esemplificativo, si consideri che la pressione atmosferica è circa 100.000 Pa, mentre la massima pressione sonora della voce a 1 metro è circa 1 Pa ($1 \text{ Pa} = 1 \text{ Pascal} = 1 \text{ N/m}^2 = 10 \mu\text{bar}$). La pressione sonora generata da un diapason soggetto ad una semplice eccitazione provoca un'oscillazione sonora ad andamento sinusoidale. In Figura 14 è possibile verificare come il tono 1 sia più forte del tono 2.

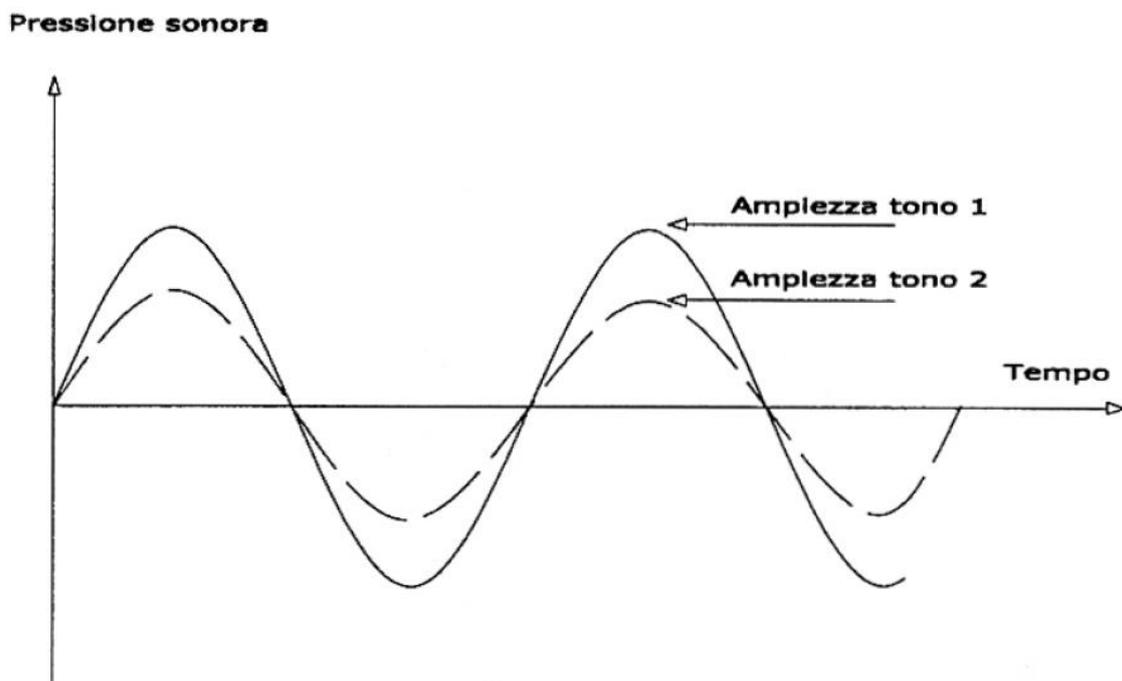


Figura 14: Ampiezza dell'oscillazione sonora

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

In caso di propagazione dell'onda sonora in tutte le direzioni, la pressione sonora diminuisce, mantenendo invariata la sua frequenza. Quando, invece, ci si trova in presenza di sorgente sonora puntiforme, l'ampiezza della pressione decresce della metà ad ogni raddoppio della distanza (Figura 15).

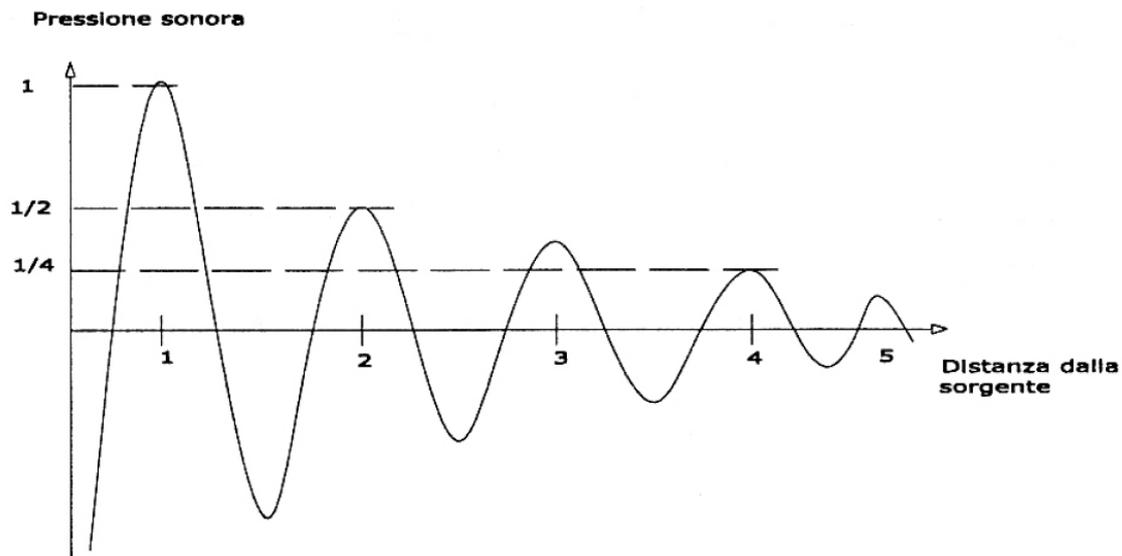


Figura 15: Diminuzione della pressione sonora in relazione alla distanza dalla sorgente

Quando incontra un ostacolo, come mostrato in Figura 16, lungo il percorso di propagazione, il suono viene in parte riflesso e, a seconda delle caratteristiche superficiali dell'ostacolo stesso, in parte assorbito mentre il resto penetra l'ostacolo.

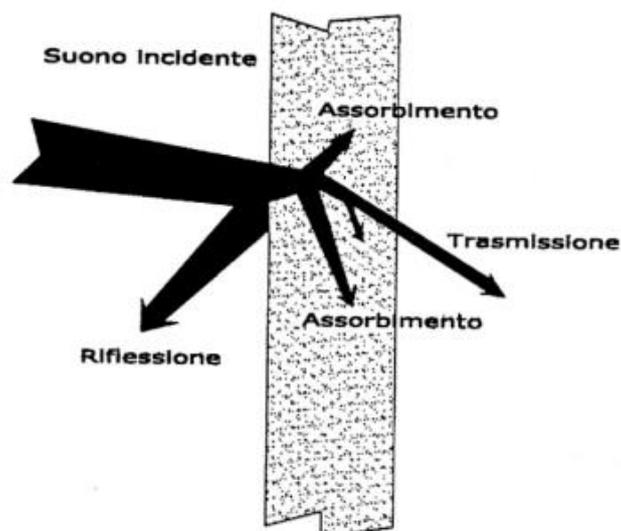


Figura 16: Comportamento del suono incidente rispetto ad un ostacolo

Questi effetti (riflessione, assorbimento e trasmissione) dipendono principalmente dalla lunghezza d'onda del segnale acustico. Le onde corte (corrispondenti alle alte frequenze) possono essere assorbite con materiali di spessore ridotto. Le onde lunghe (corrispondenti alle frequenze basse) tendono invece ad attraversare o ad aggirare l'ostacolo, oppure ne vengono riflesse. Un'ombra acustica può prodursi solo dietro un oggetto le cui dimensioni sono molto superiori alla lunghezza d'onda del segnale acustico.

3.2. Comportamento del suono

Un'onda sonora che durante il suo percorso incontra un altro mezzo di trasmissione modifica il suo comportamento. In funzione delle caratteristiche e delle proprietà fisiche della superficie di separazione possono verificarsi diversi fenomeni: riflessione, rifrazione, diffrazione e interferenza/battimenti. Il metodo con il quale possono essere studiati e descritti i suddetti fenomeni è quello definito "acustica geometrica" (Pascali, 2012).

La riflessione si verifica quando un'onda sonora incontra un ostacolo e viene da esso riflessa (Figura 17).

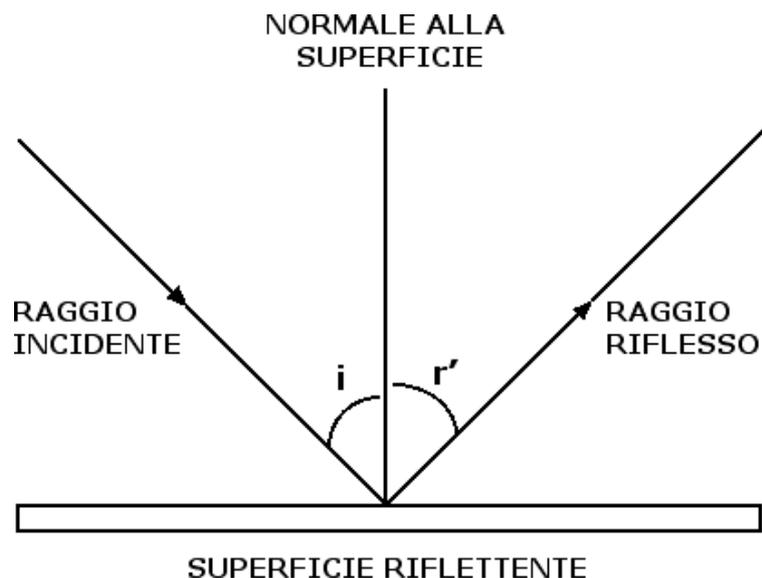


Figura 17: Riflessione di un'onda sonora

In base alla nota legge di riflessione, che regola anche la riflessione delle onde magnetiche e della luce, l'angolo di incidenza (i) del raggio incidente risulta uguale all'angolo di riflessione (r') del raggio riflesso e sia l'angolo di incidenza che l'angolo di riflessione sono complanari e compresi fra i rispettivi raggi e la normale alla superficie riflettente. L'onda si propaga come se fosse emessa da una sorgente virtuale posizionata simmetricamente rispetto alla sorgente reale, da parte opposta alla superficie riflettente. Nel caso in cui la superficie non risulti piana ma curva (concava o convessa) si possono verificare concentrazioni di fronti d'onda (superficie concava) oppure dispersione

(superficie convessa). Se la superficie dell'ostacolo non risulta essere sufficientemente liscia, rispetto alla lunghezza d'onda delle onde sonore incidenti, la riflessione non risulta più di tipo regolare, ma diffusa. Il comportamento delle superfici reali solitamente intermedio tra le due situazioni limite di riflessione speculare su superficie liscia e di riflessione perfettamente diffusa (riflessioni uniformemente distribuite in tutte le direzioni). Esempio classico di riflessione delle onde sonore è l'eco, fenomeno che si verifica quando un suono, incontrando un ostacolo in grado di riflettere le onde sonore incidenti, torna indietro all'ascoltatore con un certo ritardo. L'orecchio umano è in grado di distinguere i due suoni se il tempo che separa l'emissione del suono e l'arrivo dell'onda riflessa è almeno pari a 1/10 di secondo. Se il suono riflesso è più basso di quello diretto, si verifica il fenomeno del mascheramento.

La rifrazione, invece, consiste nel cambiamento di direzione della propagazione dell'onda sonora quando questa attraversa la superficie di separazione di due mezzi aventi densità diversa (Figura 18). Questo cambiamento dipende dal rapporto tra le diverse velocità di propagazione dell'onda nei due mezzi.

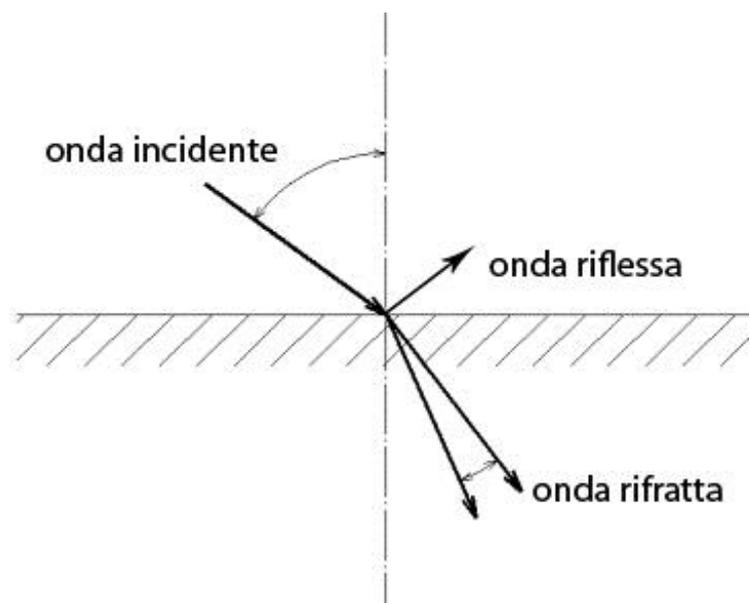


Figura 18: Rifrazione di un'onda sonora

La rifrazione è matematicamente governata dalla legge di Snell, conosciuta come “legge dei seni”:

$$\frac{\text{sen } i}{\text{sen } r} = \frac{n_1}{n_2}$$

dove n_1 è l'indice di rifrazione del primo mezzo, n_2 l'indice di rifrazione del secondo mezzo, i è l'angolo di incidenza che l'onda sonora forma con la normale alla superficie, r è l'angolo di incidenza rifratto con la normale alla superficie. L'angolo di incidenza i e l'angolo di rifrazione r risultano essere complanari.

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

La diffrazione si verifica quando le onde sonore incontrano un ostacolo o una fenditura la cui dimensioni non sono paragonabili con la sua lunghezza d'onda (Figura 19). Essa inoltre si verifica quando le onde sonore oltrepassano il bordo di un ostacolo. Diversi sono i tipi di diffrazione che si possono avere, a seconda della frequenza del suono incidente. La frequenza dell'onda sonora influisce quindi sul tipo di diffrazione che si verifica. Infatti, ad alte frequenze si verificano deformazioni completamente diverse da quelle che si osservano a bassa frequenza. Ci si rende facilmente conto di questo se, ad esempio, si considera la deformazione apportate da una fenditura in una parete.

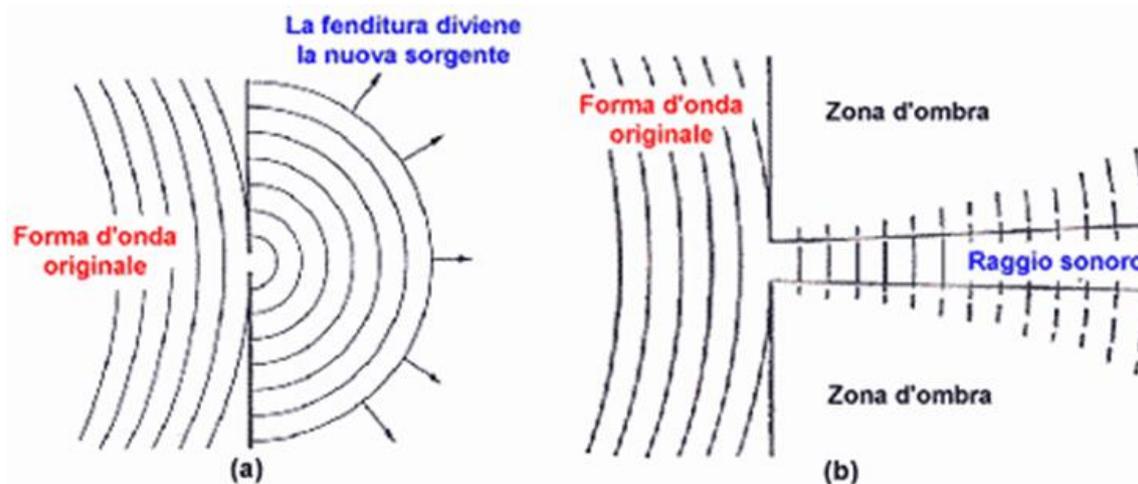


Figura 19: Diffrazione attraverso una fenditura a basse frequenze (a) e ad alte frequenze (b)

Come illustra la Figura 19, a basse frequenze la fenditura, per effetto diffrattivo, diventa sorgente di un'onda sferica, mentre ad alte frequenze dal foro si forma un raggio sonoro che è tanto più collimato tanto più è alta la frequenza. Un altro interessante caso di diffrazione si ha quando si pone una barriera sottile lungo la propagazione dell'onda. Anche qui si ottengono effetti diversi al variare della frequenza dell'onda (Figura 20).

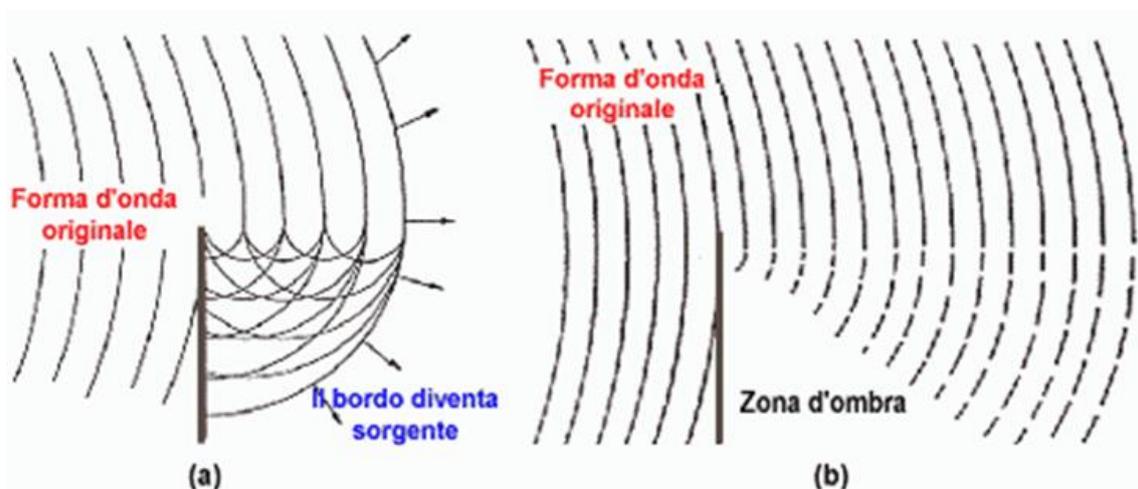


Figura 20: Diffrazione attraverso una barriera a basse frequenze (a) e ad alte frequenze (b)

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

In questo caso ad alte frequenze si viene a creare una zona d'ombra in prossimità della barriera (che potrebbe essere ad esempio un muro) mentre lontano dall'ostacolo l'onda rimane praticamente imperturbata. Differente è l'effetto per le basse frequenze: in questo caso, infatti, il bordo diviene a sua volta sorgente di un'onda cilindrica e il livello sonoro che verrebbe avvertito da un ricevitore posizionato oltre la barriera sarebbe dato dall'interazione dell'onda diretta con l'onda rifratta. In genere, è difficile quantificare l'entità di questi fenomeni sia per basse che per alte frequenze. Vi è però un'importante eccezione: infatti è stata trovata una relazione analitica approssimata per quantificare le variazioni introdotte da uno schermo sottile di lunghezza indefinita posto tra sorgente e ricevitore. Tale approssimazione è nota come relazione di Maekawa, dal nome dello studioso che la presentò. Come mostrato in Figura 21, si ha una sorgente puntiforme (o lineare) di onde sonore, un ricevitore posto ad una certa distanza ed uno schermo (teoricamente di lunghezza indefinita) posto tra sorgente e ricevitore in modo da nascondere il ricevitore alla sorgente.

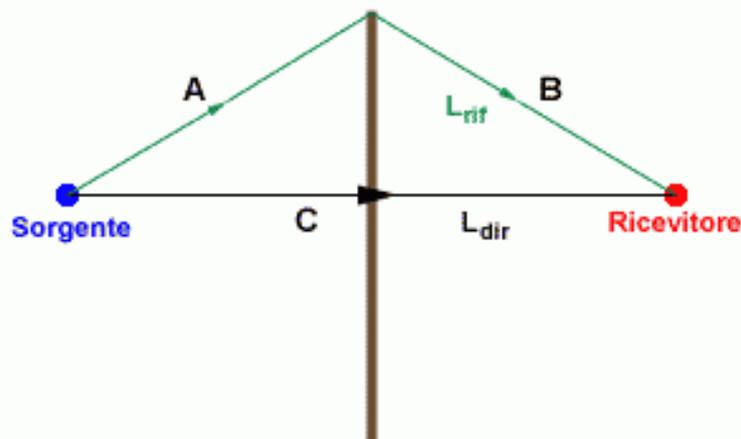


Figura 21: Diffrazione dovuta ad una barriera sottile

La relazione di Maekawa consente di calcolare l'attenuazione dovuta alla presenza della barriera. Tale attenuazione dipende dalla lunghezza d'onda del suono e dalla differenza di cammino, cioè la differenza tra il cammino teorico dell'onda diretta (indicato con la lettera C in Figura 21) e quello reale dell'onda diffratta (indicato con i tratti A e B in Figura 21). Si definisce inoltre il numero di Fresnel N come (tale valore è un numero puro):

$$N = \frac{2\delta}{\lambda} = \frac{2\delta f}{c}$$

Nelle relazioni proposte da Maekawa l'attenuazione dipende dal solo numero di Fresnel e, se rappresentate in scala logaritmica la relazione è perfettamente lineare. Tali relazioni sono:

- a) In caso di sorgenti puntiformi $\Delta L = 10 \log(3 + 20N)$
- b) In caso di sorgenti lineari $\Delta L = 10 \log(2 + 5.5N)$

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

Nel grafico mostrato in Figura 22, vengono rappresentate le curve di Maekawa in scala logaritmica. Viene, inoltre, rappresentata anche l'attenuazione calcolabile con l'approssimazione di Kirchoff per sorgenti puntiformi.

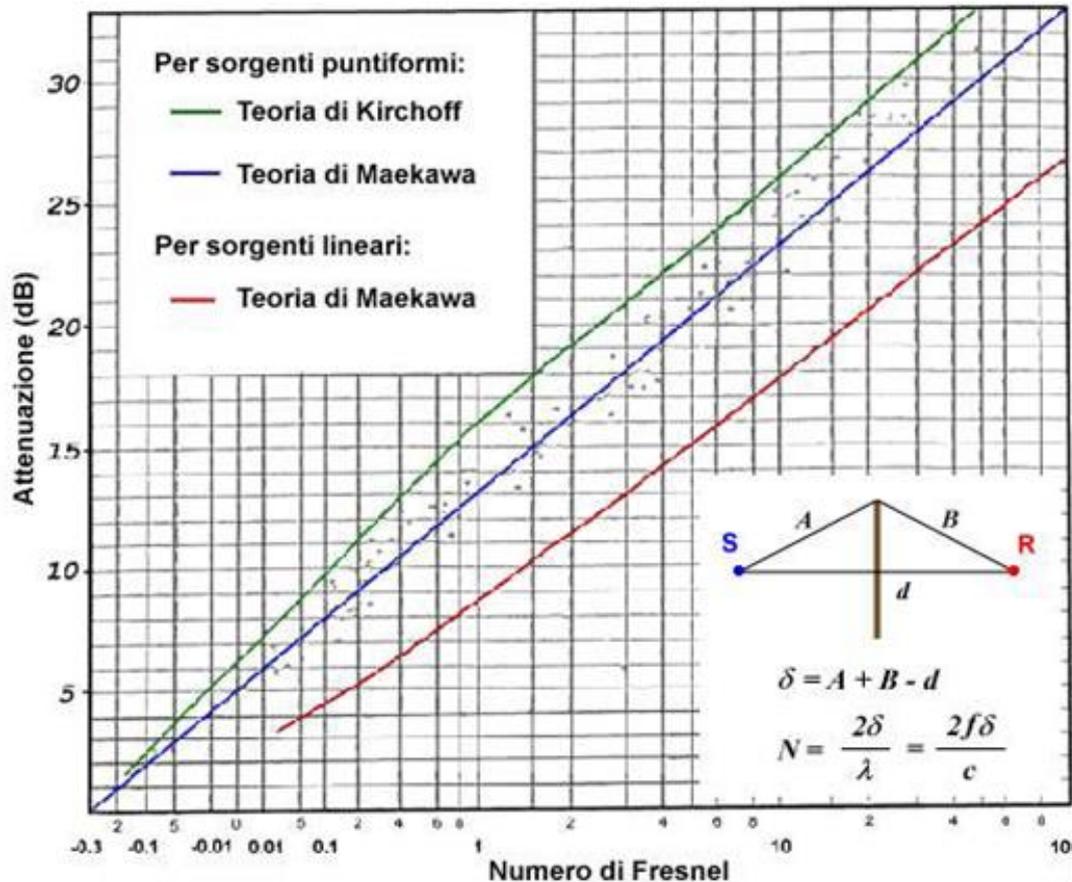


Figura 22: Diagramma di Maekawa

Il fenomeno dell'interferenza si verifica quando due suoni sinusoidali avente la stessa frequenza si propagano simultaneamente nello stesso mezzo. In questo caso, lo spostamento di un dato punto in un certo istante è pari alla somma vettoriale degli spostamenti prodotti dalle onde componenti in quel punto e in quell'istante. L'interferenza è costruttiva quando le onde sonore sono in fase, ossia quando gli spostamenti hanno la stessa direzione e si ottiene un'onda di ampiezza maggiore rispetto all'ampiezza delle singole onde. Viceversa, l'interferenza è distruttiva quando le onde sono in contro-fase, ossia quando gli spostamenti hanno verso opposto e si ottiene un'onda di ampiezza minore rispetto a quelle delle singole onde componenti. Se le onde sonore hanno frequenze leggermente diverse si ha invece il fenomeno dei battimenti, con il risultato di percepire un suono di intensità variabile che raggiunge il massimo ad intervalli regolari, con frequenza pari alla differenza delle frequenze delle onde emesse dalle due sorgenti sonore.

3.3. Potenza sonora, energia acustica e pressione sonora

L'orecchio umano e il microfono dei fonometri reagiscono alla pressione sonora, che è direttamente misurabile nel tempo ed è determinante per definire un grado di sensibilità. La pressione sonora che si misura in un luogo dipende da molteplici fattori: dalla potenza sonora emanata dalla sorgente acustica, dalla caratteristica di irradiazione del suono, dalla lontananza dalla sorgente acustica, dalla presenza di ostacoli fra le sorgenti e i punti di misurazione, dall'influenza dei fenomeni di riflessione che possono essere generate dal luogo stesso, dalla presenza di altre sorgenti acustiche interferenti. La potenza sonora generata da una sorgente acustica è la grandezza che meglio si adatta per confrontare le caratteristiche di differenti sorgenti sonore (Figura 23). La potenza sonora si esprime in watt (W) come si fa anche per le potenze meccaniche, elettriche e termiche.

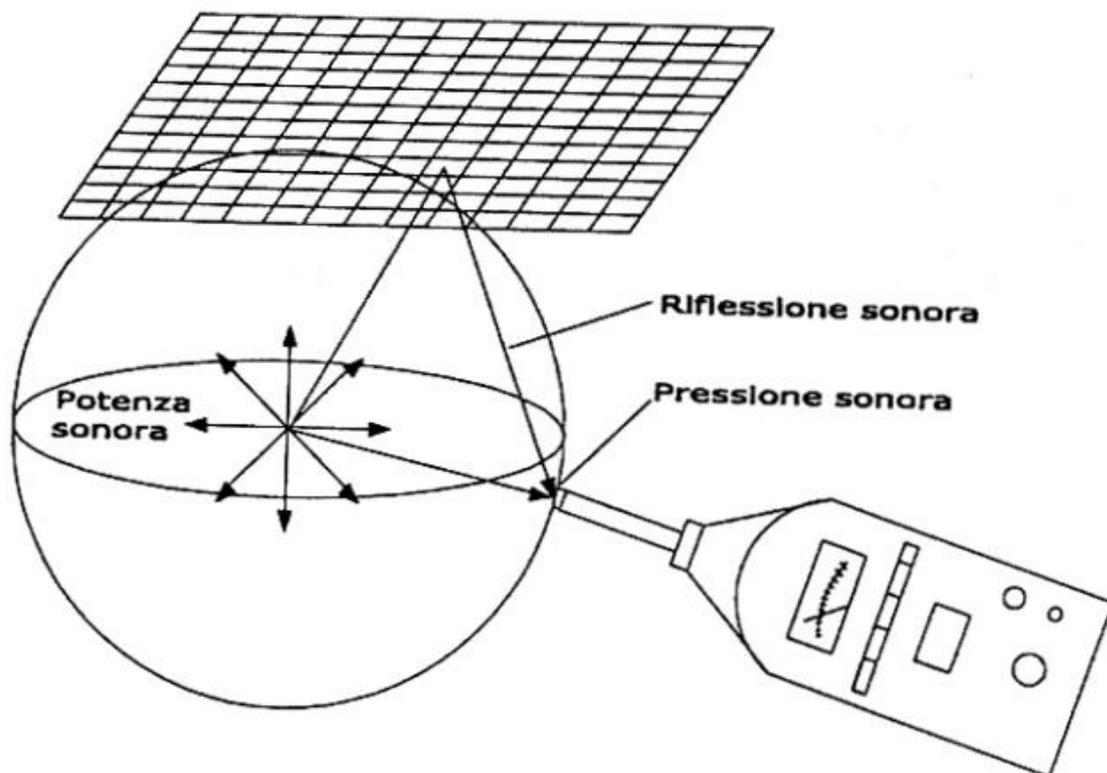


Figura 23: Esempio di potenza sonora e pressione sonora

Nella Tabella 2 si mostrano i livelli di potenza sonora, in dB, prodotti da alcune sorgenti specifiche.

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

Tabella 2: Potenze sonore di alcune sorgenti specifiche

Valori assoluti (W)	Livelli di potenza sonora (dB)	Sorgente
10^4	160	Aereo quadrireattore
10^2	140	Aereo leggero
10	130	Organo fortissimo
1	120	Martello pneumatico
10^{-1}	100	Altoparlante Hi-Fi
10^{-3}	80	Officina meccanica
10^{-5}	60	Voce media
10^{-7}	40	Aria pulsante
10^{-8}	30	Sussurro leggero
10^{-9}	20	Brezza leggera

L'energia acustica emessa da una fonte sonora è il prodotto ottenuto dalla sua potenza media moltiplicata per la durata dell'irradiazione acustica. La potenza sonora e l'energia acustica sono proporzionali al quadrato della pressione acustica. Ad un raddoppio della pressione sonora si ha di conseguenza una quadruplicazione della potenza sonora.

L'orecchio umano sano è in grado di apprezzare un campo di pressione sonora estremamente vasto. Si passa dalla pressione sonora relativa alla soglia di udibilità (20 μ Pa) a quella relativa alla soglia del dolore (20 Pa). Queste pressioni sonore, intese nel rapporto da 1 a 1 milione, si rivelano d'uso poco pratico e non corrispondono in nessun modo all'effettiva percezione umana della forza prodotta dal rumore. L'introduzione del livello sonoro in decibel (dB) ha permesso di ridurre questo campo di valori. L'unità decibel (=1/10 Bel) è legata al nome A.G. Bell, l'inventore del telefono e deriva quindi dalla tecnica delle telecomunicazioni, nella quale un livello è definito come il logaritmo del rapporto di una grandezza rispetto ad una grandezza di riferimento dello stesso genere. Adattando questo principio alla pressione sonora e prendendo come grandezza di riferimento la pressione sonora relativa alla soglia di udibilità (valore di riferimento) si ha la definizione del livello di pressione sonora o livello sonoro (ISO 131, 1979).

Il **livello di pressione sonora (L_{pi})** è dato da:

$$L_{pi} = 10 \log \frac{p_i^2}{p_o^2} [dB]$$

Con p_i = pressione sonora efficace alle varie frequenze in bande di ottava o 1/3 di ottava [Pa] con $i=1, \dots, n$.

Il valore di p_o è quello pari alla soglia di udibilità ($p_o=20 \mu$ Pa).

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

Il livello di pressione sonora globale ($Lp_{globale}$), in dB, è dato da:

$$Lp_{globale} = 10 \log \left(\frac{p_1^2}{p_0^2} + \frac{p_2^2}{p_0^2} + \dots + \frac{p_n^2}{p_0^2} \right)$$

Se sono noti i livelli di pressione sonora (Lp_i) alle varie frequenze, oppure, se sono noti i diversi livelli di pressione sonora Lp dalla seguente:

$$Lp_{globale} = 10 \log \left(10^{\frac{Lp_1}{10}} + 10^{\frac{Lp_2}{10}} + \dots + 10^{\frac{Lp_n}{10}} \right)$$

Il livello di pressione sonora globale relativo alla curva di ponderazione A è dato da:

$$Lp_{globale(A)} = 10 \log \left(10^{\frac{Lp_1+x_1}{10}} + 10^{\frac{Lp_2+x_2}{10}} + \dots + 10^{\frac{Lp_n+x_n}{10}} \right)$$

Dove gli x_i rappresentano i fattori di ponderazione relativi al filtro A che vanno sommati algebricamente ai valori di Lp_i alle varie frequenze.

Esistono, inoltre, formule che consentono, noto il livello di potenza sonora (Lw) di una sorgente, di determinare il livello di pressione sonora (Lp) ad una certa distanza (r) da essa, mentre noto il livello di pressione sonora in un dato punto (in quanto ricavato direttamente da una misura), di risalire al livello di potenza sonora o valutare il livello di pressione sonora generato dalla stessa sorgente sonora in altri punti.

Il livello di potenza sonora (Lw_i) è dato da:

$$Lw_i = 10 \log \left(\frac{W_i}{W_0} \right) [dB]$$

Con W_i = potenza sonora efficace alle varie frequenze in bande di ottava o 1/3 di ottava [W] con $i=1, \dots, n$ e con $W_0=10^{-12}$ W.

Il livello di potenza sonora globale ($Lw_{globale}$) è dato da:

$$Lw_{globale} = 10 \log \left(\frac{W_1}{W_0} + \frac{W_2}{W_0} + \dots + \frac{W_n}{W_0} \right)$$

Se sono note le potenze (W_i) alle varie frequenze, oppure da:

$$Lw_{globale} = 10 \log \left(10^{\frac{Lw_1}{10}} + 10^{\frac{Lw_2}{10}} + \dots + 10^{\frac{Lw_n}{10}} \right)$$

Se sono noti i livelli di potenza sonora (Lw_i) alle varie frequenze.

Allo stesso modo per come visto per i livelli di pressione sonora, anche per i livelli di potenza sonora il valore globale relativo alla curva di ponderazione A è dato dall'equazione:

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

$$Lw_{globale(A)} = 10 \log \left(10^{\frac{Lw_1+x_1}{10}} + 10^{\frac{Lw_2+x_2}{10}} + \dots + 10^{\frac{Lw_n+x_n}{10}} \right)$$

Dove gli x_i rappresentano i fattori di ponderazione relativi al filtro A che vanno sommati algebricamente ai valori di Lw_i alle varie frequenze.

In sintesi, è possibile asserire che il Livello di potenza sonora Lw indica la sonorità intrinseca di una sorgente ed è un valore univoco, mentre il Livello di pressione sonora Lp indica la sonorità di una sorgente nei vari punti dello spazio per cui dipende dalla distanza. Man mano che ci si allontana dalla sorgente il livello di pressione sonora diminuisce, mentre il livello di potenza sonora rimane sempre il medesimo perché è un valore che rappresenta una caratteristica oggettiva della sorgente.

L'equazione:

$$Lp = Lw + 10 \log \left(\frac{1}{4\pi r^2} \right) [dB] \text{ (propagazione sferica)}$$

consente di calcolare, noto il livello di potenza sonora di una **sorgente puntiforme fissa con propagazione sferica**, il livello di pressione sonora ad una distanza r dalla sorgente. Da questa, si arriva alla legge del decadimento del livello della pressione sonora con il raddoppio della distanza (*Legge del decadimento decrescente*), per cui ad ogni raddoppio di distanza dalla sorgente sonora corrisponde una riduzione di 6 dB del livello di pressione sonora (Figura 24).

$$Lp_2 = Lp_1 - 10 \log \left(\frac{r_2^2}{r_1^2} \right) [dB]$$

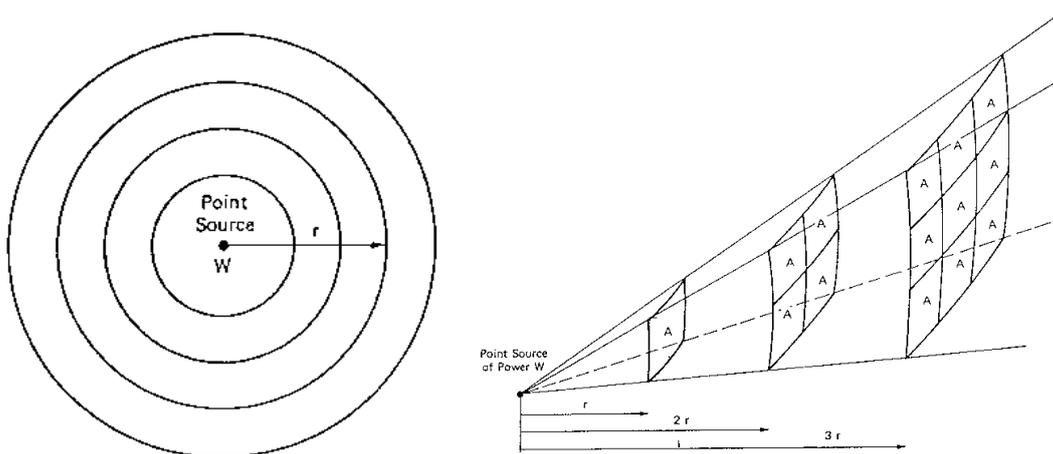


Figura 24 - Sorgente puntiforme fissa e propagazione tipica

La spiegazione fisica di questa legge può essere facilmente compresa rifacendosi al modello di propagazione sferica tipica di una sorgente sonora puntiforme. Infatti, se si raddoppia il raggio della sfera, la stessa quantità di energia si deve distribuire ora su una

superficie quattro volte più grande e conseguentemente l'intensità sonora (I) e il quadrato della pressione sonora si deve ridurre localmente con un fattore quattro.

Il modello di sorgente sonora posizionata nello spazio libero, che irradia in tutte le direzioni, è rappresentativo di alcune situazioni reali, ma poco aderente ai casi più comuni di sorgenti posizionate su un piano riflettente (ad esempio vicino al terreno). In questi casi, se lo spazio che circonda la sorgente sonora è praticamente libero da superfici riflettenti e da barriere, la propagazione che si verifica è di tipo semisferica e tutta l'energia irradiata verso il basso viene riflessa dal terreno e costretta a propagarsi nella regione semisferica superiore. In analogia con i principi dell'ottica, le onde acustiche irradiate verso il basso si sovrappongono a quelle irradiate verso l'alto (Figura 25).

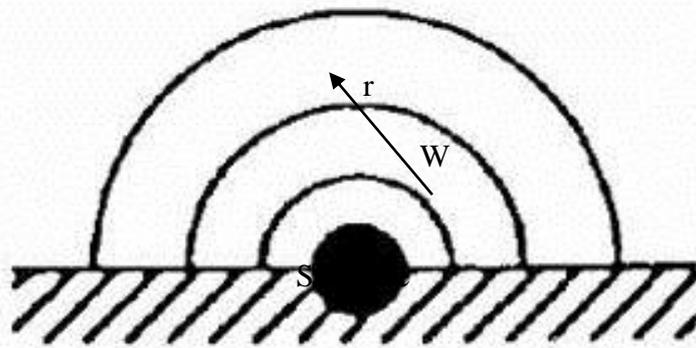


Figura 25: Propagazione da una sorgente puntiforme posizionate su piano riflettente

La **propagazione semisferica** comporta un incremento di 3 dB rispetto alla propagazione sferica poiché ora tutta l'energia irradiata dalla sorgente sonora viene riflessa dal terreno e costretta a propagarsi nella regione semisferica superiore. Operando opportune sostituzioni nella relazione della propagazione sferica si può ottenere quella relativa alla propagazione semisferica:

$$L_p = L_w - 8 - 20 \log(r) \text{ [dB]} \text{ (propagazione semisferica)}$$

In maniera analoga a quanto visto per la propagazione sferica, anche in questo caso, vale la legge del decadimento del livello di pressione sonora con il raddoppio della distanza.

Se si considera, invece, il caso di una **sorgente sonora puntiforme (di potenza sonora W) in movimento con velocità costante v** , il livello di pressione sonora che giunge al ricevitore varia nel tempo ed è dato dalla seguente relazione:

$$L_p(t) = L_{p_{max}} - 10 \log \left(\frac{r_0^2 + v^2 + t^2}{r_0^2} \right) \text{ [dB]}$$

L'origine del tempo t_0 si deve supporre corrispondente all'istante in cui la sorgente sonora transita nel punto più vicino al ricevitore (distanza r_0) e il livello di pressione sonora $L_{p_{max}}$ (Figura 26).

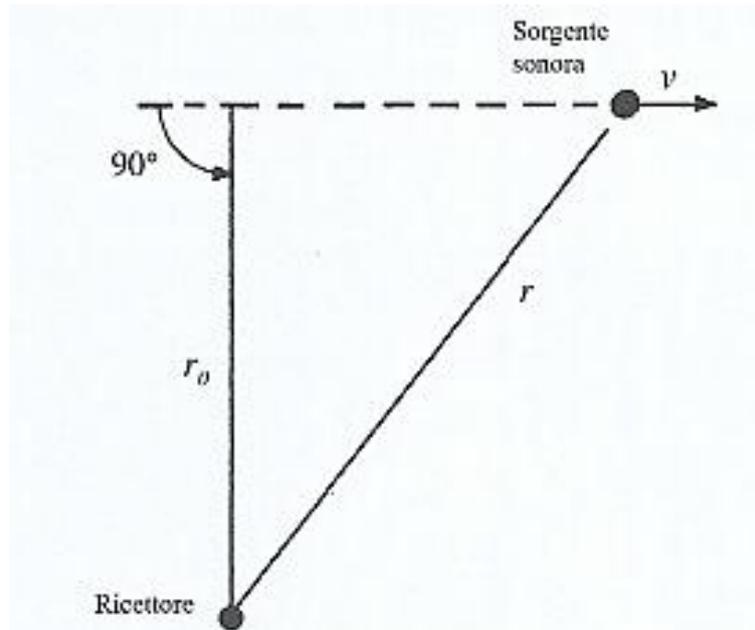


Figura 26: Sorgente puntiforme in movimento

Il fattore $10 \log \left(\frac{r_0^2 + v^2 + t^2}{r_0^2} \right)$ che compare nel secondo membro dell'equazione precedente, è ottenibile ricavandolo in funzione del tempo, utilizzando il diagramma mostrato in Figura 27.

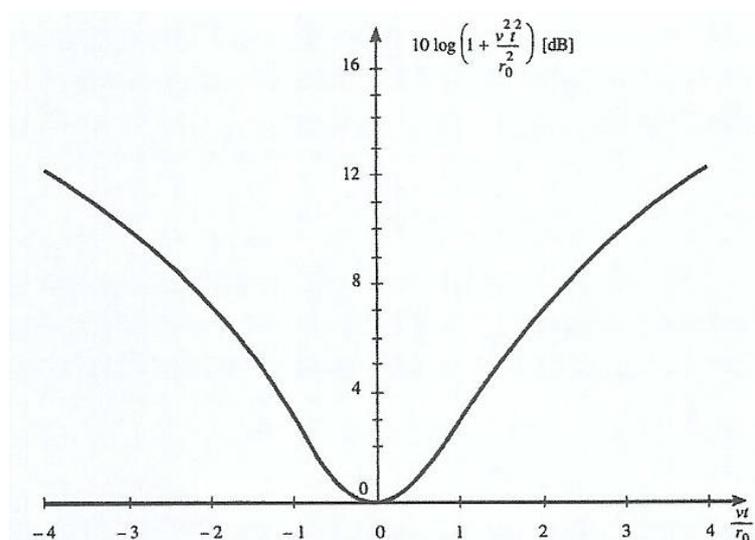


Figura 27: Variazione del livello della pressione sonora $L_p(t)$ rispetto al valore massimo

Il caso della **sorgente sonora lineare continua fissa di lunghezza infinita** è quello che approssimativamente rappresenta la strada rettilinea con una densità di traffico uniformemente distribuita lungo la sua lunghezza o da un condotto rettilineo, che irradia in modo uniforme per tutta la sua lunghezza. Intanto, bisogna specificare che la differenza fondamentale tra la sorgente sonora lineare e quella puntiforme risiede nel fatto che mentre la prima presenta una propagazione delle onde sonore lungo una serie di superfici

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

concentriche avanti come asse la stessa linea della sorgente, la seconda è libera di irradiare in tutte le direzioni (salvo ovviamente quando la stessa è posizionata su un piano riflettente).

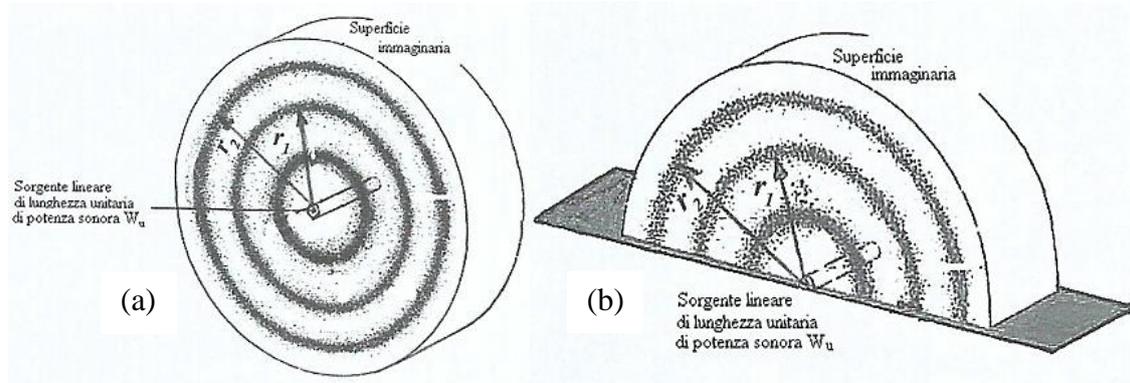


Figura 28: Esempio di propagazione di una sorgente sonora lineare posizionata nello spazio libero (a) e di una posizionata su un piano riflettente (b)

Se la sorgente è posizionata su un piano riflettente (Figura 28-b), quale potrebbe essere teoricamente una superficie di terreno, la propagazione risulta essere di tipo semicilindrica. Nel caso della propagazione cilindrica se si considera la potenza irradiata non dall'intera sorgente lineare ma dalla sua unità di lunghezza (W_u), si può ricavare la relazione fra la potenza per unità di lunghezza della sorgente sonora lineare e la pressione sonora alla distanza r da essa.

I fronti d'onda che si generano con queste tipologie di sorgenti sono quelli che si verificano quando si è in presenza di strade, ferrovie, linee di trasporto in generale, visto che si propagano in modo lineare (Figura 29). Al fine del calcolo del livello equivalente è necessario scomporre un singolo evento in una serie di piccoli, ma continui eventi.

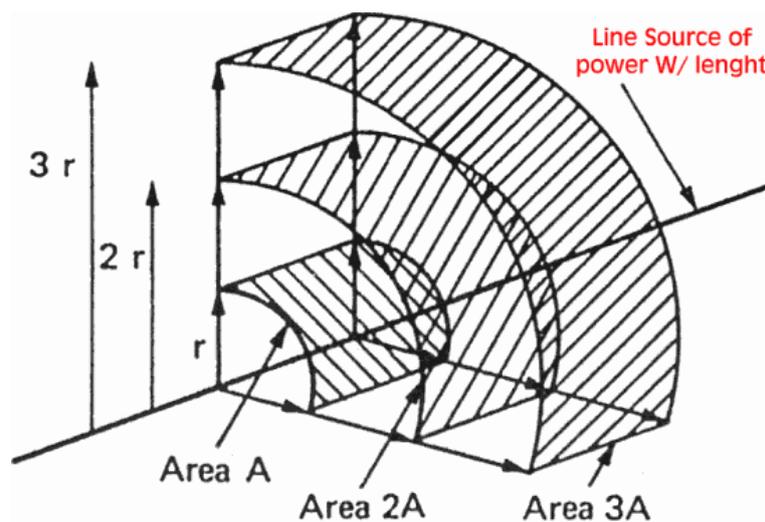


Figura 29: Schematizzazione di una sorgente lineare in movimento (automobile che percorre una strada)

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

Se un ricevitore si allontana da un'autostrada (sorgente lineare) il livello sonoro che rileva scende di 3dB al raddoppiare della distanza, mentre se si allontana da una fabbrica (sorgente concentrata) il livello sonoro cala di 6 dB al raddoppiare della distanza.

Ad ogni modo, l'equazione finale rappresentativa del fenomeno della propagazione cilindrica descritto è:

$$Lp = Lw_u - 8 - 10 \log(r) \text{ [dB]} \text{ (propagazione cilindrica)}$$

Analogamente, il caso della sorgente posizionata su un piano riflettente (Figura 28 – b), che è il caso più frequente nella realtà, si ha:

$$Lp = Lw_u - 10 \log(r) - 5 \text{ [dB]} \text{ (propagazione semicilindrica)}$$

Allo stesso modo delle sorgenti puntiformi, anche in questo caso è possibile prevedere il livello di pressione sonora ad una certa distanza dalla sorgente, conoscendo il livello di pressione sonora ad una distanza più prossima alla sorgente stessa. Infatti, se Lp_1 è il livello di pressione sonora alla distanza r_1 e Lp_2 quello alla distanza r_2 dalla sorgente lineare si ha:

$$Lp_1 - Lp_2 = 10 \log\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \text{ [dB]} \text{ quindi } Lp_2 = Lp_1 - 10 \log\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \text{ [dB]}$$

Dall'ultima equazione si rileva che il livello di pressione sonora che si propaga da una sorgente lineare decade di 3 dB soltanto, ad ogni raddoppio della distanza dalla sorgente.

3.4. Direttività delle sorgenti

Molto frequentemente si verifica che la sorgente sonora non è isotropa, ma presenta caratteristiche direzionali in una generica direzione angolare θ , come nel caso della Figura 30.

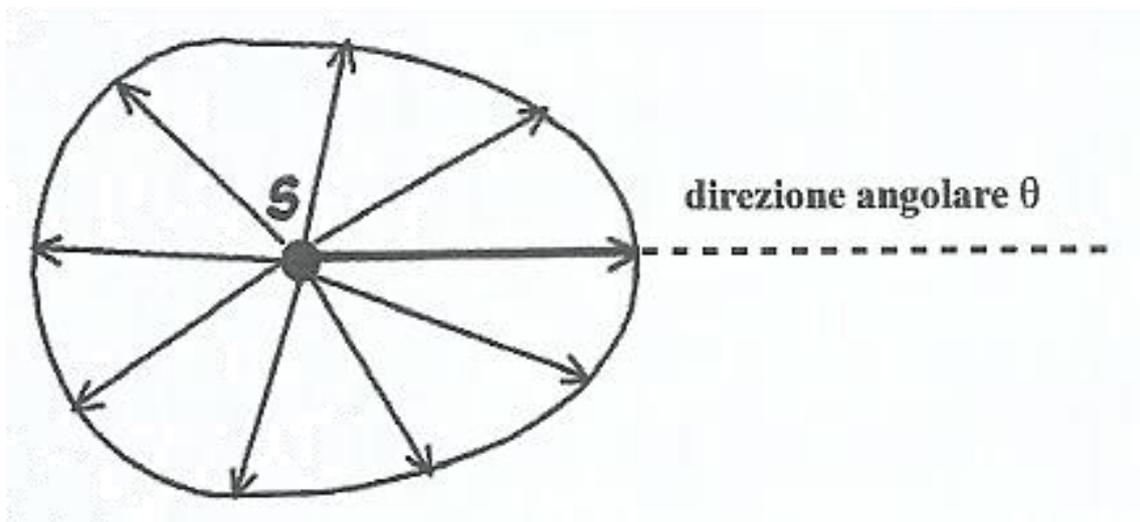


Figura 30: Sorgente sonora puntiforme con caratteristiche direzionali

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

In questo caso il campo acustico generato dalla sorgente sonora è caratterizzato da una emissione di energia sonora diversa secondo le varie direzioni. Si usa pertanto introdurre nei calcoli un indice chiamato “*Indice di direttività*” dato dalla seguente formula:

$$ID = 10 \log(Q) [dB]$$

dove Q è il “*fattore direttività*” definito come il rapporto tra l’intensità sonora in un punto ad una certa distanza (r) dalla sorgente lungo la direzione θ :

$$I_{\theta} = \frac{p^2(\theta)}{\rho_0 c} \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

e l’intensità sonora che si avrebbe nello stesso punto nel caso in cui la sorgente fosse isotropa:

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

Ovvero:

$$Q = \frac{\frac{p^2(\theta)}{\rho_0 c}}{\frac{W}{4\pi r^2}} = \frac{I_{\theta}}{I}$$

che, trasformata in quantità logaritmiche, diventa:

$$ID = Lp(\theta) - Lp [dB]$$

dove:

- $Lp(\theta)$ è il livello di pressione sonora misurato, ad una distanza r dalla sorgente, lungo la direzione angolare θ [dB];
- Lp è il livello di pressione sonora alla distanza r prodotto dalla sorgente che irradia in maniera uniforme in tutte le direzioni (sorgente isotropa) [dB].

Il contributo del fattore di direttività (Q) in molti casi pratici può essere trascurato, mentre deve essere preso in considerazione se la sorgente puntiforme è posizionata su una superficie riflettente. In genere, è sufficiente conoscere il valore di Q , sul piano verticale ed orizzontale. Occorre, ancora, ricordare che il valore di Q dipende dalla frequenza e che normalmente aumenta con essa (Farina, 2005).

Il campo sonoro generato da una sorgente può essere modificato dalla presenza di ostacoli e superfici riflettenti: se, per esempio, una sorgente puntiforme sferica ($Q = 1$), viene posta su di un piano perfettamente riflettente, si ottiene $Q = 2$, come mostra la Figura 31; se viene posta in un angolo, tra due superfici riflettenti, si ottiene $Q = 4$.

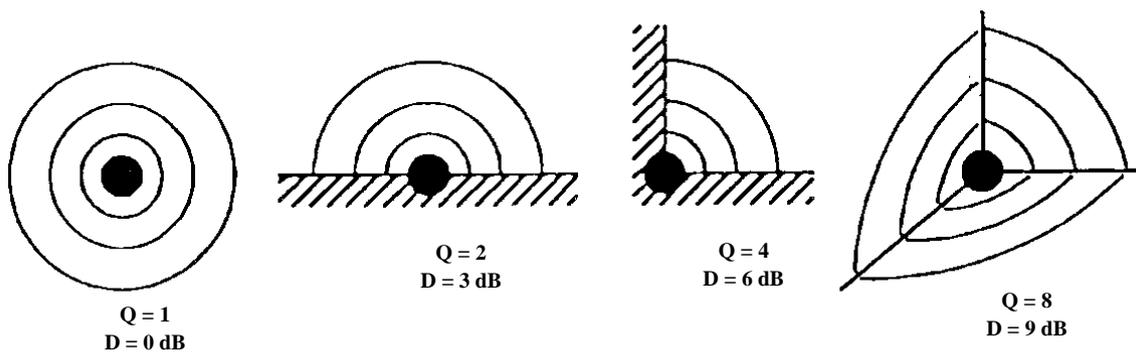


Figura 31: Curve di direttività di una sorgente sferica puntiforme in vicinanza di superfici riflettenti

In forma tabellare rappresentabili nel seguente modo (Tabella 3).

Tabella 3: Rapporto tra tipo di emissione, fattore (Q) e indice di direttività (ID)

Tipologia	Q	ID
<i>Sferica</i>	1	0 dB
<i>Semisferica</i>	2	3 dB
<i>Tra due superfici ortogonali</i>	4	6 dB
<i>Tra tre superfici ortogonali</i>	8	9 dB

Utilizzando le relazioni precedenti, si può scrivere, per sorgenti in campo libero caratterizzate dal fattore di direttività Q:

$$L_p = L_w - 20 \log(r) - 11 + ID \text{ (propagazione influenzata dalla direttività)}$$

Che può anche essere scritta nel seguente modo:

$$L_p = L_w - 20 \log(r) - 11 + 10 \log(Q)$$

La relazione suddetta è particolarmente importante in quanto consente, attraverso la misura dei livelli sonori L_p , di determinare il fattore di direttività di una sorgente ed il valore del livello di potenza sonora. La misura dovrà essere condotta in camera anecoica secondo le prescrizioni della normativa (ISO 3745, 2012).

3.5. Analisi spettrale, curve di ponderazione e tipologie di rumore

Il campo delle frequenze udibili spesso viene suddiviso in numerose bande di frequenze determinando per ciascuna di esse il livello sonoro. Questa analisi è necessaria ad esempio:

- per tener conto dei parametri che variano in funzione delle frequenze (per es. assorbimento acustico);

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

- per stimare la percezione di un rumore da parte dell'orecchio umano, che esegue esso stesso, un'analisi spettrale.

L'analisi spettrale d'uso in acustica si effettua mediante le bande di frequenza, la cui larghezza aumenta proporzionalmente alla frequenza centrale. Le bande di frequenza normalizzate a livello internazionale sono le bande d'ottava, le cui frequenze centrali (mediane) sono definite a partire dalla frequenza di riferimento di 1.000 Hz moltiplicandola o dividendola per due. Per analisi più precise, ogni banda a ottave viene suddivisa in 3 bande a terzi d'ottava le cui frequenze mediane sono parimenti fissate, come mostrato in Tabella 4.

Tabella 4: Suddivisione delle bande in 1/3 di ottava

25	50	100	200	400	800	1600	3150	6300	12500
31.5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
40	80	160	315	630	1250	2500	5000	10000	20000

Le analisi spettrali sono rappresentate frequentemente sotto forma di diagramma a colonne (Figura 32). L'asse orizzontale esprime le frequenze centrali delle bande di frequenza e l'asse verticale il livello sonoro nella corrispondente banda di frequenza.

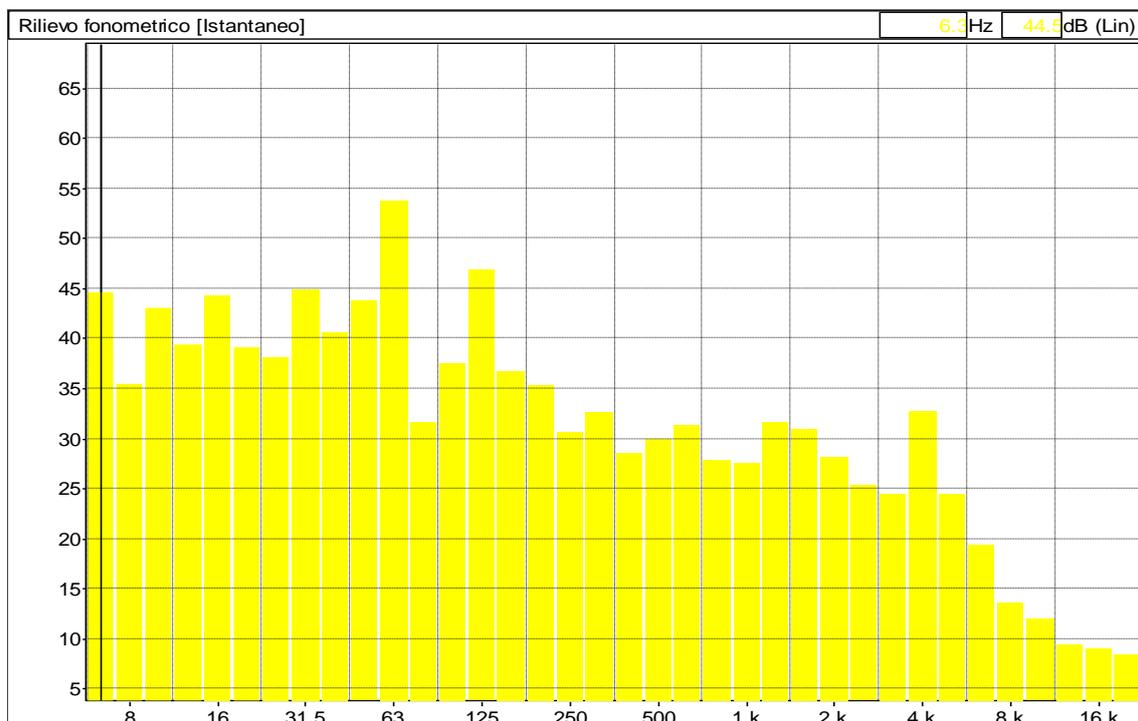


Figura 32: Analisi spettrale in terzi d'ottava

Nel predisporre le curve di ponderazione, Figura 33, si è tenuto conto della sensibilità dell'udito umano in funzione delle frequenze. Attualmente tutti ricorrono alla curva A

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

per la valutazione dei fenomeni sonori civili ed industriali, rumori stazionari ed impulsivi (i fenomeni sonori impulsivi venivano prima valutati mediante la curva C). Ecco perché i valori di misurazione e valutazione vengono indicati in dB (A).

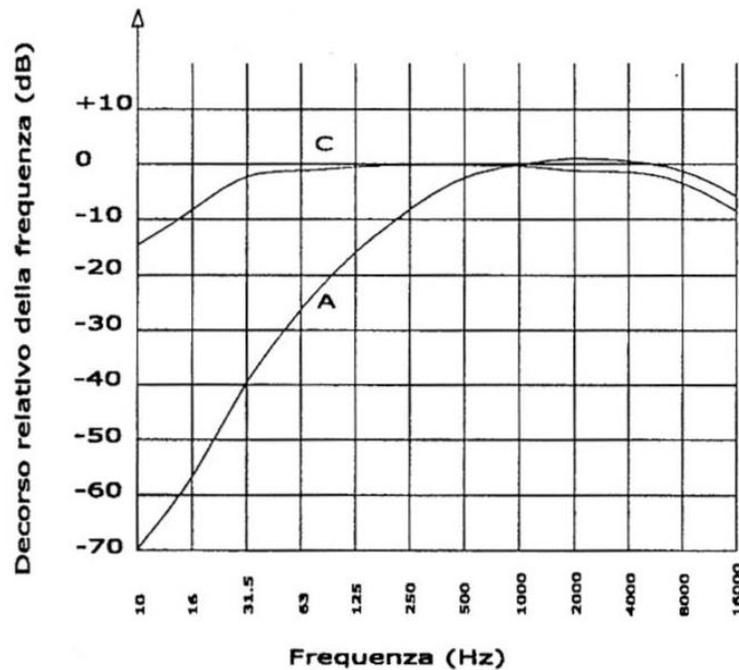


Figura 33: Curve di ponderazione A e C

La differenza fra tono, suono e rumore si basa sullo spettro acustico. Un tono puro è un'oscillazione acustica ad andamento sinusoidale, vale a dire composta di una sola frequenza (Figura 34). Il tono del diapason, dell'audiometro, del flauto, è prossimo al tono puro.

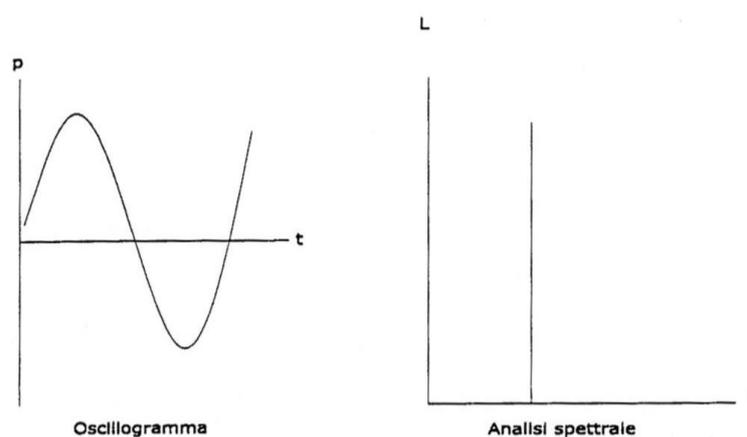


Figura 34: Rappresentazione di un tono puro

Un suono, come mostrato in Figura 35, si compone di un tono base e di toni armonici (superiori) ossia di multipli interi della frequenza base. Questi toni armonici determinano il timbro. Ne sono esempi i suoni di un violino o degli strumenti a fiato.

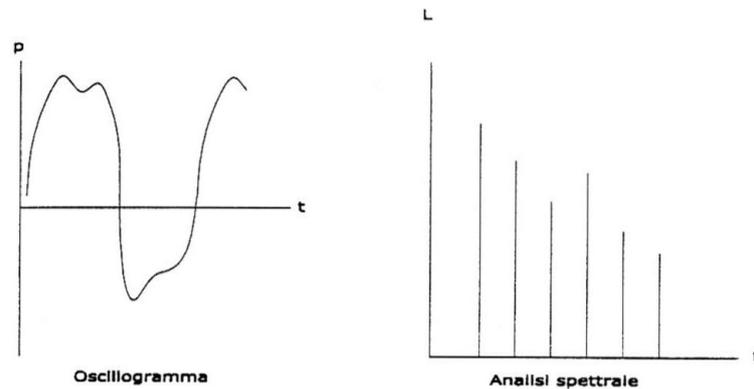


Figura 35: Rappresentazione di un suono

I rumori, come mostrato in Figura 36, sono fenomeni sonori non periodici nel tempo e composti di numerose frequenze disarmoniche, il che vuol dire che queste frequenze non si trovano fra di loro in relazione. Non è possibile indicare una tonalità alta del suono. Ne sono esempi il rumore di una cascata o di un martello pneumatico.

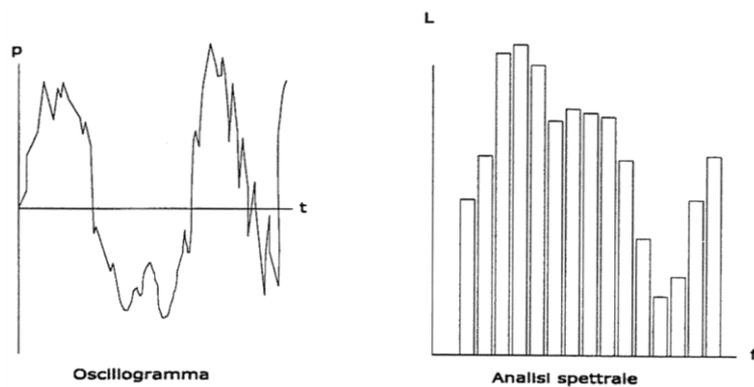


Figura 36: Rappresentazione di un rumore

Per le misure acustiche, il segnale di prova a cui si ricorre spesso è il cosiddetto “fruscio rosa” atto a fornire un livello sonoro costante su tutte le bande di terzi d’ottava, ossia uno spettro livellare a banda di terzi d’ottava. Per contro, lo spettro del “fruscio bianco” cresce di 3 dB di ottava in funzione della frequenza sia per l’analisi a banda di ottava, sia per quella a banda di terzi d’ottava, come mostrato in Figura 37.

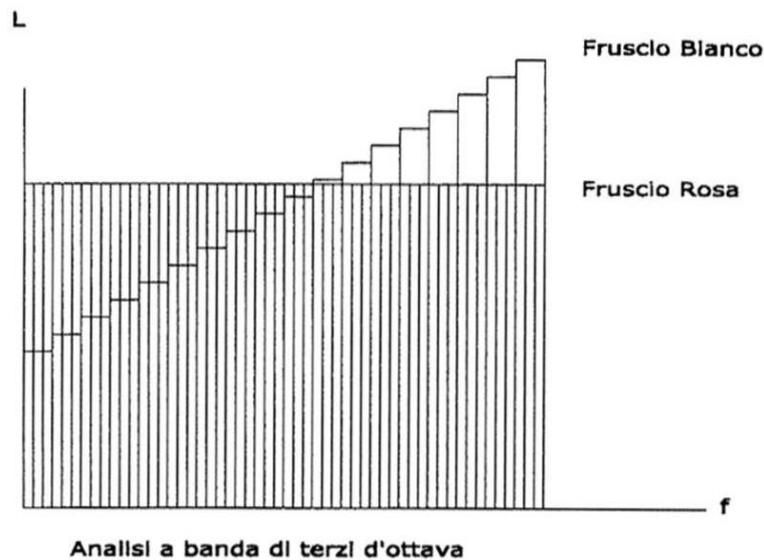


Figura 37: Fruscio rosa e bianco

La differenza fra rumore stazionario, rumore intermittente (non stazionario) e rumore impulsivo, è data dal decorso temporale del segnale sonoro.

Il **rumore stazionario** (continuo), mostrato in Figura 38, ha il livello sonoro e lo spettro acustico costanti, eccetto trascurabili fluttuazioni di livello. Ne è un esempio il rumore in un reparto di filatura.

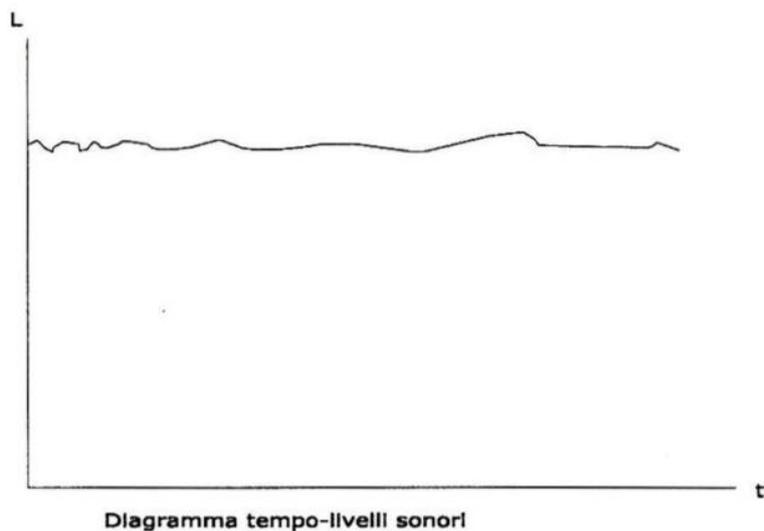


Figura 38: Rappresentazione del rumore stazionario

Il **rumore intermittente** (non stazionario), mostrato in Figura 39, è caratterizzato da un alternarsi di numerose fasi di rumore, aventi ciascuna un livello ed uno spettro acustico differenti. Un caso del genere può verificarsi dall'esercizio alternato di più macchine o da diverse condizioni di funzionamento di una singola macchina.

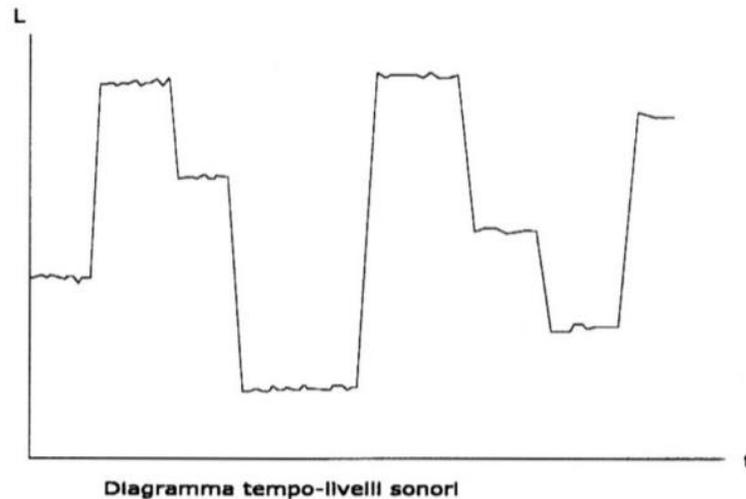


Figura 39: Rappresentazione del rumore intermittente

Il **rumore impulsivo**, invece, mostrato in Figura 40, consiste in impulsi di energia sonora di breve durata, con picchi di pressione sonora elevati, come ad esempio colpi, detonazioni o esplosioni. Ad esempio, è un rumore impulsivo il fenomeno prodotto dallo sparo di un colpo di arma da fuoco, infatti, tale fenomeno produce un livello di pressione sonora superiore di 150 dB entro un millesimo di secondo con una durata di alcune frazioni di secondo.

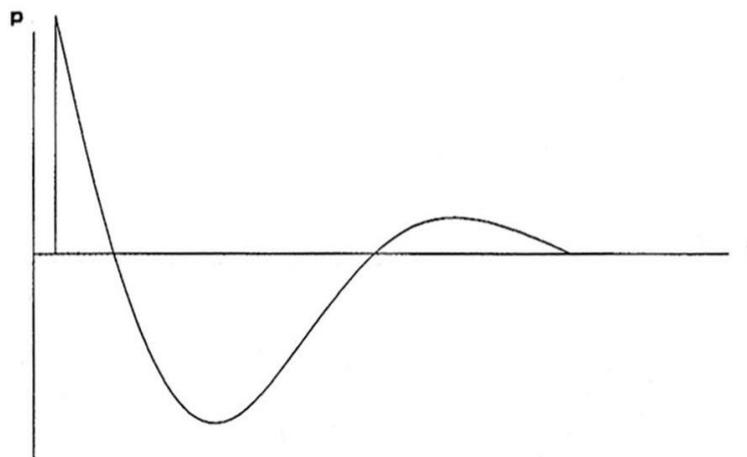


Figura 40: Rappresentazione del rumore impulsivo

Quando si interrompe bruscamente l'emissione di un suono da parte di una sorgente sonora posizionata all'interno di un ambiente chiuso, si rileva che il livello sonoro non decresce immediatamente a valori nulli, ma decresce più o meno lentamente. Questo fenomeno è dovuto alla presenza di onde riflesse che continuano a rimbalzare da una superficie all'altra, determinando la persistenza di un livello sonoro via via decrescente. Il **tempo di riverbero T** , espresso in secondi, è il tempo che intercorre fra il disinserimento della sorgente sonora e il momento in cui il livello sonoro è diminuito rispettivamente di

un milionesimo del suo valore iniziale o di 60 dB e rappresenta il parametro della risonanza di un locale. L'entità del tempo di riverbero dipende dall'assorbimento ambientale.

I valori indicativi per i tempi di riverbero vengono indicati come tempi di riverbero ottimali e dipendono dalle frequenze. Grazie a questi valori è possibile valutare la qualità acustica ambientale di un locale. Nel caso più favorevole, i tempi di riverbero di un locale si trovano entro la zona ottimale; al riguardo sono ammissibili piccole tolleranze in più o in meno (0.1 - 0.2 sec.). I tempi di riverbero vengono indicati per le frequenze di 1.000-4.000 Hz nelle quali essi rimangono costanti.

3.6. Fenomeni di propagazione negli spazi chiusi

Gli aspetti fisici che regolano la propagazione del suono all'interno degli ambienti chiusi è complessa al punto tale che non è possibile descrivere il fenomeno con mezzi matematici analitici. Tuttavia, sono disponibili modelli di calcolo che, per mezzo di ipotesi semplificative, permettono di ottenere previsioni sufficientemente attendibili. L'impiego di tali modelli è destinato alla soluzione di problematiche complesse legate ai grandi spazi (auditori, teatri, palazzetti, etc.) per i quali è necessario valutare in modo puntuale i diversi accorgimenti progettuali allo scopo di garantire una diffusione sonora ottimale (Mattevi, 2014). Nella valutazione degli ambienti di uso comune (casa, ufficio, mense e altro) è possibile impiegare, invece, algoritmi di calcolo semplificati, comunque utili a garantire un adeguato risultato. Nel caso degli abitacoli di automezzi, è necessario conoscere i meccanismi di propagazione del suono in uno spazio confinato, le cui dimensioni siano sufficientemente grandi. In acustica è definito ambiente di dimensioni grandi quello la cui dimensione media è almeno dieci volte più grande della lunghezza d'onda emessa da una sua sorgente interna. Se si considera poi che le frequenze percepite da un orecchio normoudente sono comprese fra 20 Hz e 20 kHz, ossia entro una lunghezza d'onda compresa fra 17 metri e 1,7 cm circa, è chiaro che non è possibile a priori stabilire in quale condizione si è posti. Ciò considerato, in un ambiente confinato, una sorgente sonora determina due campi sonori sovrapposti (Figura 41):

uno **diretto**, caratterizzato dalla trasmissione del suono dalla sorgente al ricevitore senza deviazione delle onde sonore;

uno **riverberante**, prodotto da fenomeni di riflessione delle onde sonore da parte delle superfici che delimitano l'ambiente.

L'onda sonora riflessa raggiungerà, a causa del percorso più lungo, il ricevitore dopo l'onda diretta, il cui ritardo dipende dalla lunghezza del percorso che ha compiuto a causa delle riflessioni. Il campo sonoro diretto dipende principalmente dalla distanza che intercorre fra sorgente e ricevitore, il cui decadimento è legato alla relazione prevista per la propagazione del suono all'aperto (campo libero), mentre il campo sonoro riverberante

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

dipende dalla geometria e dalle caratteristiche di assorbimento del rumore delle superfici che delimitano l'ambiente.

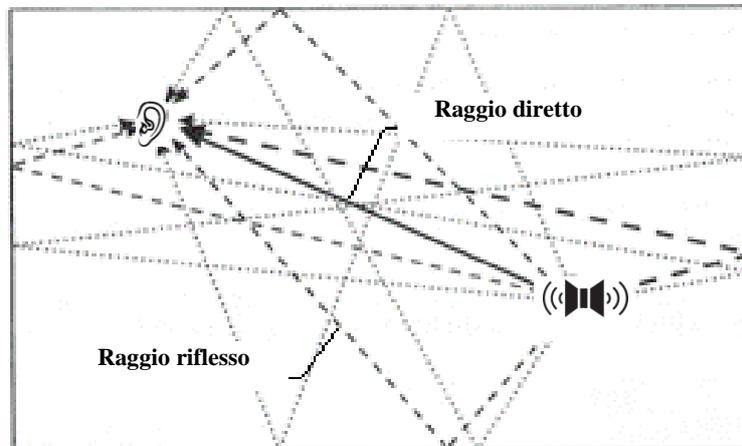


Figura 41: Ricettività umana dei suoni in ambiente chiuso

Il calcolo del livello di pressione sonora in un ambiente chiuso è basato sul principio che il campo sonoro prodotto da una determinata sorgente, in un punto di ricezione nell'ambiente, è costituito dalla somma della quota dell'onda diretta e di quella riflessa. L'onda diretta si comporta genericamente in maniera analoga alla propagazione sonora in campo libero, ossia decade per semplice divergenza geometrica, con una riduzione di 6 dB ad ogni raddoppio della distanza. Nel campo riverberante, invece, è necessario calcolare l'espressione della densità dell'energia nel campo riverberante. Infatti, la potenza emessa dalla sorgente ha una prima interazione con le superfici dell'ambiente che la rinviando parzialmente all'interno. La quota di energia rinviata è dipendente dal **coefficiente di assorbimento medio** (α_m) il quale può essere calcolato con la formula seguente:

$$\alpha_m = \sum \frac{\alpha_i S_i}{S}$$

dove α_i è il coefficiente di assorbimento della i -esima superficie di estensione S_i . Attraverso il coefficiente di assorbimento medio dell'ambiente si ricava la **costante dell'ambiente** (R), definita dalla relazione:

$$R = \frac{S\alpha_m}{1 - \alpha_m} \text{ (m}^2\text{)}$$

dove S è la superficie totale dell'ambiente in m^2 .

Per mezzo dell'espressione di Hopkins e Stryker è possibile determinare il livello della pressione sonora in un punto dell'ambiente avendo noto il **livello della potenza sonora della sorgente** (L_w):

$$L_p = L_w + 10 \log \left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right)$$

dove Q è il fattore di direttività della sorgente lungo la direzione considerata e r in metri è la distanza tra il centro acustico della sorgente e il punto di ricezione. Diverso e più specifico è il caso dei livelli di pressione sonora producibili all'interno di un autoveicolo.

È stato già approfondito il caso di un'onda sonora che durante il suo cammino incontra una superficie e che trasmette parte della sua energia alla superficie stessa, in parte quella stessa energia viene riflessa ed in parte assorbita. Il comportamento dell'onda dipende in gran parte dalle caratteristiche superficiali del materiale che incontra. In un ambiente chiuso, quale è quello di un abitacolo, è perciò fondamentale distinguere due principali caratteristiche:

- ***l'assorbimento acustico*** che è l'attitudine delle superfici a non riflettere i suoni (i relativi coefficienti di assorbimento acustico indicano la frazione di energia sonora non riflessa e variano da 0 per le superfici totalmente riflettenti a 1 per le superfici totalmente assorbenti);
- ***l'isolamento acustico*** che è l'attitudine delle superfici che lo delimitano a non trasmettere i suoni ed è rappresentato in termini di attenuazione in dB che il suono subisce nell'attraversarle.

Entrambi dipendono dalla frequenza del segnale sonoro e quindi vanno analizzati in funzione di essa. Il comportamento acustico di un abitacolo dipende dai diversi elementi che lo compongono, la cui scelta, disposizione ed assemblaggio sono qualificanti e condizionanti ai fini del risultato che si intende perseguire (Pascali, 2012). La propagazione sonora in un ambiente chiuso, le cui dimensioni sono grandi rispetto alla lunghezza d'onda (λ) della più bassa frequenza che interessa, è principalmente oggetto di studio nell'ambito dell'acustica edilizia o degli ambienti interni. Quando però ci si riferisce a piccoli spazi, si deve fare riferimento allo studio delle cavità risonanti e dei silenziatori. La propagazione delle onde sonore all'interno di un ambiente chiuso dipende prevalentemente dalle superfici al contorno e dagli oggetti in esso contenuti, oltre che, ovviamente, dalla sorgente in esso presente. Se un ambiente è costituito da superfici completamente assorbenti, l'energia che perviene al punto di ricezione in condizioni stazionarie è data esclusivamente da quella irradiata direttamente (situazione di campo sonoro diretto). In generale, però, le superfici di un ambiente riflettono le onde sonore, per cui nel punto di ricezione, oltre alle onde dirette, pervengono anche quelle irradiate in tutte le altre direzioni. L'entità di queste ultime dipende dalla natura, finitura e disposizione delle superfici che delimitano l'ambiente: più le pareti sono pesanti e lisce, quindi riflettenti, più queste onde sono numerose e di elevata intensità. Il campo sonoro presente in un ambiente è dovuto al campo sonoro diretto e al campo sonoro riverberato. Eccetto che nello spazio prossimo alla sorgente, il campo sonoro che generalmente si instaura, a regime, nell'ambiente in condizioni stazionarie, è un campo sonoro uniformemente diffuso. Nel caso ideale, in cui le superfici che delimitano un ambiente

sono completamente assorbenti, la potenza sonora rispetto ad un punto ricettore, in condizioni stazionarie, è quella irradiata direttamente:

$$W = \frac{p^2}{\rho c} 4\pi r^2$$

dove W è la potenza sonora [W], ρ la densità dell'aria [Kg/m³], c la velocità del suono [m/s], r la distanza tra la sorgente e il ricettore [m], p la pressione sonora [N/m²]. Se si confrontano le relazioni che, nel caso in esame, introducono l'Indice di Direttività (ID) e il fattore di direttività (Q), si rileva che le formule per il calcolo dei livelli di pressione sonora sono identiche a quelle già viste nei paragrafi precedenti riguardo la propagazione del suono in campo libero.

Si parla di assorbimento acustico quando un materiale presenta attitudine a dissipare l'energia sonora incidente facendo in modo che la stessa energia non venga completamente riflessa. Ecco che per ogni materiale si può definire un coefficiente di assorbimento acustico α dato da:

$$\alpha = \frac{E_a}{E_i} = \frac{W_a}{W_i}$$

che rappresenta il rapporto tra l'energia sonora assorbita (generalmente trasformata in calore).

3.7. Caratteristiche delle vibrazioni

Un'oscillazione di un sistema meccanico attorno ad un punto di equilibrio è definita "vibrazione". Il movimento che si genera dovuto all'oscillazione del sistema può essere caratterizzato dalla periodicità o dalla casualità. L'unità di misura della frequenza per oscillazioni periodiche è l'Hertz (Hz), come definito già nell'ambito delle onde sonore. Le vibrazioni rappresentano un fenomeno fisico complesso, finalizzato alla dispersione di energia e alla creazione di suoni. Ecco perché gli studi sul suono e sulle vibrazioni risultano strettamente collegati. Le onde di pressione sono generate da strutture vibranti (ad esempio le corde di chitarra) e le onde di pressione possono generare vibrazioni di strutture. Dal punto di vista letterale i termini "oscillazione" e "vibrazione" sono pressoché sinonimi, ma se si vuole entrare nel merito della definizione scientifica si hanno (Tonti, 2005):

- oscillazioni di elevata frequenza e piccola ampiezza si chiamano preferibilmente **vibrazioni**. Così una corda di piano o un bicchiere vibrano; lo scafo di una nave, a causa del motore vibra; il pavimento vibra.
- oscillazioni di bassa frequenza ed elevata ampiezza si chiamano preferibilmente **oscillazioni**. Così un lampadario oscilla; una nave oscilla attorno all'asse longitudinale (moto di rollio) e attorno all'asse trasversale (moto di beccheggio).

Le vibrazioni possono essere classificate secondo due tipologie (Rao, 2011):

- Le **vibrazioni libere** si verificano quando un sistema oscilla senza essere sottoposto ad alcuna sollecitazione (forza). In assenza di forze di attrito, di forze aggiuntive o di fenomeni di dispersione energetica, un corpo oscillante potrebbe vibrare all'infinito;
- Le **vibrazioni forzate** sono indotte da una forza esterna che viene applicata al sistema.

Il fenomeno fisico associato alle vibrazioni, dal punto di vista dell'analisi, può essere facilmente compreso attraverso lo studio dell'oscillatore armonico semplice, definito più semplicemente sistema massa-molla-smorzatore (Figura 42).

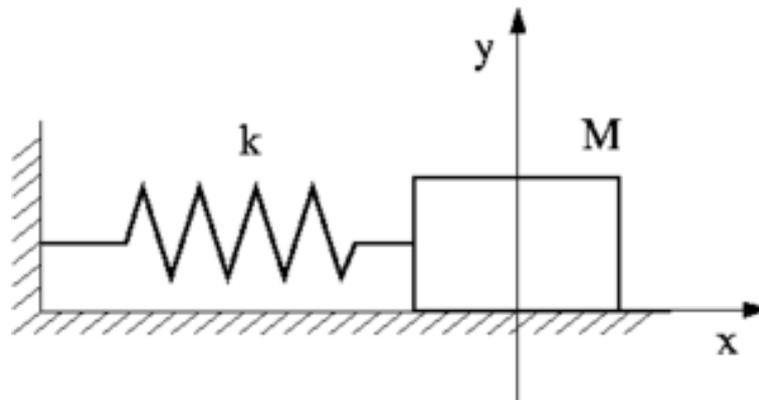


Figura 42: Oscillatore armonico semplice

Tutte le strutture meccaniche tendono a vibrare con una o più frequenze di risonanza, determinate dalla tipologia del materiale e dalla sua geometria. Ogni frequenza di risonanza corrisponde ad una modalità di vibrazione. Le vibrazioni che si propagano all'interno di un mezzo dipendono dalla composizione di quest'ultimo, le cui proprietà possono influenzare sia l'ampiezza e sia la velocità di propagazione. Esse possono provocare danni o causare disturbo. Durante la propagazione dalla sorgente al ricevitore le onde vibratorie possono essere attenuate o amplificate.

Dal punto di vista degli effetti sull'uomo, le vibrazioni vengono percepite sotto forma di sollecitazioni trasmesse al corpo intero o a parti del corpo, anche sotto forma di rumore re-irradiato. Le vibrazioni stesse, possono produrre tremolii e scuotimenti causando una sensazione di persistente insicurezza e, in caso di esposizione prolungata, anche seri danni.

3.7.1. Caso delle vibrazioni libere non smorzate

Le ipotesi di partenza per lo studio del sistema massa-molla-smorzatore (Figura 43), si basano sulla trascurabilità delle dispersioni e l'assenza di forze applicate alla massa.

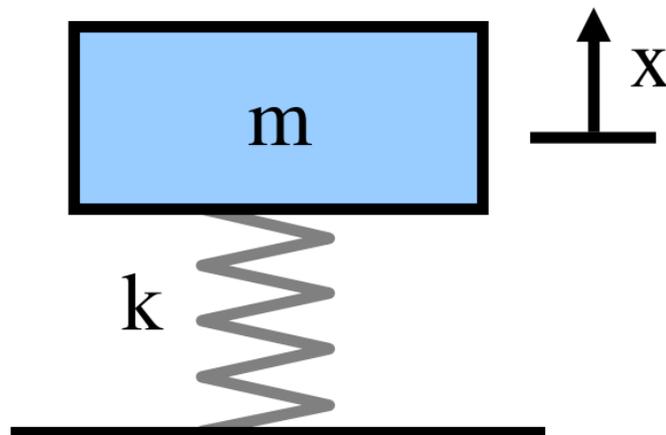


Figura 43: Oscillatore armonico con movimento non smorzato

La forza (f) applicata alla massa (m) dalla molla avente costante di proporzionalità k (rigidezza) è proporzionale all'allungamento (x) secondo la formula:

$$F = -kx$$

Dalla seconda legge della dinamica (Legge di Newton) sappiamo che la forza è proporzionale alla massa per l'accelerazione:

$$\sum F = ma = m\ddot{x} = m \frac{d^2x}{dt^2}$$

Si ha una equazione differenziale ordinaria considerando la somma delle forze sulla massa:

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

Supponendo di far vibrare il sistema tirando la molla ad una distanza "A" e si può descrivere il movimento della massa utilizzando l'equazione:

$$x(t) = A \cos(2\pi f_n t)$$

La quale descrive un movimento armonico semplice di ampiezza "A" e frequenza f_n (frequenza naturale o frequenza propria). Per il sistema semplice costituito dalla sola massa collegata ad una molla si ha:

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Con k costante della molla e m la massa dell'oggetto.

Spesso, a scopo di semplificazione, nelle equazioni viene utilizzata anche la frequenza angolare ω :

$$\omega = 2\pi f$$

Misurata in radianti/secondo, anche se normalmente è convertita nell'unità standard Hz (cicli/secondo). Utilizzando le suddette formule, se si conosce la massa e la rigidità del sistema si può determinare la frequenza a cui lo stesso sistema vibrerà dopo una perturbazione iniziale. Quando viene "perturbato", ogni sistema ha una o più frequenze naturali che si manifestano come vibrazione. La relazione, nel contempo, può essere utilizzata per capire cosa accade a sistemi più complessi al variare della massa o della rigidità. A titolo di esempio, la formula spiega perché quando un veicolo è completamente carico la sospensione sarà "più molle" di come si presenta scarico: infatti, aumentando la massa, si riduce la frequenza naturale del sistema.

Queste formule, utili per descrivere il movimento risultante, non spiegano perché il sistema oscilla. Ciò può essere spiegato attraverso il principio della conservazione dell'energia. Estendendo la molla da un valore "A" è stata immagazzinata energia potenziale nella molla:

$$\frac{1}{2}kx^2$$

Lasciata la molla, questa prova a ritornare al proprio stato di riposo. Nel processo si verifica una accelerazione della massa. Nel punto in cui la molla raggiunge il punto di equilibrio non vi è più energia potenziale, ma la massa ha raggiunto la relativa velocità massima e di conseguenza tutta l'energia potenziale si trasforma in energia cinetica. Da quel momento la massa comincia a rallentare perché ora comprime la molla. In questa fase, l'energia cinetica si trasforma di nuovo in energia potenziale. Questo processo di trasformazione energetica che interessa la molla provoca le oscillazioni della massa. Nei sistemi reali si verifica sempre una dissipazione di energia per cui il sistema tende a ritornare nella posizione iniziale.

3.7.2. Caso delle vibrazioni libere smorzate

Se al sistema esaminato in precedenza si aggiunge un ammortizzatore viscoso (Figura 44) avente una costante di proporzionalità c , espressa in unità di forza/velocità (Ns/m):

$$F_d = -cv = -c\dot{x} = -c \frac{dx}{dt}$$

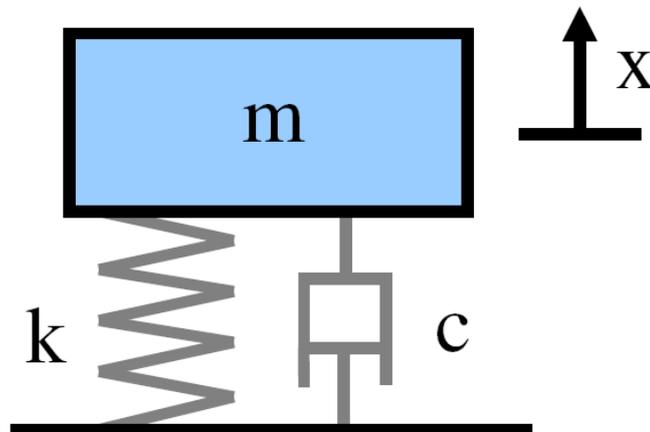


Figura 44: Oscillatore armonico con movimento smorzato

Si ottiene la seguente equazione ordinaria, sommando le forze agenti sulla massa:

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

La cui soluzione dipende dalle caratteristiche dell'ammortizzatore. Se l'ammortizzazione è abbastanza piccola il sistema tranquillo vibrerà, ma smetterà di vibrare col tempo. Questo caso, di particolare interesse nell'analisi delle vibrazioni, è denominato **underdamping**. Se si aumenta l'ammortizzazione fino al punto in cui il sistema non oscilla più, si raggiungerà il punto di **smorzamento critico** (nel caso in cui l'ammortizzazione viene aumentata oltre lo smorzamento critico il sistema è denominato **overdamped**). Il valore che il coefficiente c deve raggiungere per lo smorzamento critico nel modello totale dell'ammortizzatore della molla è:

$$c_c = 2\sqrt{km}$$

Il coefficiente di smorzamento, chiamato anche fattore di smorzamento e percentuale di smorzamento critico, serve a caratterizzare la quantità di ammortizzazione di un sistema. Il suo valore è ottenuto mediante il rapporto tra l'ammortizzazione reale e la quantità di ammortizzazione richiesta per raggiungere lo smorzamento critico.

La formula del coefficiente di smorzamento è data da

$$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{km}}$$

A titolo di esempio, le sospensioni delle auto presentano un coefficiente di smorzamento pari a 0.2-0.3, mentre quello delle strutture in metallo sarà circa 0.05.

Le vibrazioni che si propagano in un materiale/mezzo assumono la forma di onde elastiche che si propagano come onde di volume e come onde di superficie. Le onde di

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

volume (body waves, che si propagano in uno spazio) sono costituite da onde longitudinali (di tipo P), che si propagano nella direzione parallela alla direzione di propagazione della vibrazione e da onde trasversali (o di taglio, Shear waves, che si propagano lungo una superficie) si dividono in onde orizzontali (di tipo R, dette di Rayleigh) e onde verticali (di tipo L, dette di Love). Queste onde hanno una propagazione di tipo elettrico che si sviluppa in un piano verticale attraverso la direzione di propagazione della vibrazione. La propagazione di tutte queste tipologie di onde, mostrate in Figura 45, si può descrivere matematicamente in modo piuttosto agevole in mezzo elastico omogeneo e continuo, infinitamente esteso. Tuttavia, nella realtà, la propagazione delle vibrazioni diventa estremamente complessa in materiali che presentano discontinuità di vario genere e non completamente omogenei.

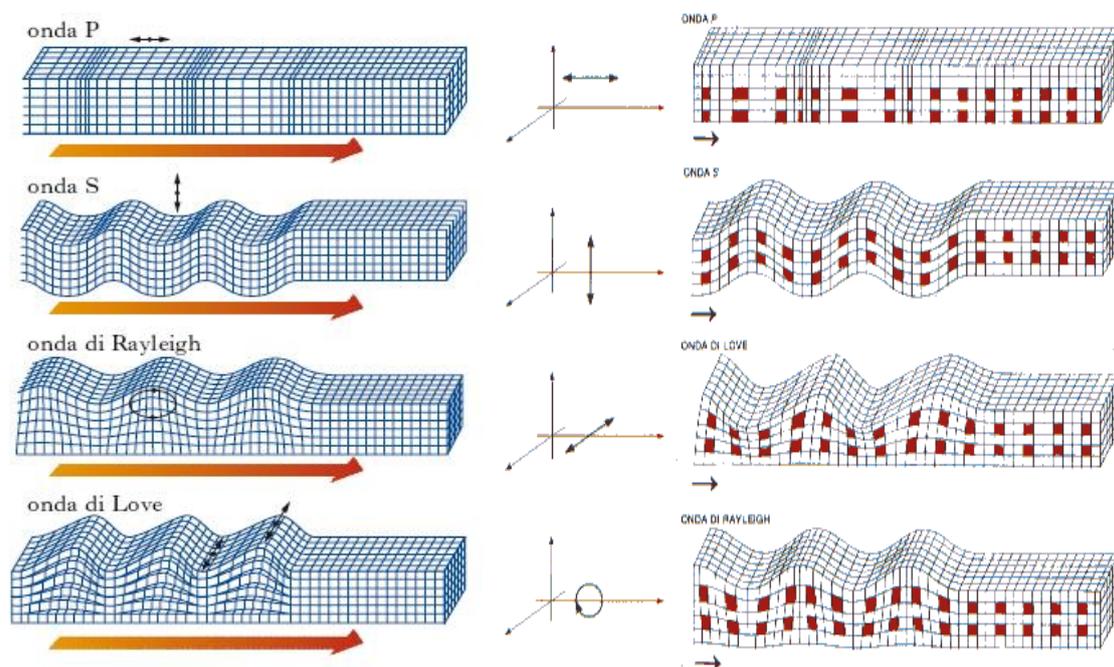


Figura 45: Propagazione delle onde vibratorie

Quando un mezzo isotropico, omogeneo ed elastico è soggetto ad una forza, le particelle di cui è composto il mezzo vengono sollecitate al movimento e vengono generate due tipologie di onde: quelle longitudinali e quelle trasversali. Queste onde si propagano in tutte le direzioni. Se non vi sono discontinuità o interfaccia fra messi diversi queste due tipologie di onde sono le uniche ad essere generate. Le onde longitudinali si propagano con la velocità maggiore e dunque arrivano per prime al ricettore. Per un'onda longitudinale il movimento delle particelle è parallelo alla direzione di propagazione. La velocità di propagazione, c_p , può essere descritta dalla relazione:

$$c_p = \left[\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)} \right]^{\frac{1}{2}}$$

Dove E è il modulo di Young, ν il rapporto di Poisson e ρ la densità del mezzo.

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

Le onde di compressione sono anche chiamate onde P. Le onde trasversali sono più lente rispetto a quelle longitudinali. Il movimento delle particelle è perpendicolare alla direzione di propagazione. La velocità di queste onde, c_s , può essere descritta dalla relazione:

$$c_s = \left[\frac{G}{\rho} \right]^{\frac{1}{2}}$$

Dove ρ è la densità del mezzo e G è il modulo elastico trasversale del mezzo. Poiché le onde trasversali si propagano attraverso un'azione trasversale, esse non si possono propagare nei mezzi gassosi (aria) o liquidi (acqua). Le onde trasversali sono anche chiamate onde S. Lo spostamento causato dalle onde S può avvenire in qualunque direzione in un piano normale alla direzione di propagazione (Figura 46). Di solito, si considerano solo la direzione verticale (SV) e orizzontale (SH) chiamate onde S polarizzate.

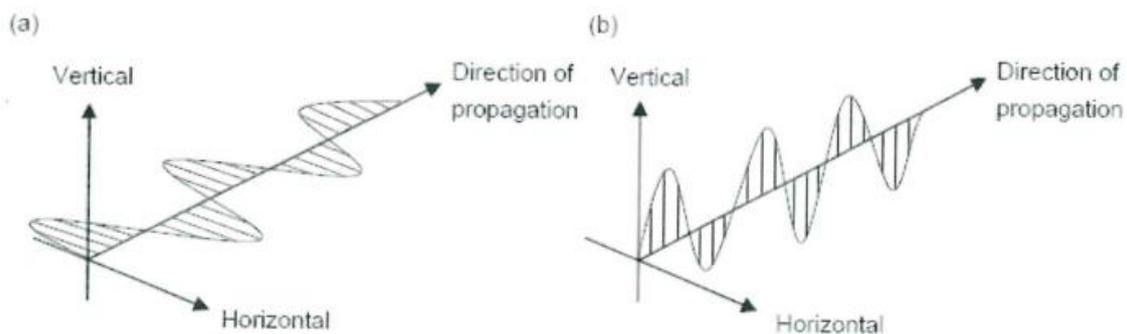


Figura 46: Direzione di propagazione delle onde

Il rapporto fra velocità delle onde P ed S non è costante e varia in base alla relazione:

$$K = \frac{c_p}{c_s} = \left[\frac{2(1 - \nu)}{1 - 2\nu} \right]^{\frac{1}{2}}$$

Da qui si può osservare come la relazione fra onde, P ed onde S, è una funzione del rapporto di Poisson, dove all'aumentare del rapporto di Poisson cresce anche il rapporto fra le velocità (Figura 47).

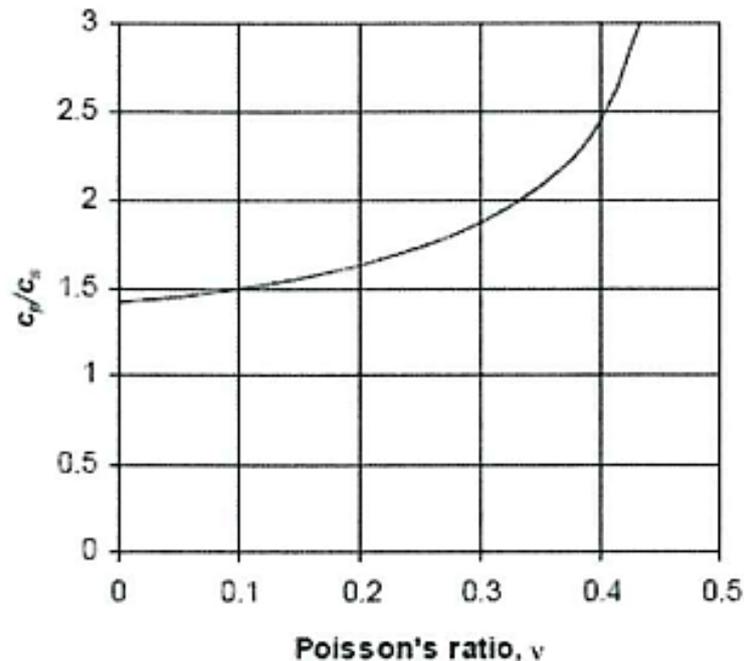


Figura 47: Variazione del rapporto fra le velocità delle onde P ed S in funzione del rapporto di Poisson

Per un mezzo circoscritto, che presenta una superficie limite di qualche tipo, vengono generate onde superficiali. Queste vengono generate da onde di volume che interagiscono con la superficie di contorno. Quindi, laddove esistono discontinuità di un mezzo vengono generate onde di superficie. L'onda più comune è detta onda di Rayleigh (R), che si propaga lungo la superficie e consiste di movimenti di particelle sia longitudinali sia laterali. La velocità di propagazione è inferiore a quella delle onde di volume. Le onde R non si propagano a grande distanza nel mezzo, poiché la velocità decresce con la profondità e a una distanza pari a 1-2 lunghezze d'onda e la velocità è trascurabile. L'ampiezza dell'onda dapprima diminuisce con la profondità, raggiunge un massimo a 0,2-0,6 lunghezze d'onda e poi rapidamente decresce. Se vi sono strati con proprietà diverse possono essere generate le cosiddette onde di Love all'interno di ciascuno strato. Un'altra tipologia di onda superficiale è l'onda di Stoneley, che si propaga lungo la superficie di separazione fra due mezzi solidi con proprietà diverse.

3.8. Impatti sulla salute umana prodotti da rumore e vibrazioni

Come già detto in precedenza, il rumore e le vibrazioni possono causare danni alla salute umana, in funzione dell'entità alla quale l'uomo viene esposto ed al relativo tempo di esposizione.

3.8.1. Effetti prodotti dall'esposizione al rumore

Il rumore può provocare una serie di danni sulla salute, il più grave, meglio conosciuto e studiato è l'*ipoacusia*, cioè la perdita permanente di vario grado della capacità uditiva

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

(CTIPLL-INAIL, 2014). Circa 60 milioni sono i lavoratori che in Europa sono esposti a livelli di rumore potenzialmente pericolosi per almeno un quarto della loro giornata lavorativa e la perdita dell'udito causata da questo agente fisico rappresenta ancora circa un terzo di tutte le malattie professionali. Il rumore può agire, inoltre, con meccanismo complesso anche su altri organi ed apparati, con numerose conseguenze tra le quali l'insorgenza della fatica mentale, la diminuzione dell'efficienza e del rendimento lavorativo, interferenze sul sonno e sul riposo e numerose altre. Da non trascurare anche i possibili effetti sulla sicurezza: il rumore può determinare, infatti, un effetto di mascheramento che disturba le comunicazioni verbali e la percezione di segnali acustici di sicurezza, con un aumento di probabilità degli infortuni sul lavoro.

In Italia il problema rumore è particolarmente evidente rispetto al contesto europeo, pur essendo un rischio in diminuzione rappresenta ancora la terza causa di malattia professionale denunciata all'INAIL. L'orecchio umano agisce da trasduttore nel trasformare energia acustica, prima in energia meccanica e successivamente in energia elettrica. Dopo essere stata convertita, gli impulsi elettrici arrivano al cervello attraverso delle terminazioni nervose. Qui vengono elaborati permettendo la percezione del suono. L'apparato uditivo, mostrato in Figura 48, è anatomicamente composto da tre sezioni: l'orecchio esterno, l'orecchio medio e l'orecchio interno.

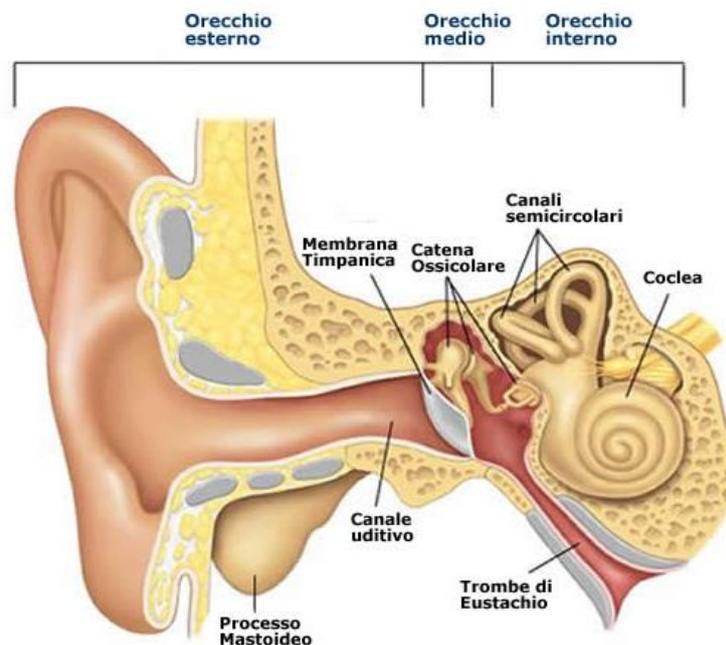


Figura 48: Anatomia dell'orecchio umano

L'orecchio esterno è essenzialmente costituito dal padiglione auricolare, il cui scopo è quello di raccogliere e convogliare i suoni verso il canale uditivo; l'orecchio medio è formato dalla membrana timpanica che vibrando comunica le vibrazioni alla catena ossicolare (a sua volta formata da tre ossicini detti martello, incudine e staffa); l'orecchio interno si occupa di trasformare le vibrazioni in oscillazioni di microscopiche cellule

ciliate, le quali a loro volta trasmettono il segnale alle cellule nervose che lo portano al cervello. Di seguito si analizzano, sinteticamente, gli effetti prodotti dall'esposizione prolungata al rumore (PAF, 2016).

EFFETTI FISIOLOGICI

Il rumore può interferire con le attività mentali, influenzando sulla capacità di memorizzazione e, inoltre, creando alterazione dello stato di attenzione ed abilità nell'affrontare problemi complessi. Le strategie di adattamento messe in atto per "cancellare" il rumore e lo sforzo necessario per mantenere le prestazioni, sono associate ad aumento della pressione arteriosa e ad elevati livelli ematici degli ormoni legati allo stress. Tali effetti possono avere gravi ricadute sulla salute e comportare, in relazione alle condizioni individuali del soggetto esposto, l'insorgenza di:

- *Ipoacusia* - il rumore elevato può causare diminuzione dell'udito, anche se questo rischio si può considerare trascurabile per la popolazione generale, se esposta a livelli di rumore sotto i 70 dB LAeq, per 24 ore al giorno. Tale rischio è invece reale, e la situazione si presenta preoccupante, in riferimento ad attività ricreative e di svago (ad es. le discoteche), che interessano larghe fasce di popolazione giovanile; dalle poche indagini effettuate all'interno di discoteche italiane, si evidenzia il frequente superamento dei limiti di immissione acustica (95 dB LAeq e 103 dB LAmax) previsti dalla recente normativa in Italia;
- *Problemi Cardiovascolari* - Ipertensione ed incremento rischio infarto; esiste ampia e documentata evidenza in letteratura della relazione tra esposizione a rumore ed insorgenza della cardiopatia ischemica e dell'ipertensione, a partire da livelli espositivi compresi fra 65 e 70 dB(A) di LAeq;
- *Indebolimento difese immunitarie*;
- *Problemi Gastrointestinali*.

COMUNICAZIONE

La parola è comprensibile al 100% con livelli di rumore di fondo intorno a 45 dB(A) di LAeq. Per livelli superiori ai 55 dB(A) di LAeq di livello di fondo (livello medio raggiunto dalla voce umana non alterata), è necessario alzare il tono della voce. L'eccessivo rumore di fondo interferisce con la capacità di concentrazione ed induce a comunicare con tono di voce alterato, incrementando conseguentemente il rumore di fondo dell'ambiente. Nelle aule scolastiche e nelle sale congressuali in cui si trovano rispettivamente, bambini (che sono particolarmente sensibili agli effetti del rumore) e persone anziane con diminuzione dell'udito, il rumore di fondo dovrebbe essere di 10 dB(A) di LAeq più basso rispetto alla voce dell'insegnante o dello speaker.

EFFETTI SULL'APPRENDIMENTO E SUL COMPORAMENTO

Studi condotti in sede internazionale hanno dimostrato che i bambini esposti a rumore cronico possono manifestare deficit nella capacità di concentrazione. Sembra che essi sviluppino, per far fronte all'effetto distraente del rumore, strategie di apprendimento che causano stress psico-fisico. Parecchi studi hanno poi documentato un collegamento fra rumore e risultati scolastici, in particolare la capacità nella lettura. Il rumore cronico ha effetti negativi sull'abilità nella lettura, al contrario del rumore acuto che sembra avere scarsi effetti. Anche l'abilità nella lingua parlata sembra essere correlata alle capacità nella lettura, per cui risulterebbe che il rumore è in relazione con entrambe. Il rumore elevato aumenta i comportamenti aggressivi sui soggetti predisposti e sopra 80 dB LAeq si riducono i riflessi istintivi in risposta a situazioni di pericolo.

RIPOSO E SONNO

Il rumore può disturbare il sonno, inducendo difficoltà ad addormentarsi, riduzione della fase di sonno profondo, aumento dei risvegli ed effetti avversi dopo il risveglio o dopo un inadeguato riposo, come affaticamento e deficit delle prestazioni. Questi effetti si possono evitare se i livelli sonori nell'ambiente indoor destinato al riposo sono mantenuti sotto i 30 dB(A) di LAeq di livello di fondo, oppure con livello di picco max sotto 45 dB(A) di LAeq. Tali criteri dovrebbero essere scrupolosamente osservati per gli ambienti di lavoro destinati al turno di riposo dei lavoratori.

EFFETTI PSICOLOGICI E COMPORAMENTALI

La reazione di fastidio (annoyance) e malessere causata dal rumore aumenta ampiamente in base ai livelli di rumore; la maggior parte degli esseri umani risulta infastidita da esposizioni a rumore intorno a 50 dB(A) LAeq. Il rumore elevato induce aggressività ed incrementa la possibilità di comportamenti aggressivi su soggetti predisposti. A livelli espositivi superiori a 80 dB(A) di LAeq si riducono i riflessi istintivi in risposta a situazioni di pericolo, con potenziali ricadute in termini di sicurezza.

3.8.2. Effetti prodotti dalle vibrazioni

Nel momento in cui un uomo entra in contatto con macchine o superfici vibranti, può essere soggetto anch'egli, per via della trasmissione energetica al corpo intero o al sistema mano-braccio, alle vibrazioni presenti (PAF, 2016). Nella valutazione del rischio vibrazioni è possibile suddividere quelle a corpo intero in vibrazioni trasmesse a bordo di macchine mobili o in prossimità di macchine fisse e in vibrazioni trasmesse perché si è posizionati all'interno di una struttura e/o ambiente sollecitati (ad es. edifici). Le vibrazioni trasmesse al sistema mano-braccio, invece, sono principalmente prodotte dalle macchine o dagli utensili impugnati dagli operatori. Dal punto di vista dell'esposizione, le norme tecniche introducono due tipologie:

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

- a. Esposizione giornaliera a vibrazioni trasmesse al sistema mano-braccio A (8) [m/s^2], definita come il valore mediato nel tempo, ponderato in frequenza, delle accelerazioni misurate per una giornata lavorativa nominale di otto ore;
- b. Esposizione giornaliera a vibrazioni trasmesse al corpo intero A (8) [m/s^2] definita come il valore mediato nel tempo, ponderato, delle accelerazioni misurate per una giornata lavorativa nominale di otto ore.

All'interno di un ambiente di lavoro, l'esposizione prolungata a vibrazioni di elevata intensità può produrre vere e proprie patologie. Ad ogni modo, esse possono provocare disagi alle persone esposte. Spesso, la conversione delle vibrazioni produce rumore che si va ad associare al disturbo creando un vero e proprio "effetto cumulo". Di seguito si analizzano, sinteticamente, gli effetti prodotti dall'esposizione prolungata alle vibrazioni sul sistema corpo intero e su quello mano-braccio (PAF, 2016).

PATOLOGIE DA VIBRAZIONI TRASMESSE A CORPO INTERO

a) Danni al sistema cocleo vestibolare

Una prolungata esposizione a vibrazioni meccaniche sembra poter aggravare l'ipoacusia provocata dal rumore. L'esposizione combinata a vibrazioni e rumore sembra causare uno spostamento temporaneo della soglia uditiva alle alte frequenze (6-10 kHz) maggiore di quello provocato dall'esposizione al solo rumore. I disturbi dell'equilibrio possono essere indotti da vibrazioni di frequenze comprese tra 1 Hz e 15-18 Hz. L'iperstimolazione del vestibolo e dei canali semicircolari determinano, dopo un periodo di latenza variabile, la comparsa di un quadro sintomatologico noto come *chinetosi* ("mal di mare"). Il meccanismo patogenetico di tale effetto sinergico sull'organo dell'udito non è stato ancora chiarito.

b) Disturbi e lesioni a carico del rachide lombare

Numerosi studi di biodinamica hanno dimostrato che le vibrazioni possono indurre lesioni all'apparato muscolo-scheletrico del rachide. Il sovraccarico meccanico dovuto a fenomeni di risonanza della colonna vertebrale nell'intervallo di frequenza delle vibrazioni tra 3 e 10 Hz, crea danno strutturale a carico dei corpi vertebrali, dischi e articolazioni intervertebrali. Un'eccessiva risposta contrattile dei muscoli paravertebrali causata da intenso stimolo vibratorio, con conseguenti fenomeni di strain e affaticamento muscolare. Si possono verificare in maniera frequente ernie discali e spondiloartrosi in persone esposte a vibrazioni e microtraumatismi del rachide.

c) Lesioni all'apparato cervico-brachiale

L'esposizione a vibrazioni con frequenze che si sovrappongono a quella di risonanza del corpo umano può amplificare la risposta muscolare della regione collo-spalla. Alcuni studi epidemiologici hanno evidenziato un'aumentata occorrenza di disturbi

cervicobrachiali nei conducenti di automezzi. Diversi fattori ergonomici sono sospettati di essere all'origine di questi disturbi, quali i movimenti di rotazione e torsione del capo, i movimenti ripetitivi del sistema mano-braccio-spalla per azionare i comandi dei veicoli, e l'esposizione a vibrazioni meccaniche.

d) Danni al sistema nervoso periferico e al sistema riproduttivo

È dimostrato in medicina che l'esposizione a vibrazioni meccaniche possa produrre danni maggiori alle persone di sesso femminile. Oltre a causare effetti negativi, anche di natura irreversibile sull'apparato riproduttivo, le vibrazioni possono influire sul ciclo mestruale e originare processi infiammatori e anomalie del parto. In alcuni studi epidemiologici nel settore dei trasporti si è data evidenza della correlazione esistente tra aborto spontaneo ed esposizione a vibrazioni.

e) Disturbi al sistema circolatorio

In letteratura sono riportate associazioni tra esposizione a vibrazioni e rischio di insorgenza di emorroidi e varici venose degli arti inferiori. Nell'ambito di tale possibile associazione, l'esposizione a vibrazioni potrebbe agire come fattore concorrente in combinazione con la prolungata postura assisa tipica dei conducenti di automezzi e veicoli. Una elevata pressione intra-addominale sembra anche avere un ruolo nel meccanismo patogenetico di tali affezioni.

f) Disturbi digestivi

L'esposizione a vibrazioni può provocare un aumento dell'attività gastro-intestinale con potenziale insorgenza di disturbi quali la gastrite e l'ulcera peptica. Tali patologie risultano avere maggiore incidenza su conducenti di veicoli e possono esser accompagnati da sensazioni distorsive di tipo ottico e olfattivo.

g) Fattori aggravanti

La presenza di valori di picco, dovuti a situazioni di stress improvviso quali urti, scosse, buche, possono incidere ancor più in maniera negativa sui danni descritti in precedenza. Allo stesso modo, le posture incongrue e scomode (stazionarietà di una posizione da "seduto" per tempi prolungati, movimenti di torsione del tronco per guide in retromarcia oppure posizione di guida con busto proteso in avanti). A ciò si aggiungano, poi, le condizioni al contorno quali una temperatura bassa, un'alta umidità relativa oppure una forte ventilazione, in associazione ad una situazione di stress a cui potrebbe essere soggetto l'individuo in esame.

PATOLOGIE DA VIBRAZIONI TRASMESSE AL SISTEMA MANO-BRACCIO

a) Sindrome da vibrazioni mano-braccio

Le vibrazioni prodotte da sistemi impugnati su macchinario comportano, in base al livello di esposizione, un aumento del rischio di insorgenza di lesioni vascolari, neurologiche e muscolo-scheletriche. A livello vascolare, si può verificare il fenomeno di Raynaud definito VWF (vibration-induced white finger), a livello neurologico si può registrare una neuropatia periferica prevalentemente sensitiva, mentre a livello osteoarticolare si possono avere lesioni cronico-degenerative a carico dei segmenti ossei ed articolari degli arti superiori, in particolare a livello dei polsi e dei gomiti.

b) Sindrome del tunnel carpale

Effetti indotti dalle vibrazioni sono dolore e parestesie (formicolii) a livello della superficie palmare delle prime tre dita ed a volte del quarto dito, talvolta con irradiazione anche alla spalla. Si evidenzia una perdita di sensibilità e riduzione di forza nei movimenti del pollice, con atrofia dei muscoli che si trovano nella mano alla base del pollice.

c) Angiopatia e neuropatia da vibranti

I disturbi vascolari, come già anticipato, sono rappresentati da episodi di vasospasmo digitale, classificati, sotto il profilo nosologico, come fenomeno di Raynaud. Vi è poi evidenza epidemiologica di ipo-parestesie, riduzione della sensibilità tattile e termica, nonché di limitazione della capacità di manipolazione.

3.9. Comfort acustico e vibrazionale nei mezzi di trasporto

L'inquinamento acustico si inquadra nel problema più generale della valutazione dell'impatto ambientale che, negli anni '80, ha assunto una non trascurabile importanza nella realtà progettuale ed in quella di qualsiasi opera di intervento sul territorio. Negli ultimi decenni, il continuo aumento della domanda di mobilità ha avuto come conseguenza un progressivo aumento dell'uso dell'automobile, che ha così provocato un sensibile aumento del livello sonoro ambientale e anche delle vibrazioni indotte, in modo particolare nelle aree urbane. Infatti, la rete delle infrastrutture di trasporto costituisce la fonte di inquinamento acustico attualmente più distribuita e più pressante sul territorio, sia in ambito urbano, ove le situazioni compromesse sono numerose, sia in ambito extraurbano, ove più marcato è il condizionamento delle sorgenti imposte sul clima sonoro originario.

Le sorgenti principali di rumore da traffico sono i veicoli che, anche se notevolmente diversificati fra loro per le diverse prestazioni e per le diverse destinazioni d'uso (veicoli commerciali, mezzi di trasporto pubblico, mezzo proprio), adottano tutti motori alternativi a combustione interna, dando luogo a rumori presentanti uno spettro a banda

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

larga a distribuzione abbastanza simile, differenziandosi invece nel livello globale di emissione. All'origine del rumore veicolare, come mostrato in Figura 49, è possibile porre essenzialmente due tipologie di sorgenti: quelle correlate con il numero di giri del motore (power train) e quelle correlate con la velocità del veicolo su strada. Nella prima categoria, che è indipendente dalla seconda, rientrano il motore, l'impianto di aspirazione e scarico, la ventola di raffreddamento, gli alberi di trasmissione, il cambio, le pompe idrauliche e i generatori elettrici (Figura 50).

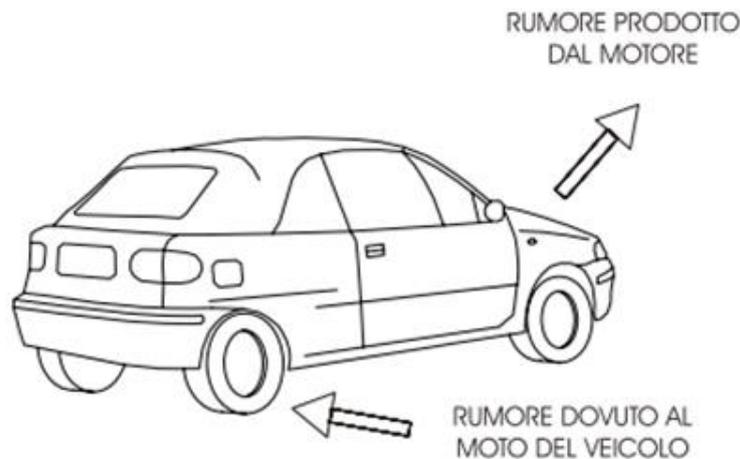


Figura 49: Schematizzazione del rumore prodotto da un veicolo

Nella seconda, invece, rientrano il rumore provocato dall'interazione pneumatici-strada e il rumore aerodinamico (Gerola & Mattevi, 1996), (Harris, 1993).

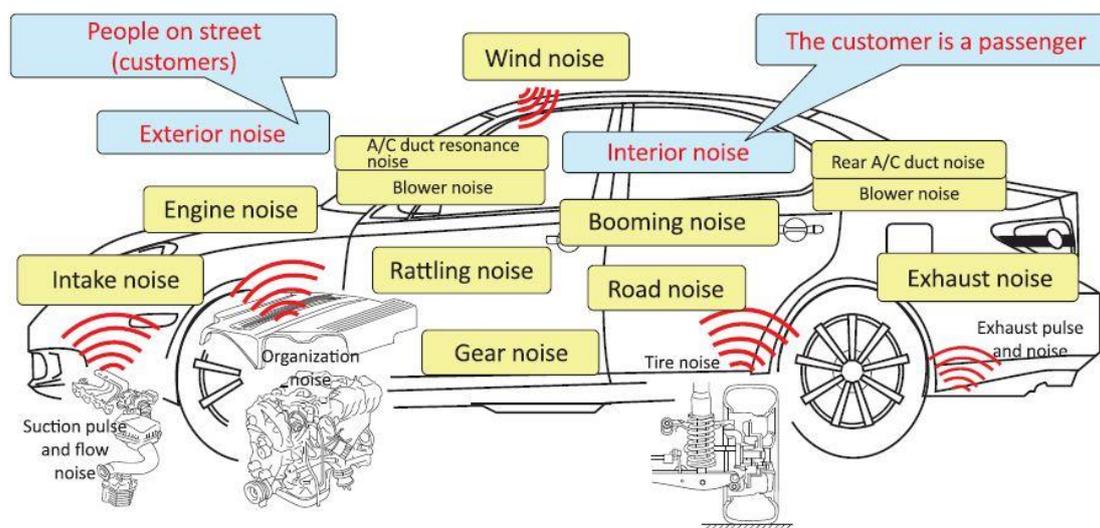


Figura 50: Schematizzazione di dettaglio dei rumori prodotti da un veicolo
(fonte: <http://dakstoyota.com>)

Il rumore prodotto dal veicolo determina un impatto acustico sia in ambiente esterno (sulla infrastruttura di trasporto) che in ambiente interno (nell'abitacolo della stessa

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

vettura). Il rumore del motore è principalmente dovuto alla combustione nella camera di scoppio, all'aspirazione dell'aria, alla emissione dei gas combusti, agli accoppiamenti meccanici (punterie, ingranaggi, trasmissioni a catena, etc.), alle vibrazioni (causate dai carichi variabili determinati dalla pressione dei gas, alle forze d'inerzia, all'azione delle masse rotanti e di quelle in moto relativo) ed alle vibrazioni indotte nella carrozzeria (Gerola & Mattevi, 1996), (Harris, 1993). Il rumore da rotolamento dipende, sostanzialmente, dalla velocità del veicolo e dalle caratteristiche e condizioni del manto stradale (rugosità, tipo di inerti e granulometrie utilizzate, grado di "ammaloramento", proprietà di assorbimento acustico, etc.), mentre hanno una minore influenza le caratteristiche del pneumatico (dimensione, carico, pressione di gonfiaggio, disegno del battistrada, grado di usura), il peso del veicolo e la sua accelerazione. Nel caso del rumore generato dal pneumatico, esso è dovuto al contatto del battistrada sulla superficie, dalla vibrazione dell'aria compressa fra i tasselli del battistrada per effetto della deformazione elastica del pneumatico ("pompaggio dell'aria") e dal cosiddetto "slip and stick", fenomeno di "aggrappamento" dello pneumatico sugli inerti superficiali della pavimentazione (Canale & Ventura, 1986), (Cirillo, 1997), (Calixto, Diniz, & Zannin, 2003). Il rumore aerodinamico, causato principalmente dall'impatto della vettura contro l'aria, è funzione, oltre che della velocità, del profilo della carrozzeria (sagoma); esso copre di norma frequenze comprese tra i 500 e i 3000 Hz ed è particolarmente fastidioso perché interferisce con la voce parlata, il cui livello oscilla fra i 45 e i 60 dBA. In generale, a basse velocità, il motore e il sistema di aspirazione e scarico sono le sorgenti di rumore predominanti, mentre a velocità maggiori di 50-60 km/h aumenta sensibilmente il contributo del rumore da rotolamento. La struttura del veicolo (telaiο, carrozzeria), pur non costituendo essa stessa una sorgente di rumore, è messa in sollecitazione sia dal motore che dalle irregolarità del manto stradale, per cui contribuisce al livello globale di rumore e di vibrazioni prodotte.

Nelle automobili è prevalente il rumore dovuto al moto del veicolo su quello prodotto dal motore, con eccezione delle fasi di stasi ed accelerazione. Diverso è il caso dei veicoli pesanti e degli autobus diesel, per i quali il rumore prodotto dal motore e dai sistemi connessi prevale sempre sul rumore dovuto alle altre cause (Figura 51).

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

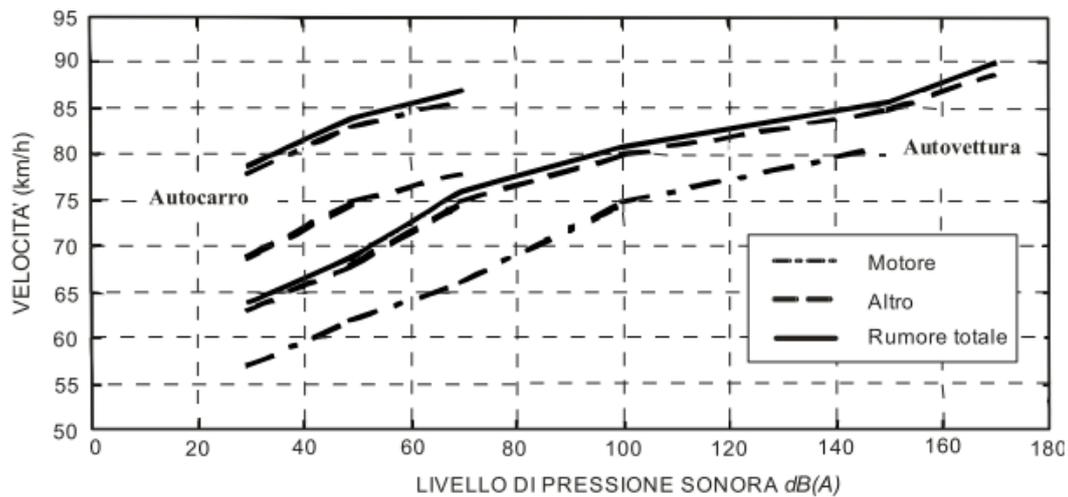


Figura 51: Livelli di emissione per veicoli leggeri e pesanti

Un ruolo importante ai fini dell'inquinamento acustico è giocato dallo stato di manutenzione dei veicoli circolanti, in quanto l'usura meccanica provoca un progressivo aumento di rumorosità in alcune componenti, quali ad esempio il sistema di scarico e l'impianto frenante. In letteratura, esistono diversi algoritmi di quantificazione del rumore da traffico stradale che rappresentano strumenti di indubbia utilità nella fase decisionale, soprattutto per la scelta degli interventi mirati al contenimento del fenomeno. L'implementazione dei modelli disponibili in letteratura è basata sull'applicazione di opportune formule di origine teorico-sperimentale e la previsione può riguardare sia il Leq , sia i livelli statistici cumulativi. I modelli classici si basano in genere su considerazioni di tipo fisico: sono ipotizzate le modalità di generazione del rumore delle sorgenti ed è quindi stimato il livello di rumore in un punto (ricettore) in funzione della distanza (d) che lo separa dalla sorgente stessa. In genere, le infrastrutture stradali vengono rappresentate come sorgenti di rumore lineari, ognuna delle quali caratterizzata da un particolare valore della potenza acustica. Si evidenzia che la formulazione del modello classico è basata esclusivamente su valutazioni di tipo acustico, considerato che il dato di "input" è costituito solamente dai risultati di misure fonometriche. Sono disponibili, tuttavia, alcuni modelli basati sull'applicazione di particolari correlazioni di origine sperimentale che consentono di stimare il livello di rumore in un punto a prescindere dal dato di misura. Tali modelli utilizzano solo le informazioni sui dati del traffico e/o sulle particolarità topografiche del sito in esame. I più affermati e collaudati modelli di previsione del rumore generato dal traffico permettono di calcolare il Leq in dB(A) partendo dai dati dei flussi veicolari. Generalmente tutti i metodi considerano le seguenti variabili caratterizzanti:

- flusso veicolare;
- tipologia del traffico veicolare;

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

- caratteristiche cinematiche del traffico (velocità dei veicoli, accelerazione addizionale, stop and go);
- caratteristiche peculiari della infrastruttura stradale;
- condizioni meteorologiche.

I metodi di previsione esistenti mostrano alcune differenze fra i parametri considerati; in ogni modo, per definire un modello di previsione del rumore emesso dal traffico veicolare, occorre:

- definire l'energia acustica emessa dal singolo veicolo in relazione, ad esempio, alla sua tipologia, al tipo di manto stradale e ai parametri del moto, identificando i principali meccanismi di emissione di rumore;
- individuare le leggi di propagazione dell'energia generata dal traffico, tenendo conto delle caratteristiche morfologiche del terreno, dell'influenza esercitata da ostacoli naturali e/o artificiali e se necessario delle condizioni meteorologiche.

Le più importanti variabili considerate nello sviluppo di modelli matematici sono flusso di traffico e composizione (Calixto, Diniz, & Zannin, 2003), (Alves Filho, Lenzi, & Zannin, 2004). L'incremento di volume di traffico, in termini di veicoli per ora, determina un incremento del rumore (Paz, Ferreira, & Zannin, 2005).

I dati di input sono dunque noti, perché predetti o assunti in progetto e verificati durante la campagna di misure. I numerosi studi sul rumore hanno condotto alla formulazione di tre principali tipologie di modelli:

- modelli che correlano il Leq con parametri geometrici e di traffico;
- modelli che stimano il Leq come somma di eventi individuali;
- modello sperimentali.

I modelli basati sulla correlazione tra parametri geometrici e di traffico, con il Leq misurato in fase di studi sperimentali, generalmente hanno come dati di input il flusso di traffico, la composizione e la velocità media della corrente veicolare, la pendenza, il rapporto tra l'altezza e la distanza delle costruzioni e a volte le condizioni della strada.

Occorre evidenziare che generalmente tutti i modelli proposti (Figura 52), derivano da una analisi statistica di dati rilevati e generalmente dalla migliore elaborazione dei risultati sperimentali, data la difficoltà o, a volte, l'impossibilità di sviluppare modelli da considerazioni analitiche sulle caratteristiche del fenomeno.

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

<i>Model</i>	<i>Author</i>
$L_{Aeq} = L_{10} - 1.3s + 0.11s^2$	Alexandre
$L_{Aeq} = 52 + 10 \text{ Log } F/d$	Alexandre
$L_{Aeq} = L_{50} + 0.0167(L_{10} - L_{90})^2$	Baranek
$L_{Aeq} = 55.5 + 10.2 \text{ Log } F + 0.3 p - 19.3 \text{ Log } d$	Burgess
$L_{Aeq} = 20 + 20 \text{ Log } V + 10 \text{ Log } (F_1 + 6F_p) - 12 \text{ Log } (d + 0.33L) + 10 \text{ Log } (0.00555\theta)$	CETUR
$L_{Aeq} = 28.8 + 0.65 L_{50}$	CSTB
$L_{Aeq} = 51 + 10 \text{ Log } F + 6.5 \text{ Log } L$	CSTB
$L_{Aeq} = 55.7 - 0.05V + 12.2 \text{ Log } F + 0.4p - 12.7 \text{ Log } L$	Garcia, Bernal
$L_{Aeq} = L_{50} + 0.079(L_{10} - L_{90})^2$	Griffits, Laungdon
$L_{Aeq} = 53.2 + 6 \text{ Log } V + 11.7 \text{ Log } (L + 6M + 10H) - 4.50 \text{ Log } W - 0.017J - 5.23 \text{ Log } (d-1)$	Jaiwr
$L_{Aeq} = 38 + 15 \text{ Log } F - 10 \text{ Log } L$	Josse
$L_{Aeq} = -17.5 - 10 \text{ Log } F + 30 \text{ Log } V - 11.5 \text{ Log } d$	Lamure
$L_{Aeq} = L_{50} + 0.021(L_{10} - L_{50})^2$	Lauber
$L_{Aeq} = 10 \text{ Log } F + 20 \text{ Log } V + C$	Lenure, Auzou
$L_{Aeq} = 49.5 + 0.21V + 12.2 \text{ log } (F_1 + 6F_p) - 13.9d$	OMTC

Figura 52: Modelli di previsione del rumore da traffico per stimare il livello equivalente

Barone et al. (2011), implementano un modello matematico di previsione del rumore da traffico considerando le caratteristiche del flusso di traffico, il contesto urbano e le caratteristiche della superficie stradale. Sulla base dei risultati di tale studio (Barone, Crocco, & Mongelli, 2011), gli stessi autori propongono modelli di previsione che prendono in considerazione le caratteristiche del flusso di traffico, il tipo di infrastruttura stradale, la larghezza della sezione stradale, la superficie stradale (tradizionale o acustica) e la distanza dalla sorgente (Barone, Crocco, Mongelli, & Aloe, 2012), (Barone, Crocco, Mongelli, & Aloe, 2012a).

Se da una parte numerosi sono gli studi condotti nell'ultimo decennio per stimare il rumore da traffico e valutare gli effetti in ambiente esterno, non risultano invece molti gli approfondimenti scientifici effettuati per valutare l'impatto acustico in ambiente interno, ossia studi finalizzati ad individuare una soluzione al problema dell'esposizione simultanea al rumore ed alle vibrazioni all'interno dell'abitacolo delle vetture. Molto poco è stato, tra l'altro, approfondito in merito all'effetto combinato di rumore e vibrazioni sul comfort all'interno dei mezzi di trasporto. Al centro degli studi finora compiuti ci sono, in particolare, le valutazioni mediche relative ai danni al fisico dovuti all'esposizione, ma anche e con sempre maggiore attenzione i tentativi di modellazione, sia meccanica che matematica, tesi alla valutazione indiretta delle sollecitazioni trasmesse dal piano stradale al sedile e dunque all'individuo (King, 1984), (Silva, Ambrosio, & Pereira, 1997), (Bedewi & Bedewi, 1996).

Proprio quella della valutazione diretta, sperimentale, delle sollecitazioni trasmesse all'individuo è una delle questioni più spinose che coloro che abbiano messo mano al problema si siano trovati ad affrontare. In questo, dunque, l'aspetto della riduzione del fenomeno ad un modello matematico più o meno dettagliato e più o meno specifico permette un approccio indiretto ma spesso esaustivo per la stima delle sollecitazioni trasmesse e per la prevenzione di effetti negativi sulla salute umana. Punto focale

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

dell'analisi è la valutazione dell'impedenza del corpo umano lungo le tre direzioni principali (Harris, 1988), (Broch, 1984).

La Whole Body Vibration (WBV) si genera quando un corpo è posto a contatto con una sorgente vibrante. Contrariamente a quanto accade nella local vibration, vibrazione locale, in cui una o più parti del corpo umano (testa, braccia, busto) sono esposte alla vibrazione, la WBV interessa l'intero corpo e provoca dunque effetti che si trasmettono all'interno dell'individuo. Il termine stesso "Whole Body Vibration" implica che l'intero corpo è sottoposto alla vibrazione e agli effetti della stessa e che non esistono particolari punti di contatto locale. Sono molti gli ambienti che possono provare la WBV: tra questi tutti i mezzi di trasporto, sia su strada, che su rotaia che in aria e in acqua, molti mezzi operativi e addirittura alcune strutture edili. Il corpo umano è molto sensibile al movimento: la natura della vibrazione, le caratteristiche antropometriche delle persone e gli effetti della vibrazione stessa possono cambiare radicalmente a seconda dell'ambiente in cui ci si trova e dei movimenti che si compiono. Queste tre aree di variabilità contribuiscono sensibilmente al modello causa-effetto della risposta umana alla vibrazione impressa. Sono diversi gli aspetti di interesse del problema, dalla risposta biodinamica del corpo umano alla risposta dinamica del sedile e dunque alla possibilità di smorzare le vibrazioni trasmesse, agli effetti sulla salute.

La conoscenza di come la vibrazione è trasmessa dal (e attraverso) il corpo umano può dare un importante contributo alla comprensione della risposta umana alla Whole Body Vibration. Esistono tra l'altro alcuni range critici di frequenza per ogni parte del corpo (occhi, spalle, testa, collo e spina dorsale). Per ciò che riguarda le vibrazioni in un veicolo possiamo affermare che l'intervallo di interesse (e quello che viene generalmente misurato) è quello compreso tra 0.5 e 5 Hz. È stato dimostrato (Griffin, 1990) che i sedili possiedono bassi valori di risonanza e che dunque amplificano gli effetti della vibrazione per frequenze inferiori ai 10 Hz. È necessario, inoltre, determinare un peso ad ogni componente del movimento a seconda degli effetti provocati sul passeggero. La norma tecnica di riferimento (UNI ISO 2631, 2014) ha fornito un metodo generale per la misurazione degli effetti di vibrazioni comprese tra 1 e 80 Hz sul corpo umano. Sono stati studiati gli effetti della vibrazione sul sistema muscolo-scheletrico al variare della frequenza e della forma della vibrazione: quelle definite pericolose sono state stimate al di sotto dei 6 Hz. Effetti dannosi sul corpo umano, infatti, possono essere provocati dall'esposizione a WBV vicine alle frequenze di risonanza delle varie parti del corpo. La spina dorsale ha una frequenza di risonanza (FR) di circa 5 Hz, quella ovvero prodotta da molte macchine per movimento terra: da qui dolori e patologie e la necessità di studiare appositi sedili, nonché la necessità di effettuare in ambiente di lavoro una valutazione di rischi specifica. Ad esempio, i diagrammi presentati dalla ISO/CD 5982 mostrano il modulo e la fase dell'impedenza driving point del corpo umano in posizione seduta con schienale dritto nella direzione z e copre l'80% del campo di valori sperimentali ottenuti dalla letteratura prima del '70. Il campione e la tipologia di riferimento è tuttavia insufficiente: troppo ristretto il numero di soggetti (39 maschi, per le donne ci sono pochi

dati disponibili in letteratura anche se le guidatrici sono in aumento), limitati il range di frequenze di sollecitazione (0.5-30 Hz), l'ampiezza dell'accelerazione di input (1-2 m/s²), la monoassialità (z), la limitazione nelle caratteristiche antropometriche dei soggetti scelti (pesi compresi tra i 54 e i 94 kg) e la postura. Nel proseguo del lavoro ci soffermeremo maggiormente sui tentativi di definizione di norme internazionali.

L'impedenza meccanica di un corpo umano seduto misurata in direzione verticale, spesso impiegata per descrivere il comportamento biodinamico, è stata misurata durante differenti condizioni sperimentali. L'impedenza definisce il complesso rapporto che esiste tra forze dinamiche alle quali è sottoposto il corpo umano e i movimenti risultanti in termini di velocità e accelerazioni. L'impedenza è definita come:

$$Z = \frac{F}{v}$$

dove F è la forza dinamica alla quale è sotto posto il corpo e v è la velocità risultante.

L'impedenza meccanica dipende fortemente dall'angolo di fase tra le due variabili che la definiscono. Lo studio (Griffin, 1990), come detto, è stato condotto variando alcuni parametri considerati fondamentali nell'analisi. A variare, dunque, sono stati i parametri relativi all'ampiezza della vibrazione, compresa tra i 0.5 e i 1.4 m/s² (discretizzata in quattro step), la frequenza di eccitazione (2-100 Hz), il peso corporeo dei soggetti, compreso tra i 57 e i 92 kg, e la posizione rilassata o eretta della parte superiore del corpo. I risultati ottenuti mostrano che l'impedenza aumenta con la frequenza fino ad un picco principale a circa 5 Hz, con alcune sostanziali differenze tra uomini e donne. Il picco dominante è principalmente dovuto alle caratteristiche meccaniche dalla spina dorsale. Superato questo picco l'impedenza decresce in maniera complessa, mostrando altri due picchi addizionali (le donne presentano un picco importante attorno ai 10 Hz). Questi picchi secondari, compresi nelle regioni tra 8-10 Hz e tra i 50 e gli 80 Hz, sono probabilmente dovuti alle caratteristiche meccaniche delle altre parti del corpo come la testa, le gambe, l'addome e il seno. La frequenza dei picchi principali e secondari diminuisce con l'aumentare del livello di vibrazione. La posizione eretta offre valori di impedenza maggiori e con picchi localizzati a frequenze un po' superiori rispetto alla posizione reclinata. Gli individui più pesanti offrono maggiori valori di impedenza ma a frequenze più basse. In letteratura sono presenti le misure di caratteristiche dell'impedenza meccanica verticale di guidatori seduti di veicoli in un intervallo di frequenze compreso tra i 0.625 e i 10 Hz, con un'ampiezza di eccitazione compresa tra 1 e 2 m/s² e con l'impiego di un simulatore di WBV. Le misurazioni sono state effettuate su soggetti in posizione seduta con piedi fermi e mani sul volante. Sono state inoltre apportate variazioni nella postura, nell'angolo di inclinazione dello schienale e nella natura o ampiezza dell'eccitazione. Le variazioni sono state introdotte per mostrarne l'influenza sull'impedenza meccanica al punto di guida. In un intervallo compreso tra gli 0.75 e i 10 Hz e per eccitazioni inferiori ai 4 m/s² è stato proposto un modello a 4 gradi

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

di libertà non lineare, per il quale i parametri sono stimati per soddisfare sia la misura dell'impedenza meccanica al punto di guida che le caratteristiche di trasmissibilità definite da una sintesi di dati pubblicati per soggetti senza schienale. L'identificazione dei parametri comporta la soluzione di una funzione di ottimizzazione multi-variabile. La risposta del modello è strutturata in modo da fornire risultati migliori esatti per ciò che riguarda l'impedenza meccanica.

L'industria sta portando avanti progetti per lo studio di modelli che possano prevedere il comportamento dinamico e meccanico del corpo umano sottoposto a vibrazione e provvedere dunque alla costruzione di sedili capaci di attenuare le sollecitazioni trasmesse dal fondo stradale e monitorare in tempo reale l'esposizione alla vibrazione (Figura 53).

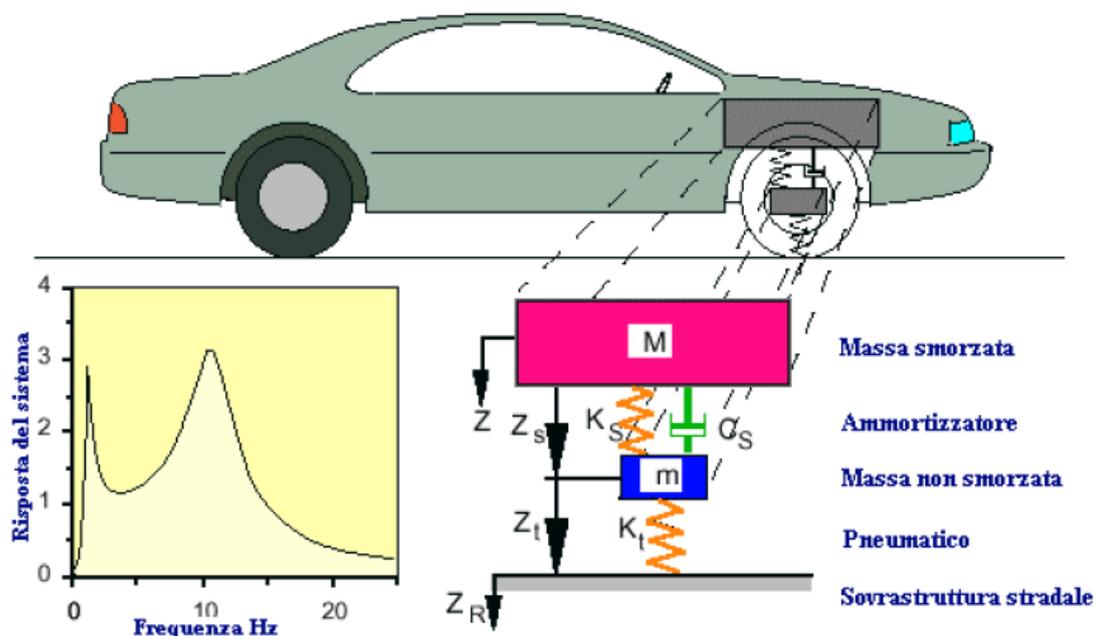


Figura 53: Caratteristiche del sistema di smorzamento dell'auto (Coni, Silanos, & Annunziata, 2000)

Per quanto concerne lo stato dell'arte sugli studi relativi al comfort acustico e vibrazionale all'interno dei sistemi di trasporto, alcuni autori si sono distinti in campo nazionale per gli studi sul campo acustico generato all'interno dell'abitacolo dei mezzi di trasporto (Farina & Pagliarini, 1985). Con lo scopo di studiare il problema dell'impatto acustico e vibrazionale, sono stati implementati procedimenti di calcolo numerico che impiegano il metodo degli elementi finiti e modelli in scala (Farina, Pagliarini, & Pompoli, 1988) come strumenti di previsione del campo acustico all'interno dell'abitacolo sin dalla progettazione del veicolo.

Accanto a quelle sopra citate, vi sono metodologie di indagine per la previsione dei livelli acustici e vibrazionali, indotti dalle caratteristiche superficiali della pavimentazione

stradale su veicoli commerciali (Coni, 1994). I risultati mettono in evidenza come pavimentazioni il cui spettro è spostato verso basse frequenze, determinino maggiori livelli vibrazionali e acustici sulla struttura e all'interno del mezzo.

Il problema del comfort acustico e vibrazionale nell'abitacolo di mezzi di trasporto suscita sempre più interesse a livello internazionale, ed è oggetto di un numero sempre maggiore di studi e ricerche. Il rumore all'interno dell'abitacolo, prodotto dal sistema veicolo, incide sul livello di concentrazione alla guida e l'esposizione alle vibrazioni può determinare offuscamento della vista durante il viaggio. In un simile scenario, le prestazioni visive sono ridotte e, contemporaneamente, è alterato il comfort di guida, verificandosi condizioni che possono potenzialmente determinare incidenti stradali.

Studi condotti (Nophiah, et al., 2012) analizzano sia i parametri di qualità del suono (Genuit, 2004), (Nor, Fouladi, Nahvi, & Ariffin, 2008), che l'andamento delle vibrazioni (Genell & Vestfjall, 2007) rispetto alle prestazioni del motore, per identificare la correlazione tra il livello di esposizione alle vibrazioni e il livello di rumore che viene prodotto nella cabina macchina.

La riduzione del livello di rumore può migliorare la qualità di guida. La vibrazione all'interno del veicolo riduce il comfort, influenzando direttamente la concentrazione alla guida. Una delle principali fonti di vibrazioni nell'abitacolo della vettura è la vibrazione dovuta all'interazione tra pneumatico e superficie stradale (O'Boy & Dowling, 2009), (O'Boy & Dowling, 2009a). Fondamentalmente il livello di vibrazione dipende da differenti fattori quali velocità della vettura, modello di pneumatico e rugosità della superficie stradale.

Tassitani et al., nel 2015, ha indagato come la presenza di discontinuità lungo il tracciato stradale (dossi) influenzi il comfort vibrazionale a bordo di un veicolo, anche a velocità ben al di sotto di quelle stabilite dal Codice della Strada (Tassitani, Barone, & Mongelli, 2016). In altri studi ancora, sono state elaborate metodologie di indagine utilizzando differenze di accelerazione, di pressione acustica e combinazione di queste, attraverso l'uso di smartphone o strumenti di precisione, per rilevare anomalie dell'infrastruttura stradale (Festa, Mongelli, Astarita, & Giorgi, 2013), (Astarita, Festa, Mongelli, & Tassitani, 2014). Tuttavia, tali metodologie, seppur utilizzando le stesse grandezze, non identificano dei valori di comfort a bordo veicolo, ma permettono esclusivamente di identificare discontinuità del tracciato stradale.

Altri studi (Lin, Chen, & Lee, 2010) propongono una metodologia che permette di misurare il comfort sui veicoli del trasporto pubblico mediante un indice chiamato *Comfort Measuring System (CMS)*. Questo sistema si compone di tre parti (Figura 54):

- Misurazioni ottenute attraverso rilievi dei sensori di smartphone;
- Database forniti dai gestori del sistema di trasporto;
- Algoritmo per la determinazione dei risultati, utilizzando le misurazioni da smartphone e dal database.

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

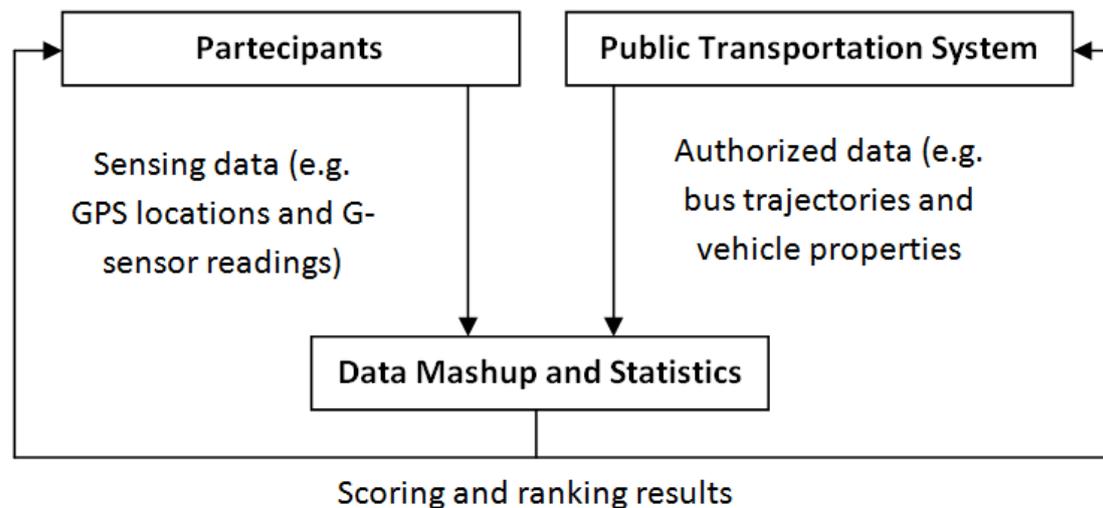


Figura 54: Architettura del CMS

Il rumore e le vibrazioni all'interno dell'abitacolo sono anche da correlare alle vibrazioni cui è soggetto il corpo del guidatore mentre è seduto su una superficie vibrante, un sedile, o mentre muove il volante (Daruis, Nor, Deros, & Fouladi, 2008), (Nahvi, Fouladi, & Nor, 2009), (Velmurugan, Kumaraswamidhas, & Sankaranarayananamy, 2012). In sostanza, il rumore e le vibrazioni nell'abitacolo del veicolo sono direttamente correlati alla velocità del motore, considerando i cambi in proporzione diretta alla trasmissione del motore (giri/min). Le fonti identificate provengono principalmente dalla combustione e da vibrazioni meccaniche (Black & Rao, 2004).

Il livello di rumore di tutti i motori a combustione interna è determinata dalle prestazioni del motore e dalla velocità. Per il motore a combustione, è possibile distinguere due tipologie: sorgenti di rumore interne ed esterne. Fonti di rumore interne sono quelle che provengono da combustione, colpi di pistone, ruota motrice, etc., mentre fonti esterne possono correlarsi a sistema di aspirazione, di scarico, ventola di raffreddamento, superficie del motore, etc. Sulla base di studi precedenti, le principali fonti di vibrazioni nel sistema veicolo possono collegarsi a due sorgenti che sono la trasmissione del motore durante accelerazione e decelerazione mentre il veicolo è in movimento e l'interazione del pneumatico con la superficie stradale (O'Boy & Dowling, 2009), (O'Boy & Dowling, 2009a).

Generalmente, ad una certa velocità del motore, il livello di vibrazione è correlabile principalmente all'interazione tra rotolamento pneumatici e superficie stradale (Hanouf & Faris, 2009), (Qatu, Abdelhamid, Peng, & Sheng, 2009). Oltre alla vibrazione causata da rotolamento pneumatici, vi è quella connessa alle sollecitazioni strutturali, che si diffonde ad altre parti, come il cerchio, scatola del cruscotto, porta, sterzo, etc. Vi è poi da considerare la vibrazione connessa al livello di rugosità della superficie stradale sulla quale il pneumatico rotola (Kindt, Sas, & Desmet, 2009). Maggiore è la rugosità della superficie stradale, maggiore sarà il livello di vibrazioni prodotto nell'abitacolo dell'auto.

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

Per un ingegnere che si occupa di acustica, è indispensabile conoscere i metodi e gli strumenti che possono essere utilizzati per misurare e valutare il livello di rumore percepito ed è anche di importanza cruciale conoscere i metodi adottati per migliorare il livello di acustica (Shin, Ih, Hashimoto, & Hatano, 2009), (Ferrer, de Diego, Pinero, & Garcia-Bonito, 2003), (Duhring, Jensen, & Sigmund, 2008). Per ridurre il livello di rumore, è necessario essere in grado di valutarlo quantitativamente e numericamente (Wang, 2009), (de Oliveira, et al., 2009).

In sostanza, i passeggeri sono solo in grado di classificare il vissuto a livello di rumore nell'abitacolo del veicolo esprimendo sensazioni soggettive. Talvolta, la definizione di rumore è diversa tra i passeggeri. Tuttavia, nella scienza e in ingegneria, per consentire ai ricercatori di identificare quantitativamente il livello del rumore, il livello acustico deve essere letto in maniera numerica (Wang, Lee, Kim, & Xu, 2007), (Leite, Paul, & Gerges, 2008), (Yildirim & Eski, 2008).

Per quanto riguarda le misurazioni a bordo, i riferimenti principali sono quelli offerti dalla normativa sulla sicurezza nei luoghi di lavoro, i quali danno una indicazione su quelle che sono le massime esposizioni a cui può essere soggetto un lavoratore (durante una giornata lavorativa di 8 ore). In particolare, il Testo unico sulla sicurezza, che recepisce le norme tecniche internazionali, tratta i due agenti fisici in maniera separata: da una parte si effettuano misurazioni dei livelli di pressione sonora in prossimità dell'orecchio al fine di calcolare l'esposizione nell'arco delle otto ore lavorative, dall'altra si effettuano misurazioni delle accelerazioni con sonda specifica per calcolare l'esposizione relativa all'uso effettivo di un macchinario vibrante.

La valutazione del rischio rumore, invece, si basa sulla determinazione del livello di esposizione giornaliera $Lex,8h$ o, nel caso settimanale Lex,w , parametri riconosciuti come descrittori dell'esposizione al rumore. Si misura il livello equivalente continuo $Leq(A)$, che rappresenta la media energetica dei vari livelli istantanei di rumore misurati in un certo intervallo di tempo, pesati con il filtro "A", il quale simula il comportamento dell'orecchio umano alle sollecitazioni acustiche. Il livello di esposizione giornaliera al rumore di un lavoratore ($LEX, 8h$) è invece un valore medio, ponderato in funzione del tempo, dei livelli di esposizione al rumore per una giornata lavorativa nominale di otto ore e, in caso di esposizione a diversi livelli sonori equivalenti durante la medesima giornata lavorativa, occorre eseguire la sommatoria per ogni tempo di esposizione. La durata di ogni misurazione deve essere sufficientemente ampia ed in grado di rappresentare il livello medio di pressione sonora continuo equivalente. La determinazione dei livelli espositivi avviene attraverso un processo articolato che prevede rilievi dei livelli di rumorosità misurati nelle postazioni con microfono posizionato nella zona occupata generalmente dalla testa. I limiti ai quali si fa riferimento dipendono sostanzialmente dalla tipologia di ambiente (esterno/interno). La Legge Quadro sull'inquinamento acustico, la n. 447/95, e i suoi decreti attuativi, stabiliscono i valori limite di *accettabilità* che si devono rispettare sia in ambiente esterno ai fini dell'impatto

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

acustico determinato da un'attività all'interno del contesto nel quale è collocata, sia per assicurare il rispetto dei limiti della normale tollerabilità all'interno degli ambienti abitativi mediante l'applicazione del cosiddetto *Criterio Differenziale*, che viene utilizzato per definire o meno il disturbo alla quiete pubblica (art. 659 C.P.), sanzionabile tra l'altro in sede penale. È riconosciuto che livelli di pressione sonora elevati possono provocare danni alla salute delle persone. Esiste una schematizzazione (Tabella 5) che, sulla base dei livelli standard emessi da alcune tipologie di sorgente, rappresenta in maniera efficace le soglie del disturbo e del dolore.

Tabella 5: Scala della lesività del rumore (Cosa M., Nicoli M., 1974)

Gamma di rumore	Livello di pressione sonora dB(A)	Caratteristiche della fascia di livelli di pressione sonora
α	0-35	<i>Rumore che non arreca fastidio né danno</i>
β	36-65	<i>Rumore fastidioso e molesto, che può disturbare il sonno e il riposo</i>
γ	66-85	<i>Rumore che disturba e affatica, capace di provocare danno psichico e neurovegetativo ed in alcuni casi danno uditivo</i>
δ	86-115	<i>Rumore che produce danno psichico e neurovegetativo, che determina effetti specifici a livello auricolare e che può indurre malattia psicosomatica</i>
ϵ	116-130	<i>Rumore pericoloso: prevalgono gli effetti specifici su quelli psichici e neurovegetativi</i>
ζ	131-150 ed oltre	<i>Rumore molto pericoloso: impossibile da sopportare senza adeguata protezione; insorgenza immediata o comunque molto rapida del danno</i>

Nella Figura 55 vengono mostrati i livelli di pressione sonora in dB(A) prodotto da alcuni oggetti e/o mezzi di trasporto.

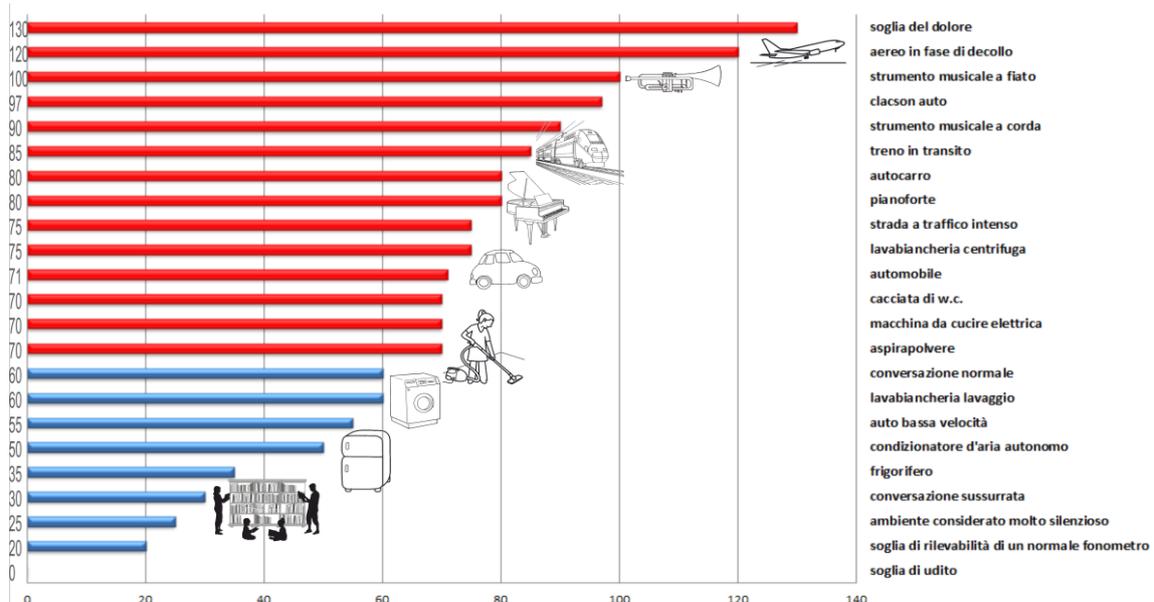


Figura 55: Livelli sonori indicativi riferiti ad alcune sorgenti (fonte www.arpamarche.it)

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

Per quanto concerne le vibrazioni all'interno di un abitacolo, in via preliminare vi è da dire che la principale fonte, generante vibrazioni, è il motore acceso. In effetti, in condizione di veicolo fermo e con motore acceso, la sollecitazione indotta a tutta la struttura è dovuta ad esso. In secondo luogo, ulteriori sollecitazioni sono indotte dalle caratteristiche della pavimentazione stradale (presenza di buche, dossi, etc.) e dalle caratteristiche e dallo stato di conservazione dei pneumatici. La vibrazione di un motore è data principalmente dalla sua struttura costruttiva: infatti, a seconda del tipo di motore, si potrà avvertire delle vibrazioni più o meno forti. Per ridurre questo problema o per mitigarlo in qualche modo, molte case costruttrici sono ricorse a diversi sistemi. Uno di questi consiste nell'equilibrare l'albero motore o di applicare l'equilibratore, un albero in sincronia con l'albero motore, che essendo munito di un peso decentrato dall'asse di rotazione, genera una vibrazione opposta a quella del motore, rinchiudendola o eliminandola definitivamente. Un altro metodo per attutire le vibrazioni è quello di applicare spessori di gomma, che assorbono gran parte della vibrazione del motore. Dal punto di vista normativo, vi sono riferimenti che descrivono in linea di principio, i metodi di misura da adottare (UNI 9916, 2004), l'uso dei dati e la valutazione del fenomeno (ISO 4866, 2010), ma esse fanno riferimento sostanzialmente a strutture fisse. Esistono altri riferimenti più precisi e accostabili all'analisi del contesto "abitacolo" che possono essere ricercati nell'ambito della valutazione del rischio vibrazioni, compendiate nell'Allegato A Parte XXXV del D.lgs. 81/08, e che trovano genesi, come già detto, nelle norme tecniche internazionali (ISO 5349-1 e ISO 2631-1). Diversamente da apparecchiature di tipo fisso, dove le vibrazioni sono generate da operazioni svolte e dal movimento di organi interni, per quanto riguarda invece le auto le vibrazioni sono prodotte dal motore (in regime di rotazione) e dalla traslazione del mezzo (superficie di scorrimento, velocità, interfaccia mezzo-superficie).

L'esposizione alle vibrazioni viene valutata, nell'ambito del D.lgs. 81/08 e ss.mm.ii., a seconda di due distinte tipologie già anticipate: le vibrazioni trasmesse al sistema mano-braccio (Figura 56) e le vibrazioni trasmesse al corpo intero (Figura 57):

- la valutazione dell'esposizione alle vibrazioni *sistema mano-braccio (HAV)* si basa principalmente sul calcolo del valore dell'esposizione giornaliera normalizzato a un periodo di riferimento di 8 ore, $A(8)$, calcolato come radice quadrata della somma dei quadrati (valore totale) dei valori quadratici medi delle accelerazioni ponderate in frequenza, determinati sui tre assi ortogonali (ah_{wx} , ah_{wy} , ah_{wz}), conformemente ai capitoli 4 e 5 e all'allegato A della norma ISO 5349-1 (2001) e secondo le modalità previste dall'allegato XXXV, parte A del D. Lgs. 81/08.

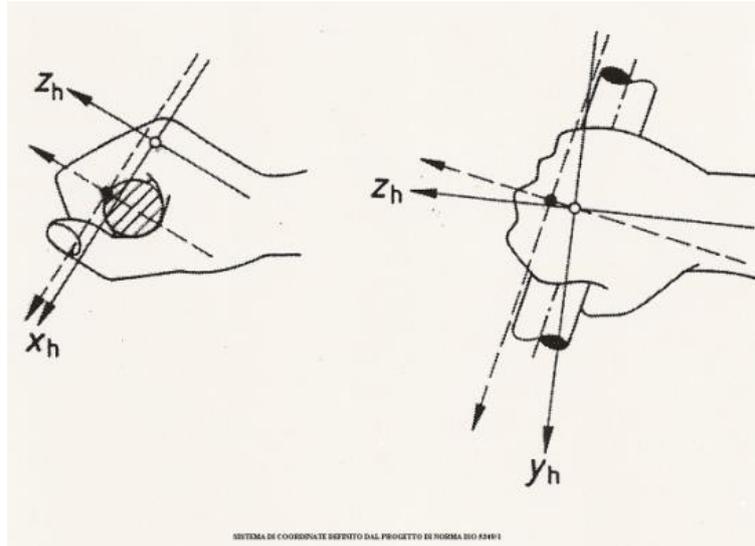


Figura 56: Orientamento assi per le misure sul sistema mano-braccio

- la valutazione dell'esposizione alle vibrazioni trasmesse al **corpo intero (WBV)** si basa sul calcolo dell'esposizione giornaliera $A(8)$ espressa come l'accelerazione continua equivalente su 8 ore, calcolata come il più alto dei valori quadratici medi delle accelerazioni ponderate in frequenza, determinati sui tre assi ortogonali ($1,4a_{wx}$, $1,4a_{wy}$, $1a_{wz}$, per una persona seduta o in piedi), conformemente ai capitoli 5, 6 e 7, all'all. A e all'all. B della norma ISO 2631-1 (1997) e secondo le modalità previste dall'allegato XXXV, parte B del D. Lgs. 81/08.

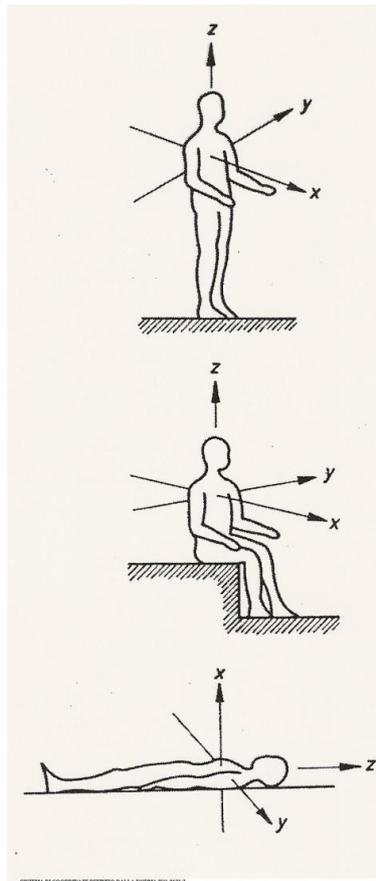


Figura 57: Orientamento assi per le misure sul corpo intero

I valori limite di esposizione per le vibrazioni trasmesse al corpo intero sono:

- il *valore limite di esposizione giornaliero*, normalizzato a un periodo di riferimento di 8 ore, fissato a $1,15 \text{ m/s}^2$;
- il *valore d'azione giornaliero*, normalizzato a un periodo di riferimento di 8 ore, fissato a $0,5 \text{ m/s}^2$.

Le vibrazioni trasmesse al corpo, come già visto, costituiscono quindi un rilevante fattore di rischio sia per la varietà e l'importanza degli effetti ad esse associati sia per il numero di persone esposte. Nel caso dei mezzi di trasporto (autobus, camion, etc.) e semoventi (trattori agricoli, carrelli elevatori, pale meccaniche, etc.), le vibrazioni si trasmettono attraverso i sedili di guida agli addetti in posizione assisa.

Per la valutazione tecnica delle vibrazioni trasmesse al corpo viene generalmente seguita la norma internazionale ISO 2631/1-1997, che ha integrato ed aggiornato la precedente versione del 1985. Nella norma viene definito un sistema di coordinate ortogonali riferito soggetto esposto, con origine fissata in corrispondenza del torace:

- *l'asse z* passa per i glutei e la testa (per i piedi e la testa nel caso di un soggetto in posizione eretta);
- *l'asse x* per la schiena ed il petto;

- *l'asse y* per le due spalle.

Di fatto, se si considera la direzione di marcia di un mezzo di trasporto, tali coordinate corrispondono generalmente agli assi verticale (z), longitudinale (x) e trasversale (y). L'intensità delle vibrazioni viene descritta in termini di accelerazione (a) espressa in m/s²; l'intervallo di frequenza da considerare risulta compreso tra 0,5 e 80 Hz.

La suddetta ISO 2631/1 dà indicazioni sul calcolo dell'accelerazione a_v , ovvero l'accelerazione totale trasmessa al corpo, partendo dalle accelerazioni trasversali, longitudinale e verticali e dei relativi pesi.

$$a_v = \left[(k_x * A_{wx})^2 + (k_y * A_{wy})^2 + (k_z * A_{wz})^2 \right]^{0.5}$$

dove:

- k_x , k_y e k_z sono i fattori moltiplicativi rispettivamente dell'asse x, y e z; secondo la ISO 2631/1 sono pari a $k_x=1.4$, $k_y=1.4$ e $k_z=1$;
- A_{wx} , A_{wy} e A_{wz} sono rispettivamente le accelerazioni ponderate lungo gli assi x, y e z.

Le vibrazioni sui mezzi di trasporto sono dovute prevalentemente al funzionamento del motore ed alla traslazione del mezzo. Il funzionamento dei motori a combustione interna produce vibrazioni di frequenza relativamente elevata, in genere tra 20 e 60 Hz. Come è noto la sensibilità del corpo umano a queste frequenze è modesta, in quanto superiori alla frequenza di risonanza del rachide (5-15 Hz). Le vibrazioni dovute alla traslazione del mezzo ed alle sollecitazioni originate dal profilo irregolare del terreno sono caratterizzate da componenti di bassa frequenza (1-20 Hz). Generalmente, negli spettri delle accelerazioni verticali si presenta un picco di frequenza pari alla frequenza di risonanza del mezzo (2-6 Hz). Per quanto riguarda gli spettri delle accelerazioni orizzontali, questi, in genere, sono piatti o presentano elevati valori a frequenze molto basse. In relazione al particolare andamento delle curve di isopercezione delle vibrazioni, la sensibilità alle accelerazioni verticali è massima tra 4 e 8 Hz, mentre la sensibilità alle accelerazioni orizzontali è massima tra 1 e 2 Hz. L'entità delle vibrazioni dipende, dunque, dalle sollecitazioni a cui il mezzo è sottoposto ed in particolare dalla velocità di traslazione e dal tipo di terreno. Nel caso dei mezzi di trasporto, che operano su superficie uniformi (strada o rotaia), la velocità di traslazione, generalmente elevata, assume un rilievo determinante. Nella Figura 58, vengono riportati i differenti fattori che influenzano le vibrazioni sugli automezzi e sui velivoli.

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

Automezzi	Velivoli
<ul style="list-style-type: none">• <i>tipo di autoveicolo (di trasporto, semoventi, etc.);</i>• <i>caratteristiche del contatto al suolo (gomme, cingolato, rotaia, etc.);</i>• <i>percorrenza chilometrica (media e complessiva);</i>• <i>velocità media;</i>• <i>caratteristiche del percorso;</i>• <i>operazioni di lavoro svolte con eventuale uso di attrezzi ausiliari;</i>• <i>condizioni di esercizio (sospensioni, sedile, motore, etc.)</i>	<ul style="list-style-type: none">• <i>tipo di velivolo;</i>• <i>caratteristiche del propulsore;</i>• <i>ore di volo (medie e complessive);</i> <p><i>tipo di servizio svolto</i></p>

Figura 58: Confronto tra fattori che influenzano le vibrazioni su automezzi e su velivoli

Diversi sono i parametri che possono pertanto influire sulle vibrazioni. Questi sono legati non solo al tipo di mezzo (sospensioni, gommatura, sedile, etc.), al tipo di percorso (superficie, etc.), alla velocità di movimento, ma anche a fattori casuali (ad es. frenate improvvise per traffico intenso.) e soggettivi (modalità di guida, etc.). Al riguardo va infine sottolineato che il livello più basso di rischio da WBV si ha per i mezzi su rotaia, rispetto ai quali si possono avere valori medi di accelerazione aumentati di circa due volte (per gli autobus), tre volte (per i trattori agricoli), quattro volte (per i carrelli elevatori diesel), nove volte (per le pale meccaniche).

Per tutti i motivi sopracitati, ogni mezzo di trasporto può causare agli utenti del servizio stesso situazioni più o meno sconfortevoli, sino ad arrivare, per casi limiti, anche a danni all'organismo. Per tale motivo, risulta essere fondamentale nella definizione del comfort a bordo tenere conto di queste due grandezze: rumore e vibrazione.

4. Strumentazione e software per l'analisi sperimentale

4.1. Introduzione

Per le misure di rumore e vibrazioni/accelerazioni si sono utilizzate delle strumentazioni di precisione, con certificati di taratura e conformi alle principali normative e standard Europei ed Internazionali. L'uso di tali strumenti, ha permesso di ottenere delle misure accurate che difficilmente si sarebbe potuto ottenere attraverso altre strumentazioni. Tutti i dati registrati durante le sperimentazioni sono stati georeferenziati allineando i dati strumentali con i dati di localizzazione misurati mediante il GPS presente all'interno dello smartphone.

4.2. Strumentazione

La strumentazione utilizzata durante le sperimentazioni è stata fornita dalla società 01 dB per il tramite della società AESSE Ambiente S.r.l., in seguito alla firma di un protocollo d'intesa tra l'Università della Calabria e la società stessa. La strumentazione è rappresentata da:

1. **Fonometro di classe 1 BLUE SOLO:** è uno strumento dedicato alle misure di rumore in conformità ai principali standards Europei ed Internazionali, come NF EN 60804 (2000), CEI 1260 (1995), CEI 61672-1 (2002), NF EN 60651 (2000) e NF S 31-084 (2002) "*Méthode de mesurage des niveaux d'exposition au bruit en milieu de travail*" e ISO 9612 (1997) "*Guidelines for the measurement and assessment of exposure to noise in a working environment*". Permette l'analisi del segnale in frequenza in tempo reale con filtri 1/3 d'ottava, verificando anche la presenza di componenti tonali. Permette di individuare la presenza di una eventuale componente impulsiva mediante la misura in parallelo con costanti di tempo Fast, Slow ed Impulse. Lo strumento è dotato di un calibratore Mod. Cal 21 di Classe 1 conforme alla IEC 60942 (1997), che invia un segnale a 94 dB con una frequenza di 1000 MHz per la calibrazione. Infine, lo strumento è dotato di un microfono di classe 1, con integrato un preamplificatore mod. PRE21S.



Figura 59: Fonometro Blue Solo 01 dB

Il SOLO permette di:

- misurare i livelli di pressione sonora equivalente;
- impostare, automaticamente, un periodo di misura;
- registrare gli eventi al superamento di un livello di soglia impostato;
- trasferire i dati mediante connessione USB o RS232 al pc per l'elaborazione;
- analizzare i dati mediante il software dB Trait;
- visualizzare sul display, in real time, i livelli di pressione sonora misurati;
- visualizzare sul display i risultati della misurazione, attraverso l'uso di grafici.

Le caratteristiche tecniche dello strumento sono riportate in Figura 60.

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

Standards	CEI 61672-1 (2002) / NF EN 60651 (2000) / NF EN 60804 (2000) CEI 1260 (1995) / ANSI 1.11 / ANSI 1.4 CEM / EMC EN 50081-1 and 2 / EN 50082-1 and 2 / CEI / IEC 61000
Metrology	Single dynamic range: 30-137 dB(A) in class 1 and class 2 Weighting: A, B, C and Z Leq/Lp, Lpmin, Lpmax (S, F, I) / Lpk (C, Z) Short Leq with time step from 1 to 60 s LAE, Leq start/stop up to 24 hours Switchable 0.3 / 10 Hz high-pass filter BackErase mode: Erasing of the last 10 s of signal Underload and overload indicators
Input / Output	AC/DC output RS232 output for Kyoline-type serial printer
Real-time frequency analysis (option)	1s average 1/1 or 1/3 octave (from 12.5 Hz to 20 kHz) Average 1/1 or 1/3 octave in Lp (F, S)
Performances	Parallel measurement of Leq, Lp and Lpk (1 time weighting) with possible selection of 2 different frequency weightings Storage of 99 sets of results Backlit screen and keyboard 24-hour operating life Rechargeable battery, non volatile memory Ergonomic page display Language: French, English, Spanish, German, Italian, Portuguese
Standard accessories	Preamplifier PRE21S Microphone: ½", 50 mV/Pa, class1 or 20 mV/Pa, class 2 Windscreen Integrated battery and mains power supply Fully equipped carrying case
Optional accessories	Carrying pouch External battery charger and additional battery(ies) Calibrator CAL21 (class 1) or CAL02 (class 2) Serial printer Microphone extension cable

Figura 60: Caratteristiche tecniche Solo

2. **Dosimetro di vibrazioni VIB 008:** è uno strumento dedicato alle misure di vibrazioni “mano braccio” ed “a corpo intero”, in conformità alla direttiva della Comunità Europea 2002/44/EC e ai conseguenti decreti applicativi italiani come il D.lgs. 81/2008 (Testo Unico in materia di salute e sicurezza sul lavoro). Lo strumento,

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

inoltre, risulta essere conforme agli standard ISO 5349-1 “*Mechanical vibration -- Measurement and evaluation of human exposure to hand-transmitted vibration -- Part 1: General requirements*” e ISO 2631-1 “*Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 1: General requirements*”. Il vibrometro è di dimensioni ridotte ed ergonomico, in modo da consentire un facile utilizzo, consentendo, comunque, di acquisire i dati, memorizzarli e trasferirli in un qualsiasi PC o Tablet con sistema operativo Windows. Il Kit utilizzato nelle sperimentazioni, mostrato in Figura 61, è composto dall’unità di acquisizione, memorizzazione, trasferimento dati e da un accelerometro con relativo kit per la misura di vibrazioni a corpo intero. L’accelerometro, mostrato in Figura 61, deve essere posizionato sul sedile del passeggero, rispettando la direzione degli assi indicati sul cuscino stesso.



Figura 61: Dosimetro di vibrazioni VIB 008 01 dB con accelerometro

Nel kit fornito dalla società 01dB, vi è anche il software di acquisizione dati, oltre ad un software per l’analisi completa dB Maestro ver. 5.5.

Il vibrometro VIB 008, permette di:

- registrare, con intervalli di tempo di 1 secondo, la storia temporale di tutte le grandezze lungo tutti gli assi in contemporanea;
- valutare l’esposizione giornaliera A (8), come previsto dalle normative vigenti in materia di salute e sicurezza nei luoghi di lavoro;
- analizzare in frequenza in 1/3 d’ottava i dati acquisiti;
- memorizzare fino ad un massimo di 20 ore in continuo;

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

- registrare, collegando un microfono, eventuali commenti o note vocali;
- collegarsi, tramite Bluetooth, ad un qualsiasi dispositivo con sistema operativo Windows, sia esso Tablet o PC, per visualizzare in real time i dati misurati, mediante l'uso del software dBA (8);
- trasferire i dati memorizzati, mediante Bluetooth, per elaborarli mediante il software dB Maestro.

Le caratteristiche tecniche dello strumento sono riportate in Figura 62.

	Whole body mode	Hand arm mode
		
Linearity domain	70 dB	70 dB
Dynamic range	0.04-120 m/s ²	0.5-3000 m/s ²
Frequency weightings	Wd, Wk, 1/1, 1/3	Wh, 1/1, 1/3
Broad-band weighting	0.4 - 3700Hz	
Display resolution	0.01	0.01
Recorded magnitudes	Band-pass acceleration Weighted acceleration Band-pass and weighted peak and peak-to-peak acceleration Peak factor Equivalent acceleration Daily exposure Mobile RMS vibration MTVV Vibration dose VDV Seat efficiency SEAT (option)	Band-pass acceleration Weighted acceleration Band-pass and weighted peak and peak-to-peak acceleration Equivalent acceleration Daily exposure
Configuration	Transducers Units m/s ² , g Integration time Reference duration Time constant	Transducers Units m/s ² , g Integration time Reference duration
Alarm, overload counting	Yes	Yes
Calculated magnitudes	Av, aeq, A(8), A(8)v, VDV, Fc, MTVV SEAT(option) Measurement time, calculation time	Av, A(8) Measurement time
Integration time	From 1s to 60s by steps of 1s	From 1s to 60s by steps of 1s
Spectrum (option)	.	
Octave	1 Hz - 2kHz	1Hz - 2kHz
1/3 octave	0.8Hz- 2.5kHz	0.8Hz- 2.5kHz
Signal mode (option)		
Sampling frequency	256-8192Hz	256-8192Hz
Pre-trigger	Depends on the calibration frequency From 0 s to 16 s	Depends on the calibration frequency From 0 s to 16 s
Maximum duration	-	-
Post-trigger	-	-

Operating temperature: -10°C / + 50°C (0-95% RH)

Figura 62: Caratteristiche tecniche VIB 008 01dB

- Dosimetro di rumore WED 007:** è uno strumento dedicato alle misure di rumore in conformità agli Standards NF S 31-084 (2002) “*Méthode de mesurage des niveaux d'exposition au bruit en milieu de travail*” e ISO 9612 (1997) “*Guidelines for the measurement and assessment of exposure to noise in a working environment*”. A

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

differenza del fonometro SOLO, il dosimetro di rumore WED 007, è di dimensioni ridotte ed ergonomico, in modo da consentire un facile utilizzo, consentendo, comunque, di acquisire i dati, memorizzarli e trasferirli in un qualsiasi PC o Tablet con sistema operativo Windows. Il Kit utilizzato nelle sperimentazioni, mostrato in Figura 63, è composto dall'unità di acquisizione, memorizzazione, trasferimento dati e da un microfono tipo MCE321 di classe 2, con integrato un preamplificatore. Il microfono, mostrato in Figura 63, viene fornito anche di un cavo che permette il posizionamento a ridosso dell'orecchio dell'utente.



Figura 63: Dosimetro di rumore WED 007 01 dB con microfono

Attraverso l'interfaccia Bluetooth è possibile gestire integralmente il setup di misura direttamente da Pocket PC o Notebook programmare la misura, intervenire durante l'acquisizione inserendo codifiche e/o annotazioni vocali e gestendo al meglio lo start-stop dello strumento. È possibile acquisire LAeq, LCEq, LAsp, LAFp; LAspmax, LAFpmax, LASeq, LAFeq con tempo di integrazione da 1 a 60 secondi. La Memoria flash integrata, tipo Micro SD 256 MB garantisce una capacità di memorizzazione per LAeq (1s) + LCpk > 100 giorni. I dati acquisiti possono essere importati e analizzati con il software dBTrait.

Il dosimetro di rumore WED 007, permette di:

- registrare in simultanea i livelli sonoro in dB(A) e dB(C);
- valutare l'esposizione giornaliera Lex,8h, come previsto dalle norme vigenti in materia di salute e sicurezza nei luoghi di lavoro;
- misurare in gamma dinamica da 40 a 140 dB(A);

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

- conteggiare i picchi superiori a 135, 137 e 140 dB(C);
- memorizzare fino ad un massimo di 50 ore in continuo;
- collegarsi, tramite Bluetooth, ad un qualsiasi dispositivo con sistema operativo Windows, sia esso Tablet o PC, per visualizzare in real time i dati misurati, mediante l'uso del software dBWED;
- trasferire i dati memorizzati, mediante Bluetooth, per elaborarli mediante il software dB Trait.

Le caratteristiche tecniche dello strumento sono riportate in Figura 64.

	Leq / Lp channel	Peak channel
Precision class	Class 2	
Linearity domain	80 dB	50 dB(C)
Dynamic range	2 40-120 dB / 60-140 dB	1 (fixed) 93-143 dB
Frequency weightings	A and C in //	C or Z
Measured magnitudes	LAeq, LCEq, LASp, LAFp, LCSp, LCFp LASpmax, LAFpmax	LCpk, LZpk
Configuration	Tc, Lc, LCutoff, Q, LAXMax	135, 137 and 140 dB
Peak counting	-	Yes
Calculated magnitudes	Lex,d, EAT, Dose, SEL, LAvg, TWA, Projected Exp., Projected Dose, Lxx	-
Integration time	from 1s to 60s	-

Microphone: type MCE321 class 2, 11 mV/Pa, 9mm, weight < 10 g
Operating temperature: -10°C / + 50°C (0-95% RH)

Figura 64: Caratteristiche tecniche WED 007 01dB

4. **Sorgente sonora omnidirezionale FOUR e amplificatore PHON-X-Mark I:** è un diffusore acustico omnidirezionale, usato prevalentemente per le misure del potere fonoisolante fra ambienti secondo le normative vigenti D.P.C.M. 5/12/97 e UNI 11367) e per la misura del tempo di riverberazione degli ambienti (ISO 354). Grazie all'utilizzo di un amplificatore dedicato, il FOUR, mostrato in Figura 65, è in grado di emettere un livello di rumore sufficiente a caratterizzare la maggior parte degli ambienti. FOUR soddisfa le richieste della ISO 140 e ISO 3382.



Figura 65: Dodecaedro FOUR e amplificatore PHON-X Mark I (Fonte: <http://www.aesse-ambiente.it>)

PHON-X Mark I è uno strumento in grado di fornire l'appropriata amplificazione dei segnali diretti al Dodecaedro. La doppia alimentazione rete-batteria (a litio polimeri) rende lo strumento estremamente versatile anche in casi in cui non sia possibile accedere alla rete elettrica o in cui il cavo di alimentazione possa creare problemi di connessione o intralcio. A rendere ancora più autonomo lo strumento, è un generatore di rumore rosa e bianco che, attraverso un selettore a levetta, permette di scegliere e inviare all'amplificatore uno dei due rumori internamente disponibili. Il cuore del sistema è il pre-amplificatore su cui vengono convogliate le sorgenti interne ed esterne, controllando il guadagno del segnale in uso che sono controllati con un led il superamento della soglia di saturazione segnale (overload). Sono presenti due finali in classe "D" i quali provvedono ad amplificare ciascuno metà dei dodici altoparlanti del sistema FOUR. Questa soluzione ha permesso di ottenere, in spazi ridotti, potenze elevate anche con alimentazione a batterie e l'ottimizzazione della dissipazione di calore con l'uso di ventola di raffreddamento a bassissimo rumore (trascurabile durante le misurazioni). Il sistema può essere avviato in controllo manuale e in controllo remoto con telecomando. La scheda tecnica dello strumento è riportata nella Figura 66.

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

Risposta in Frequenza	100Hz - 6400 Hz
Potenza Sonora	Migliore di 120dB
Impedenza	3 Ω
Altoparlanti	12 x 4''
Connettori	1 x Neutrik Speakon 4 pole
Struttura Cabinet	Multistrato Betulla da 15 mm
Dimensioni (Diametro Sfera)	30 cm
Peso	8.5 kg
Diametro Ingaggio Stativo	25 mm
Accessori	Borsa morbida (in dotazione)

Figura 66: Scheda tecnica del dodecaedro FOUR

5. **Smartphone Samsung GT-I9505:** è uno smartphone con Sistema Operativo Android v. 5.0.1, con display da 5'' ad elevata risoluzione. Supporta reti UMTS/GSM e connettività LTE, HSPA, UMTS, EDGE e GPRS, oltre alla connettività Wi-Fi e al sistema di localizzazione GPS.



Figura 67: Samsung Galaxy GT-I 9505

4.3. Software

Nella fase di sperimentazione sono stati utilizzati alcuni software (dB Trait e dB Maestro) di forniti dalla società **01dB e Aesse Misure**, per l'estrapolazione e l'elaborazione dei dati fonometrici e vibrazionali, inoltre, è stata usata l'applicazione **Torque Pro v. 1.8.54**, per sistemi operativi Android, utili per la geolocalizzazione del viaggio. Infine, in fase di post elaborazione è stato utilizzato un software Open Source (**Quantum GIS v.1.8.0 Lisboa**) per l'elaborazione dei rilievi in ambiente GIS.

1. Software dB Trait ver. 5.5

Il software dB Trait, prodotto dalla 01 dB e fornito dalla Aesse Misure, è stato utilizzato per lo scarico e la post-elaborazione dei dati acquisiti sia dal Fonometro BLUE SOLO che dal dosimetro di rumore WED 007. Il software, compatibile con i sistemi Windows 32 e 64 bit, è dotato di tutte l'utility e gli strumenti per analisi approfondite dei dati acquisiti (Figure 68 e 69).

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

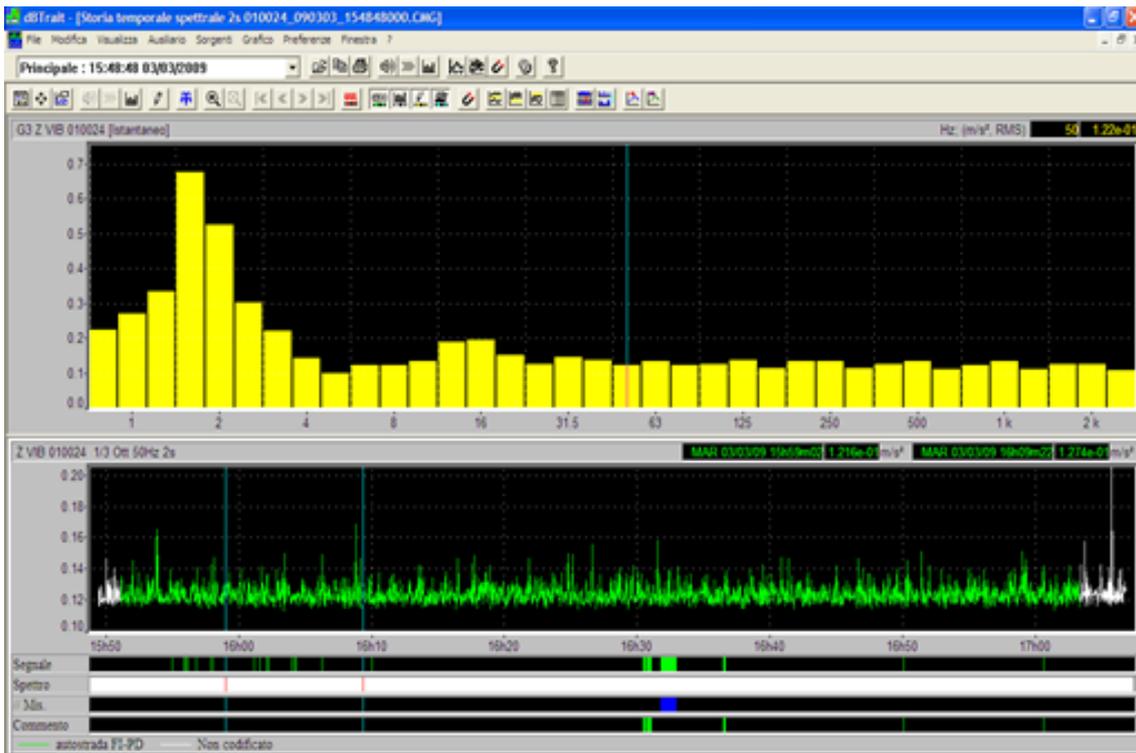


Figura 68: Schermata ambiente di lavoro con diagramma dei Leq e spettro di frequenza

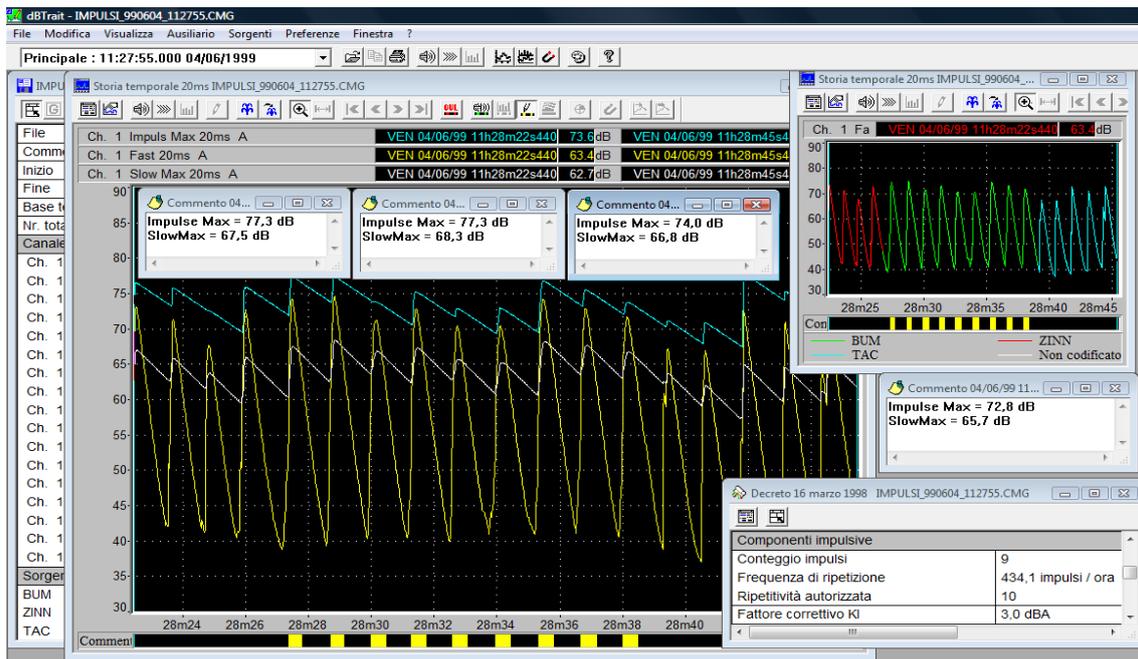


Figura 69: Schermata ambiente di lavoro con storia temporale e identificazione delle sorgenti

Esso consente, inoltre, di eseguire codifiche/mascheramenti dei dati, analisi statistiche, creazione di report. Di seguito vengono elencate le funzionalità principali.

- Elaborazione, visualizzazione time history e spettri anche contemporaneamente, stampa dati, esportazione grafici in formato grafico e testo, verso software Office;
- Esportazione su fogli di calcolo;

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

- Ricerca automatica toni puri e rumore impulsivo secondo DM 16/03/98. Report automatico;
- Analisi statistica a intervalli programmabili;
- Visualizzazione fino a 6 tracciati temporali in contemporanea;
- Calcolo Leq tra i cursori;
- Visualizzazione dei tracciati temporali di tutte le bande in frequenza;
- Possibilità di eliminare o specificare determinati periodi in funzione di soglie gestibili dall'utente;
- Possibilità di concatenare misure eseguite in tempi differenti;
- Possibilità di riascolto eventi audio (se presenti) mediante doppio click del mouse, possibilità di re-analisi in frequenza dell'evento audio;
- Calcolo dei livelli delle sorgenti o degli eventi (SEL, Leq, Max, Min, orario di presenza, etc.);
- Calcolo parametri ex Direttiva Europea (Lden, Ldn, etc.);
- Possibilità di determinare gli eventi in funzione del superamento di una determinata soglia e in funzione della durata del superamento; calcolo automatico dei seguenti valori dell'evento: LAeq, SEL, Lmax, Lmin, durata, orario evento, conteggio numero eventi;
- Analisi dei livelli sonori in intervalli programmabili, Time history, Ln e analisi statistica (Livelli percentili Ln da L0.1 a L99.9 con passo 0.1 definibili dall'utente);
- Analisi statistica cumulativa e distributiva;
- Ricalcolo di livelli per intervalli temporali definibili da utente (LAeq orario, LAeq day, night, etc.);
- I dati possono essere stampati ed esportati su qualsiasi foglio di calcolo sia nella versione numerica che grafica. Visualizzazione di tutte le tabelle, grafici, spettri e storie temporali di tutte le grandezze misurate (totali, parziali, Leq tra i cursori, identificazione automatica degli eventi, gestione dei marker, gestione dei documenti integrati con grafici, testi, file di vario genere);
- Multitasking;
- Ambiente Windows XP, 2000, 98.

2. *Software dB Maestro ver. 5.5*

Il software dB Maestro è un prodotto della 01 dB, sviluppato principalmente per la valutazione dell'esposizione di un individuo alle vibrazioni sul luogo di lavoro, in conformità alla Direttiva Europea 2002/44/CE e molti standard internazionali (ISO 8041 (2005), ISO 5349 (2001), ISO 2631 (1997)). È un software in grado di elaborare tutti i dati acquisiti con il dosimetro VIB utilizzando un tablet o un personal computer sul quale è installato il software di acquisizione dB(8).

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

I dati raccolti da remoto vengono analizzati con la tecnologia senza fili Bluetooth senza causare alcun disturbo per l'operatore sul posto di lavoro durante la misurazione, fornendo così i valori delle misurazioni nelle reali condizioni di lavoro.

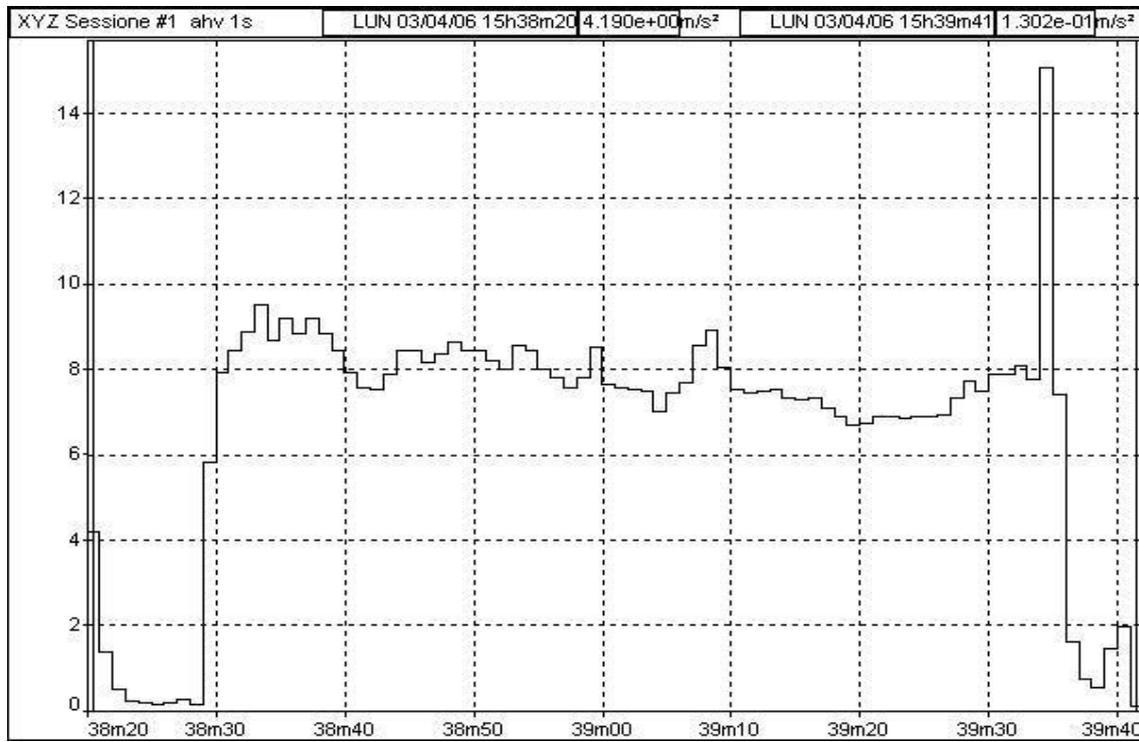


Figura 70: Rappresentazione dell'evoluzione temporale di un parametro rilevato

In sintesi, il software dB Maestro consente le seguenti operazioni:

- Visualizzazione di tutte le storie temporali acquisite in parallelo Asse X, Y, Z, Asum, Amax;
- Analisi statistica completa;
- Analisi cumulativa e analisi distributiva;
- Multitasking;
- Copia-incolla dei dati e dei grafici su qualsiasi foglio di calcolo office, etc.;
- Dati stampabili ed esportabili (semplicemente con un copia-incolla) su qualsiasi foglio di calcolo;
- Visualizzazione di tutte le tabelle, grafici, spettri e storie temporali di tutte le grandezze misurate, report automatici;
- Gestione di periodi particolari definibili da utente;
- Possibilità di definire dei tratti della storia temporale da rinominare e gestire in maniera singola;
- Possibilità di catalogare le misure eseguite indicando tipo di macchinario misurato e posizione dell'accelerometro;
- Calcolo automatico, una volta impostato il tempo di esposizione, dell'esposizione nelle 8 ore;

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

- Individuazione automatica del tempo necessario per raggiungere il livello di azione e il livello limite;
- Possibilità di scaricamento di file audio associata agli eventi sonori.

3. App Torque Pro ver. 1.8.54

Torque Pro è un'applicazione a pagamento per sistemi Android, che consente di vedere quello che una macchina fa in tempo reale, ottenendo i codici di errore OBD, le prestazioni della vettura, i dati dei sensori. È un utile strumento di diagnostica dotato di adattatore Bluetooth per la connessione al sistema OBD2 gestione del motore. È in grado di utilizzare il GPS per fornire dati istantanei geo-localizzati, impiegando anche altri sensori contenuti all'interno del dispositivo sul quale è installato. Al termine della registrazione restituisce un file di dati organizzato rispetto a tutte le informazioni che si è deciso in fase preliminare di acquisire. Ha un'interfaccia grafica molto intuitiva, costituita da un vero e proprio cruscotto, come mostrato in Figura 71.



Figura 71: Cruscotto dell'App Torque Pro

4. Quantum GIS v.1.8.0 Lisboa

Quantum Geographic Information System (QGIS) è un software Open Source di analisi geografica gratuito che permette di visualizzare, modificare e stampare mappe, nonché analizzare dati in relazione al contesto geografico di riferimento. È un sistema progettato per ricevere, immagazzinare, elaborare, analizzare, gestire e rappresentare dati su mappe. Consente di eseguire analisi statistiche e gestire dati attraverso un database.

5. I sistemi di trasporto collettivo oggetto di studio

5.1. Introduzione

L'attività sperimentale ha avuto uno sviluppo temporale molto lungo, essendo strettamente legata agli orari di esercizio dei mezzi di trasporto che si è valutati. Nello specifico, le misure di rumore e vibrazioni sono state effettuate sui mezzi di trasporto di Ferrovie della Calabria S.r.l., in seguito alla firma di un protocollo di intesa tra l'Università della Calabria e la stessa azienda di trasporto.

L'attività sperimentale ha riguardato due tipologie di mezzi di trasporto, con specificità tra loro differenti:

- treni;
- autobus.

5.2. I treni oggetto di studio

I treni oggetto delle misurazioni e in possesso di Ferrovie della Calabria, lungo la tratta Cosenza – Rogliano, sono:

1. **Automotrice DE M4c.500 STADLER:** è un convoglio bloccato a due casse adatto per la trazione con cremagliera, fabbricato dalla società Svizzera Stadler Rail Group per Ferrovie della Calabria. Rappresenta il primo esemplare, fabbricato dalla Stadler, a scartamento ridotto (950 mm) ed a piano parzialmente ribassato, per il mercato italiano. Il sistema, ordinato da Ferrovie della Calabria nel 2007, ha toccato per la prima volta i binari alla fine del 2009 presso il deposito di Cosenza VaglioLise. Il sistema è composto da due casse, ognuna con un motore Cummins a 6 cilindri e generatrice elettrica, collegata a due assi motori posti alle estremità della carrozza, tutti dotati di ruota dentata. La collocazione degli equipaggiamenti di propulsione al di sopra dei carrelli motori, nelle zone anteriori dell'automotrice, garantisce un elevato sforzo di trazione anche su tratti a forte pendenza, con una velocità massima omologata pari a 80 Km/h. Il sistema, per ogni automotrice, garantisce un totale di 100 posti a sedere (www.stadlerail.com).

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo



Figura 72: Automotrice DE M4c. Gruppo 500 STADLER



Figura 73: Interni Automotrice DE M4c. Gruppo 500 STADLER

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

2. **Automotrice FCL M2.200:** è un'automotrice prodotta all'inizio degli anni '70, da Breda come evoluzione delle motrici M2 serie 120 a scartamento ridotto (950 mm). Il sistema è composto da una singola cassa con motore diesel prodotto da Man Voith con retarder, ovvero un sistema di frenatura privo di usura, con una trasmissione idromeccanica. La velocità massima omologata per il sistema è pari a 90 Km/h. Infine, il sistema garantisce un totale di 52 posti a sedere.



Figura 74: Automotrice FCL M2.200 BREDA



Figura 75: Interni Automotrice FCL M2.200 BREDA

- 3. Automotrice FIAT M4:** è un'automotrice prodotta nella metà degli anni ottanta da Ferrosud, come naturale evoluzione della motrice M2.200. Il sistema è composto da una singola cassa, l'energia viene garantita da due motori Diesel Iveco 6 cilindri, posizionati tra i perni delle ruote e collegati a due carrelli. La trasmissione è meccanica con un cambio a 5 marce a giunto idraulico. La velocità massima omologata per il sistema è pari a 100 Km/h. Infine, il sistema garantisce un totale di 52 posti a sedere più due strapuntini.

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo



Figura 76: Automotrice FIAT M4.400



Figura 77: Interni automotrice FIAT M4.400

5.3. Gli autobus oggetto di studio

Gli autobus, oggetto delle misurazioni, utilizzati da Ferrovie della Calabria lungo la linea Cosenza Vaglio Lise – Catanzaro Germaneto, in quattro specifiche corse prese in considerazione per la sperimentazione, sono:

1. **Setra S 415 HDH:** è un autobus a tre assi, con una lunghezza totale di 12.30 metri, un'altezza di 3.860 metri ed una larghezza di 2.550 metri. L'autobus monta un motore MB OM 457 a sei cilindri da 11967 cm³ con una potenza nominale di 315 kW. I posti a sedere previsti sono 52. L'autobus è dotato di sistema di riscaldamento mediante termoconvettore nelle fiancate. Le principali dimensioni sono riportate in Figura 78.

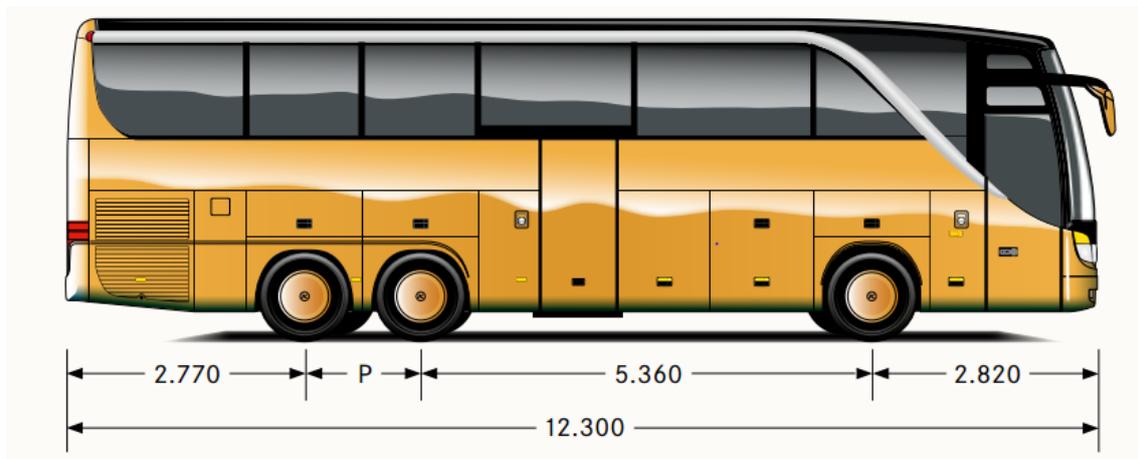


Figura 78: Caratteristiche tecniche Setra S 415 HDH (Fonte: www.setra-bus.com)



Figura 79: Vista laterale Setra S 415 HDH



Figura 80: Vista degli interni Setra S 415 HDH

- Iveco France SFR 160:** è un autobus a due assi, con una lunghezza totale di 11.99 metri, un'altezza di circa 3.8 metri ed una larghezza di circa 2.55 metri. L'autobus monta un motore IVECO a sei cilindri da 7790 cm³, con una potenza nominale di 280 kW. I posti a sedere previsti sono 56.

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo



Figura 81: Vista laterale Iveco France SFR 160



Figura 82: Vista interni Iveco France SFR 160

6. Analisi sperimentale ed identificazione dell'indice di comfort

6.1. Introduzione

Le sperimentazioni sono state realizzate al fine di individuare il comfort a bordo dei mezzi di trasporto pubblico, con lo scopo di affrontare in modo innovativo la sistematizzazione dei processi di info-mobilità e migliorare i servizi al cittadino, i livelli di sicurezza a bordo e la sostenibilità dei sistemi di trasporto collettivo. Per ognuno dei due sistemi di trasporti considerati, sono stati effettuati un totale di 30 rilievi (15 rilievi in andata e 15 rilievi in ritorno). L'attività è consistita nel:

- **misurare il grado di soddisfacimento degli utenti**, mediante la progettazione di un'apposita scheda di rilevazione somministrata durante il viaggio agli utenti del sistema di trasporto considerato;
- **misurare il grado di affollamento a bordo**, determinando i saliti e i discesi ad ogni stazione/fermata;
- **misurare il rumore a bordo**, con lo scopo di valutare il comfort acustico a bordo del mezzo considerato e dare un'indicazione oggettiva sul comfort stesso;
- **misurare le accelerazioni a bordo**, con lo scopo di valutare il comfort vibrazionale a bordo del mezzo considerato e dare un'indicazione oggettiva sul comfort stesso.
- **geolocalizzare le stazioni/fermate**, per visualizzarle in un GIS;
- **geolocalizzare i percorsi delle varie linee**, per analizzare i risultati ottenuti.

6.2. Analisi a campione preliminare

Per la definizione dell'indice di comfort da assegnare ai mezzi di trasporto pubblico è stato necessario definire delle soglie attorno alle quali delineare il modello. A tale scopo, sono stati coinvolti gli utenti nel processo decisionale, mediante un questionario, sottoposto ad un prefissato numero di utenti, è stato chiesto di assegnare un voto, variabile da 1 a 5, sul grado di rumorosità e sul grado di comfort vibrazionale percepiti. Nello specifico, le interviste sono state divise tra rumore e vibrazione e tra i due mezzi di trasporto pubblico che si sono considerati nella sperimentazione, ovvero bus e treni. La scelta di far assegnare un voto da 1 a 5 è dovuta alla possibilità di rendere unitario l'indice di comfort, da assegnare al mezzo di trasporto, in modo che per ogni voto, assegnato dagli utenti, corrisponda una soglia variabile da 0 a 1 con intervalli di 0.25. L'analisi così condotta, come mostrato nelle pagine successive, ci ha permesso di delineare le soglie per la determinazione dell'indice di comfort a bordo.

6.2.1. Definizione delle soglie di rumore sui treni

L'indagine preliminare è stata condotta su un campione di 250 utenti che abitualmente utilizzano il mezzo di trasporto pubblico, mediante un'indagine di tipo SP (State Preference), allo scopo di ottenere le soglie sulle quali costruire l'indice di comfort. Il primo passo è stato quello di registrare, mediante l'uso di uno smartphone, precedentemente sincronizzato all'orologio atomico dei satelliti, il rumore prodotto dai treni durante il viaggio. Una volta studiato l'andamento del rumore lungo il viaggio, durante le soste e prima di partire a veicolo fermo (per valutare il rumore di fondo prodotto dal solo motore acceso), è stato possibile estrapolare otto diverse registrazioni con prefissati livelli di pressione sonora equivalente, di durata media di 3 secondi con una tolleranza di ± 2 dB:

- **65 dB:** rumore prodotto dal treno Stadler con motore acceso in stazione;
- **70 dB:** rumore prodotto dal treno Fiat con motore acceso in stazione;
- **75 dB:** rumore prodotto dal treno Stadler durante il tragitto su una sezione in rettilineo senza ostacoli e/o gallerie;
- **80 dB:** rumore prodotto dal treno Man durante il tragitto su una sezione in rettilineo senza ostacoli e/o gallerie;
- **85 dB:** rumore prodotto dal treno Stadler durante il tragitto su una sezione in galleria;
- **90 dB:** rumore prodotto dal treno Fiat durante il tragitto su una sezione in pendenza positiva con ostacoli laterali;
- **95 dB:** rumore prodotto dal treno Man durante il tragitto su una sezione in galleria in piano;
- **100 dB:** rumore prodotto dai treni Man e Fiat durante il tragitto su una sezione in galleria con pendenza positiva.

Mediante l'uso del dodecaedro FOUR collegato all'amplificatore PHON-X Mark I, come descritto nel paragrafo 4.2, ciascun utente intervistato ha avuto modo di ascoltare il fruscio "rosa", ovvero un segnale di prova in grado di fornire un livello sonoro costante su tutte le bande in terzi di ottava. Per ogni livello sonoro sopra descritto, misurato all'orecchio dell'utente intervistato mediante il fonometro SOLO, è stato chiesto agli utenti di associare, mediante una scala da 1 a 5, il grado di rumorosità percepito al suono che è stato prodotto dallo strumento. L'uso di tale strumentazione, ha permesso di simulare il rumore misurato all'interno dei mezzi.

La schematizzazione dell'indagine è riportata nel flowchart di Figura 83.

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

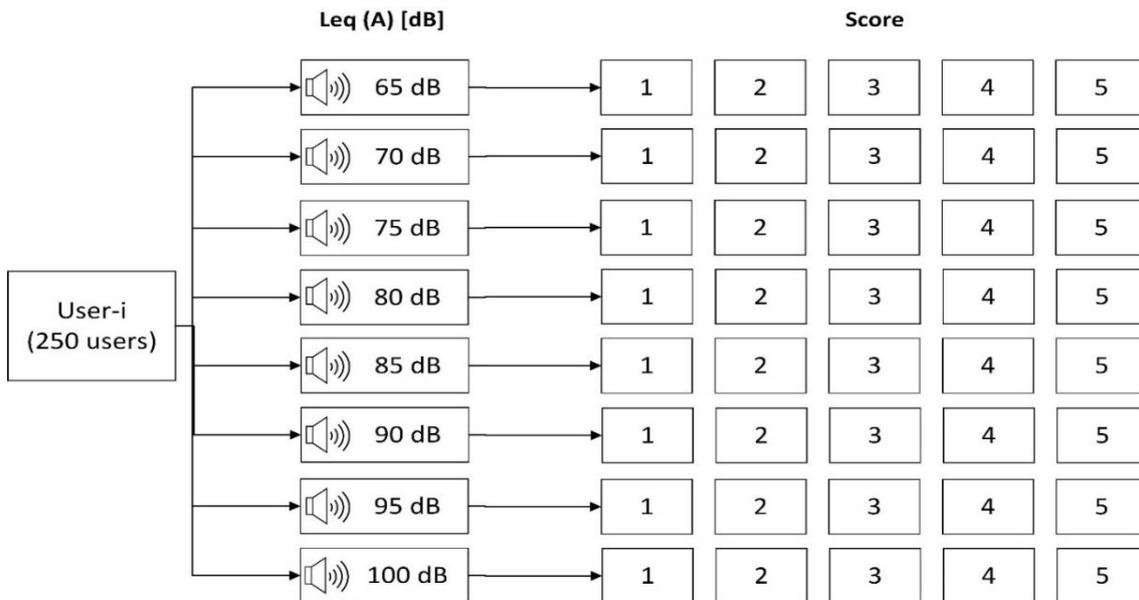


Figura 83: Flowchart indagine a campione preliminare per la definizione delle soglie di rumore nei treni

I risultati ottenuti dall'indagine a campione preliminare sul rumore sono schematizzati nella Tabella 6 e nel grafico riportato in Figura 84.

Tabella 6: Risultati indagine a campione preliminare per la definizione delle soglie di rumore nei treni

Leq (A) [dB]	Rumore Percepito										
	1		2		3		4		5		
	n°	%	n°	%	n°	%	n°	%	n°	%	
65	247	99	2	1	1	0	0	0	0	0	0
70	241	96	6	2	3	1	0	0	0	0	0
75	32	13	164	66	21	8	33	13	0	0	0
80	7	3	41	16	135	54	46	18	21	8	8
85	0	0	0	0	2	1	3	1	245	98	98
90	0	0	0	0	1	0	3	1	246	98	98
95	0	0	0	0	0	0	0	0	250	100	100
100	0	0	0	0	0	0	1	0	249	100	100

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

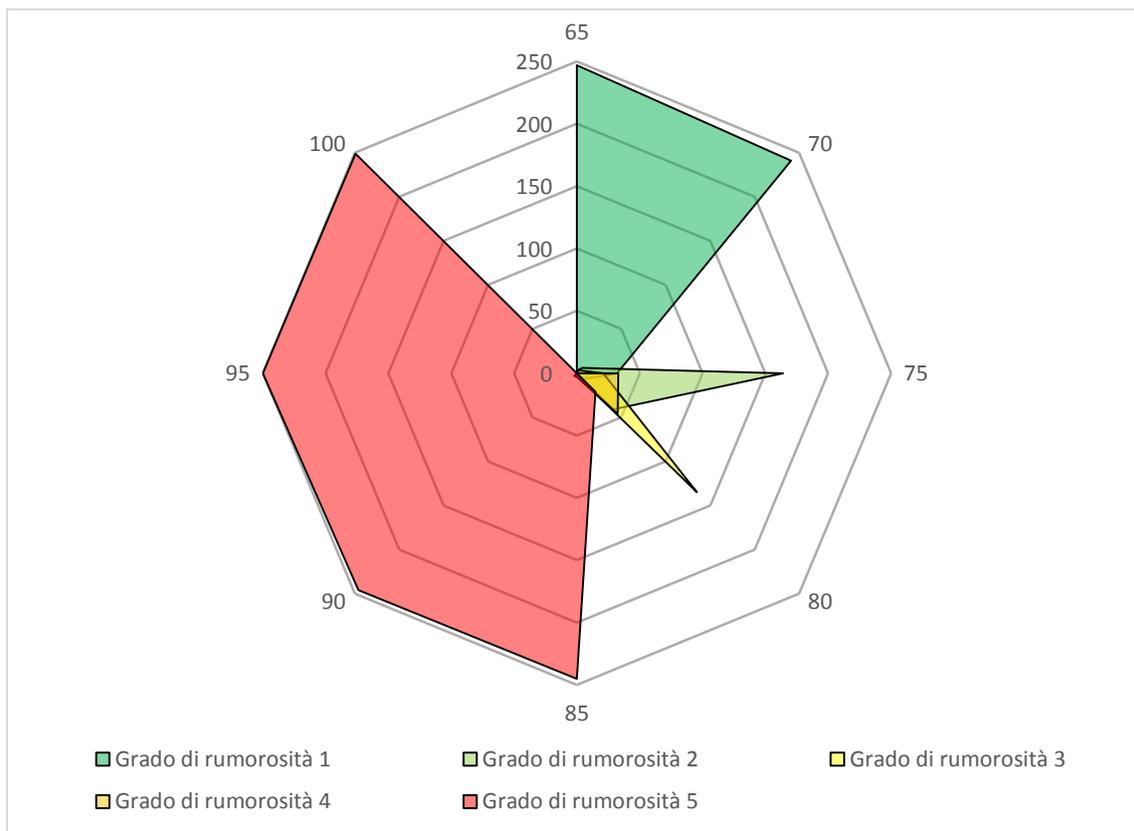


Figura 84: Grafico dei risultati ottenuti dall'indagine a campione preliminare per la definizione delle soglie di rumore nei treni

L'indagine dimostra come per il 96% degli utenti abituali il rumore al di sotto dei 70 dB risulti essere altamente confortevole, invece rumori al di sopra degli 85 dB, per circa il 98% risultino essere altamente sgradevoli. Questi due valori sono stati identificati rispettivamente come soglie minime e massime nella definizione dell'indice di comfort. Le restanti soglie sono state ricavate dai valori intermedi, identificabili in Tabella 6, e vengono riportati nella Tabella 7.

Tabella 7: Soglie di rumore per identificazione dell'indice di comfort

Leq (A) [dB]	Leq (A) \geq 85 dB	85 < Leq (A) \leq 80 dB	80 < Leq (A) \leq 75 dB	75 < Leq (A) \leq 70 dB	Leq (A) < 70 dB
x_r	1	0,75	0,5	0,25	0

6.2.2. Definizione delle soglie di rumore sugli autobus

L'indagine preliminare, nel caso degli autobus, è stata condotta su un campione di 100 utenti che abitualmente utilizzano il mezzo di trasporto pubblico, mediante un'indagine di tipo SP (State Preference), allo scopo di ottenere le soglie sulle quali costruire l'indice di comfort. Così come nel caso precedente dei treni, il primo passo è stato quello di registrare, mediante l'uso di uno smartphone, precedentemente sincronizzato all'orologio

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

atomico dei satelliti, il rumore prodotto dagli autobus durante il viaggio. Una volta studiato l'andamento del rumore lungo il viaggio, durante le soste e prima di partire a veicolo fermo (per valutare il rumore di fondo prodotto dal solo motore acceso), è stato possibile estrapolare sette diverse registrazioni con prefissati livelli di pressione sonora equivalente, di durata media di 3 secondi con una tolleranza di ± 2 dB:

- **60 dB:** rumore prodotto dall'autobus Setra S 415 HDH, con motore acceso e fermo alla fermata;
- **65 dB:** rumore prodotto dall'autobus Iveco France SFR 160, con motore acceso e fermo alla fermata;
- **70 dB:** rumore prodotto dall'autobus Setra S 415 HDH, durante il percorso cittadino con velocità di marcia compresa tra i 10 e i 30 Km/h;
- **75 dB:** rumore prodotto dall'autobus Iveco France SFR 160, durante il percorso cittadino con velocità di marcia compresa tra i 10 e i 30 Km/h;
- **80 dB:** rumore prodotto dall'autobus Iveco France SFR 160, durante un viaggio, nel tratto extraurbano tra l'aeroporto di Lamezia Terme e la cittadella Regionale di Germaneto;
- **85 dB:** rumore prodotto dall'autobus Setra S 415 HDH, durante un viaggio, nel tratto autostradale tra gli svincoli di Rogliano e Altilia;
- **90 dB:** rumore prodotto dall'autobus Iveco France SFR 160, durante un viaggio, nel tratto autostradale tra gli svincoli di Rogliano e Altilia.

In modo del tutto analogo al caso dei treni, mediante l'uso del dodecaedro FOUR collegato all'amplificatore PHON-X Mark I, ciascun utente intervistato ha avuto modo di un segnale di prova in grado di fornire un livello sonoro costante su tutte le bande in terzi di ottava. Per ogni livello sonoro sopra descritto, misurato all'orecchio dell'utente intervistato mediante il fonometro SOLO, è stato chiesto agli utenti di associare, mediante una scala da 1 a 5, il grado di rumorosità percepito al suono che è stato prodotto dallo strumento. L'uso di tale di strumentazione, ha permesso di simulare il rumore misurato all'interno dei mezzi.

La schematizzazione dell'indagine è riportata nel flowchart di Figura 85.

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

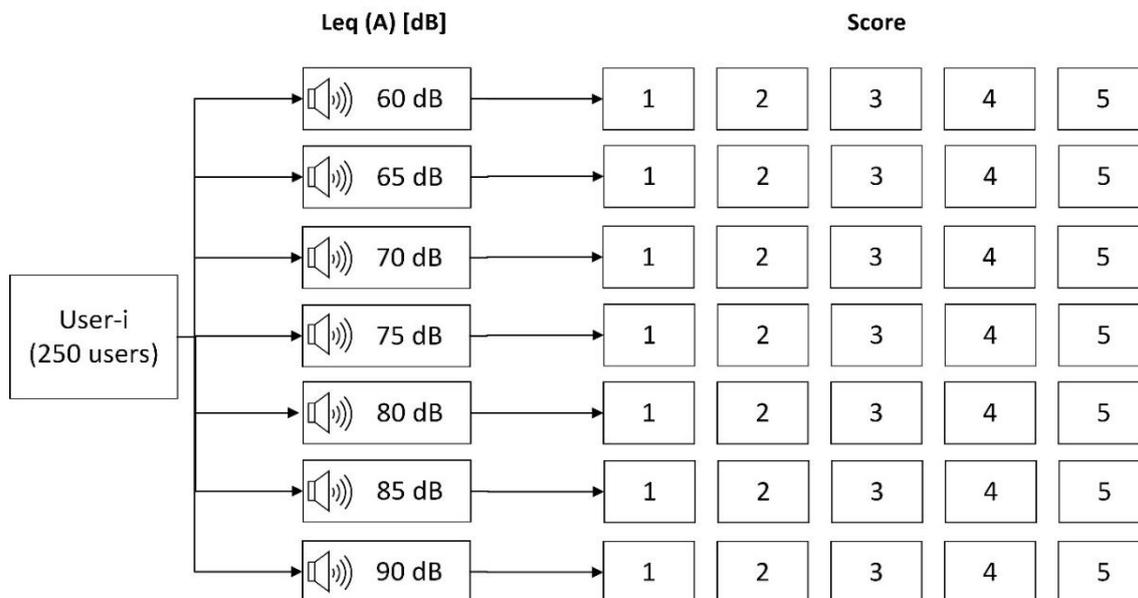


Figura 85: Flowchart indagine a campione preliminare per la definizione delle soglie di rumore negli autobus

I risultati ottenuti dall'indagine a campione preliminare sul rumore negli autobus sono schematizzati nella Tabella 8 e nel grafico riportato in Figura 86.

Tabella 8: Risultati indagine a campione preliminare per la definizione delle soglie di rumore negli autobus

Leq (A) [dB]	Rumore percepito									
	1		2		3		4		5	
	n°	%	n°	%	n°	%	n°	%	n°	%
60	99	99	1	1	0	0	0	0	0	0
65	98	98	2	2	0	0	0	0	0	0
70	17	17	68	68	15	15	0	0	0	0
75	5	5	11	11	52	52	32	32	0	0
80	0	0	0	0	1	1	4	4	95	95
85	0	0	0	0	0	0	3	3	97	97
90	0	0	0	0	0	0	1	1	99	99

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

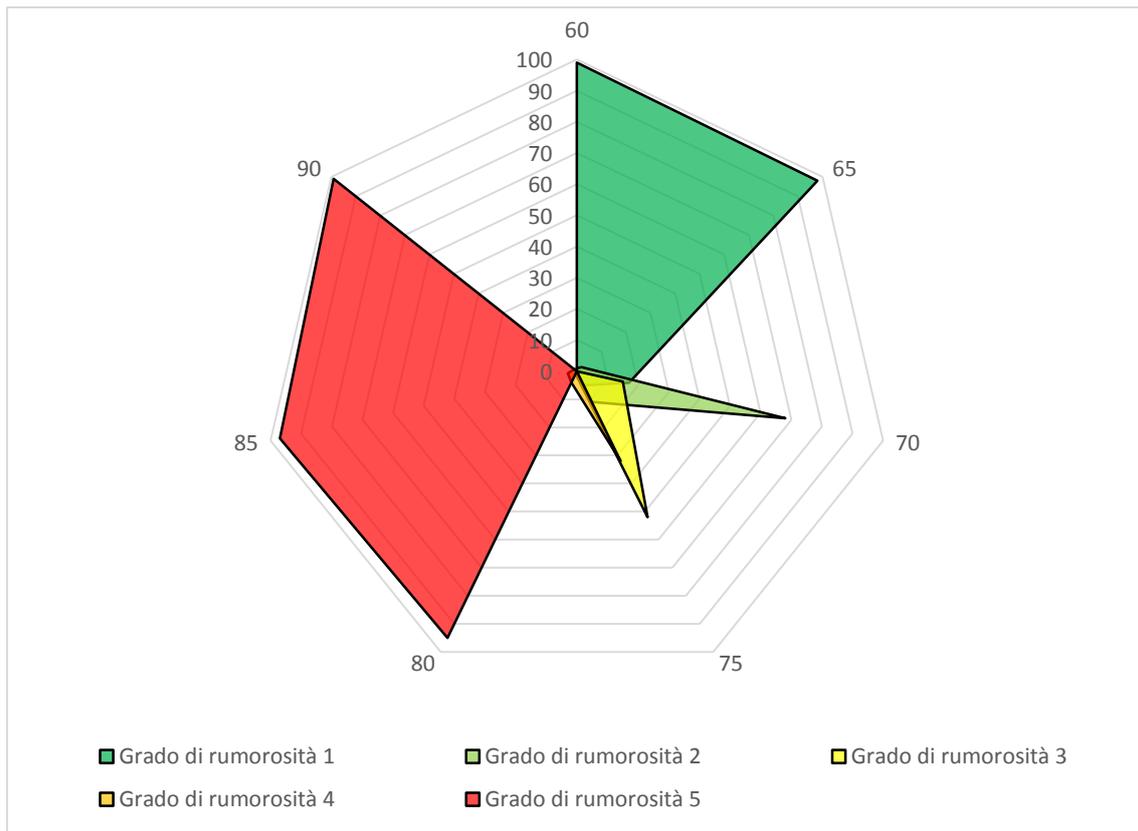


Figura 86: Grafico dei risultati ottenuti dall'indagine a campione preliminare per la definizione delle soglie di rumore

L'indagine dimostra come per il 96% degli utenti abituali il rumore al di sotto dei 70 dB risulti essere altamente confortevole, invece rumori al di sopra degli 85 dB, per circa il 98% risultino essere altamente sgradevoli. Questi due valori sono stati identificati rispettivamente come soglie minime e massime nella definizione dell'indice di comfort. Le restanti soglie sono state ricavate dai valori intermedi, identificabili in Tabella 8 e vengono riportati nella Tabella 9.

Tabella 9: Soglie di rumore per identificazione dell'indice di comfort

Leq (A) [dB]	Leq (A) ≥ 80 dB	80 < Leq (A) ≤ 75 dB	75 < Leq (A) ≤ 70 dB	70 < Leq (A) ≤ 65 dB	Leq (A) < 65 dB
X_r	1	0,75	0,5	0,25	0

6.2.3. Definizione delle soglie di vibrazione su treni e autobus

Analogamente a quanto fatto per la definizione delle soglie di rumore, anche per il comfort vibrazionale percepito dagli utenti è stata condotta un'indagine preliminare, sempre, allo scopo di definire le soglie di vibrazione per il calcolo dell'indice di comfort. Tuttavia, essendo complicato simulare un set di vibrazioni con delle soglie prefissate da sottoporre agli utenti del trasporto collettivo, l'indagine è stata svolta attraverso l'uso di

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

un'autovettura privata (Freelander 2, Land Rover), su un test site di riferimento, Figura 87, individuato lungo Viale Principe a Rende (CS), con la collaborazione di 100 utenti. In tal caso, la definizione delle soglie è stata fatta in modo univoco tra i due sistemi di trasporto, autobus e treni, poiché da misurazioni preliminari effettuati sui due mezzi di trasporto, non risultavano esserci rilevanti differenze nei valori di accelerazioni misurate.



Figura 87: Vista satellitare del test site di riferimento

A tale scopo è stato utilizzato lo studio condotto da Tassitani A. et al. (2016), il quale dimostra come lungo il suddetto test site, che è caratterizzato da un manto stradale pressoché perfetto con la presenza di soli dossi in pietra ad influenzare principalmente le accelerazioni verticali e di rotatorie ad influenzare principalmente le accelerazioni longitudinali e trasversali, conoscendo la tipologia di veicolo è possibile conoscere l'accelerazione a_v (accelerazione vibrazionale complessiva a corpo intero).

Partendo da tale studio, sono state definite delle soglie specifiche a velocità medie, con una tolleranza di ± 2 Km/h, che permettono di ottenere determinati valori di accelerazioni a_v :

- $V_m = 20$ Km/h: determina un valore di accelerazione (a_v) di circa 0.20 m/s²;
- $V_m = 30$ Km/h: determina un valore di accelerazione (a_v) di circa 0.35 m/s²;

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

- $V_m = 35 \text{ Km/h}$: determina un valore di accelerazione (a_v) di circa 0.50 m/s^2 ;
- $V_m = 40 \text{ Km/h}$: determina un valore di accelerazione (a_v) di circa 0.65 m/s^2 ;
- $V_m = 45 \text{ Km/h}$: determina un valore di accelerazione (a_v) di circa 0.90 m/s^2 ;
- $V_m = 50 \text{ Km/h}$: determina un valore di accelerazione (a_v) di circa 1.20 m/s^2 .

Ogni utente, a bordo del veicolo, ha percorso il tracciato una sola volta, per ognuna delle suddette velocità medie (senza seguire una scala di velocità ma proseguendo in modo casuale per non influenzare il parere dell'utente) e alla fine del giro gli è stato chiesto di fornire un proprio voto in merito al grado di vibrazioni percepito a bordo durante ognuno dei giri, mediante una scala da 1 a 5.

La schematizzazione dell'indagine è riportata nel flowchart di Figura 88.

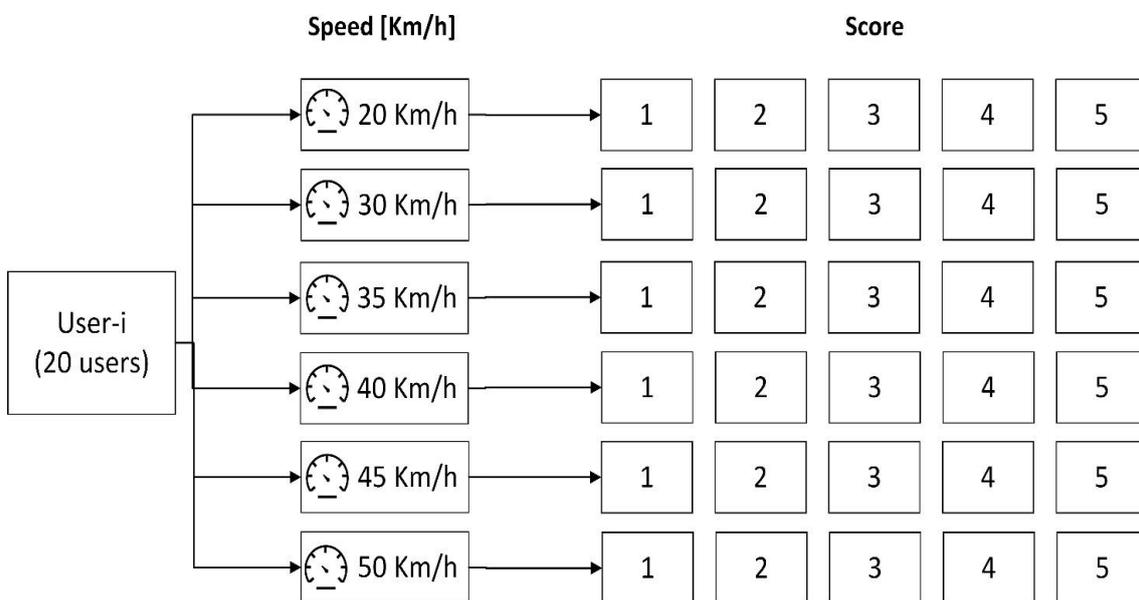


Figura 88: Flowchart indagine a campione preliminare per la definizione delle soglie di vibrazioni

I risultati ottenuti dall'indagine a campione preliminare sulle vibrazioni, sono schematizzati nella Tabella 10 e nel grafico riportati in Figura 89.

Tabella 10: Risultati indagine a campione preliminare per la definizione delle soglie di vibrazioni

$a_v \text{ [m/s}^2\text{]}$	Comfort vibrazionale percepito									
	1		2		3		4		5	
	n°	%	n°	%	n°	%	n°	%	n°	%
0,20	97	97	3	3	0	0	0	0	0	0
0,35	13	13	85	85	2	2	0	0	0	0
0,50	0	0	28	28	70	70	2	2	0	0
0,65	0	0	26	26	69	69	5	5	0	0
0,90	0	0	0	0	1	1	4	4	95	95
1,20	0	0	0	0	0	0	1	1	99	99

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

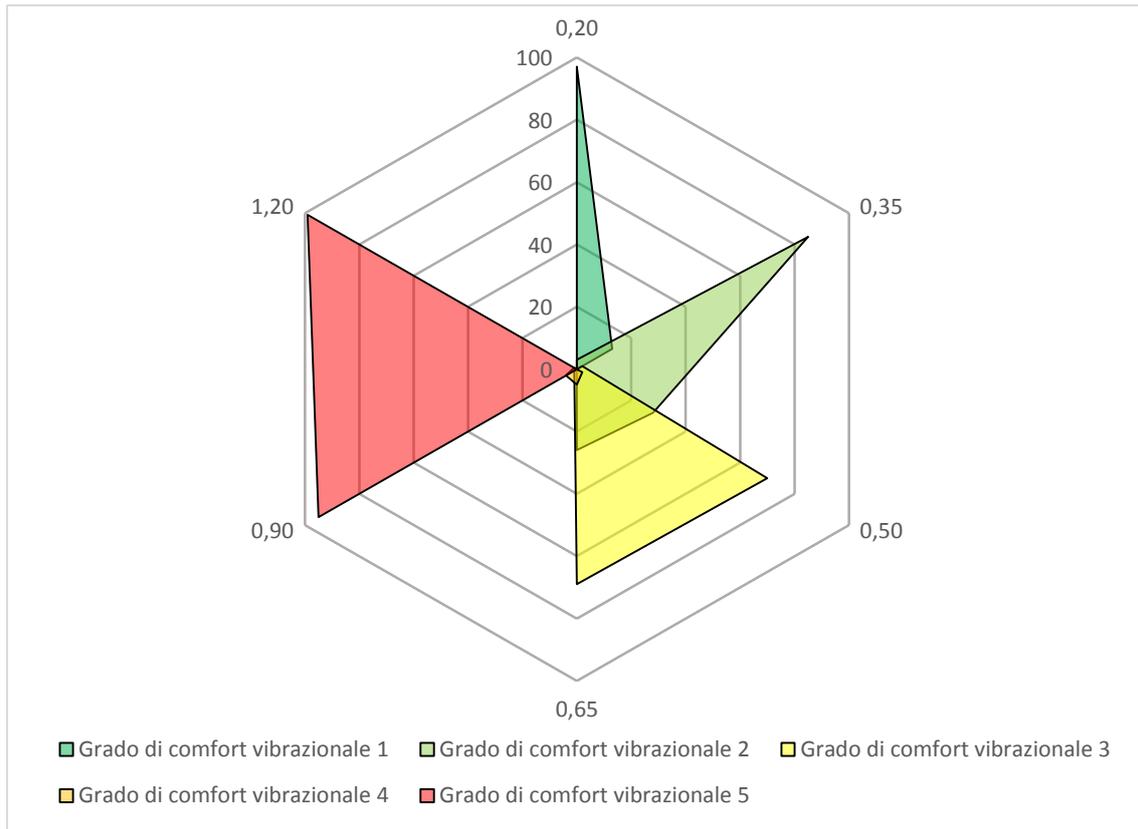


Figura 89: Grafico dei risultati ottenuti dall'indagine a campione preliminare per la definizione delle soglie di vibrazioni

L'indagine dimostra come per il 95% degli utenti intervistati, accelerazioni a_v al di sotto di 0.2 m/s^2 risultino essere altamente confortevoli, invece, accelerazioni a_v al di sopra dei valori di 0.9 m/s^2 , per circa il 95% risultino essere altamente sconfortevoli. Questi due valori sono stati identificati rispettivamente come soglie minime e massime nella definizione dell'indice di comfort vibrazionale. Bisogna, inoltre, considerare come per il 70% degli utenti, accelerazioni pari a 0.50 m/s^2 e 0.65 m/s^2 , vengono percepite entrambe con un valore medio di comfort, ovvero con un punteggio pari a 3 e per tale motivo, si è deciso di utilizzare il valore di 0.65 m/s^2 per la definizione della soglia utile a definire l'indice di comfort mediante sconfortevole. Le restanti soglie sono state ricavate dai valori intermedi, identificabili in Tabella 10, e vengono riportati nella Tabella 11.

Tabella 11: Soglie di vibrazioni per identificazione dell'indice di comfort

$a_v \text{ [m/s}^2]$	$a_v \geq 0.9 \text{ m/s}^2$	$0.90 < a_v \leq 0.65 \text{ m/s}^2$	$0.65 < a_v \leq 0.35 \text{ m/s}^2$	$0.35 < a_v \leq 0.2 \text{ m/s}^2$	$a_v < 0.2 \text{ m/s}^2$
x_v	1	0,75	0,5	0,25	0

6.3. I test-sites di riferimento

I test-sites, oggetto degli studi, sono diversi in base alla tipologia di mezzo di trasporto usato (treno o autobus) e la scelta di tali test sites è stata fatta tenendo conto delle esigenze della società di trasporto.

6.3.1. Il test site ferroviario

Nel caso dei treni, il test-site considerato è il tratto di ferrovia che va da Cosenza Vaglio Lise a Rogliano. Il tratto in esame ha uno sviluppo totale di circa 25.89 Km attraversando 10 Comuni e passando per 15 stazioni:

1. Cosenza Vaglio Lise;
2. Cosenza Monaco;
3. Cosenza Campanella;
4. Cosenza Centro;
5. Casali;
6. Bosco;
7. Pedace;
8. Pietrafitta;
9. Aprigliano;
10. Piane Crati;
11. Figline-Cellara;
12. Mangone;
13. Piano Lago;
14. Santo Stefano di Rogliano;
15. Rogliano.

Il test site è caratterizzato dalla presenza di 15 gallerie lungo il suo sviluppo, con una pendenza massima di circa il 5%. Bisogna, inoltre, ricordare come il tratto di strada ferrata considerato risulta essere un tratto a scartamento ridotto a 950 mm.

Il test site considerato faceva parte della rete ferroviaria Calabro-Lucana, Figura 90, ovvero una fitta rete di ferrovia in concessione, a scartamento ridotto, che a partire dai primi anni del '900 collegava quattro Regioni (Puglia, Basilicata, Campania e Calabria) e ben sette Province (Bari, Potenza, Cosenza, Matera, Salerno, Catanzaro e Reggio Calabria). Nello specifico, il test site considerato era la tratta che collegava le due città di Cosenza e Catanzaro, passando per paesi della pre-sila come Pedace, per poi passare da Rogliano, Soveria Mannelli, Gimigliano ed infine arrivare fino a Catanzaro Lido. Attualmente, la tratta Cosenza-Catanzaro è gestita da Ferrovie della Calabria, come tutta la rete FCL Calabrese, ed è stata suddivisa in due parti, il tratto Cosenza-Marzi ed il tratto Soveria Mannelli-Catanzaro Città.

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

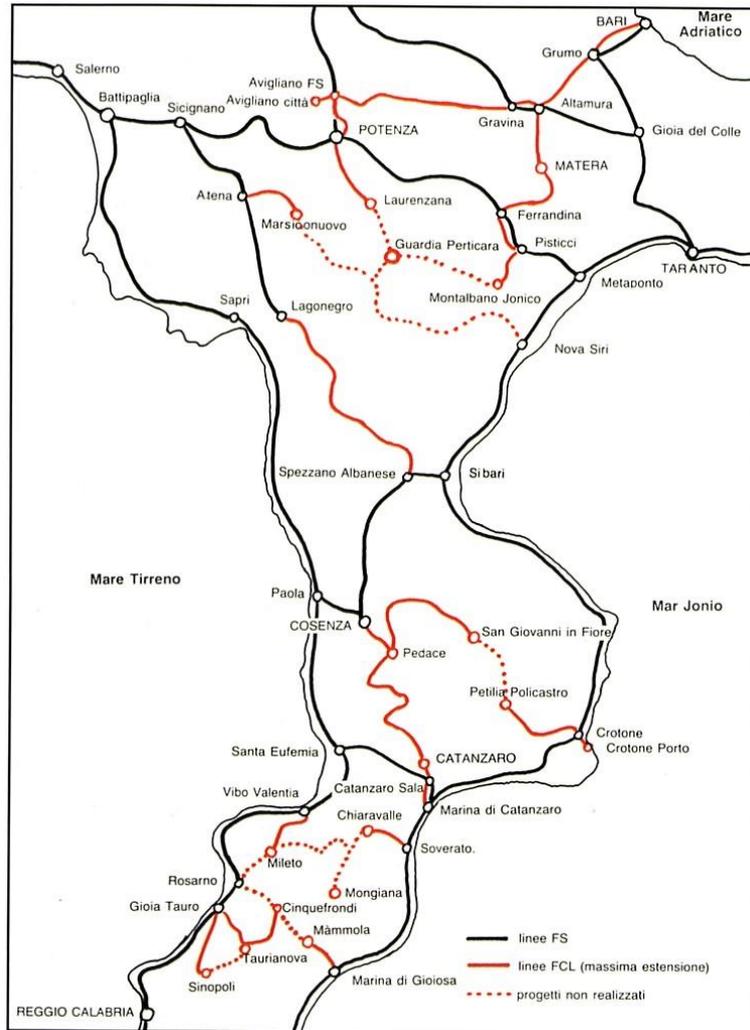


Figura 90: Schema planimetrico della rete di Ferrovie Calabro Lucane FCL

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

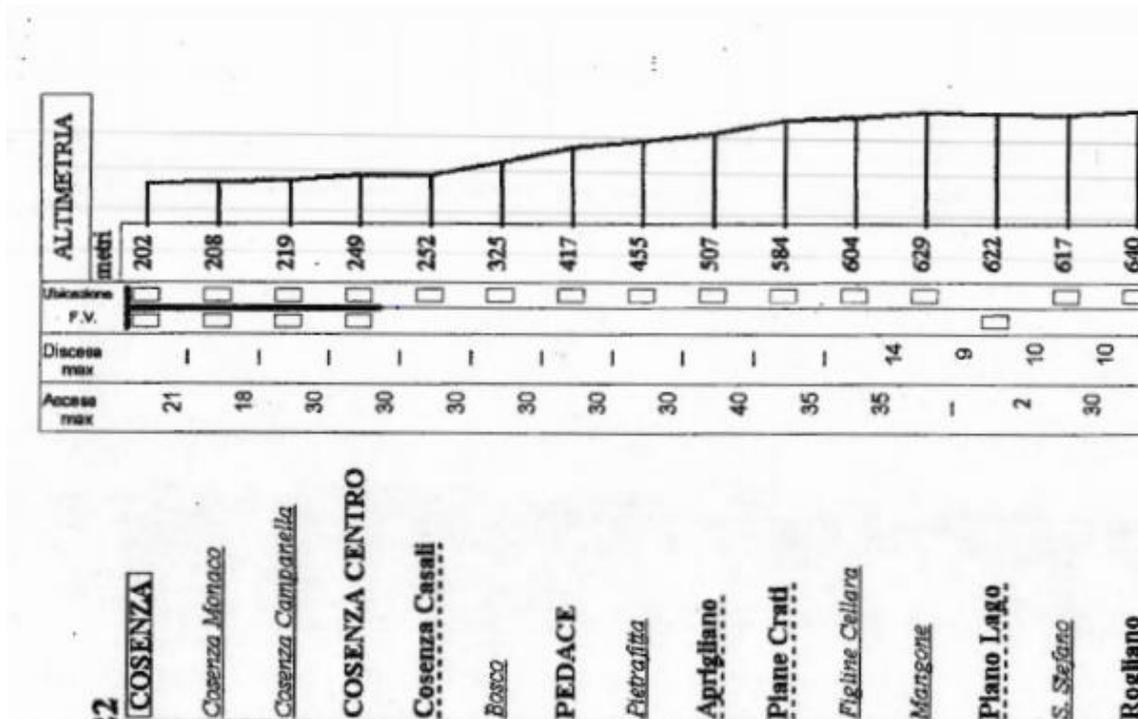


Figura 91: Schema altimetrico del test site Cosenza Vaglio Lise – Rogliano

In particolare si sono analizzate tre singole corse in direzione Rogliano e tre singole corse in direzione Cosenza, con partenze prefissate:

- **DEM4C. 500 Stadler:** corsa delle ore 13.18 con partenza da Cosenza Vaglio Lise ed arrivo a Rogliano e corsa delle ore 14.06 con partenza da Rogliano ed arrivo a Cosenza Vaglio Lise;
- **FCL M2.200:** corsa delle ore 16.39 con partenza da Cosenza Vaglio Lise ed arrivo a Rogliano e corsa delle ore 17.45 con partenza da Rogliano ed arrivo a Cosenza Vaglio Lise;
- **FIAT M4:** corsa delle ore 17.45 con partenza da Cosenza Vaglio Lise ed arrivo a Rogliano e corsa delle ore 18.50 con partenza da Rogliano ed arrivo a Cosenza Vaglio Lise.

6.3.2. Il test site per gli autobus

Nel caso degli autobus, il test-site, mostrato in Figura 92, considerato è il tratto che va dalla stazione di Cosenza Vaglio Lise fino alla cittadella Regionale a Germaneto (CZ), per un totale di circa 110 Km. Il tratto in esame è costituito da tipologie di strade eterogenee. Il primo tratto di lunghezza pari a circa 7.5 Km è rappresentato da un tratto urbano che attraversa la città di Cosenza partendo dall'autorimessa di Ferrovie della Calabria a Vaglio Lise, passando per via Popilia, per via Medaglie d'Oro, via Giulia, strada dell'Unità d'Italia, via P. Leto e via P. Rossi. Un secondo tratto, di lunghezza pari a circa 62.5 Km, è rappresentato da un tratto autostradale A3 Salerno-Reggio Calabria tra

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

gli svincoli di Cosenza Sud e Santa Eufemia Lamezia Terme); in questo tratto l'autobus fa due fermate (Altilia e Falerna) per il carico/scarico dei passeggeri. Infine, un terzo tratto, di lunghezza pari a circa 40.5 Km, è rappresentato da una strada extraurbana principale a due corsie (SS 280 – Strada dei due mari) compreso tra l'uscita autostrade di Lamezia e la cittadella Regionale sita a Germaneto (CZ), passando per l'aeroporto di Santa Eufemia.

Il test site in esame, in fase di post-elaborazione è stato suddiviso in tre test site omogenei:

1. **test site urbano:** rappresentato dalla prima parte del test site che si sviluppa nella città di Cosenza;
2. **test site autostradale:** rappresentato dai circa 62.5 Km che si sviluppano lungo l'arteria autostradale Salerno-Reggio Calabria;
3. **test site extraurbano:** rappresentato dal tratto di strada statale SS 280 che unisce l'aeroporto di Santa Eufemia con la cittadella Regionale a Germaneto (CZ).

Questa suddivisione è stata necessaria per rendere più omogenei i dati ottenuti dalle sperimentazioni.



Figura 92: Immagine satellitare del test site per i bus

Il tratto in esame del test site è caratterizzato da 7 fermate:

1. Cosenza Vaglio Lise
2. Autostazione Cosenza
3. Via Leto (Cosenza)
4. Rifornimento Esso – Uscita Altilia-Grimaldi
5. Uscita autostrada Falerna
6. Aeroporto Santa Eufemia Lamezia Terme
7. Cittadella Regionale (Germaneto – CZ)

Nel caso dei bus, durante le varie sperimentazioni, si sono aggiunte alcune fermate in base alla richiesta di alcuni passeggeri.

6.4. L'indagine a campione sui test site

6.4.1. Introduzione

Durante le sperimentazioni, realizzate a bordo dei mezzi di trasporto descritti, è stato sottoposto un questionario ad un campione di utenti con lo scopo di rilevare specifiche informazioni dagli utilizzatori del sistema di trasporto. La stessa indagine ci ha permesso di definire dei pesi (α_r e α_v) da attribuire alle due grandezze (rumore e vibrazioni) nella definizione dell'indice di comfort ed un valore di comfort percepito dagli stessi utenti durante un viaggio.

6.4.2. La scheda di rilevazione

La scheda di rilevazione somministrata agli utenti, ovvero ai passeggeri, del sistema di trasporto considerato ed è uguale sia nel caso dei treni sia nel caso dei bus. È stata progettata, principalmente, con lo scopo di ottenere un'indicazione su 4 parametri percepiti dagli utenti:

- il grado di rumorosità percepito;
- il grado di vibrazioni percepite;
- quale parametro, secondo gli utenti, influenzava maggiormente il comfort a bordo (definizione del peso);
- il grado di comfort generale percepito a bordo.

Come descritto nei paragrafi precedenti, ad oggi, per la determinazione del comfort a bordo i parametri considerati sono di tipo soggettivo, ad eccezione del solo grado di affollamento a bordo. I parametri rilevati attraverso le schede, infatti, permettono di rilevare proprio questi dati soggettivi, ovvero dati che dipendono da utente ad utente, con lo scopo di confrontarli, in un secondo momento, con il dato misurato dallo strumento.

La scheda di rilevazione, inoltre, ci ha permesso ottenere indicazioni di tipo socio-economico, sulle modalità di spostamento dell'utente e sulla frequenza dello spostamento.

Agli stessi utenti, come già detto, oltre a domande di tipo socio-economico utili per individuare il campione intervistato, è stato chiesto di attribuire un valore univoco da 1 a 10 al comfort percepito dagli utenti a bordo veicolo. Tale valore ha consentito di ricavare un corrispondente comfort perceived (CP) per singola tratta.

Di seguito, si riporta la scheda di rilevazione utilizzata.

**Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la
determinazione del comfort a bordo**

Dati generali		
1	Sesso	M
		F
	Età (anni)	<= 20
		21-40
		41-65
		> 65
	Occupazione	Occupato
		Disoccupato
		Inoccupato
		Studente
		Casalinga
		Pensionato
	Reddito nucleo familiare (€)	<10.000
		10.000-30.000
		> 30.000
	Componenti del nucleo familiare	1
		2
		3
		4
> 4		
Area di Residenza	Urbano	
	Sub urbano	
	Periferia	
Possesso patente	A	
	B	
	Altro	
	Nessuno	
Auto possedute nel nucleo familiare	0	
	1	
	2	
	3	
	> 3	
2	Dati di viaggio	
		Piedi

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

	Modalità di raggiungimento della fermata	Auto
		Altro
	Tipologia del titolo di viaggio	Singola Corsa
		Abb. Settimanale
		Abb. Mensile
		Altro
	Frequenza dello spostamento settimanale (0-7)	
Fermata/Stazione di partenza		
Fermata/Stazione di arrivo		
Qualità del servizio		
3	Grado di rumorosità percepito durante il viaggio sulla specifica linea (punteggio da 1 a 10)	
	Grado di vibrazioni percepito durante il viaggio sulla specifica linea (punteggio da 1 a 10)	
	Cosa repute determinante nella qualità del servizio (rumore o vibrazioni)	
	Grado di comfort percepito (CP)	

L'indagine è stata svolta in due fasi distinte sulle due diverse tipologie di trasporto pubblico (treno e autobus) in modo da considerare un campione di utenti statisticamente significativo. I dati sono stati elaborati con lo scopo di ottenere indicazioni sull'indice di comfort percepito dagli utenti utile a costruire un indice di comfort generale del sistema di trasporto considerato partendo dalle indicazioni fornite dagli stessi utilizzatori del servizio.

6.4.3. Elaborazione dell'indagine a campione sui treni

L'indagine sui treni ha riguardato un totale di 250 utenti, intervistati a bordo durante un viaggio, che utilizzano in modo frequente il sistema di trasporto. I dati socio-economici ci hanno permesso di definire il campione di utenti intervistato. In particolare i grafici mostrati in Figura 93, 94 e 95, elaborati dai dati rilevati durante le corse descritte nel sotto paragrafo 6.3.1, mostrano come gli utenti intervistati siano prevalentemente studenti

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

pendolari di sesso maschile, che frequentano scuole di grado superiore con età inferiore o pari a 20 anni.

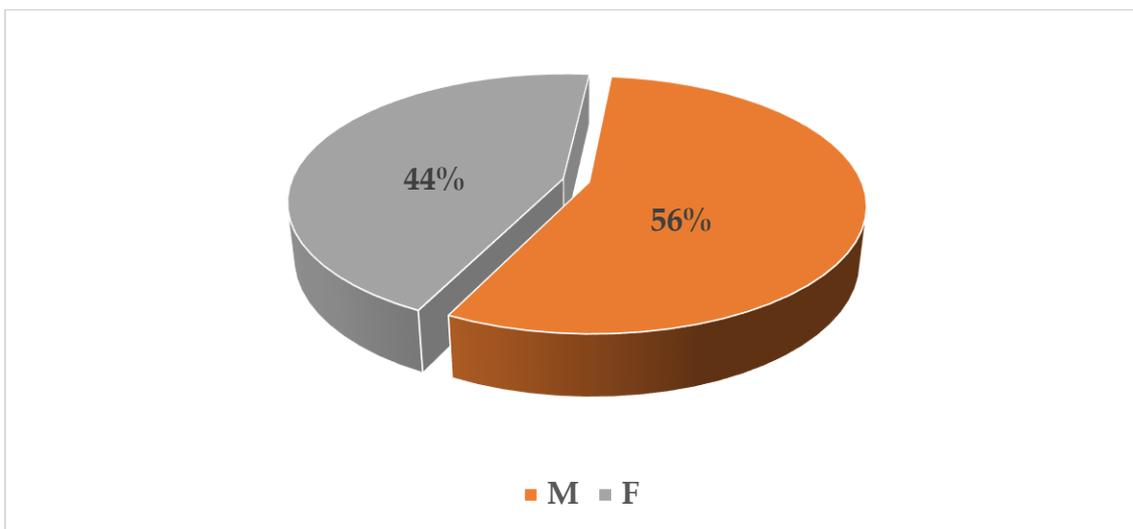


Figura 93: Elaborazione indagine a campione nei treni – Sesso utenti intervistati

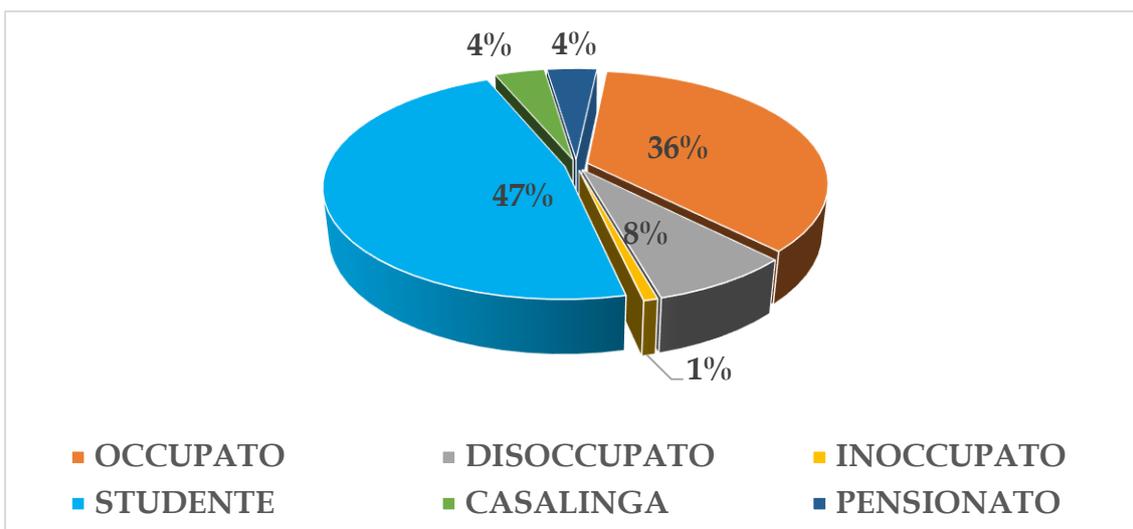


Figura 94: Elaborazione indagine a campione nei treni – Occupazione utenti intervistati

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

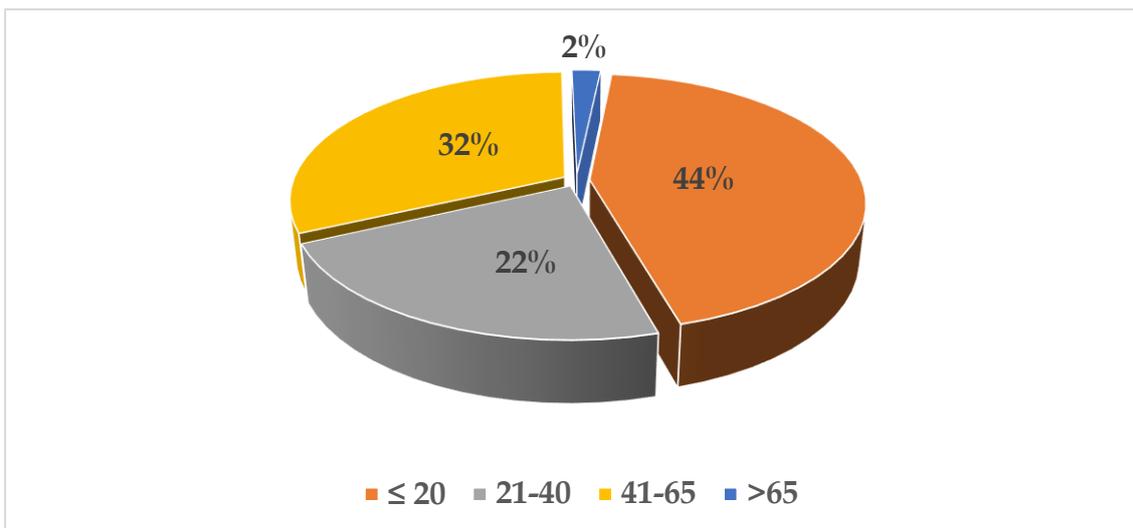


Figura 95: Elaborazione indagine a campione nei treni – Età utenti intervistati

Come mostrano i grafici di Figura 96, 97 e 98, gli utenti intervistati risiedono prevalentemente in ambito urbano, con un reddito annuale del nucleo familiare, maggiormente composto da 4 persone, compreso tra i 10000 e i 30000 euro.

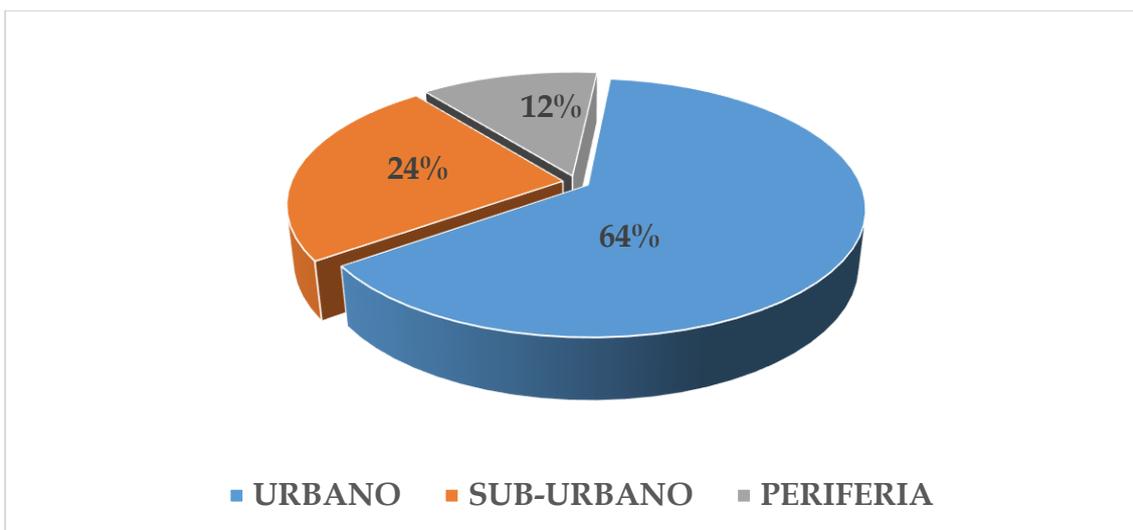


Figura 96: Elaborazione indagine a campione nei treni – Ambito di residenza utenti intervistati

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

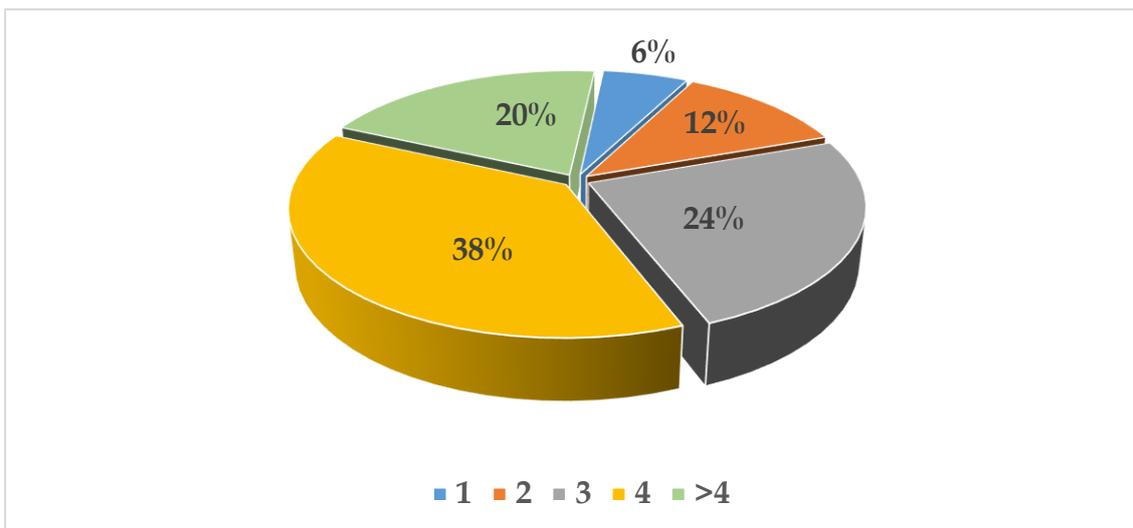


Figura 97: Elaborazione indagine a campione nei treni – N° componenti nucleo familiare utenti intervistati

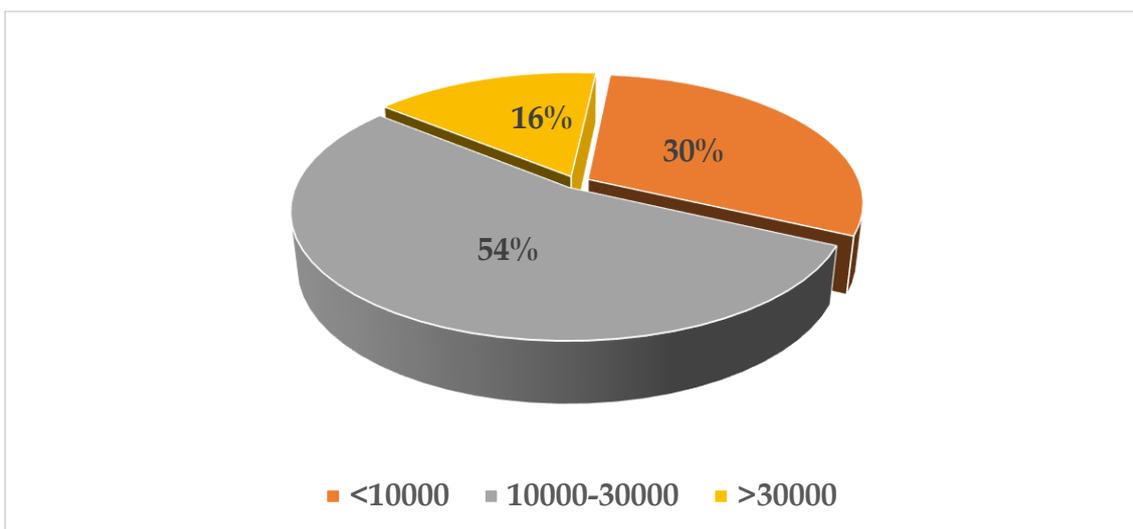


Figura 98: Elaborazione indagine a campione nei treni – Reddito annuo nucleo familiare utenti intervistati

Gli utenti intervistati, come mostrato dai grafici 99 e 100, sono prevalentemente sprovvisti di patente di guida per il 52% ed il 46% possiede una patente di guida di tipo B (auto) e muovendosi lungo il test site per raggiungere luoghi di lavoro. Gli stessi utenti, dichiarano di possedere prevalentemente due auto all'interno del nucleo familiare.

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

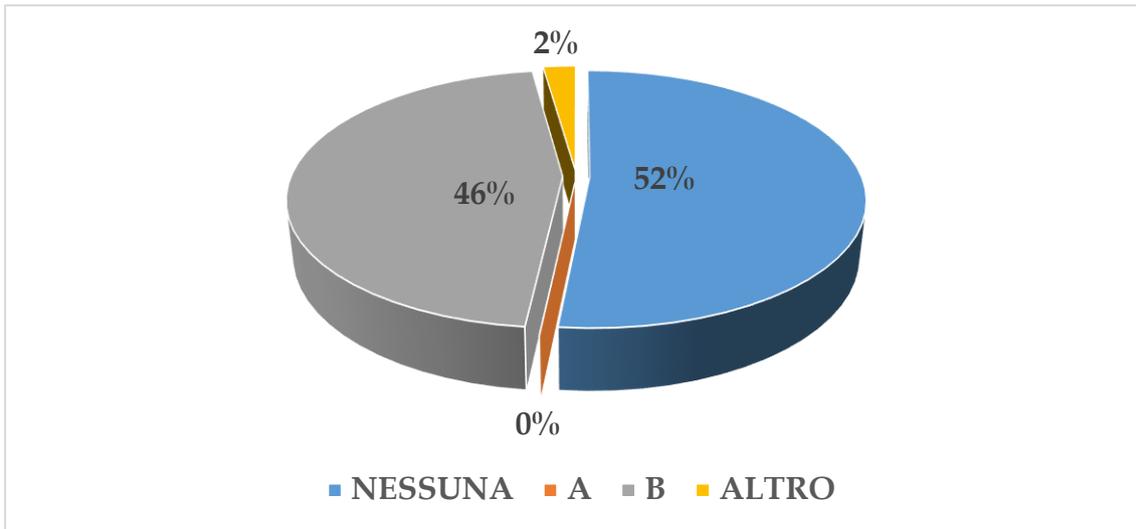


Figura 99: Elaborazione indagine a campione nei treni – Tipologia patente posseduta utenti intervistati

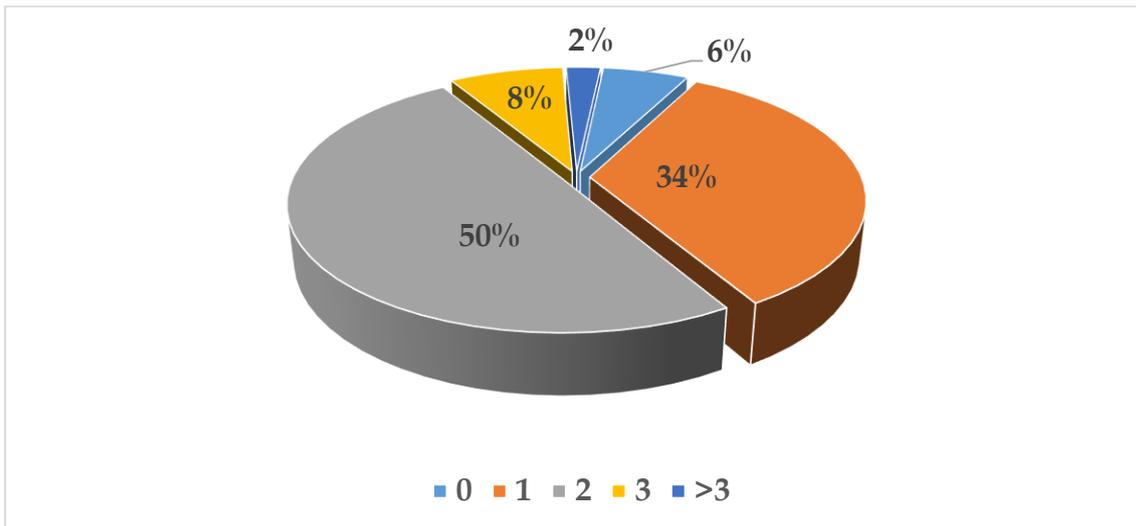


Figura 20: Elaborazione indagine a campione nei treni – N° auto possedute nel nucleo familiare utenti intervistati

Come si evidenzia dal grafico mostrato in Figura 101, più della metà degli utenti intervistati utilizza il treno con una frequenza uguale a superiore ai 5 spostamenti/settimanali, raggiungendo la stazione a piedi, Figura 102, ed utilizzando un abbonamento mensile come tipologia di biglietto (Figura 103).

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

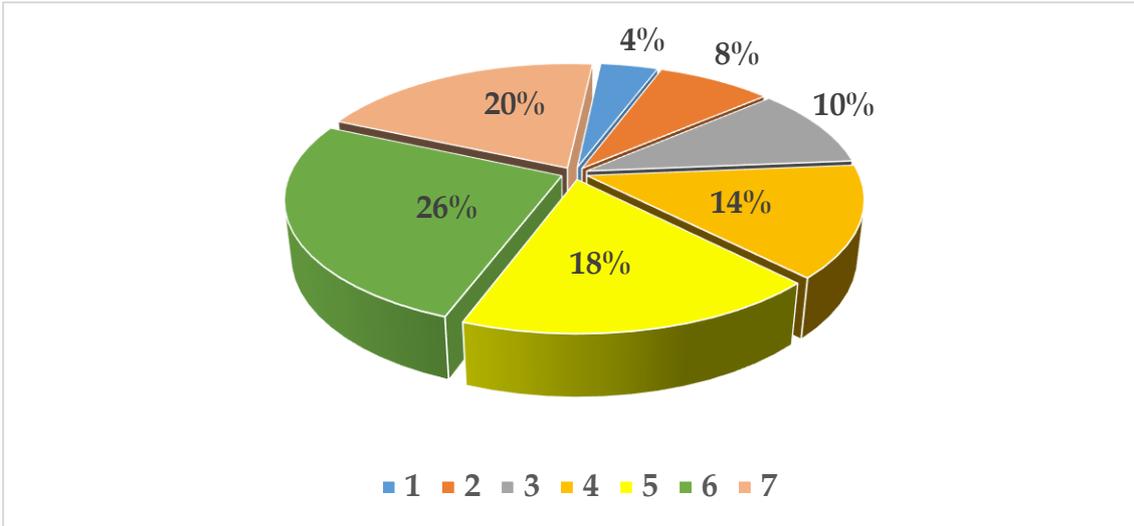


Figura 101: Elaborazione indagine a campione nei treni – Frequenza di spostamento utenti intervistati

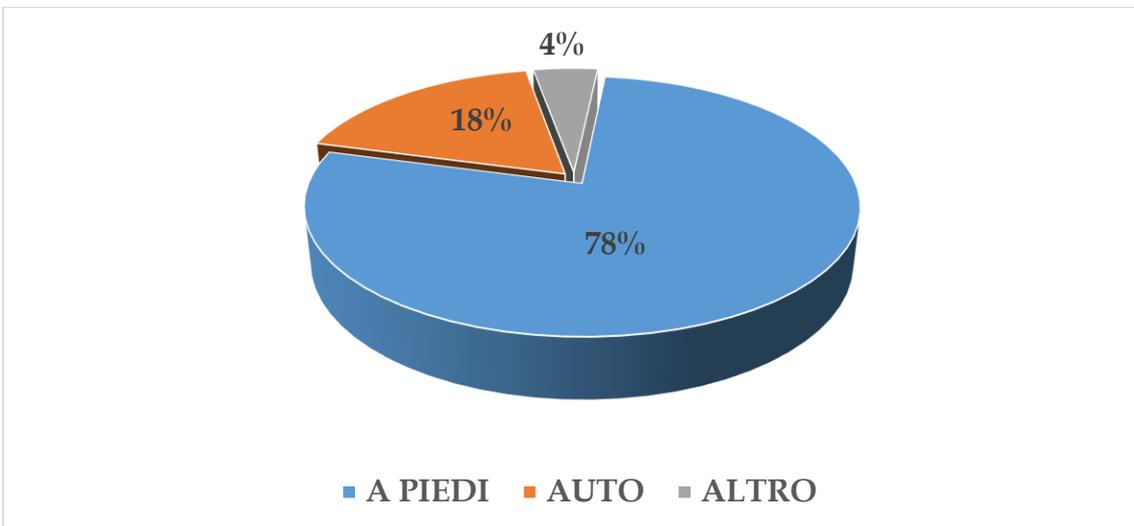


Figura 102: Elaborazione indagine a campione nei treni – Modalità di raggiungimento della stazione utenti intervistati

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

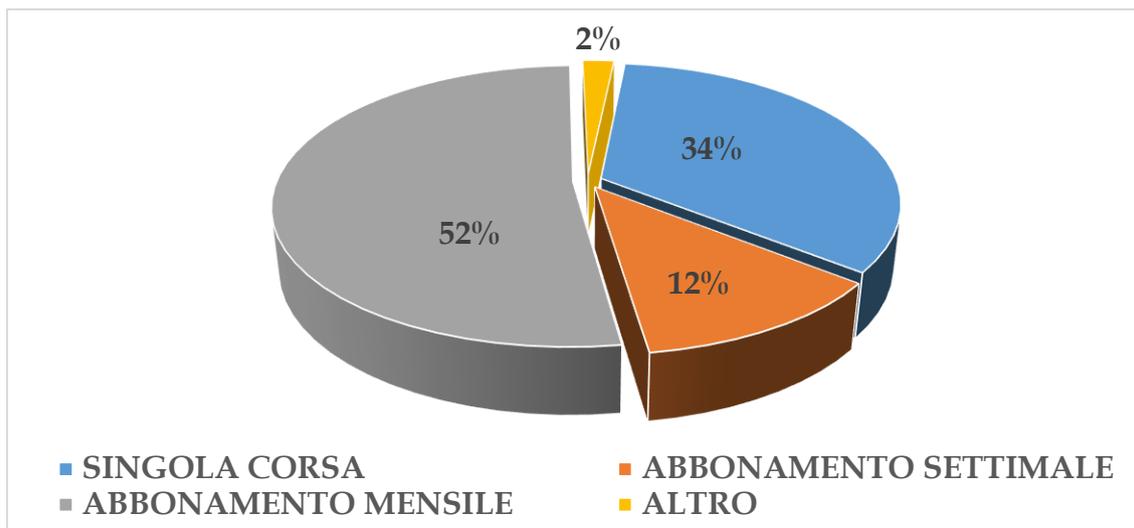


Figura 103: Elaborazione indagine a campione nei treni – Tipologia del titolo di viaggio utenti intervistati

Come detto anche in precedenza, il campione intervistato è prevalentemente un campione giovane che utilizza i treni per motivi casa-scuola e casa-lavoro, spostandosi da Cosenza verso i vari centri nei dintorni della città bruzia, come ad esempio Pietrafitta, Aprigliano, Pedace o Rogliano. Principalmente, infatti, oltre il 62% del campione intervistato parte da una delle quattro stazioni presenti nella città di Cosenza (Vaglio Lise, Monaco, Campanella e Centro), invece, il 24% sono studenti e/o lavoratori che partono da Rogliano per raggiungere le altre stazioni. Le due stazioni nelle quali principalmente gli utenti intervistati scendono sono Rogliano (36%) e Cosenza Centro (22%). I dati descritti vengono riportati negli istogrammi di Figura 104 e 105.

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

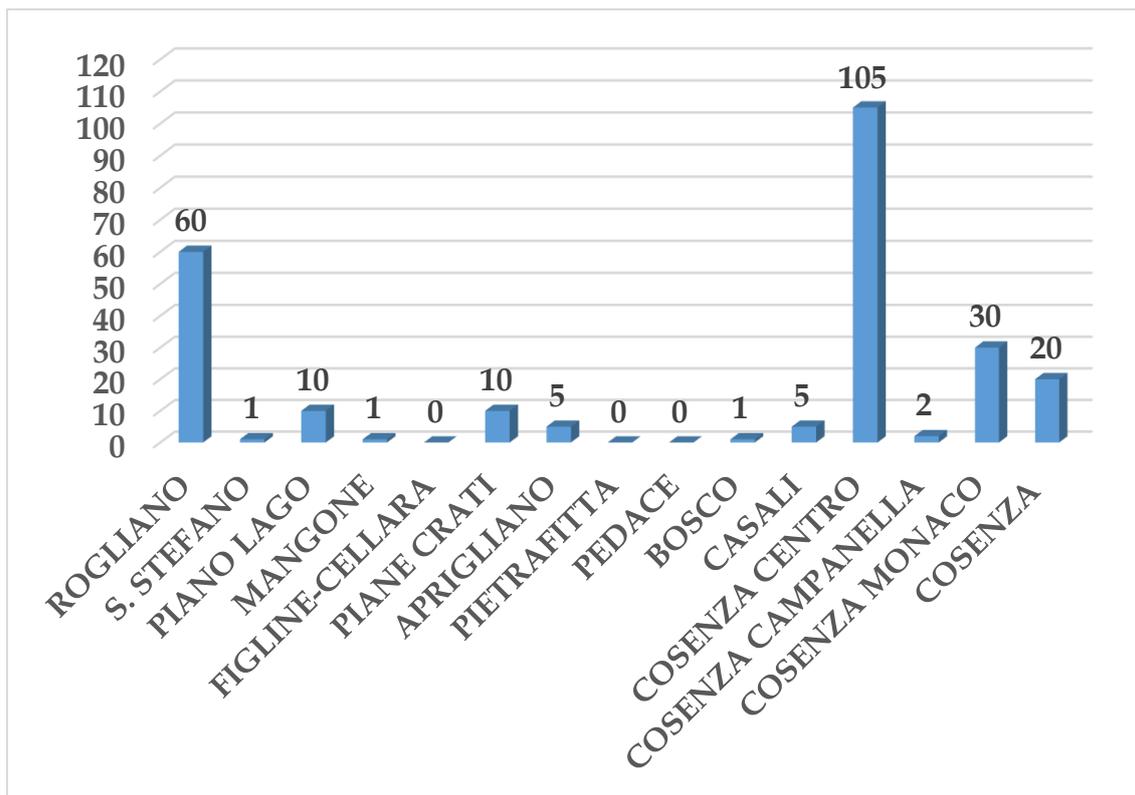


Figura 104: Elaborazione indagine a campione nei treni – Stazione di partenza utenti intervistati

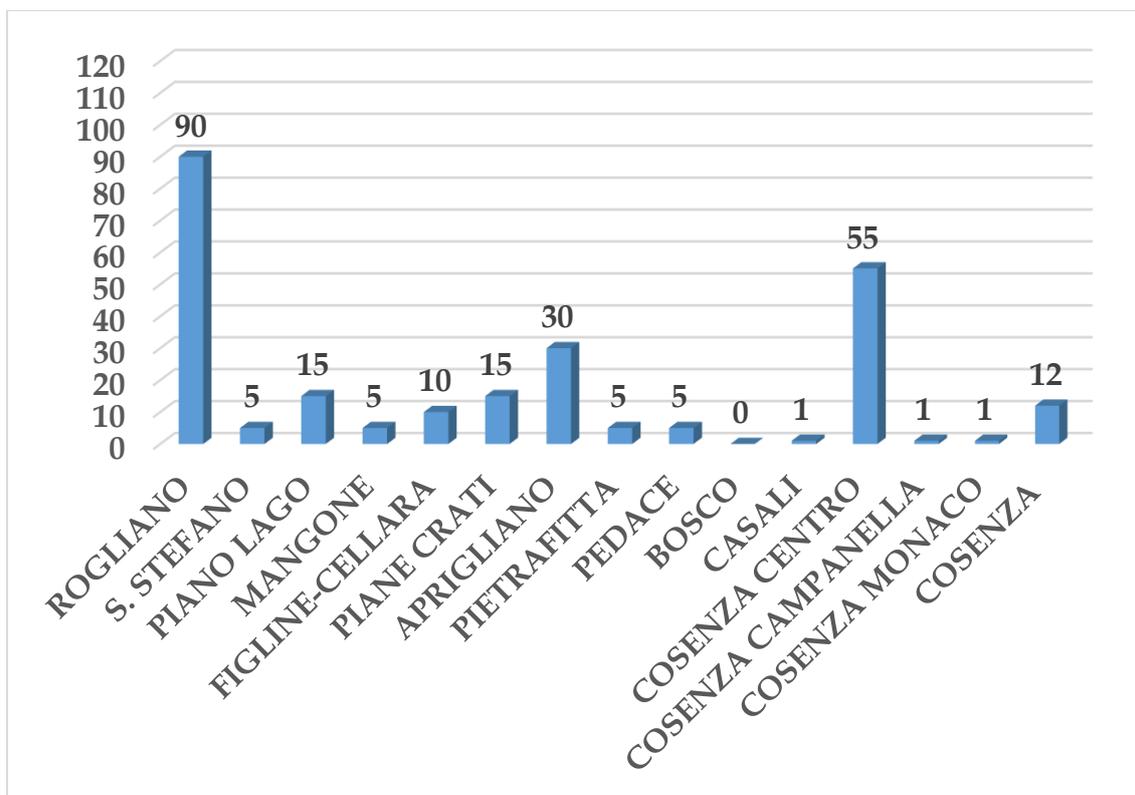


Figura 105: Elaborazione indagine a campione nei treni – Stazione di arrivo utenti intervistati

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

Bisogna, tuttavia, precisare come questi dati siano riferiti alle sole corse oggetto dello studio e non a tutti gli utenti che utilizzano il sistema di trasporto su ferro di Ferrovie della Calabria.

Come descritto nella scheda di rilevazione dell'indagine a campione, agli utenti è stato chiesto di esprimere un giudizio, con un voto da 1 a 10, sul comfort acustico e vibrazionale a bordo veicolo, definendo per ultimo quale componente tra il rumore percepito e le vibrazioni percepite è risultata più gravosa per la determinazione del comfort a bordo veicolo. I valori di comfort percepito, suddivisi per tipologia di treno, vengono riportati nella Tabella 12.

Tabella 12: Elaborazione indagine a campione nei treni – Comfort percepito utenti intervistati

Tipo di treno	Grado di rumorosità percepito	Grado di vibrazioni percepito
DEM4C.500 Stadler	5.35	4.57
FCL M2.200	7.80	5.49
FIAT M4	7.85	5.52

Considerando i tre treni oggetto dello studio gli utenti hanno individuato come componente più gravosa, per la definizione del comfort a bordo, il rumore percepito, come mostrato in Tabella 13.

Tabella 13: Elaborazione indagine a campione nei treni – Individuazione componente più gravosa per definizione dei pesi da assegnare nella definizione del CI

Comfort vibrazionale percepito		Rumore percepito	
n°	%	n°	%
73	29	177	71

Come mostrato dalla Tabella 13, per il 71% degli utenti intervistati, nei sistemi di trasporto oggetto di studio, risulta maggiormente gravoso il rumore percepito a bordo, rispetto alle vibrazioni, per la definizione del comfort a bordo veicolo. Partendo da queste indicazioni è stato possibile scegliere un peso (α) da assegnare alla componente rumore (α_r) e alla componente vibrazione (α_v) nella definizione del Comfort Index (CI). Pertanto, i parametri sono:

- $\alpha_{r(\text{treno})} = 0.7$
- $\alpha_{v(\text{treno})} = 0.3$

6.4.4. Metodologia di calcolo del Comfort Index (CI) per i treni

A valle della fase sperimentale descritta nei paragrafi precedenti è stata individuata una metodologia per il calcolo del comfort a bordo per i treni. Tale metodologia si basa sul calcolo di un Comfort Index (CI) che tenga conto di due grandezze principali:

- il **rumore misurato** a bordo veicolo durante il viaggio;
- le **vibrazioni misurate** a bordo veicolo durante il viaggio.

Come ampiamente detto, tale Comfort Index tiene conto della percezione espressa dagli utenti intervistati nelle campagne di indagine a campione ma, tuttavia, si basa su misure oggettive misurate a bordo veicolo mediante la strumentazione descritta nel Capitolo 4.

La formulazione utilizzata per il calcolo del Comfort Index (CI), sui treni, è la seguente:

$$CI(\text{treno}) = x_r(\text{treno}) \cdot \alpha_r(\text{treno}) + x_v(\text{treno}) \cdot \alpha_v(\text{treno}) \quad (1)$$

dove:

$x_r(\text{treno})$: misura del rumore in termini di dB, per i treni;

$x_v(\text{treno})$: misura di vibrazioni (a_v) in termini di m/s^2 , per i treni;

$\alpha_r(\text{treno})$: peso assegnato alla classe rumore per i treni;

$\alpha_v(\text{treno})$: peso assegnato alla classe vibrazione per i treni.

Come descritto nel paragrafo 6.4.3., per la definizione del CI è stato utilizzato un peso da assegnare a ciascuna grandezza misurata, partendo dalle indicazioni emerse dalle 250 schede di rilevazione sottoposte nell'indagine sui mezzi di trasporto pubblico. I pesi α_r e α_v , sono stati assunti pari a: $\alpha_r = 0,7$ e $\alpha_v = 0,3$.

Invece, la definizione delle soglie vengono descritte nei paragrafi 6.2.1. e 6.2.3., in particolare i valori x_r e x_v , dipendenti dal rumore e dalle vibrazioni misurate a bordo veicolo, sono riportati in Tabella 14.

Tabella 14: Identificazione dei parametri x_r e x_v

Leq (A) [dB]	Leq (A) ≥ 85	85 > Leq (A) ≥ 80	80 > Leq (A) ≥ 75	75 > Leq (A) ≥ 70	Leq (A) < 70
x_r	1	0,75	0,5	0,25	0
a_v [m/s^2]	$a_v \geq 0,9$	$0,90 > a_v \geq 0,65$	$0,65 > a_v \geq 0,35$	$0,35 > a_v \geq 0,2$	$a_v < 0,2$
x_v	1	0,75	0,5	0,25	0

Applicando la formulazione (1) si può definire il Comfort Index (CI_{treni}) specifico di un'intera linea, tra due stazioni, per un intervallo temporale specificato. Tramite le soglie identificate in Tabella 14 e tramite i pesi $\alpha_r(\text{treno})$ e $\alpha_v(\text{treno})$ è possibile applicare la formulazione (1) e calcolare il CI. Tale grado di comfort misurato, permette in base alle

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

soglie descritte in Tabella 15 di determinare il grado di comfort del sistema di trasporto considerato.

Tabella 15: Determinazione soglie per definizione del CI nei treni

	$1 \geq CI \geq 0,90$	$0,9 > CI \geq 0,75$	$0,75 > CI \geq 0,50$	$0,50 > CI \geq 0,25$	$0,25 > CI \geq 0$
CI	Molto sconfortevole	Sconfortevole	Mediamente confortevole	Confortevole	Molto confortevole

6.4.5. Elaborazione dell'indagine a campione sugli autobus

In modo del tutto analogo al caso dei treni è stata condotta un'indagine anche a bordo degli autobus lungo il test site descritto nel paragrafo 6.3.2. L'indagine sugli autobus, ha riguardato un totale di 100 utenti che utilizzano in modo frequente il sistema di trasporto. I dati socio-economici ci hanno permesso di definire il campione di utenti intervistato. In particolare i grafici mostrati in Figura 106, 107 e 108, elaborati dai dati rilevati a bordo, mostrano come gli utenti intervistati siano prevalentemente studenti pendolari di sesso maschile, che frequentano l'Università degli Studi "Magna Graecia" di Catanzaro, con un'età compresa tra i 21 e i 40 anni.

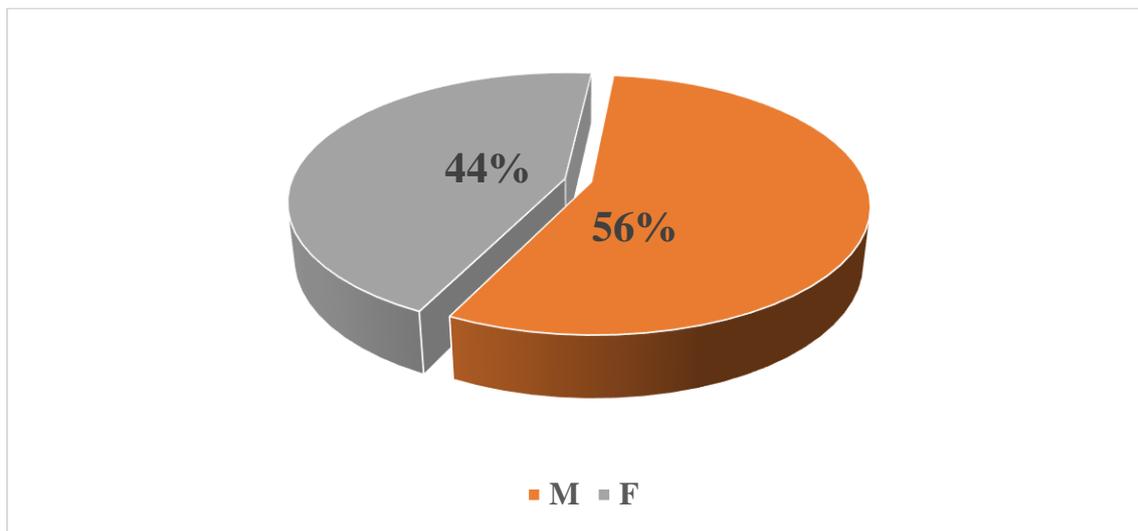


Figura 106: Elaborazione indagine a campione negli autobus – Sesso utenti intervistati

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

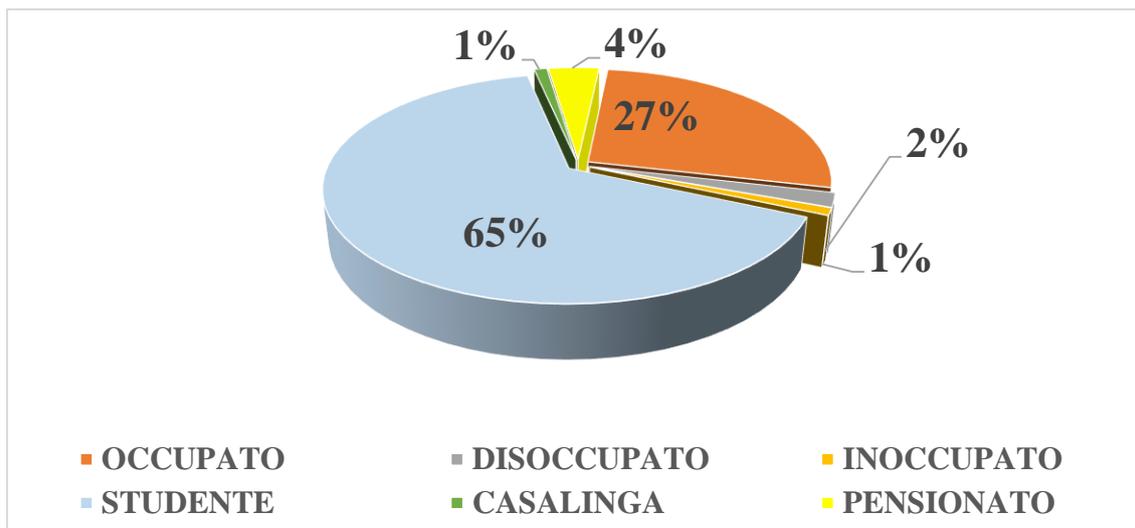


Figura 107: Elaborazione indagine a campione negli autobus– Occupazione utenti intervistati

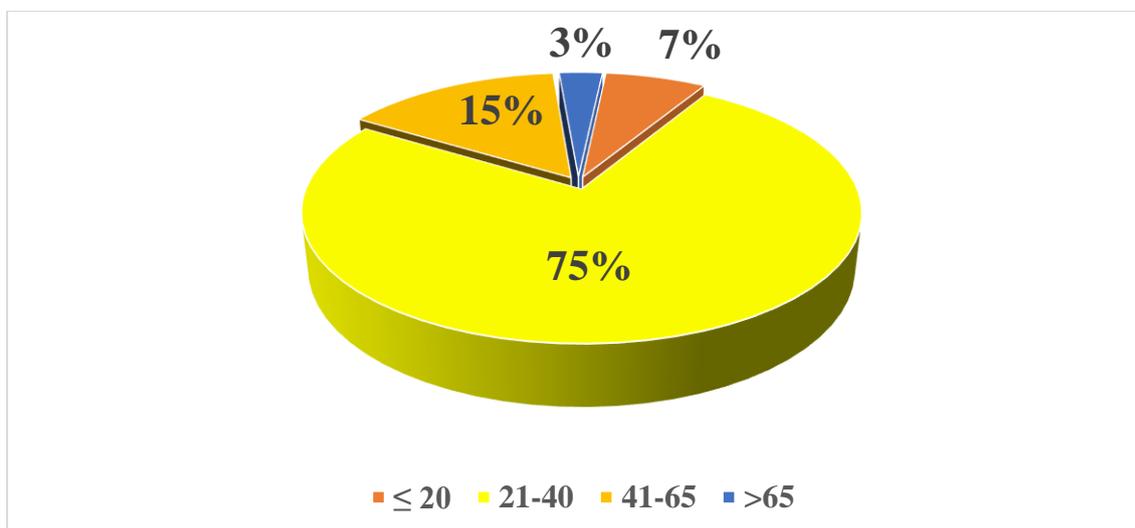


Figura 108: Elaborazione indagine a campione negli autobus – Età utenti intervistati

I grafici riportati nelle Figure 109, 110 e 111 mostrano come gli utenti intervistati risiedono prevalentemente in ambito urbano, con un nucleo familiare maggiormente composto da 4 persone e reddito annuo compreso tra i 10000 e i 30000 euro.

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

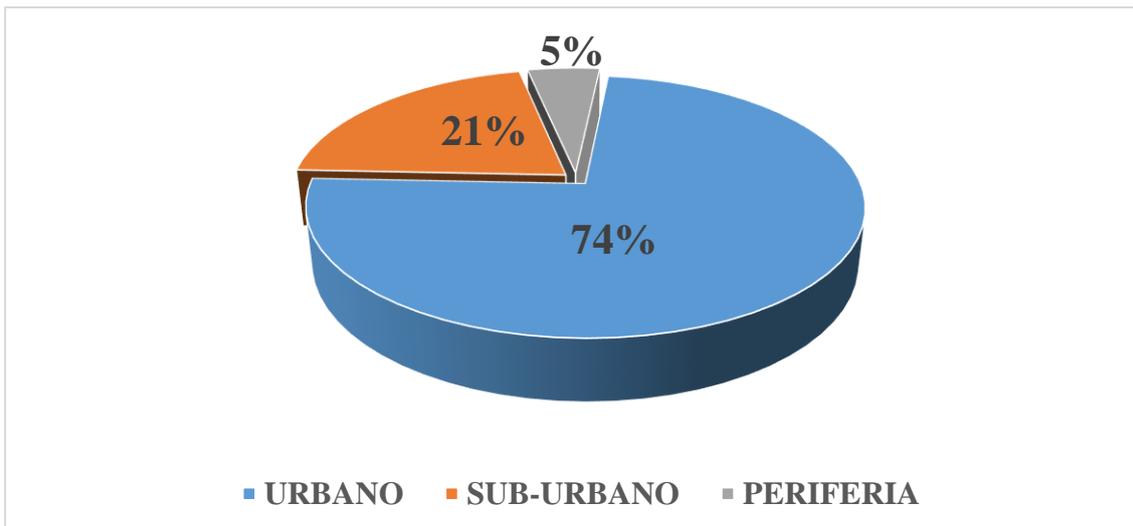


Figura 109: Elaborazione indagine a campione negli autobus – Ambito di residenza utenti intervistati

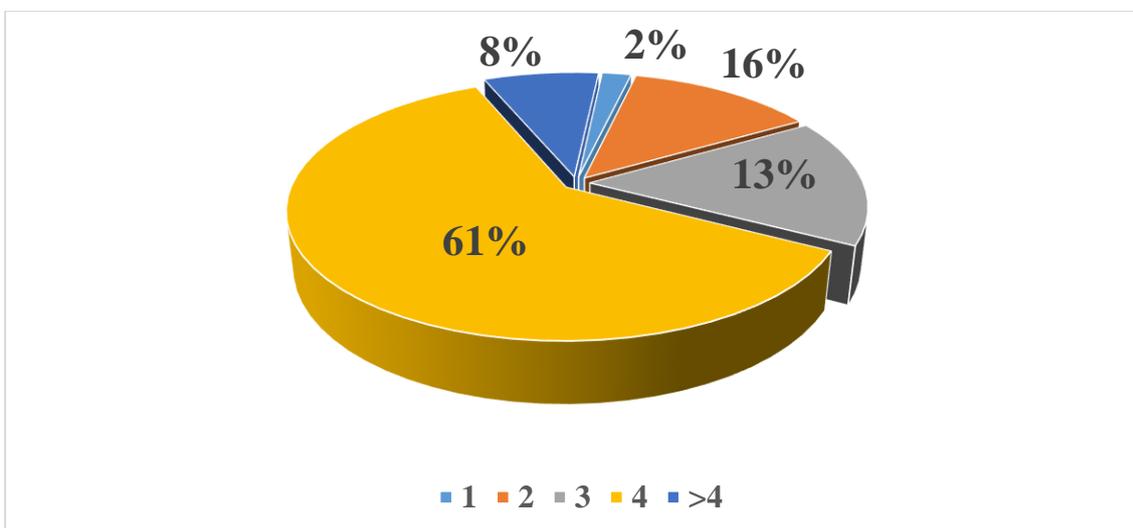


Figura 110: Elaborazione indagine a campione negli autobus – N° componenti nucleo familiare utenti intervistati

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

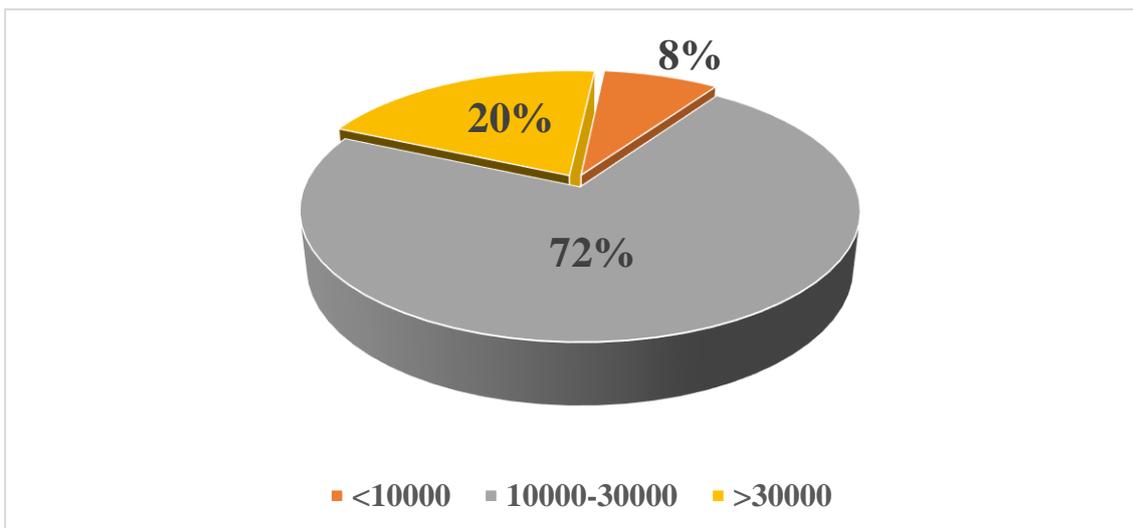


Figura 111: Elaborazione indagine a campione negli autobus - Reddito annuo nucleo familiare utenti intervistati

Gli utenti intervistati, come mostrato dai grafici di Figura 112 e 113, sono prevalentemente provvisti di patente di guida per il 92% ed il 79% possiede una patente di guida di tipo B (auto) e si muove lungo il test site per raggiungere luoghi di lavoro e/o di istruzione. Gli stessi utenti, dichiarano di possedere prevalentemente due auto all'interno del nucleo familiare.

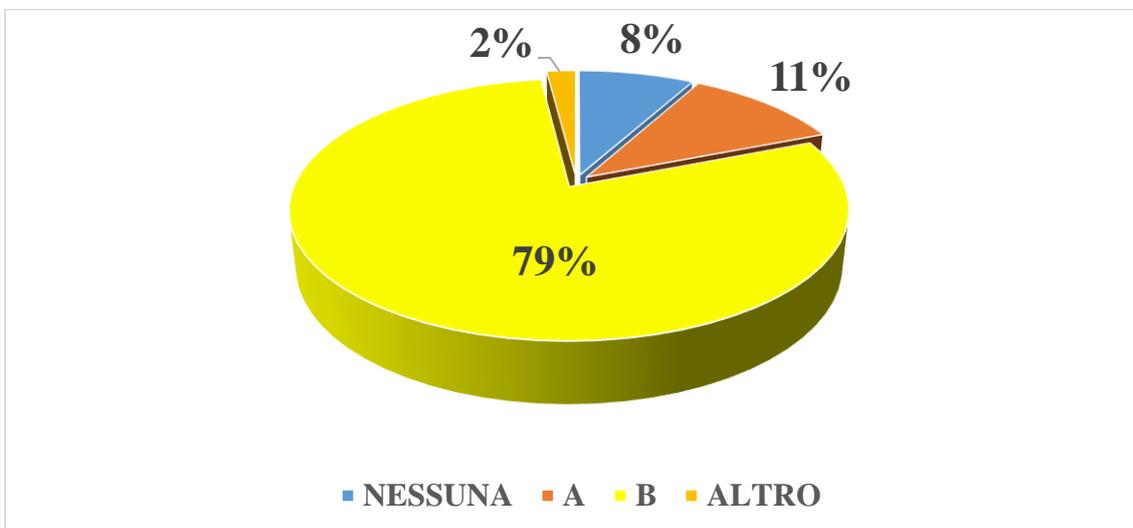


Figura 112: Elaborazione indagine a campione negli autobus – Tipologia patente posseduta utenti intervistati

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

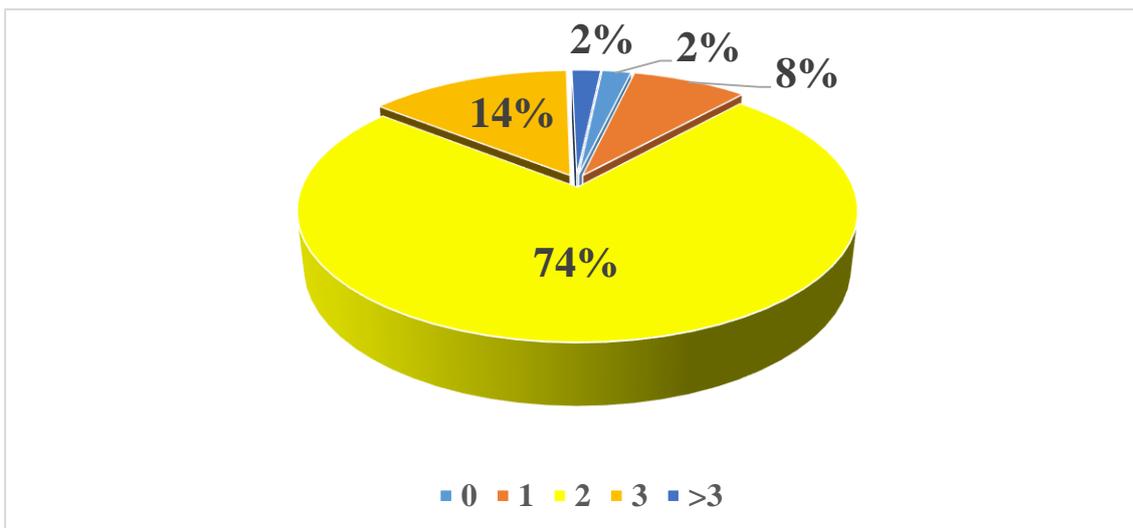


Figura 113: Elaborazione indagine a campione negli autobus – N° auto possedute nel nucleo familiare utenti intervistati

Come si evidenzia dal grafico di Figura 114, più della metà degli utenti intervistati utilizza l'autobus con una frequenza uguale o superiore ai 4 spostamenti/settimanali, raggiungendo la fermata dell'autobus a piedi, Figura 115, ed utilizzando un abbonamento mensile come tipologia di biglietto (Figura 116).

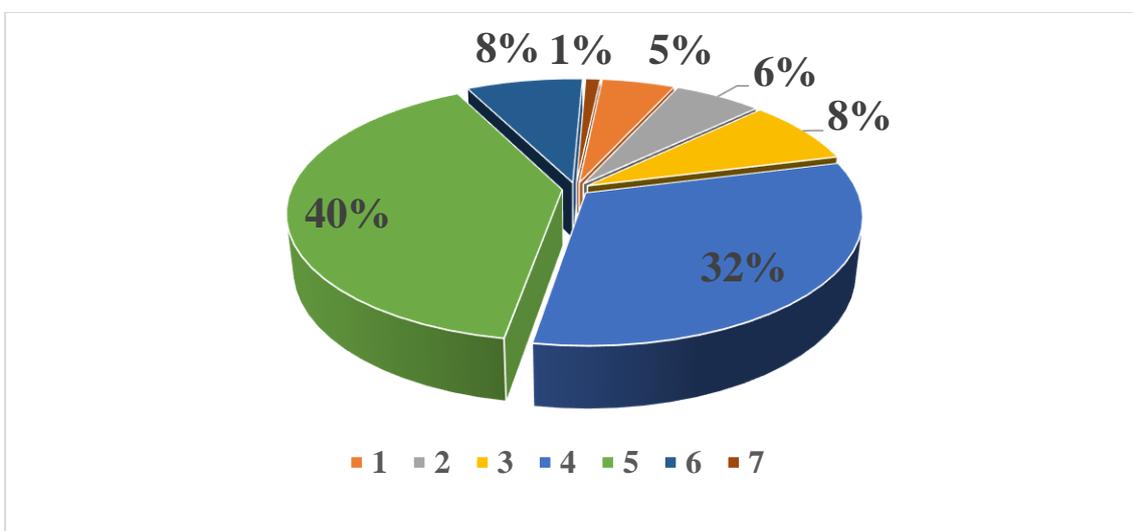


Figura 114: Elaborazione indagine a campione negli autobus – Frequenza di spostamento utenti intervistati

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

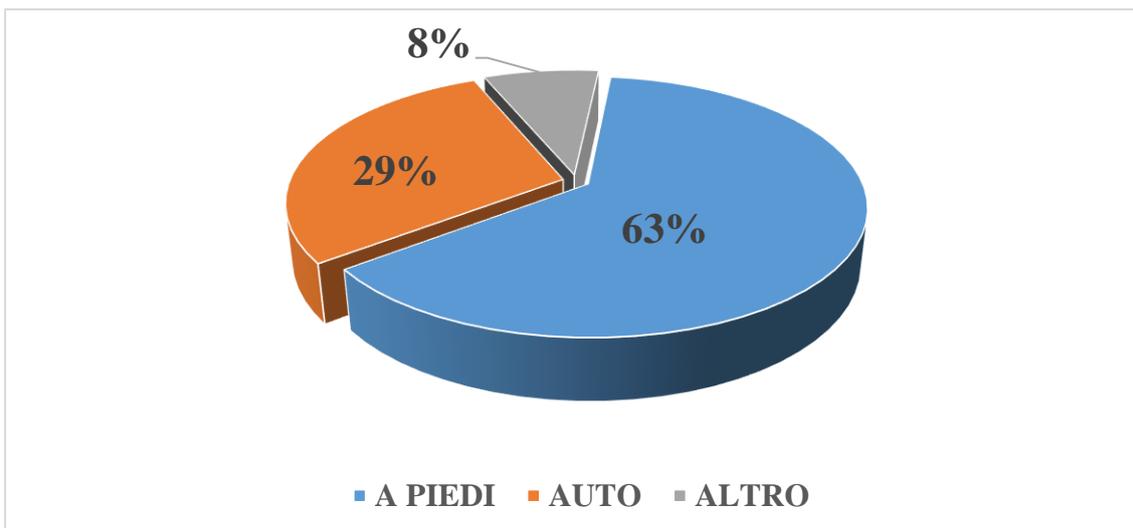


Figura 115: Elaborazione indagine a campione negli autobus – Modalità di raggiungimento della stazione utenti intervistati

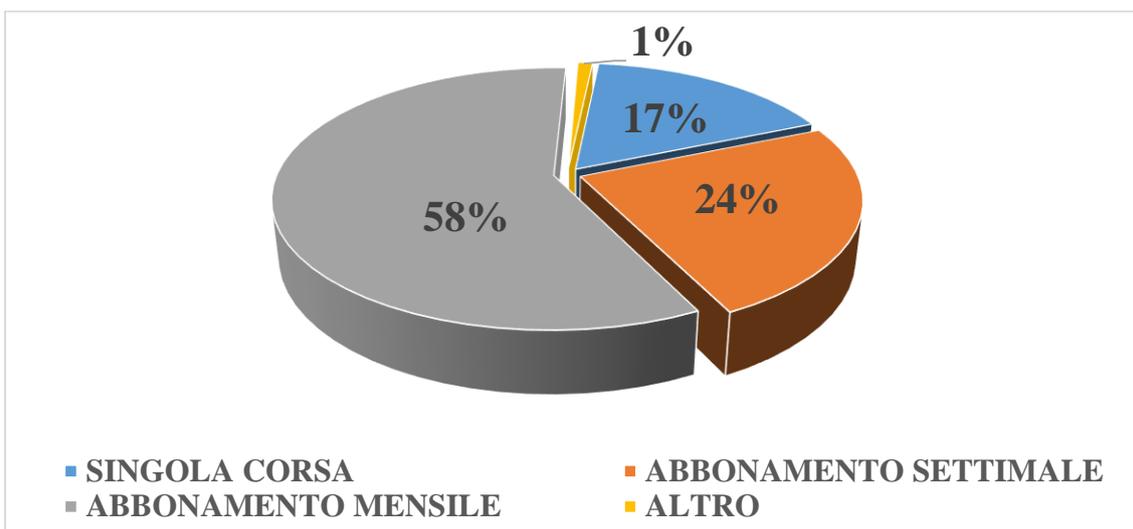


Figura 116: Elaborazione indagine a campione negli autobus – Tipologia del titolo di viaggio utenti intervistati

Come detto anche in precedenza, il campione intervistato è prevalentemente un campione giovane che utilizza gli autobus per motivi casa-scuola e casa-lavoro, spostandosi prevalentemente da Cosenza verso la città di Catanzaro. Principalmente, infatti, oltre il 50% del campione intervistato parte da una delle tre fermate presenti nella città di Cosenza (Cosenza VaglioLise, Via Leto e Cosenza Autostazione), invece, il 15% sono studenti e/o lavoratori che partono da Falerna, Altìlia e/o zone limitrofe per raggiungere la cittadella Regionale e/o l'Università della Magna Graecia di Catanzaro. Alcuni utenti, invece, utilizzano il servizio per trasporto da e per l'aeroporto di Lamezia Terme. La stazione nella quale principalmente gli utenti intervistati scendono è la cittadella Regionale (36%). I dati descritti vengono riportati negli istogrammi di Figura 117 e 118.

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

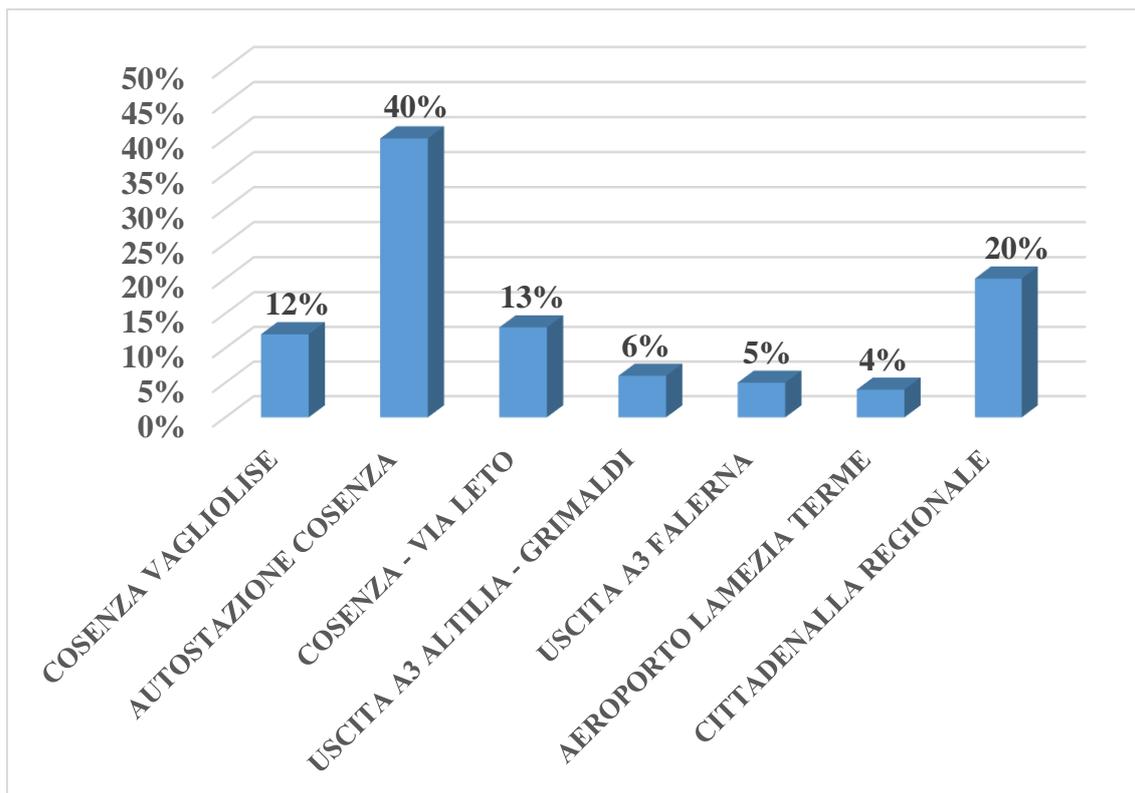


Figura 117: Elaborazione indagine a campione negli autobus – Fermata di partenza utenti intervistati

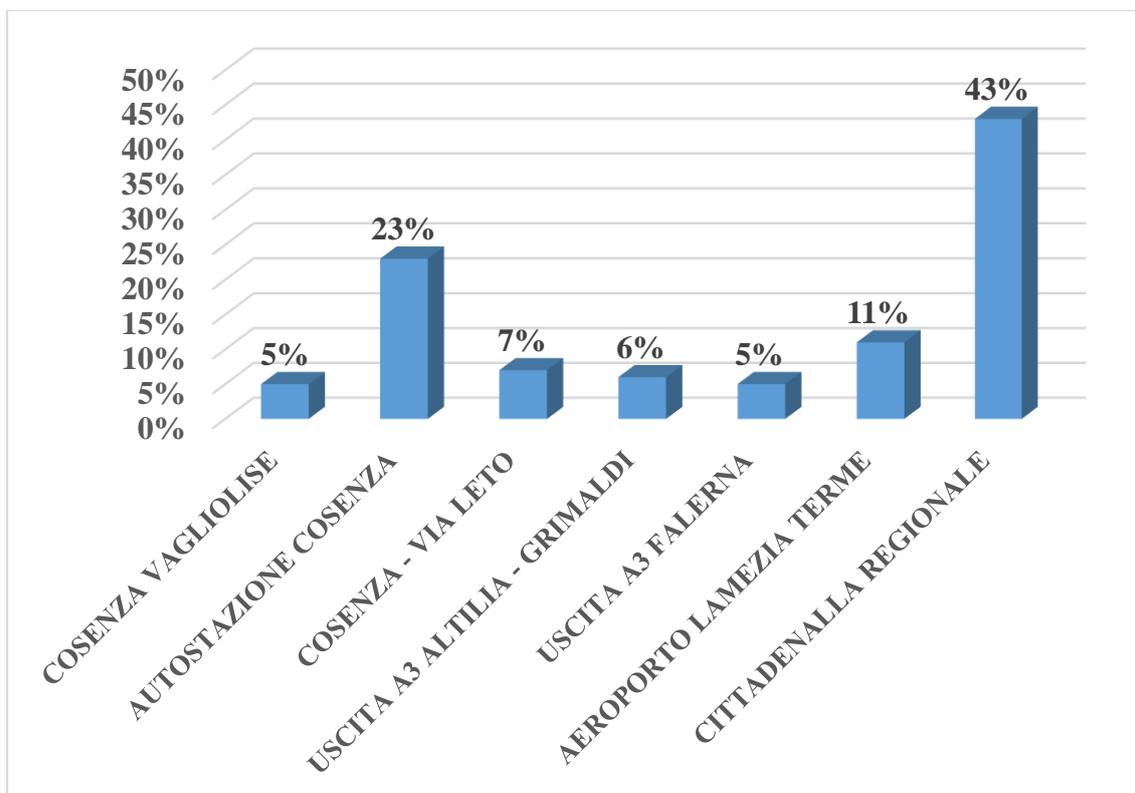


Figura 118: Elaborazione indagine a campione negli autobus – Fermata di arrivo utenti intervistati

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

Bisogna, tuttavia, precisare come questi dati siano riferiti alle sole corse oggetto dello studio e non a tutti gli utenti che utilizzano il sistema di trasporto su gomma, ovvero gli autobus, di Ferrovie della Calabria.

Allo stesso modo dei treni, come descritto nella scheda di rilevazione dell'indagine a campione, agli utenti è stato chiesto di esprimere un giudizio, con un voto da 1 a 10, sul comfort acustico e vibrazionale a bordo veicolo, definendo per ultimo quale componente tra il rumore percepito e le vibrazioni percepite è risultata più gravosa per la determinazione del comfort a bordo veicolo. I valori di comfort percepito, suddivisi per tipologia di autobus, vengono riportati nella Tabella 16.

Tabella 16: Elaborazione indagine a campione negli autobus – Comfort percepito utenti intervistati

Tipo di autobus	Grado di rumorosità percepito	Grado di vibrazioni percepito
Setra S 415 HDH	5.15	5.75
Iveco France SFR 160	5.60	6.85

Considerando i due autobus oggetto dello studio, gli utenti hanno individuato come componente più gravosa, per la definizione del comfort a bordo, il grado di vibrazioni percepito, come mostrato in Tabella 17.

Tabella 17: Elaborazione indagine a campione nei treni – Individuazione componente più gravosa per definizione dei pesi da assegnare nella definizione del CI

Comfort vibrazionale percepito		Rumore percepito	
n°	%	n°	%
64	64	36	36

Come mostrato dalla Tabella 17, per il 64% degli utenti intervistati, nei sistemi di trasporto oggetto di studio, risulta maggiormente gravoso il grado di vibrazioni percepito a bordo, rispetto al rumore, per la definizione del comfort a bordo veicolo. Partendo da queste indicazioni è stato possibile assegnare un peso (α) da assegnare alla componente rumore (α_r) e alla componente vibrazione (α_v) nella definizione del Comfort Index (CI) per gli autobus. Pertanto i parametri sono:

- $\alpha_{r(\text{bus})} = 0.35$
- $\alpha_{v(\text{bus})} = 0.65$

6.4.6. Metodologia di calcolo del Comfort Index (CI) per gli autobus

A valle della fase sperimentale descritta nei paragrafi precedenti, in modo del tutto analogo a quanto fatto per i treni, è stata individuata una metodologia per il calcolo del

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

comfort a bordo per gli autobus. Tale metodologia si basa su il calcolo di un Comfort Index (CI) che tenga conto di due grandezze principali:

- il **rumore misurato** a bordo veicolo durante il viaggio;
- le **vibrazioni misurate** a bordo veicolo durante il viaggio.

Come ampiamente detto, tale Comfort Index tiene conto della percezione espressa dagli utenti intervistati nelle campagne di indagine a campione ma, tuttavia, si basa su misure oggettive misurate a bordo veicolo mediante la strumentazione descritta nel capitolo 4.

La formulazione utilizzata per il calcolo del Comfort Index (CI), sui treni, è la seguente:

$$CI(\text{autobus}) = x_{r(\text{bus})} \cdot \alpha_{r(\text{bus})} + x_{v(\text{bus})} \cdot \alpha_{v(\text{bus})} \quad (2)$$

dove:

$x_{r(\text{bus})}$: misura del rumore in termini di dB, per gli autobus;

$x_{v(\text{bus})}$: misura di vibrazioni (a_v) in termini di m/s^2 , per gli autobus;

$\alpha_{r(\text{bus})}$: peso assegnato alla classe rumore per gli autobus;

$\alpha_{v(\text{bus})}$: peso assegnato alla classe vibrazione per gli autobus.

Come descritto nel paragrafo 6.3.5., per la definizione del CI è stato utilizzato un peso da assegnare a ciascuna grandezza misurata, partendo dalle indicazioni emerse dalle 100 schede di rilevazione sottoposte nell'indagine sui mezzi di trasporto pubblico. I pesi α_r e α_v , sono stati assunti pari a: $\alpha_r = 0,35$ e $\alpha_v = 0,65$.

Invece, la definizione delle soglie vengono descritte nei paragrafi 6.2.2. e 6.2.3., in particolare i valori x_r e x_v , dipendenti dal rumore e dalle vibrazioni misurate a bordo veicolo, sono riportati in Tabella 18.

Tabella 18: Identificazione dei parametri $x_{r(\text{bus})}$ e $x_{v(\text{bus})}$

Leq (A) [dB]	Leq (A) ≥ 80	80 > Leq (A) ≥ 75	75 > Leq (A) ≥ 70	70 > Leq (A) ≥ 65	Leq (A) < 65
x_r	1	0,75	0,5	0,25	0
a_v [m/s^2]	$a_v \geq 0,9$	$0,90 > a_v \geq 0,65$	$0,65 > a_v \geq 0,35$	$0,35 > a_v \geq 0,2$	$a_v < 0,2$
x_v	1	0,75	0,5	0,25	0

Applicando la formulazione (2) si può definire il Comfort Index (CI_{autobus}) specifico di un'intera linea, tra due fermate, per un intervallo temporale specificato. Tramite le soglie identificate in Tabella 18 e tramite i pesi $\alpha_{r(\text{bus})}$ e $\alpha_{v(\text{bus})}$ è possibile applicare la formulazione (2) e calcolare il CI (autobus). Tale grado di comfort misurato, permette in base alle soglie descritte in Tabella 19 di determinare il grado di comfort del sistema di trasporto considerato.

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

Tabella 19: Determinazione soglie per definizione del CI negli autobus

	$1 \geq CI \geq 0,90$	$0,9 > CI \geq 0,75$	$0,75 > CI \geq 0,50$	$0,50 > CI \geq 0,25$	$0,25 > CI \geq 0$
CI	Molto sconfortevole	Sconfortevole	Mediamente confortevole	Confortevole	Molto confortevole

6.5. Il grado di affollamento a bordo e la misura del ritardo

Il grado di affollamento a bordo permette di determinare il numero di passeggeri a bordo del sistema di trasporto considerato, mettendolo in relazione con il numero di posti a sedere. Tale dato, ad oggi, è da considerarsi come uno dei pochi parametri oggettivi che si possono utilizzare per definire la qualità di un sistema di trasporto collettivo. La misura del grado di affollamento è stata realizzata mediante opportuna scheda di rilevazione, andando a rilevare, ad ogni fermata, il numero di passeggeri saliti e il numero di passeggeri discesi, ottenendo il numero di passeggeri a bordo. Il grado di affollamento, si è ottenuto dividendo il numero di passeggeri a bordo ad ogni fermata con il numero di posti a sedere, ottenendo, di fatto, una percentuale di riempimento del sistema di trasporto considerato.

Nel caso in esame il grado di affollamento a bordo non ha particolarmente inciso nelle misurazioni, tranne in alcuni casi nei treni dove il rumore prodotto dai numerosi studenti a bordo dello Stadler nella corsa delle 13.18 ha influito sulle misurazioni fonometriche a bordo. Tuttavia, il grado di affollamento a bordo è stato misurato per ogni singolo viaggio, sia nel caso dei treni sia nel caso degli autobus. A tal riguardo si riportano, a titolo esemplificato e riassuntivo, le tabelle e i relativi grafici del grado di affollamento a bordo per ogni singolo sistema di trasporto (autobus e treni) per una singola corsa.

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

Tabella 20: Grado di affollamento a bordo nel treno DE M4c.500 STADLER - Cosenza Vaglio Lise - Rogliano

<i>Fermate</i>	<i>Utenti a bordo</i>	<i>Saliti</i>	<i>Discesi</i>	<i>Grado di affollamento</i>
Cosenza	4	4	0	0,040
Cosenza Monaco	44	40	0	0,440
Cosenza Campanella	50	6	0	0,500
Cosenza Centro	84	34	0	0,840
Casali	88	4	0	0,880
Bosco	88	0	0	0,880
Pedace	88	0	0	0,880
Pietrafitta	88	0	0	0,880
Aprigliano	72	0	16	0,720
Piane Crati	54	0	18	0,540
Figline - Cellara	54	0	0	0,540
Mangone	50	0	4	0,500
Piano Lago	48	1	3	0,480
Santo Stefano	41	0	7	0,410
Rogliano	0	0	41	0,000

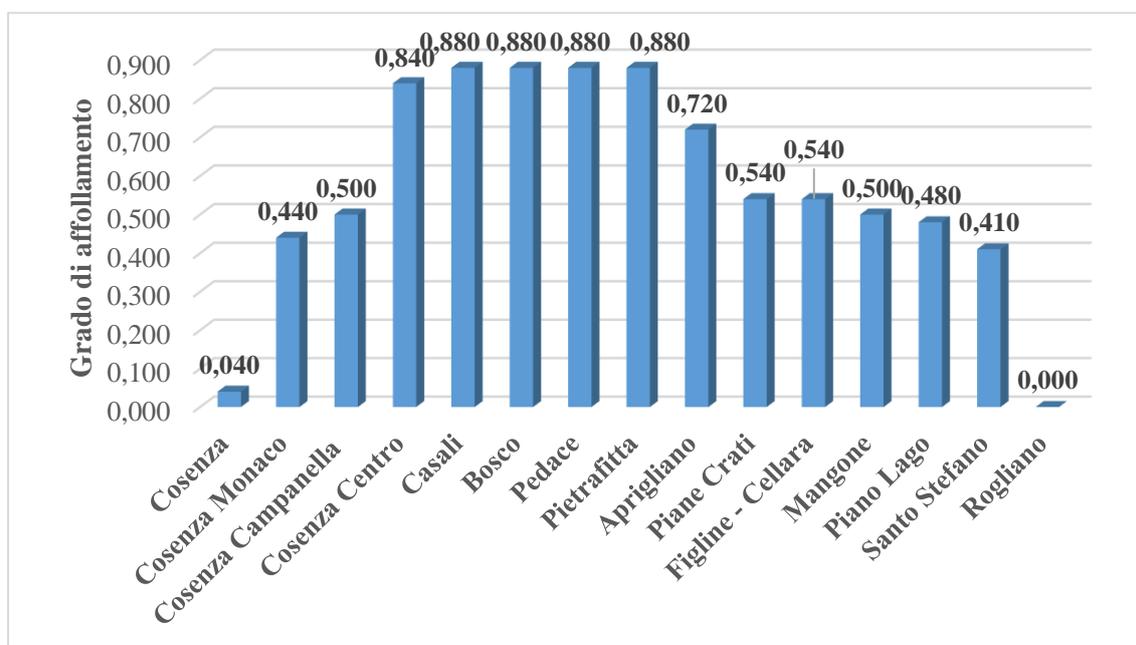
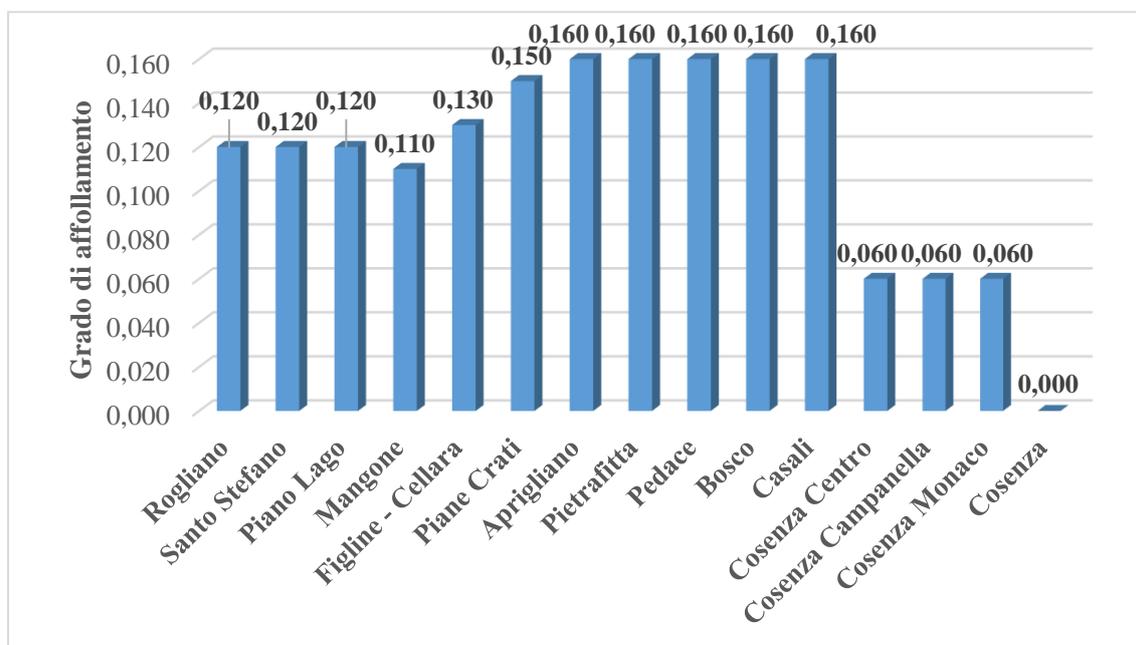


Figura 119: Grado di affollamento a bordo nel treno DE M4c.500 STADLER - Cosenza Vaglio Lise - Rogliano

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

*Tabella 21: Grado di affollamento a bordo nel treno DE M4c.500 STADLER – Rogliano – Cosenza
Vaglio Lise*

<i>Fermate</i>	<i>Utenti a bordo</i>	<i>Saliti</i>	<i>Discesi</i>	<i>Grado di affollamento</i>
Rogliano	12	12	0	0,120
Santo Stefano	12	0	0	0,120
Piano Lago	12	0	0	0,120
Mangone	11	0	1	0,110
Figline - Cellara	13	2	0	0,130
Piane Crati	15	3	1	0,150
Aprigliano	16	3	2	0,160
Pietrafitta	16	3	2	0,160
Pedace	16	0	0	0,160
Bosco	16	0	0	0,160
Casali	16	0	0	0,160
Cosenza Centro	6	0	10	0,060
Cosenza Campanella	6	0	0	0,060
Cosenza Monaco	6	0	0	0,060
Cosenza	0	0	6	0,000



*Figura 120: Grado di affollamento a bordo nel treno DE M4c.500 STADLER – Rogliano – Cosenza
Vaglio Lise*

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

Tabella 22: Grado di affollamento a bordo nel treno Fiat M4.400 - Cosenza Vaglio Lise - Rogliano

<i>Fermate</i>	<i>Utenti a bordo</i>	<i>Saliti</i>	<i>Discesi</i>	<i>Grado di affollamento</i>
Cosenza	5	5	0	0,093
Cosenza Monaco	5	0	0	0,093
Cosenza Campanella	5	0	0	0,093
Cosenza Centro	13	8	0	0,241
Casali	13	0	0	0,241
Bosco	13	0	0	0,241
Pedace	13	0	0	0,241
Pietrafitta	13	0	0	0,241
Aprigliano	12	0	1	0,222
Piane Crati	8	0	4	0,148
Figline - Cellara	8	0	0	0,148
Mangone	8	0	0	0,148
Piano Lago	7	1	2	0,130
Santo Stefano	7	0	0	0,130
Rogliano	0	0	7	0,000

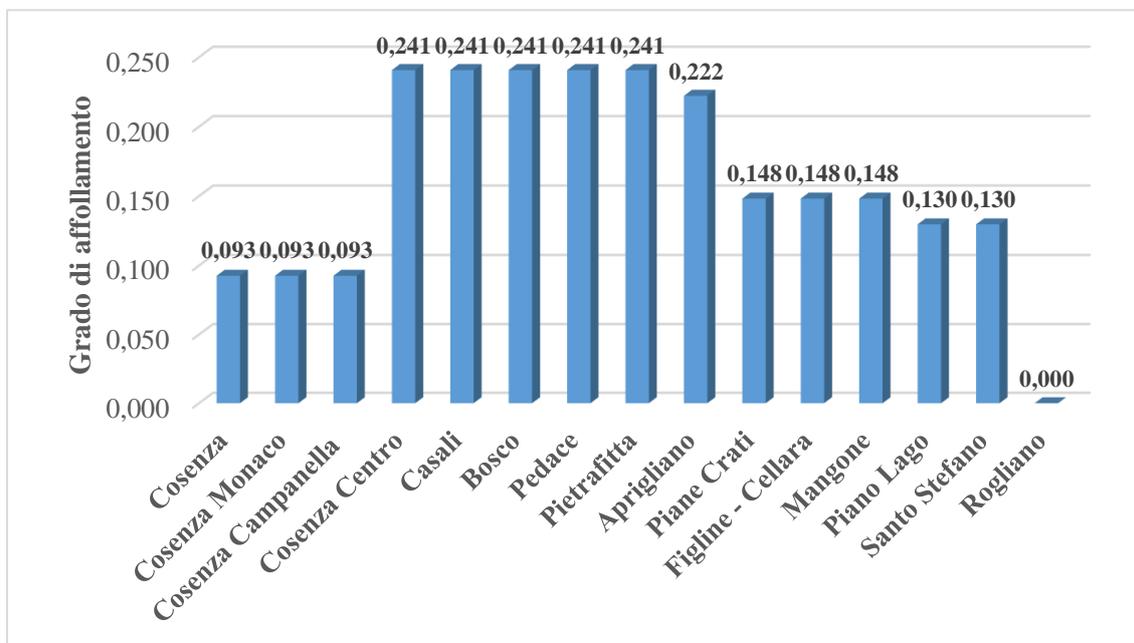


Figura 121: Grado di affollamento a bordo nel treno Fiat M4.400 - Cosenza Vaglio Lise - Rogliano

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

Tabella 23: Grado di affollamento a bordo nel treno Fiat M4.400 – Rogliano – Cosenza Vaglio Lise

<i>Fermate</i>	<i>Utenti a bordo</i>	<i>Saliti</i>	<i>Discesi</i>	<i>Grado di affollamento</i>
Rogliano	8	8	0	0,148
Santo Stefano	6	0	2	0,111
Piano Lago	4	0	2	0,074
Mangone	4	0	0	0,074
Figline - Cellara	6	2	0	0,111
Piane Crati	6	0	0	0,111
Aprigliano	6	0	0	0,111
Pietrafitta	6	0	0	0,111
Pedace	6	0	0	0,111
Bosco	7	1	0	0,130
Casali	7	0	0	0,130
Cosenza Centro	2	0	5	0,037
Cosenza Campanella	2	0	0	0,037
Cosenza Monaco	2	0	0	0,037
Cosenza	0	0	2	0,000

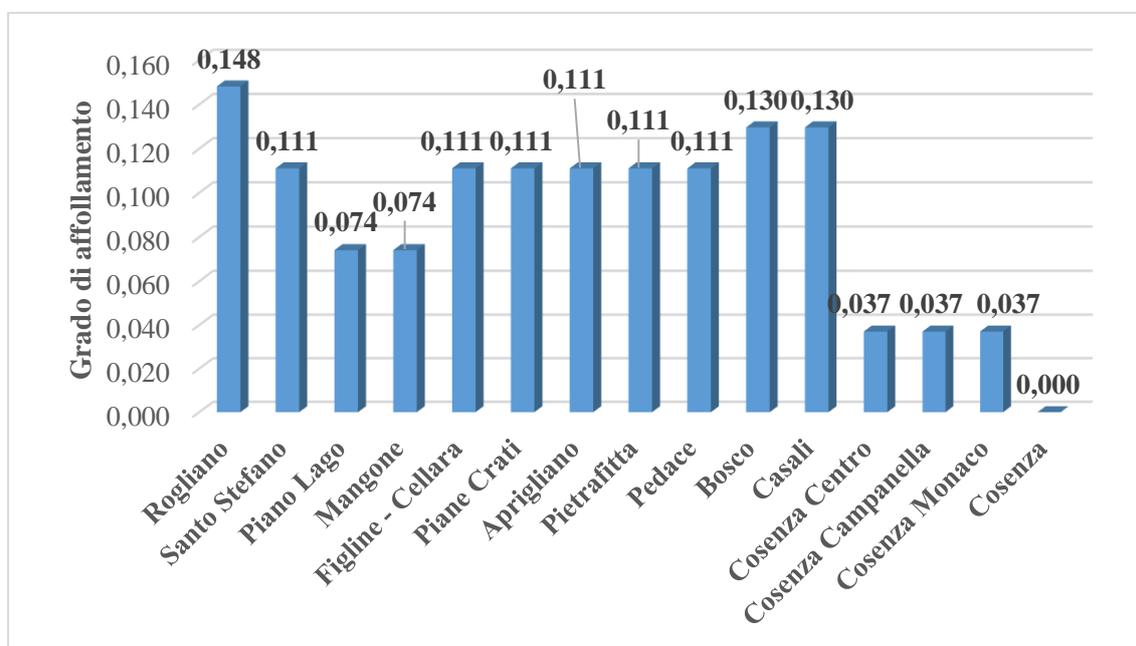


Figura 122: Grado di affollamento a bordo nel treno Fiat M4.400 – Rogliano – Cosenza Vaglio Lise

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

Tabella 24: Grado di affollamento a bordo nel treno FCL M2.200 BREDA - Cosenza Vaglio Lise – Rogliano

<i>Fermate</i>	<i>Utenti a bordo</i>	<i>Saliti</i>	<i>Discesi</i>	<i>Grado di affollamento</i>
Cosenza	4	4	0	0,077
Cosenza Monaco	6	2	0	0,115
Cosenza Campanella	6	0	0	0,115
Cosenza Centro	20	14	0	0,385
Casali	19	0	1	0,365
Bosco	19	0	0	0,365
Pedace	18	0	1	0,346
Pietrafitta	18	0	0	0,346
Aprigliano	17	0	1	0,327
Piane Crati	16	0	1	0,308
Figline - Cellara	15	0	1	0,288
Mangone	15	0	0	0,288
Piano Lago	13	0	2	0,250
Santo Stefano	12	0	1	0,231
Rogliano	0	0	12	0,000

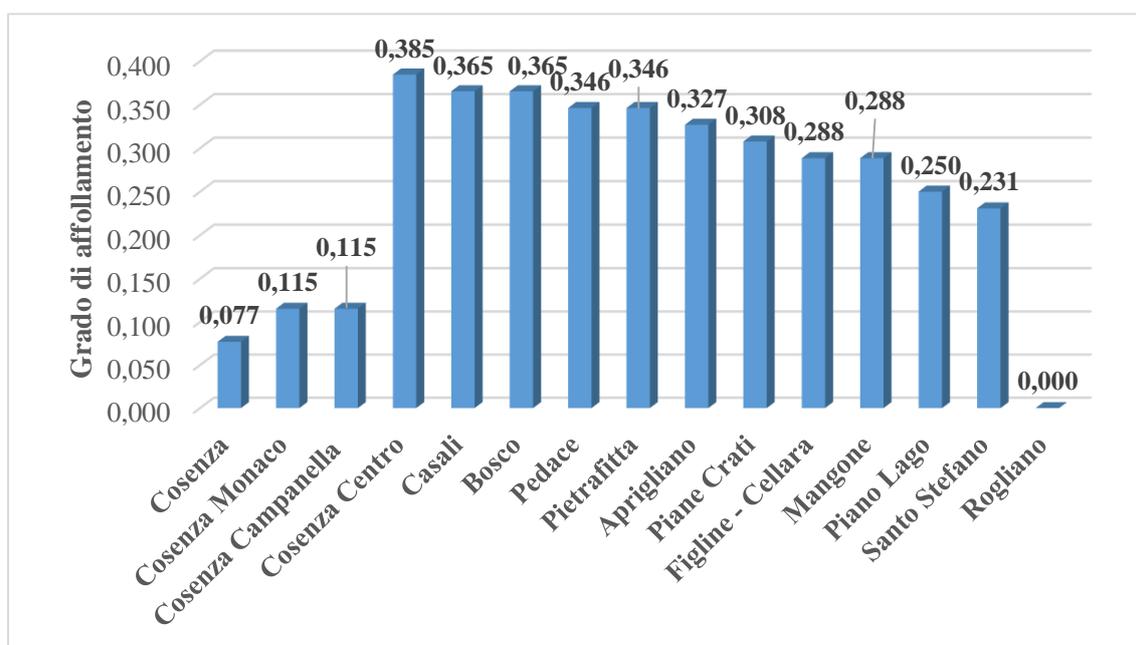
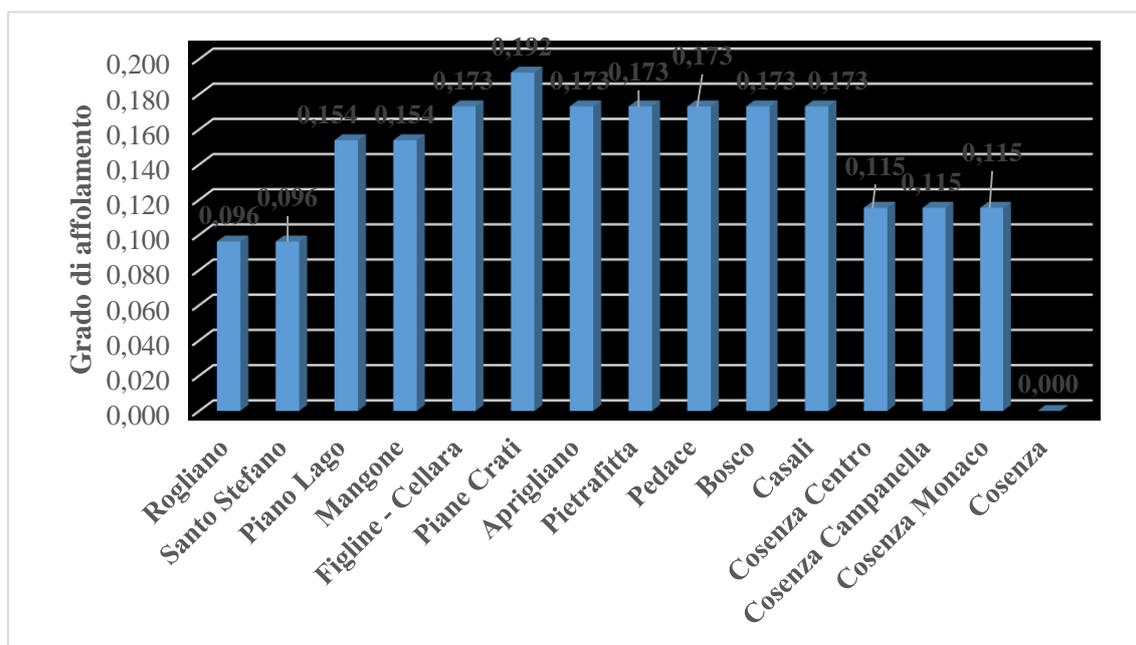


Figura 123: Grado di affollamento a bordo nel treno FCL M2.200 BREDA - Cosenza Vaglio Lise – Rogliano

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

*Tabella 25: Grado di affollamento a bordo nel treno FCL M2.200 BREDA – Rogliano – Cosenza
Vaglio Lise*

<i>Fermate</i>	<i>Utenti a bordo</i>	<i>Saliti</i>	<i>Discesi</i>	<i>Grado di affollamento</i>
Rogliano	5	5	0	0,096
Santo Stefano	5	0	0	0,096
Piano Lago	8	3	0	0,154
Mangone	8	0	0	0,154
Figline - Cellara	9	1	0	0,173
Piane Crati	10	2	1	0,192
Aprigliano	9	0	1	0,173
Pietrafitta	9	0	0	0,173
Pedace	9	1	1	0,173
Bosco	9	0	0	0,173
Casali	9	0	0	0,173
Cosenza Centro	6	3	6	0,115
Cosenza Campanella	6	0	0	0,115
Cosenza Monaco	6	0	0	0,115
Cosenza	0	0	6	0,000



*Figura 124: Grado di affollamento a bordo nel treno FCL M2.200 BREDA – Rogliano – Cosenza
Vaglio Lise*

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

Tabella 26: Grado di affollamento a bordo nell'autobus Setra S 415 HDH – Cosenza Vaglio Lise (Deposito) – Cittadella Regionale (Germaneto)

<i>Fermate</i>	<i>Utenti a bordo</i>	<i>Saliti</i>	<i>Discesi</i>	<i>Grado di affollamento</i>
Cosenza Vaglio Lise (Deposito)	2	2	0	0,038
Autostazione Cosenza	20	18	0	0,385
Via Leto	26	6	0	0,500
Fermata Esso - Altilia	33	7	0	0,635
Uscita A3 Falerna	39	7	1	0,750
Aeroporto Santa Eufemia - Lamezia Terme	35	1	5	0,673
Cittadella Regionale	0	0	35	0,000

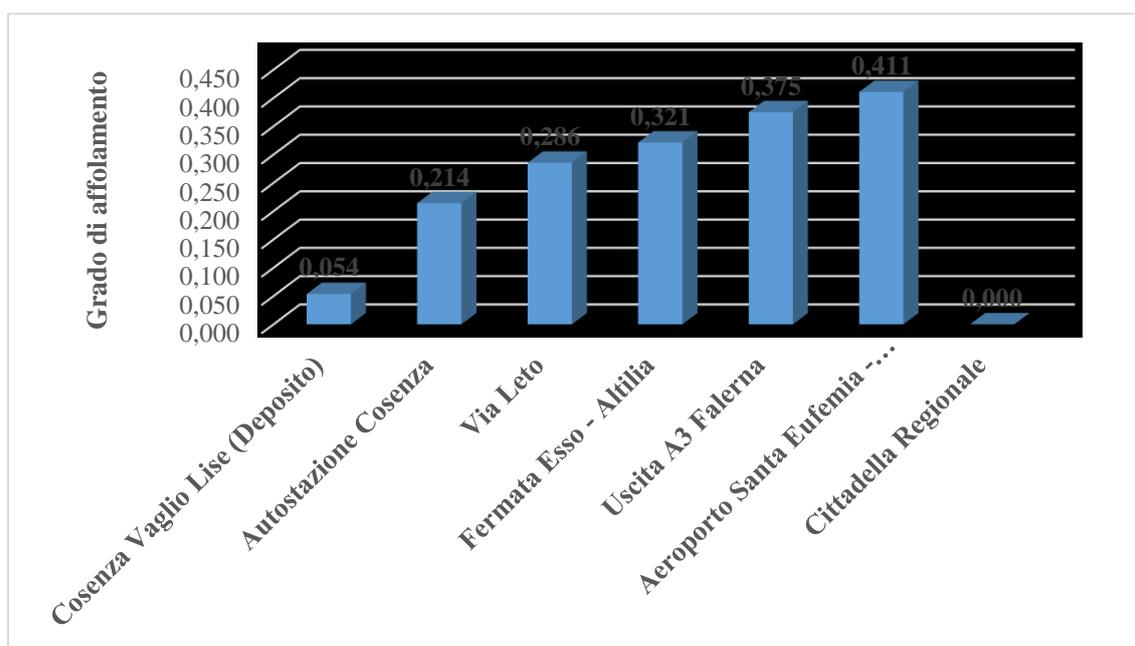


Figura 125: Grado di affollamento a bordo nell'autobus Setra S 415 HDH – Cosenza Vaglio Lise (Deposito) – Cittadella Regionale (Germaneto)

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

Tabella 27: Grado di affollamento a bordo nell'autobus Setra S 415 HDH – Cittadella Regionale (Germaneto) - Cosenza Vaglio Lise (Deposito)

<i>Fermate</i>	<i>Utenti a bordo</i>	<i>Saliti</i>	<i>Discesi</i>	<i>Grado di affollamento</i>
Cittadella Regionale	8	8	0	0,154
Aeroporto Santa Eufemia - Lamezia Terme	11	3	0	0,212
Uscita A3 Falerna	8	0	3	0,154
Fermata Esso - Altilia	8	0	0	0,154
Via Leto	2	0	6	0,038
Autostazione Cosenza	2	0	0	0,038
Cosenza Vaglio Lise (Deposito)	0	0	2	0,000

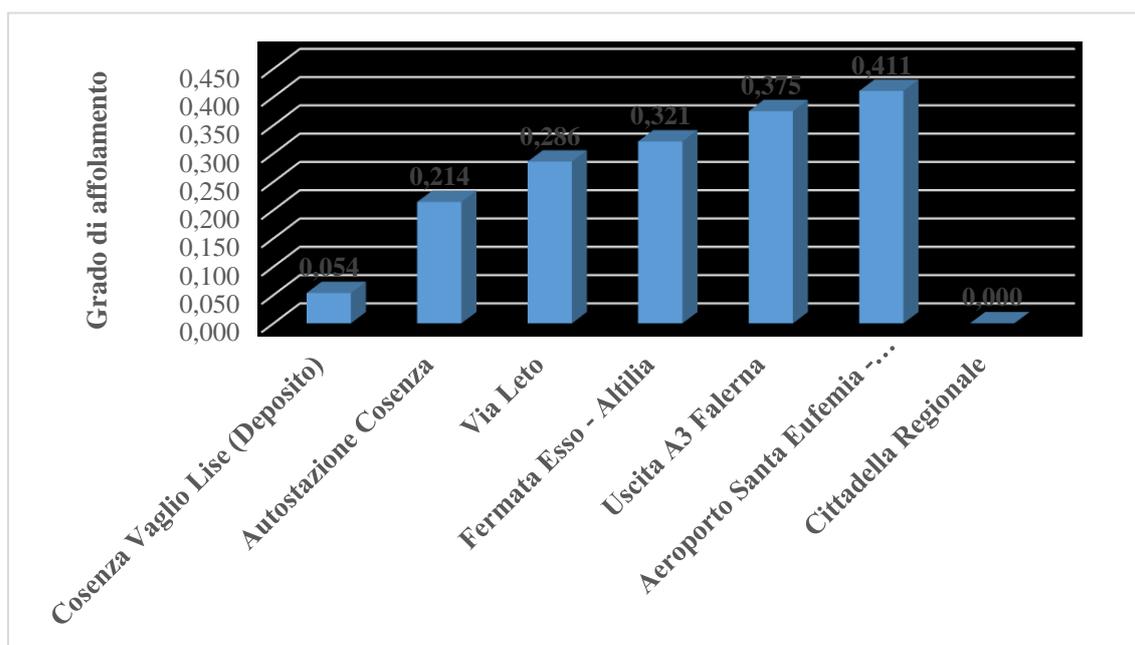


Figura 126: Grado di affollamento a bordo nell'autobus Setra S 415 HDH – Cittadella Regionale (Germaneto) - Cosenza Vaglio Lise (Deposito)

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

Tabella 28: Grado di affollamento a bordo nell'autobus Iveco France SFR 160 – Cosenza Vaglio Lise (Deposito) – Cittadella Regionale (Germaneto)

<i>Fermate</i>	<i>Utenti a bordo</i>	<i>Saliti</i>	<i>Discesi</i>	<i>Grado di affollamento</i>
Cosenza Vaglio Lise (Deposito)	3	3	0	0,054
Autostazione Cosenza	12	9	0	0,214
Via Leto	16	5	1	0,286
Fermata Esso - Altilia	18	2	0	0,321
Uscita A3 Falerna	21	4	1	0,375
Aeroporto Santa Eufemia - Lamezia Terme	23	4	2	0,411
Cittadella Regionale	0	0	23	0,000

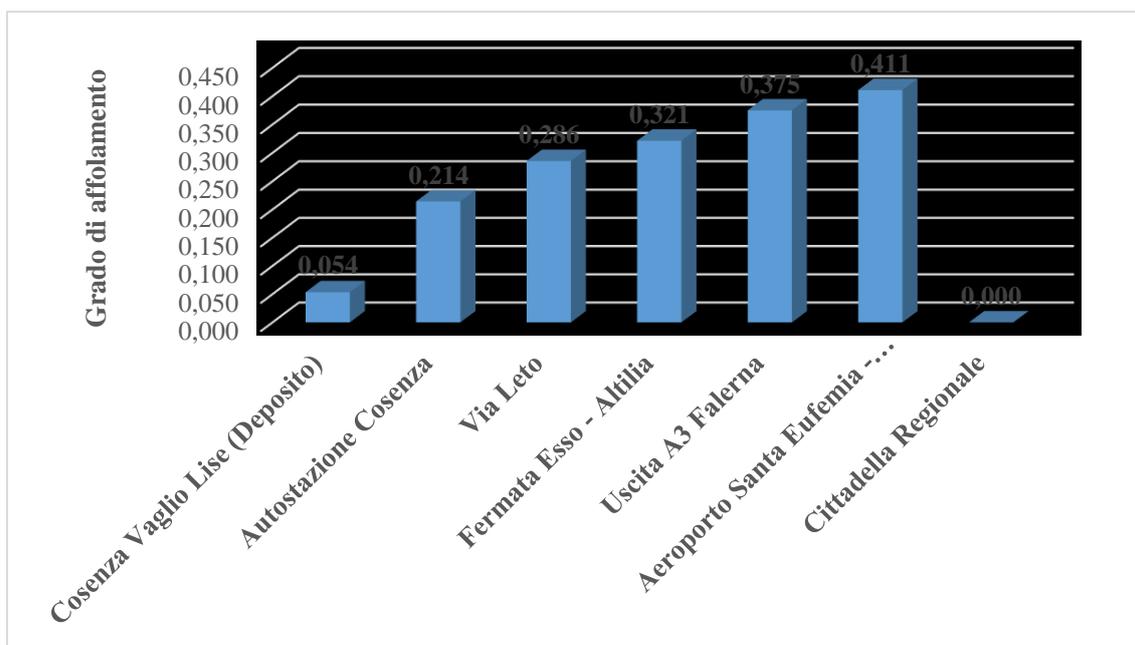


Figura 127: Grado di affollamento a bordo nell'autobus Iveco France SFR 160 – Cosenza Vaglio Lise (Deposito) – Cittadella Regionale (Germaneto)

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

Tabella 29: Grado di affollamento a bordo nell'autobus Iveco France SFR 160 – Cittadella Regionale (Germaneto) - Cosenza Vaglio Lise (Deposito)

<i>Fermate</i>	<i>Utenti a bordo</i>	<i>Saliti</i>	<i>Discesi</i>	<i>Grado di affollamento</i>
Cittadella Regionale	8	8	0	0,143
Aeroporto Santa Eufemia - Lamezia Terme	10	2	0	0,179
Uscita A3 Falerna	9	0	1	0,161
Fermata Esso - Altilia	9	0	0	0,161
Via Leto	7	0	2	0,125
Autostazione Cosenza	3	0	4	0,054
Cosenza Vaglio Lise (Deposito)	0	0	3	0,000

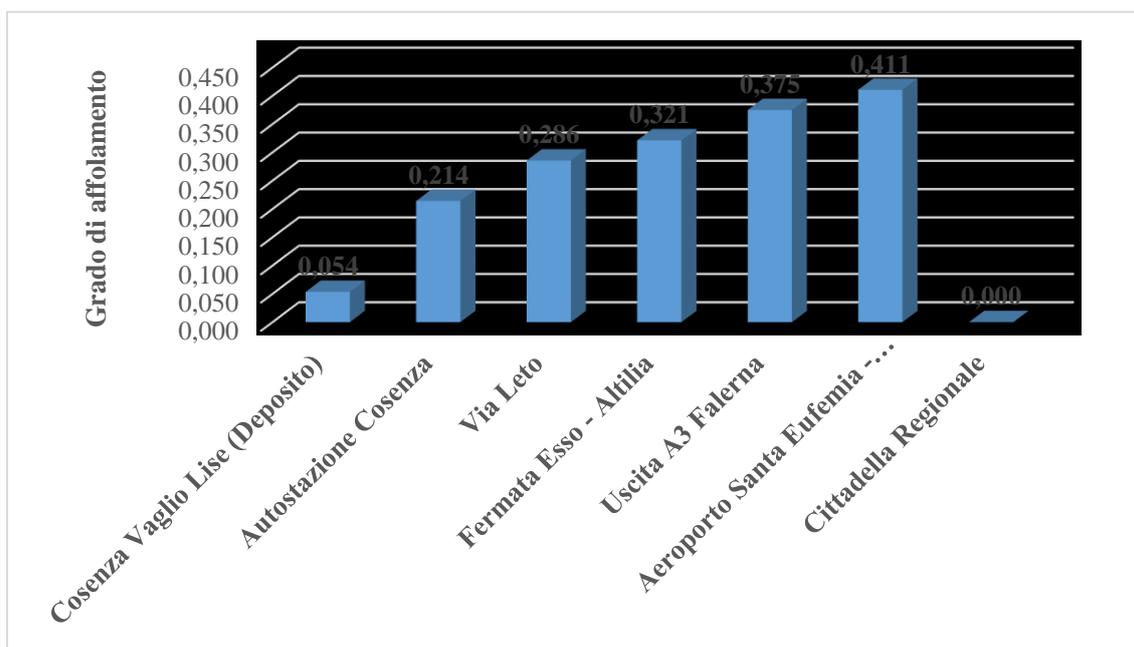


Figura 128: Grado di affollamento a bordo nell'autobus Iveco France SFR 160 – Cittadella Regionale (Germaneto) - Cosenza Vaglio Lise (Deposito)

7. Analisi dei dati, sperimentazione a bordo veicolo e calcolo dell'indice di comfort

7.1. Introduzione

Le sperimentazioni sono state realizzate in fasi distinte tra gli autobus e i treni, con lo scopo di determinare due indici di comfort. La prima fase sperimentale ha riguardato le tre tipologie di treni in possesso di Ferrovie della Calabria, lungo il test site descritto nel paragrafo 6.5.1. Durante le sperimentazioni, sia nel caso dei treni sia nel caso degli autobus, sono state misurate le accelerazioni e il rumore misurato a bordo del treno, sia a veicolo fermo e motore acceso (rumore di fondo) sia con veicolo in movimento, geolocalizzando i dati ottenuti mediante l'uso di uno smartphone, precedentemente sincronizzato con gli strumenti di precisione VIB e WED. Le misure sono state ripetute più volte su tutti i sistemi considerati in modo da ottenere una buona significatività statistica. Le condizioni in cui sono state realizzate le misure sono state pressoché sempre identiche, in modo da non alterare i risultati; l'utente soggetto alle misure di rumore e vibrazioni è sempre stato lo stesso, le condizioni metereologiche esterne sono sempre state in assenza di pioggia e vento inferiore ai 5 m/s. Per ogni rilievo si è proceduto ad una doppia calibrazione degli strumenti, prima del rilievo e a fine rilievo, in modo da verificare che le misure non siano affette da errori.

7.2. Analisi dei dati ottenuti dalle sperimentazioni

I dati ottenuti dalle strumentazioni VIB e WEB, in fase di sperimentazione a bordo veicolo sui treni e sugli autobus, sono stati estrapolati mediante l'utilizzo dei software descritti nel Capitolo 4. Una volta estrapolati i dati, si è proceduto all'allineamento dei dati fonometrici ed accelerometrici con il dato registrato dallo smartphone sulla localizzazione del sistema di trasporto oggetto di studio, usando la sincronizzazione dell'orario di tutti gli strumenti con l'orologio atomico dei satelliti. Il dato, così elaborato, ha consentito il calcolo dei parametri utili alla determinazione del CI.

7.2.1. Analisi dei dati sperimentali sui treni

Come già detto, la fase di sperimentazione a bordo veicolo è avvenuta in un arco temporale piuttosto lungo, essendo strettamente legata alle condizioni climatiche ed agli orari di esercizio dei mezzi di trasporto considerati. Nel caso dei treni la sperimentazione ha portato ad individuare alcune criticità presenti sui mezzi di trasporto e/o sul test site di riferimento. Nel caso specifico, si evidenziano picchi elevatissimi di pressione sonora registrata a bordo veicolo sia nel caso del *FIAT M4.400* sia nel caso del *FCL M2.200 BREDA*, specie all'ingresso ed all'uscita delle gallerie presenti lungo il test site di riferimento. Come vedremo, infatti, nonostante questi due mezzi risultino essere meno affollati rispetto allo *STADLER*, si sono misurati a bordo veicolo, valori di rumore e

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

vibrazioni più elevati. Tale motivo è causato principalmente dalle diverse caratteristiche tecniche dei mezzi di trasporto considerati, infatti, lo *STADLER* risulta essere un sistema il cui vagone risulta essere ben insonorizzato, con aria condizionata all'interno ed in cui il passeggero non può abbassare i finestrini. Al contrario, invece, sia il *FIAT* che il *BREDA*, sono mezzi di trasporto più datati con una minore insonorizzazione del vagone e con totale assenza di aria condizionata. Quest'ultima caratteristica fa sì che gli utenti a bordo, specie nei mesi più caldi dell'anno, abbassino i finestrini all'interno del vagone, provocando un aumento sproporzionato (oltre il 20% in alcuni casi) del livello di pressione sonora misurato a bordo, specie all'ingresso e all'uscita delle gallerie, ed una riduzione del comfort acustico, come mostrato nelle Figure 129, 130 e 131.

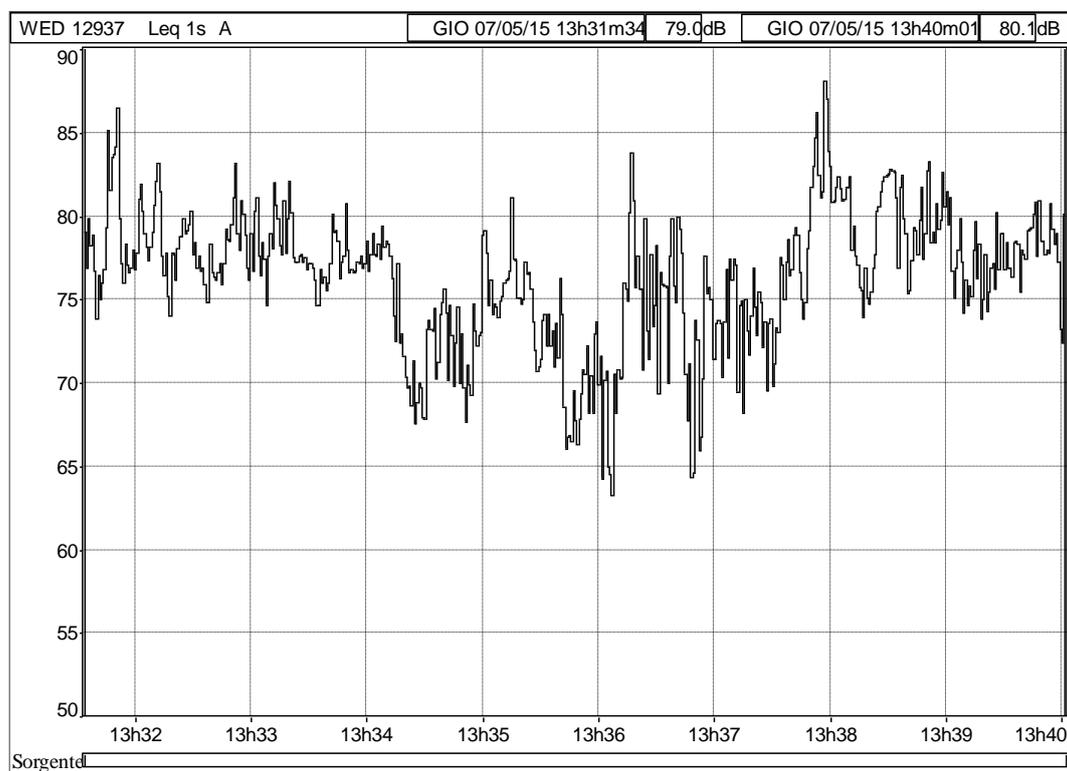


Figura 129: Andamento del rumore a bordo veicolo (DE M4c STADLER) durante il passaggio in gallerie

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

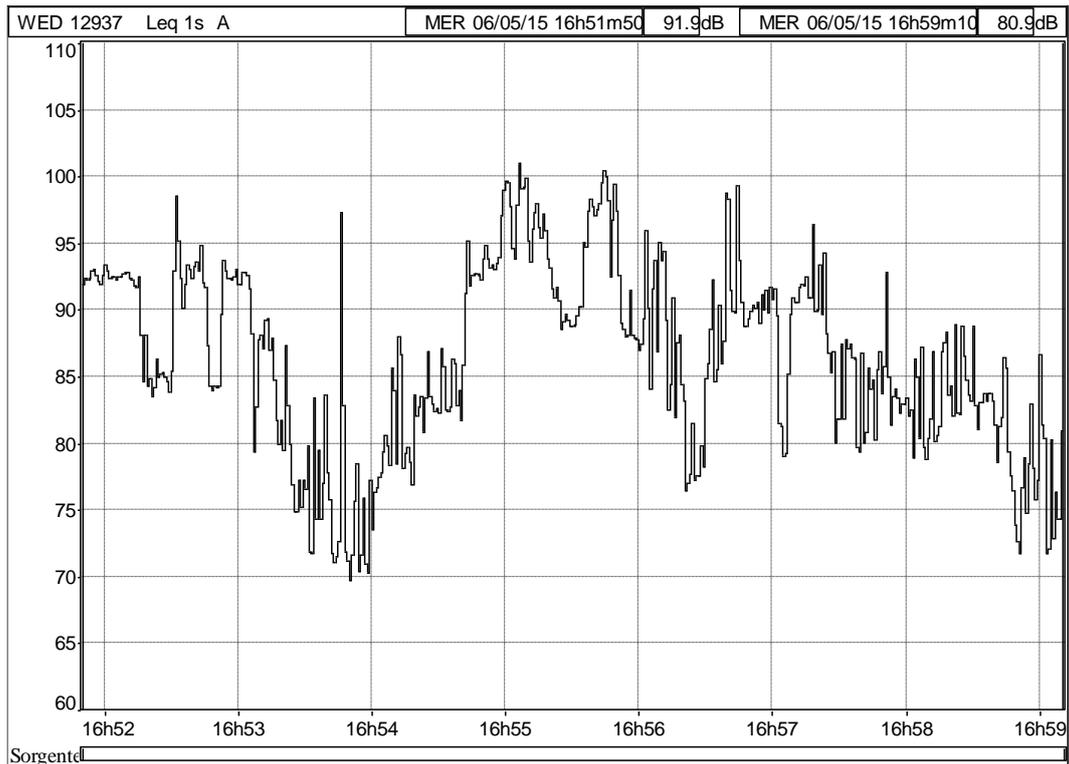


Figura 130: Andamento del rumore a bordo veicolo (FCL M2.200 BREDA) durante il passaggio in gallerie

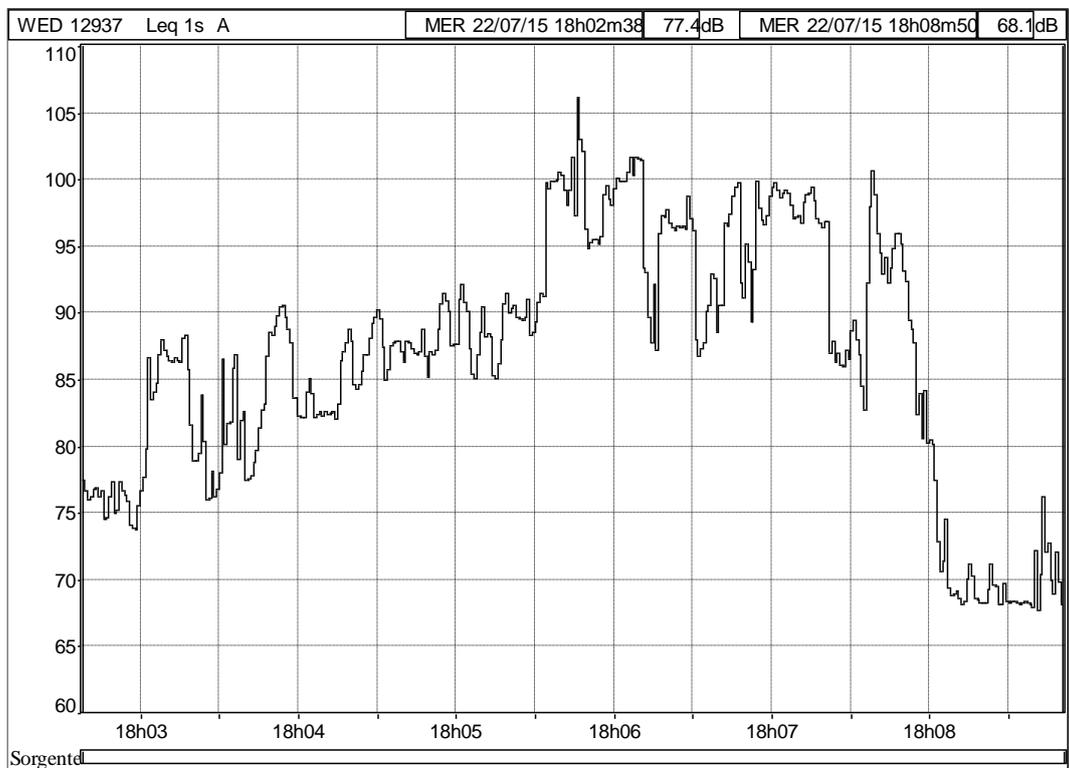


Figura 131: Andamento del rumore a bordo veicolo (FIAT M4.400) durante il passaggio in gallerie

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

Il riepilogo dei valori di pressione sonora medi rilevati durante l'intera campagna sperimentale sui treni vengono riportati nella Tabella 30 e Figura 132 (viaggio di andata Cosenza Vaglio Lise – Rogliano) e Tabella 31 e Figura 133 (viaggio di ritorno Rogliano – Cosenza Vaglio Lise).

Tabella 30: Livelli di pressione sonora medi rilevati lungo il test site durante le sperimentazioni nel viaggio di andata (Cosenza Vaglio Lise – Rogliano)

DE M4c STADLER		FCL M2.200 BREDA		FIAT M4.400	
N° rilievo	Leq (A) [dB]	N° rilievo	Leq (A) [dB]	N° rilievo	Leq (A) [dB]
1	75,7	1	86,8	1	88,4
2	77,5	2	86,3	2	88,6
3	79,2	3	85,9	3	87,8
4	77,2	4	86,4	4	86,6
5	76,8	5	81,9	5	87,2
6	75,9	6	83,4	6	89,7
7	78,8	7	84,5	7	89,2
8	78,3	8	85,8	8	89,6
9	79,5	9	85,4	9	88,5
10	79,1	10	82,6	10	90,1
11	78,1	11	83,2	11	89,8
12	78,2	12	84,1	12	89,3
13	77,9	13	86,1	13	90,2
14	77,6	14	85,2	14	88,8
15	78,6	15	84,7	15	89,9

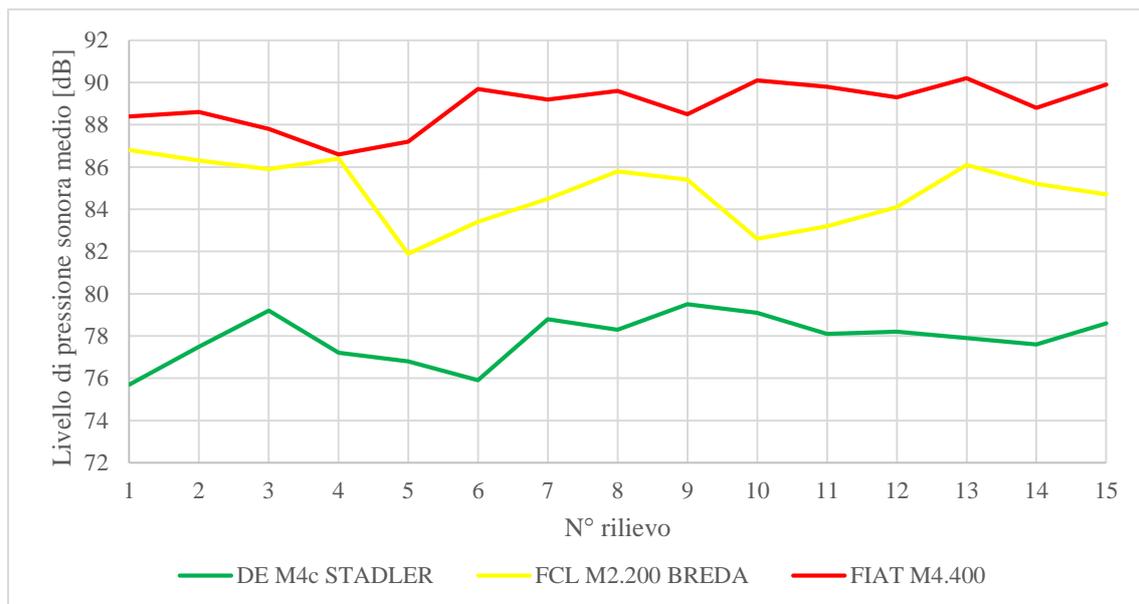


Figura 132: Livelli di pressione sonora medi rilevati lungo il test site durante le sperimentazioni lungo il test site nel viaggio di andata (Cosenza Vaglio Lise – Rogliano)

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

Tabella 31: Livelli di pressione sonora medi rilevati lungo il test site durante le sperimentazioni nel viaggio di ritorno (Rogliano - Cosenza Vaglio Lise)

DE M4c STADLER		FCL M2.200 BREDA		FIAT M4.400	
N° rilievo	Leq (A) [dB]	N° rilievo	Leq (A) [dB]	N° rilievo	Leq (A) [dB]
1	74,8	1	80,1	1	89,1
2	74,2	2	81,8	2	87,2
3	75,1	3	81,6	3	89,5
4	75,2	4	80,9	4	88,7
5	74,9	5	83,2	5	90,1
6	77,1	6	81,9	6	87,8
7	76,8	7	84,0	7	88,1
8	77,2	8	85,4	8	86,8
9	76,9	9	84,1	9	86,4
10	75,9	10	82,8	10	85,9
11	77,4	11	81,4	11	87,3
12	75,6	12	80,2	12	84,9
13	76,5	13	84,9	13	88,2
14	77,8	14	81,5	14	86,7
15	76,1	15	80,5	15	86,1

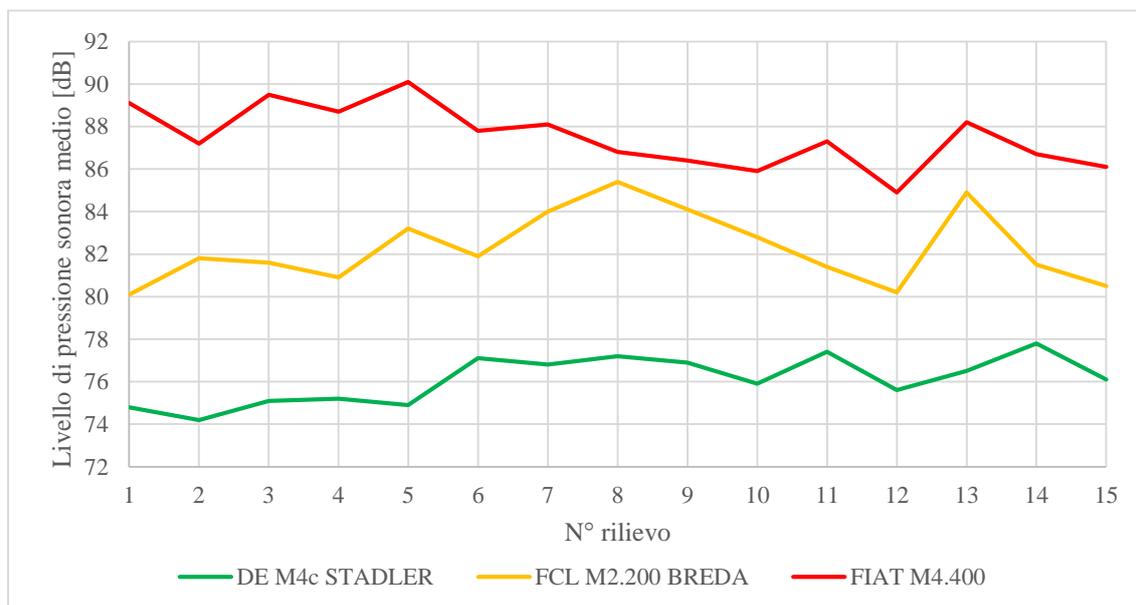


Figura 133: Livelli di pressione sonora medi rilevati lungo il test site durante nel viaggio di ritorno (Rogliano – Cosenza Vaglio Lise)

Per ciò che concerne le accelerazioni misurate nei treni oggetto di studio, non si rilevano particolari differenze tra i tre mezzi di trasporto. In linea generale, le accelerazioni misurate lungo i tre assi (x, y e z) risultano essere pressoché simili tra i tre sistemi di riferimento. Come mostrato dalle figure successive (Figure 134-142), l'accelerazione che maggiormente incide in termini di comfort a bordo è quella trasversale (ovvero lungo

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

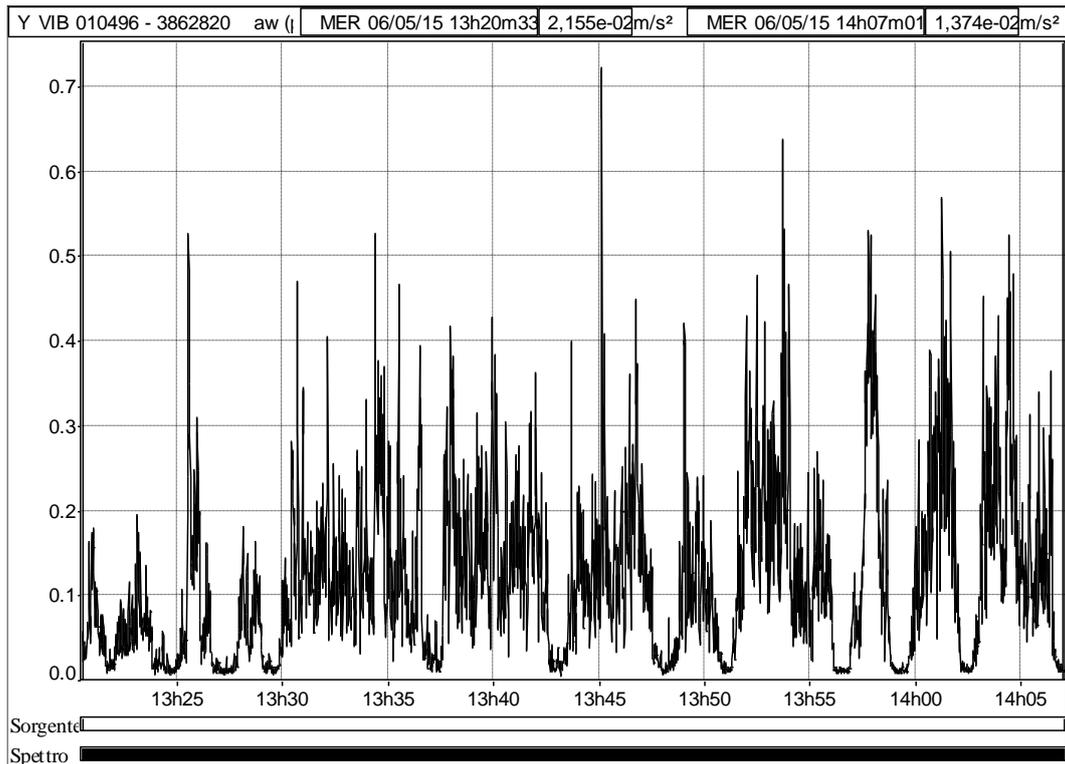


Figura 135: Andamento delle accelerazioni awy misurate a bordo veicolo (DE M4c STADLER) durante un viaggio lungo il test site

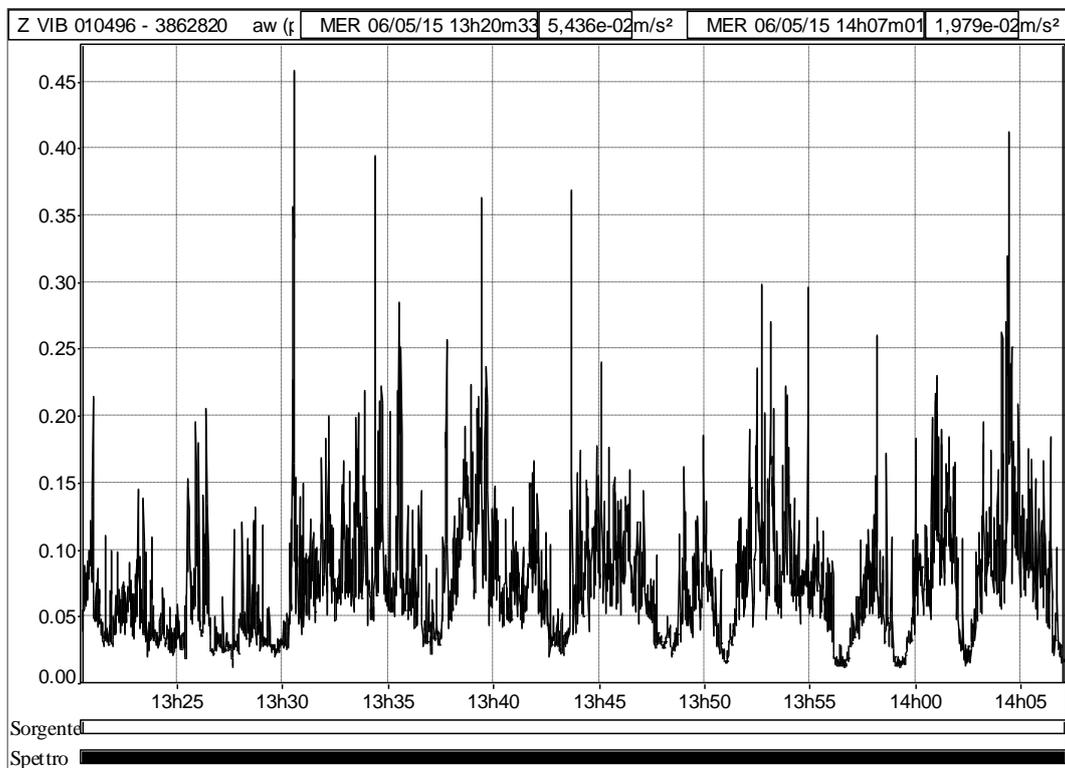


Figura 136: Andamento delle accelerazioni awz misurate a bordo veicolo (DE M4c STADLER) durante un viaggio lungo il test site

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

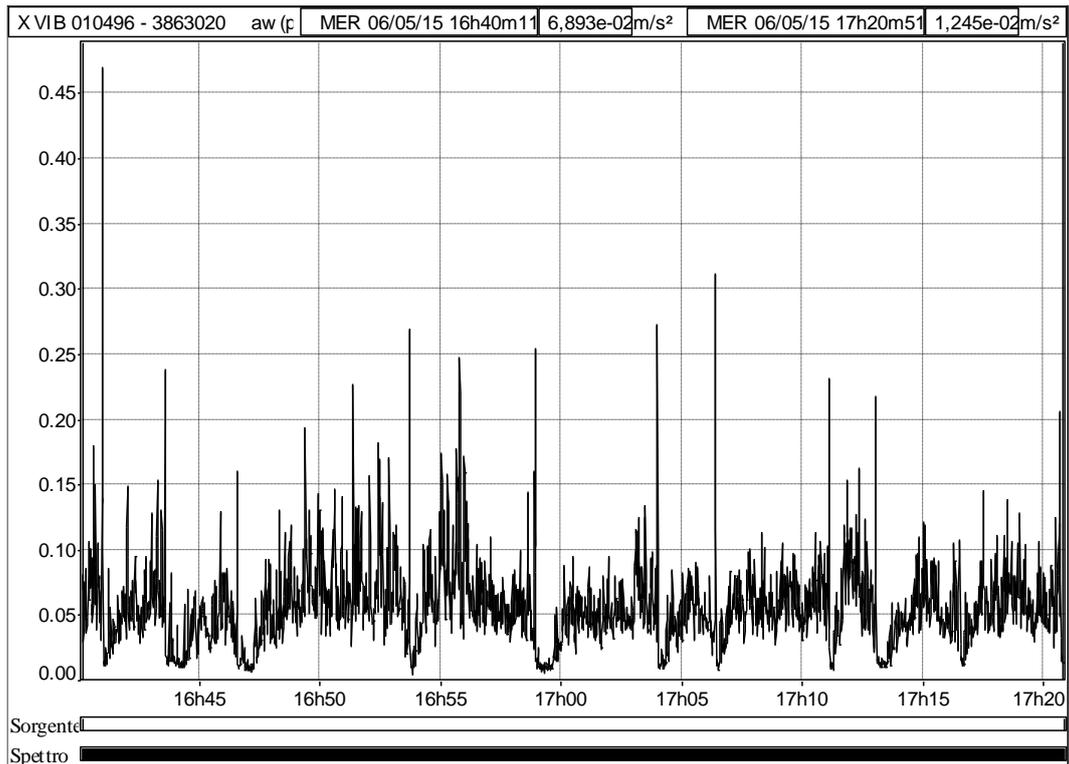


Figura 137: Andamento delle accelerazioni aw_x misurate a bordo veicolo (FCL M2.200 BREDA) durante un viaggio lungo il test site

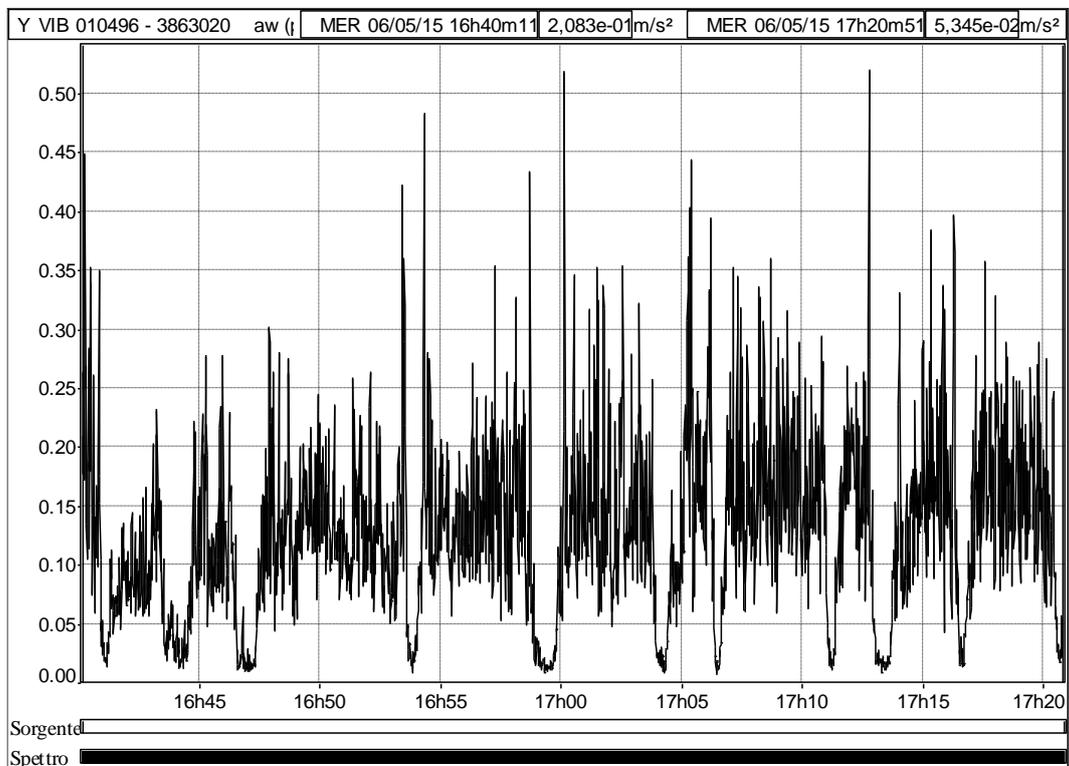


Figura 138: Andamento delle accelerazioni aw_y misurate a bordo veicolo (FCL M2.200 BREDA) durante un viaggio lungo il test site

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

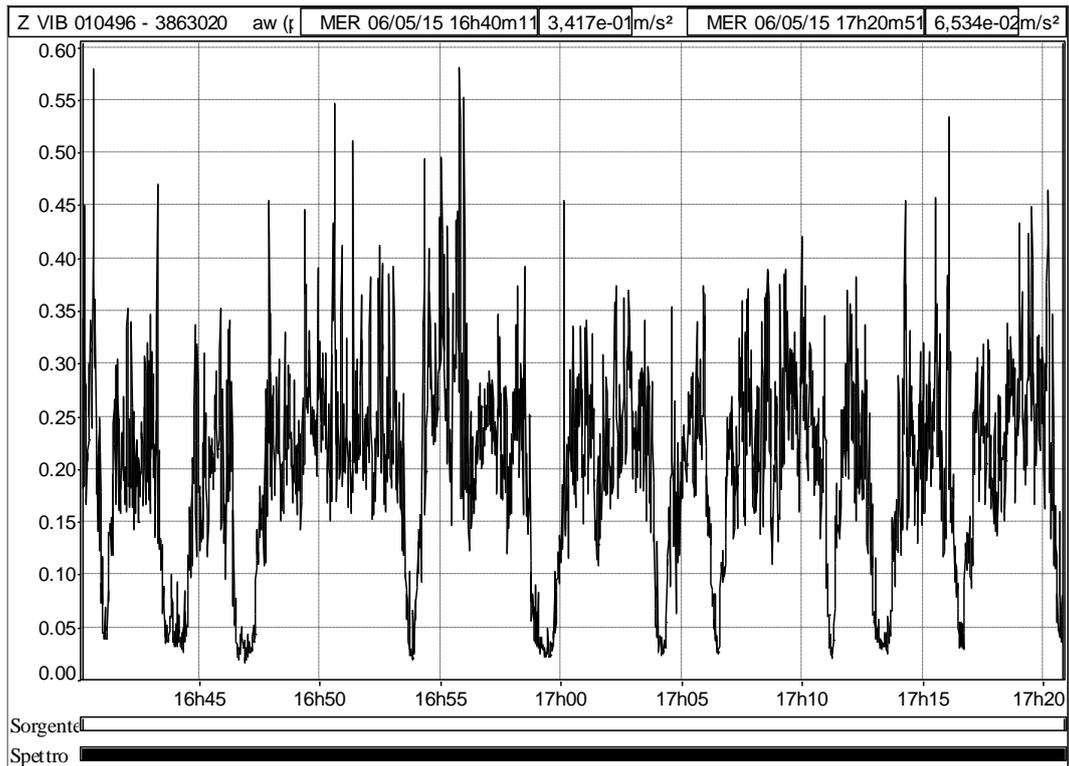


Figura 139: Andamento delle accelerazioni awz misurate a bordo veicolo (FCL M2.200 BREDA) durante un viaggio lungo il test site

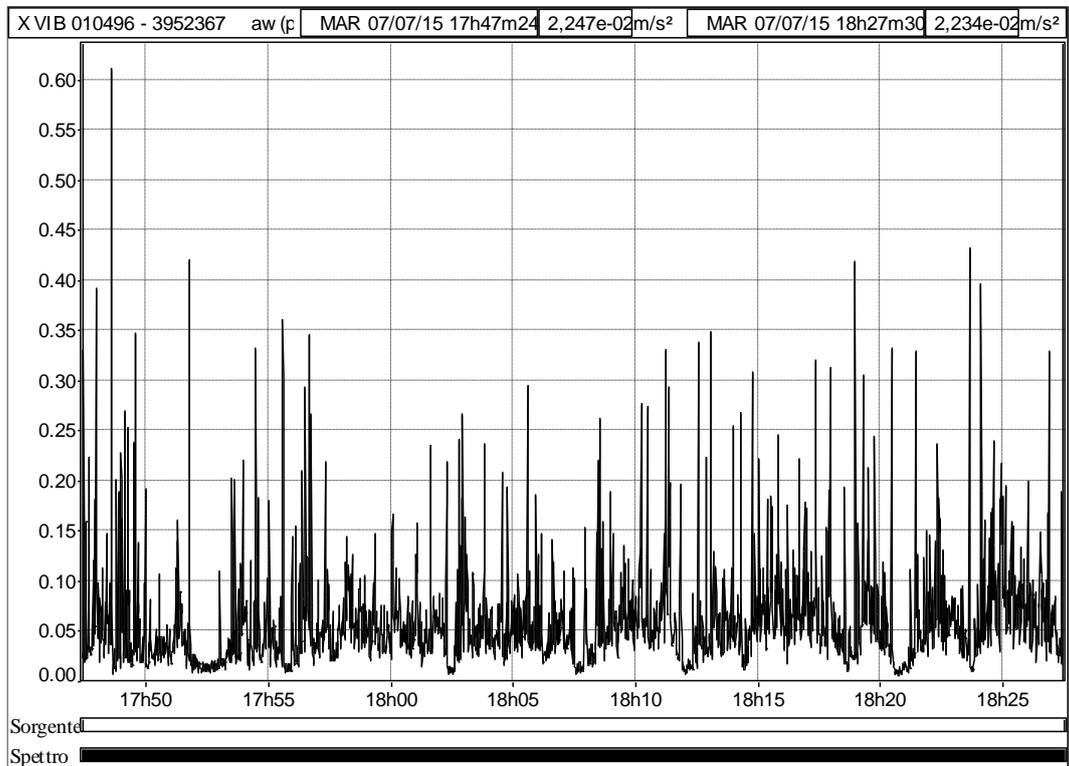


Figura 140: Andamento delle accelerazioni awx misurate a bordo veicolo (FIAT M4.400) durante un viaggio lungo il test site

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

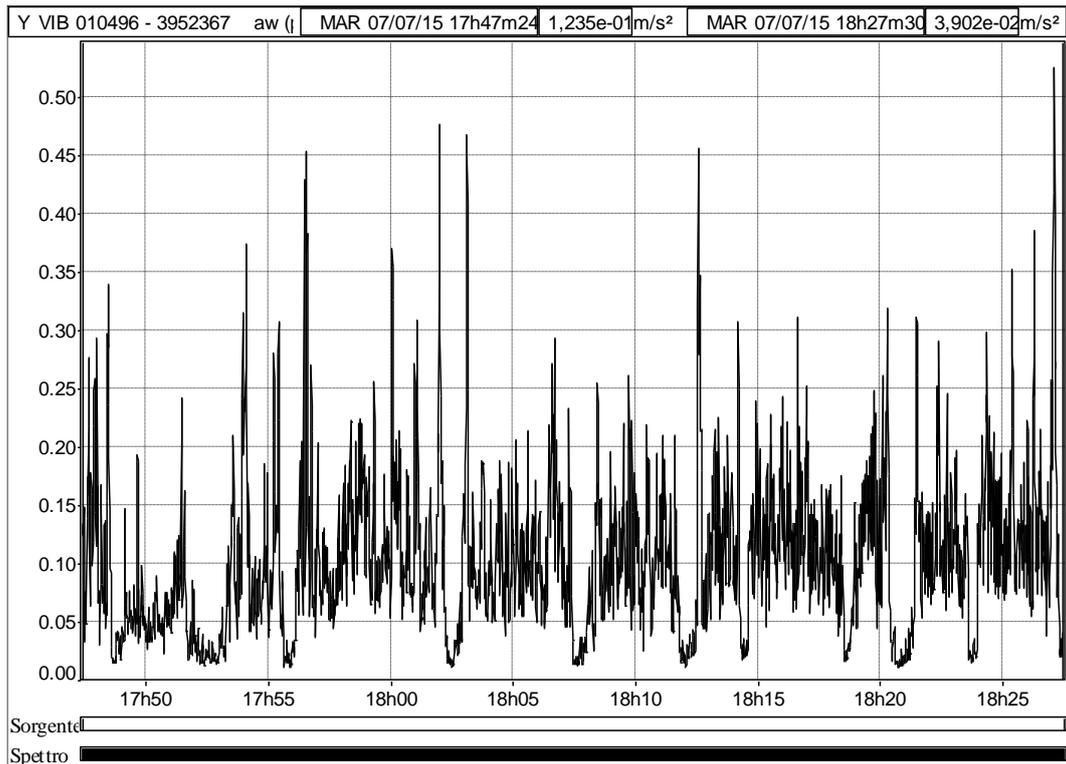


Figura 141: Andamento delle accelerazioni awy misurate a bordo veicolo (FIAT M4.400) durante un viaggio lungo il test site

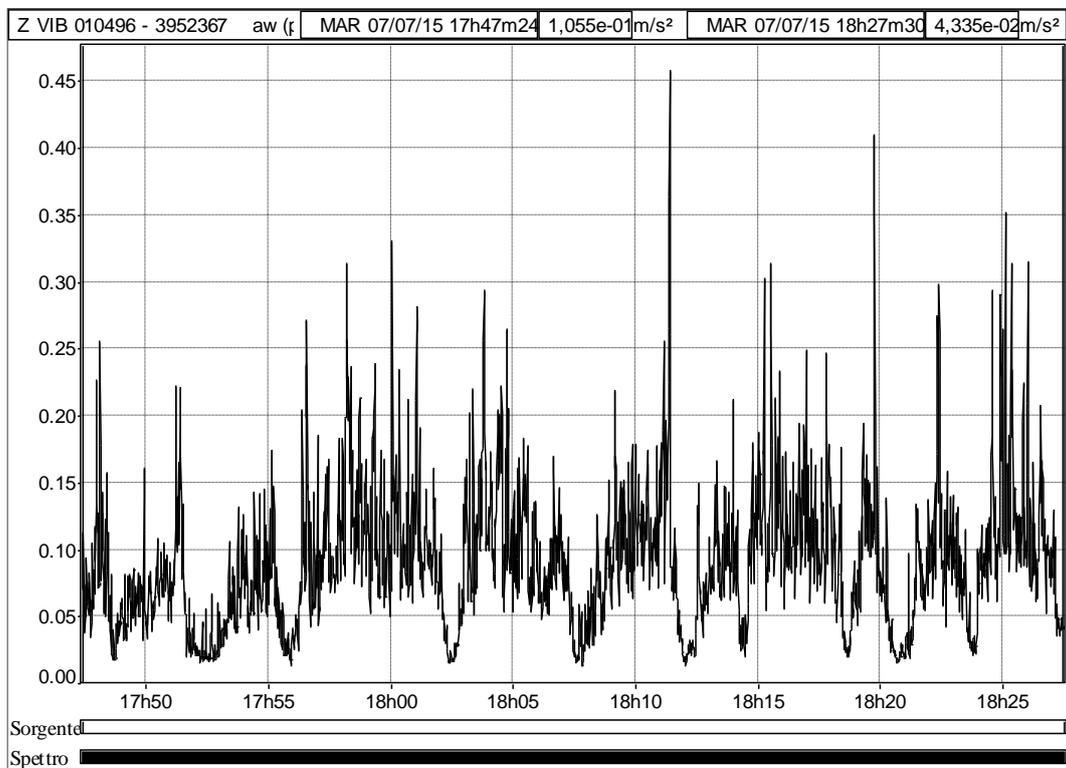


Figura 142: Andamento delle accelerazioni awz misurate a bordo veicolo (FIAT M4.400) durante un viaggio lungo il test site

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

Dalle accelerazioni a_{wx} , a_{wy} e a_{wz} , come descritto nel paragrafo 3.9., è stata determinata l'accelerazione totale a_v , utile alla determinazione del Comfort Index. Il riepilogo dei valori di a_v calcolati lungo il test site sono riportati in Tabella 32 e Figura 143 (viaggio di andata Cosenza Vaglio Lise – Rogliano) e in Tabella 33 e Figura 144 (viaggio di ritorno Rogliano – Cosenza Vaglio Lise).

Tabella 32: Valori di a_v calcolati lungo il test site durante la sperimentazione (viaggio di andata Cosenza Vaglio Lise – Rogliano)

DE M4c STADLER		FCL M2.200 BREDA		FIAT M4.400	
<i>N° rilievo</i>	<i>a_v (m/s²)</i>	<i>N° rilievo</i>	<i>a_v (m/s²)</i>	<i>N° rilievo</i>	<i>a_v (m/s²)</i>
1	0,23998	1	0,31756	1	0,23164
2	0,25626	2	0,29195	2	0,22457
3	0,24692	3	0,28891	3	0,21751
4	0,23872	4	0,30685	4	0,22675
5	0,22354	5	0,32012	5	0,23302
6	0,25123	6	0,31875	6	0,24546
7	0,22136	7	0,31245	7	0,24698
8	0,22387	8	0,31452	8	0,23987
9	0,23235	9	0,29874	9	0,24654
10	0,22987	10	0,28963	10	0,24113
11	0,22174	11	0,30113	11	0,25987
12	0,24685	12	0,31122	12	0,24896
13	0,23658	13	0,29664	13	0,25398
14	0,21985	14	0,30136	14	0,26997
15	0,22359	15	0,30398	15	0,24556

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

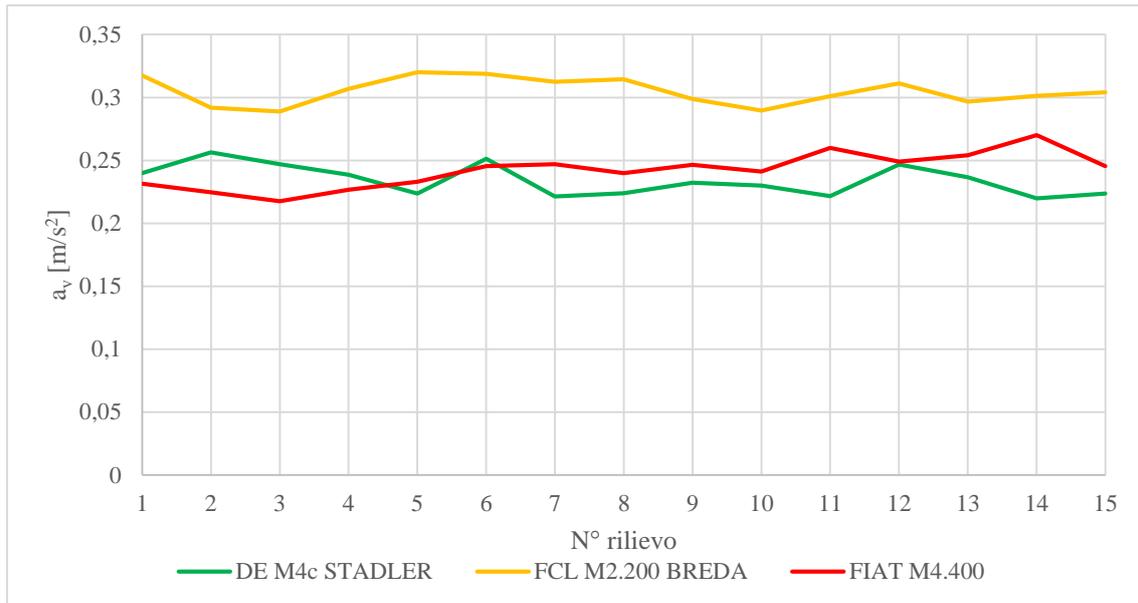


Figura 143: Valori di a_v calcolati lungo il test site durante la sperimentazione (viaggio di andata Cosenza Vaglio Lise – Rogliano)

Tabella 33: Valori di a_v calcolati lungo il test site durante la sperimentazione (viaggio di ritorno Rogliano – Cosenza Vaglio Lise)

DE M4c STADLER		FCL M2.200 BREDA		FIAT M4.400	
<i>N° rilievo</i>	a_v (m/s^2)	<i>N° rilievo</i>	a_v (m/s^2)	<i>N° rilievo</i>	a_v (m/s^2)
1	0,22657	1	0,31842	1	0,23386
2	0,22368	2	0,29692	2	0,20211
3	0,22986	3	0,30769	3	0,21912
4	0,22314	4	0,31254,	4	0,22452
5	0,22145	5	0,29874	5	0,25695
6	0,21013	6	0,30253	6	0,22359
7	0,22398	7	0,30967	7	0,23448
8	0,21986	8	0,29741	8	0,23684
9	0,23654	9	0,29854	9	0,22985
10	0,23998	10	0,28698	10	0,22114
11	0,22979	11	0,28642	11	0,23411
12	0,22311	12	0,29123	12	0,22986
13	0,21887	13	0,28975	13	0,22356
14	0,23659	14	0,29301	14	0,23654
15	0,24754	15	0,30121	15	0,23145

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

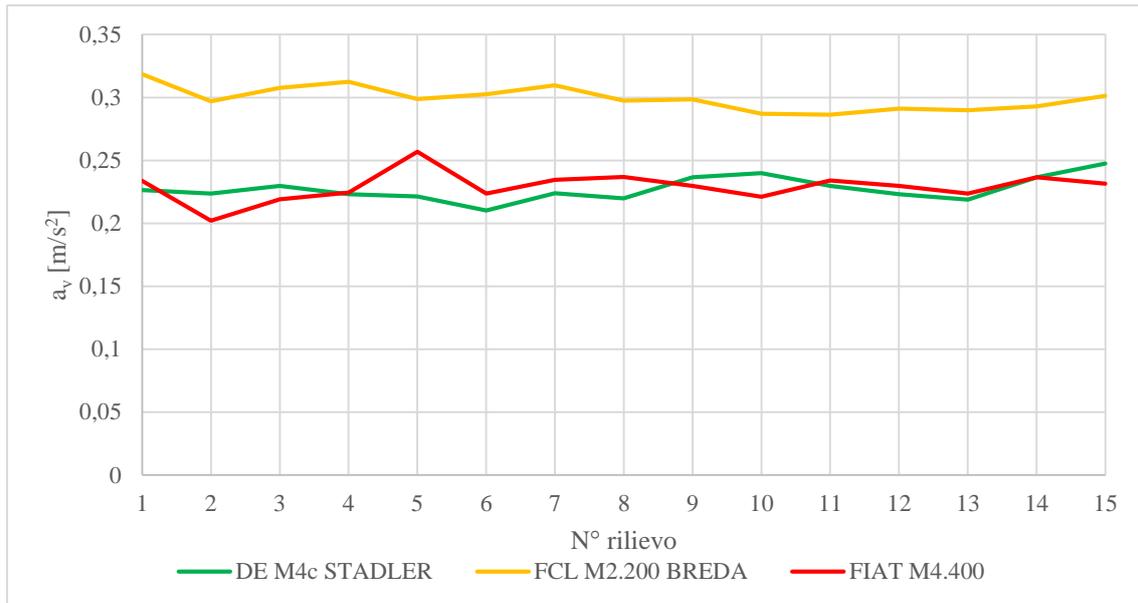


Figura 144: Valori di a_v calcolati lungo il test site durante la sperimentazione (viaggio di ritorno Rogliano – Cosenza Vaglio Lise)

Gli stessi grafici mostrano come esiste una piccola differenza in termini di accelerazioni totale tra il viaggio di andata e di ritorno, questo è dovuto soprattutto all'altimetria del tracciato ferroviario che implica un maggior sforzo del motore lungo il viaggio di andata.

7.2.2. Analisi dei dati sperimentali sugli autobus

L'analisi dei dati misurati durante l'indagine a bordo veicolo mostra come il rumore mediamente a bordo veicolo risulti essere maggiore nel tratto extra-urbano ed autostradale, ciò è dovuto principalmente alla maggiore velocità che il mezzo raggiunge lungo i suddetti test site, aumentando, di fatto, il rumore prodotto dal rotolamento dello pneumatico sul manto stradale. Inoltre, lungo i due tratti considerati, la presenza dei giunti di dilatazione per i ponti e/o viadotti crea una discontinuità sul manto stradale che al passaggio dell'autobus si tramuta in un incremento istantaneo del livello di pressione sonora misurato all'interno del veicolo stesso. Nelle Figure 145, 146 e 147 si mostra l'andamento del $Leq(A)$, lungo i vari test sites, misurato durante un viaggio a bordo veicolo sul Setra S 415 HDH, invece, le Figure 148, 149 e 150 mostrano l'andamento del $Leq(A)$, lungo i vari test sites, misurato durante un viaggio a bordo veicolo sul Iveco France SFR 160.

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

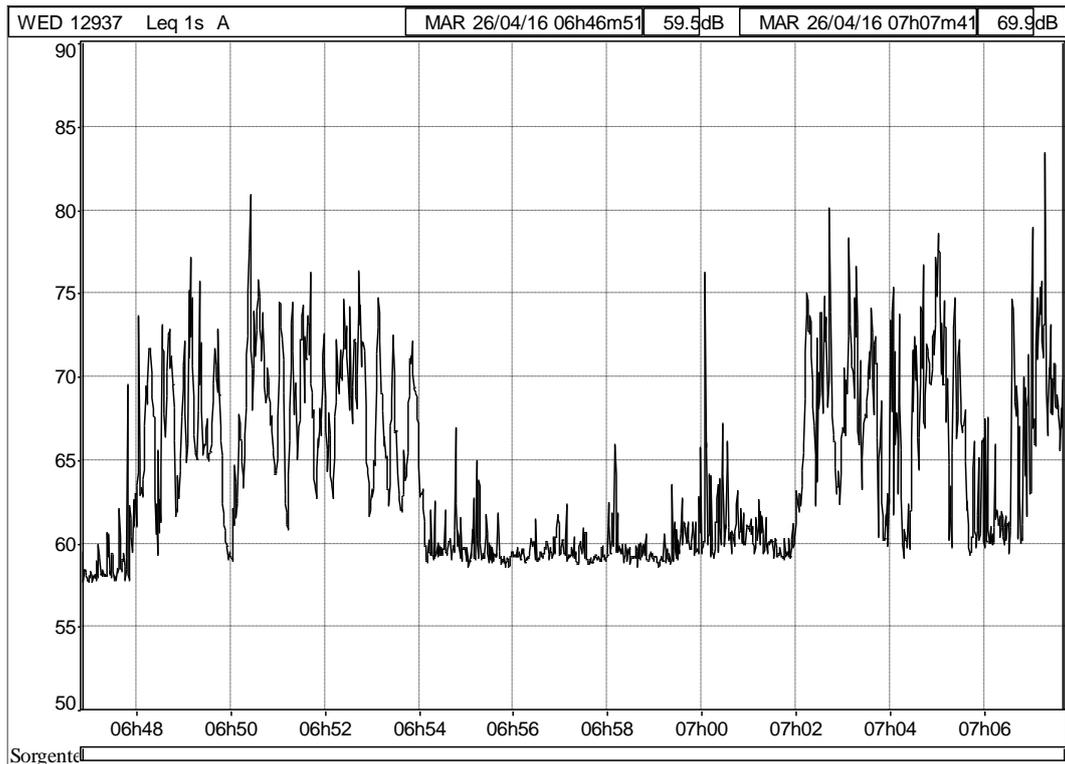


Figura 145: Andamento del rumore a bordo veicolo (Setra S 415 HDH) lungo il test site urbano

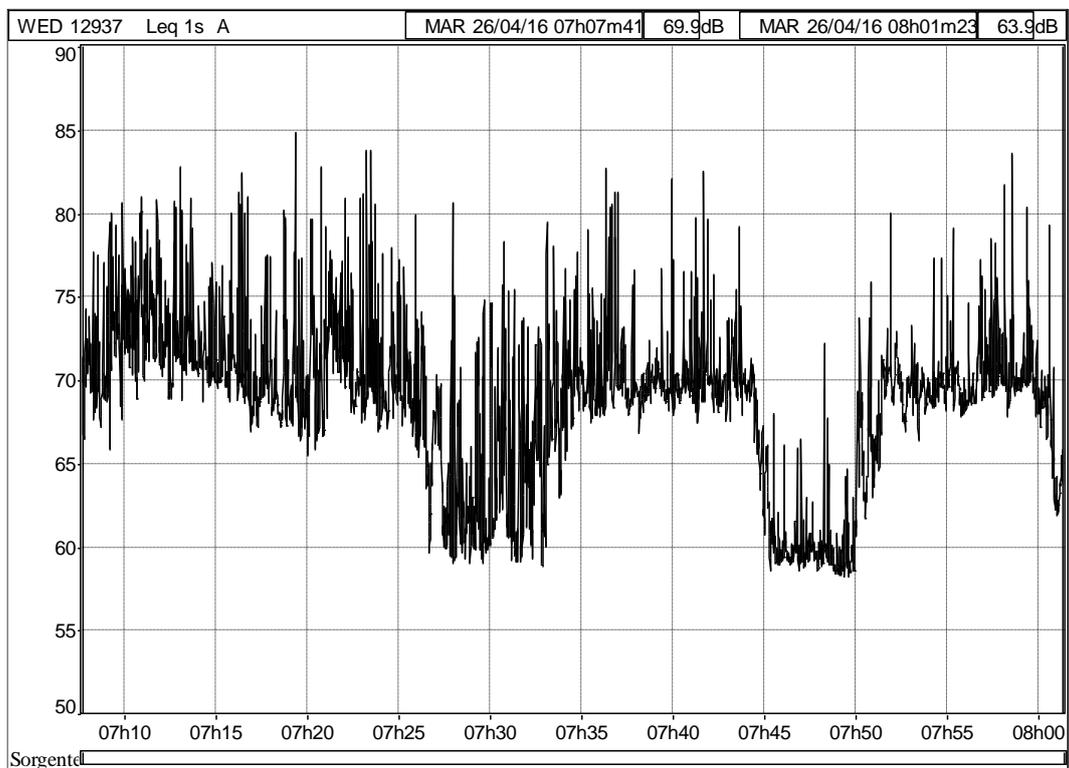


Figura 146: Andamento del rumore a bordo veicolo (Setra S 415 HDH) lungo il test site autostradale

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

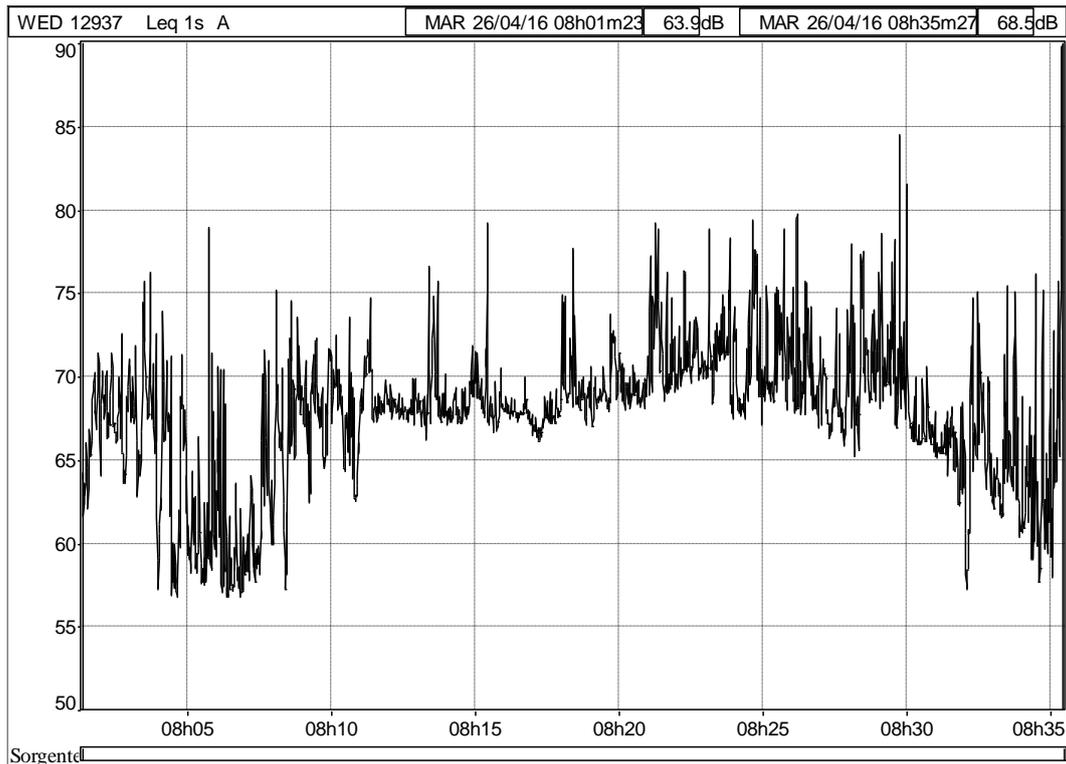


Figura 147: Andamento del rumore a bordo veicolo (Setra S 415 HDH) lungo il test site extra-urbano

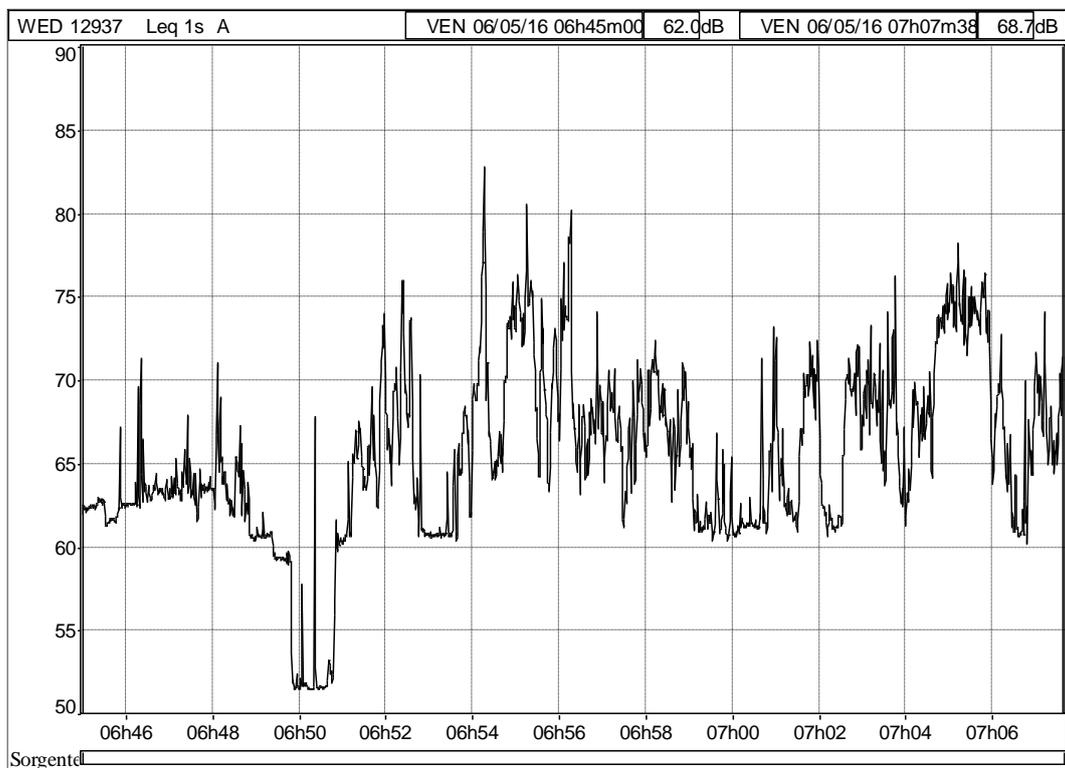


Figura 148: Andamento del rumore a bordo veicolo (Iveco France SFR 160) lungo il test site urbano

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

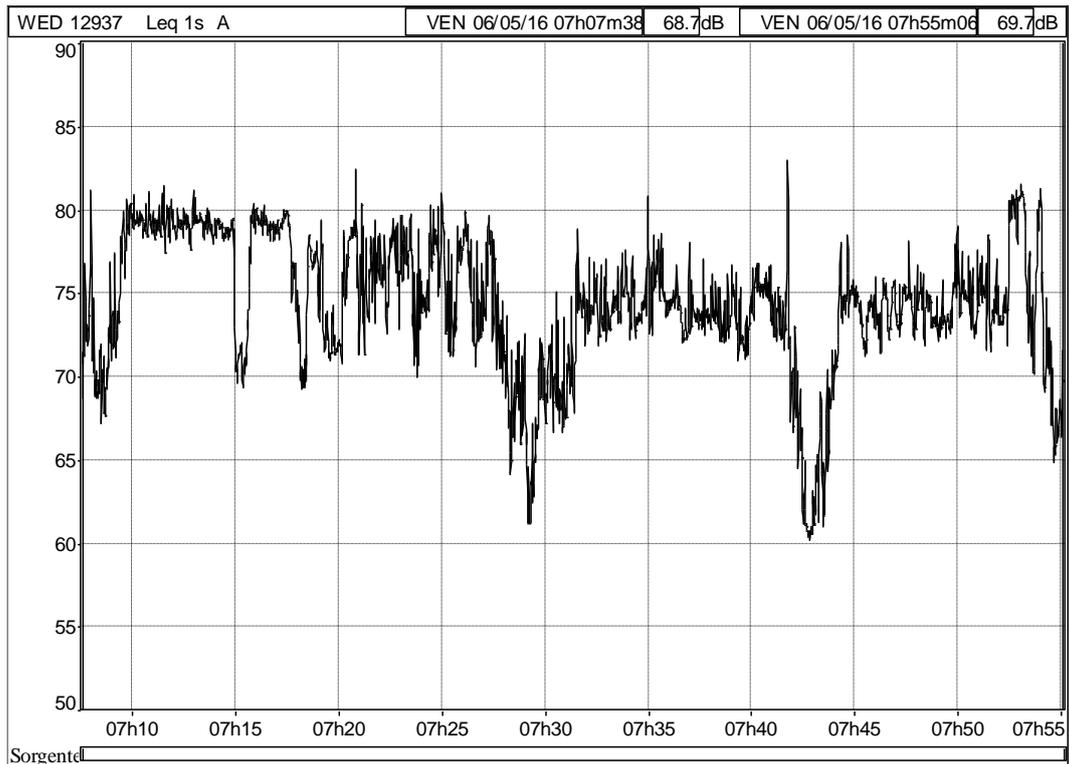


Figura 149: Andamento del rumore a bordo veicolo (Iveco France SFR 160) lungo il test site autostradale

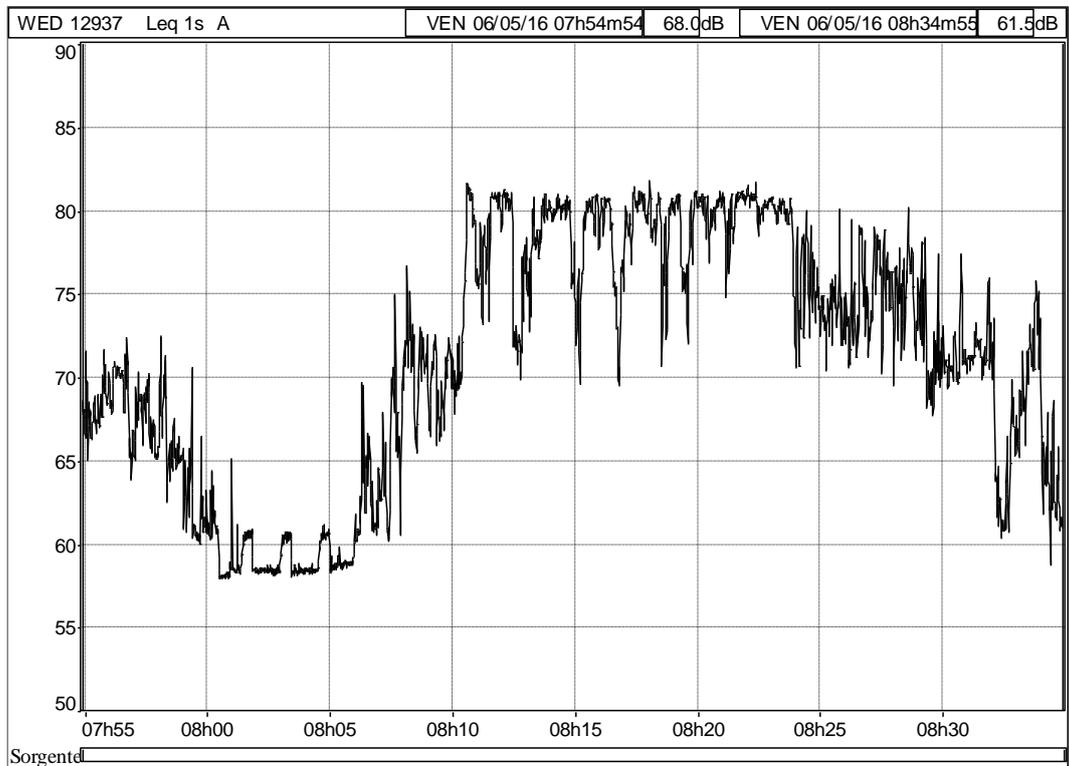


Figura 150: Andamento del rumore a bordo veicolo (Iveco France SFR 160) lungo il test site extra-urbano

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

Il riepilogo dei valori di pressione sonora medi rilevati durante l'intera campagna sperimentale sugli autobus vengono riportati nelle:

- Tabella 34 e Figura 151 (viaggio di andata test site urbano);
- Tabella 35 e Figura 152 (viaggio di andata test site autostradale);
- Tabella 36 e Figura 153 (viaggio di andata test site extra-urbano);
- Tabella 36 e Figura 154 (viaggio di ritorno test site urbano);
- Tabella 37 e Figura 155 (viaggio di ritorno test site autostradale);
- Tabella 38 e Figura 156 (viaggio di ritorno test site extra-urbano).

Tabella 34: Livelli di pressione sonora medi rilevati lungo il test site urbano durante le sperimentazioni nel viaggio di andata

Setra S 415 HDH		Iveco France SFR 160	
<i>N° rilievo</i>	<i>Leq (A) [dB]</i>	<i>N° rilievo</i>	<i>Leq (A) [dB]</i>
1	68,5	1	68,9
2	67,1	2	69,1
3	68,1	3	70,1
4	67,4	4	69,1
5	67,5	5	69,1
6	68,2	6	68,7
7	67,7	7	68,2
8	68,3	8	68,9
9	67,6	9	70,2
10	68,8	10	69,1
11	68,2	11	69,5
12	67,9	12	69,6
13	67,5	13	70,3
14	67,8	14	68,9
15	68,8	15	69,3

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

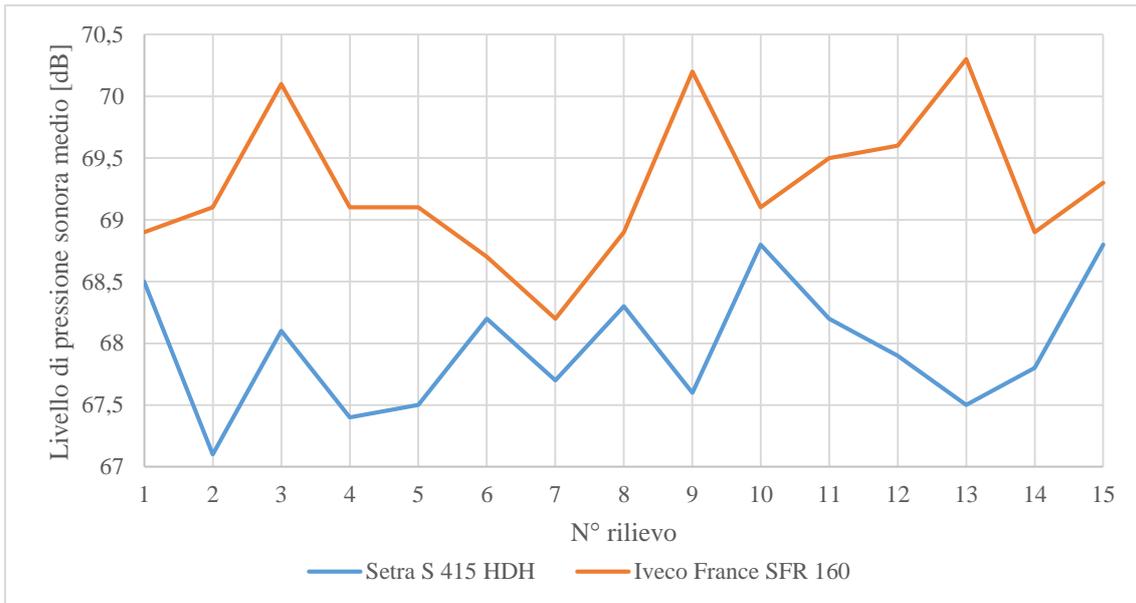


Figura 151: Livelli di pressione sonora medi rilevati lungo il test site urbano durante le sperimentazioni nel viaggio di andata

Tabella 35: Livelli di pressione sonora medi rilevati lungo il test site autostradale durante le sperimentazioni nel viaggio di andata

Setra S 415 HDH		Iveco France SFR 160	
N° rilievo	Leq (A) [dB]	N° rilievo	Leq (A) [dB]
1	72,2	1	75,5
2	71,2	2	72,5
3	71,8	3	74,6
4	71,3	4	76,1
5	71,6	5	73,4
6	71,9	6	73,5
7	71,4	7	73,9
8	71,6	8	74,1
9	70,8	9	73,8
10	72,6	10	75,3
11	71,6	11	74,9
12	70,2	12	75,4
13	70,1	13	74,7
14	71,1	14	72,9
15	71,9	15	73,4

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

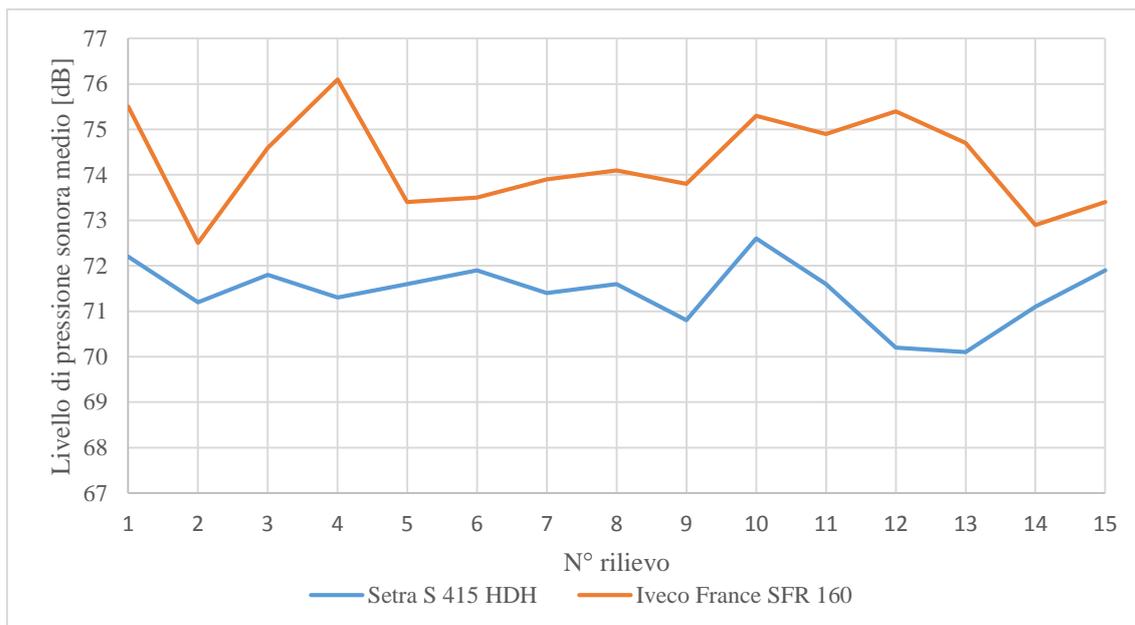


Figura 152: Livelli di pressione sonora medi rilevati lungo il test site autostradale durante le sperimentazioni nel viaggio di andata

Tabella 36: Livelli di pressione sonora medi rilevati lungo il test site extra-urbano durante le sperimentazioni nel viaggio di andata

Setra S 415 HDH		Iveco France SFR 160	
N° rilievo	Leq (A) [dB]	N° rilievo	Leq (A) [dB]
1	71,8	1	75,1
2	70,1	2	71,8
3	70,6	3	72,9
4	70,2	4	73,5
5	69,9	5	71,5
6	70,5	6	71,6
7	70,3	7	71,7
8	70,0	8	70,7
9	70,1	9	70,9
10	71,9	10	73,2
11	71,5	11	72,1
12	69,8	12	73,1
13	70,1	13	70,9
14	69,9	14	71,2
15	70,4	15	71,8

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

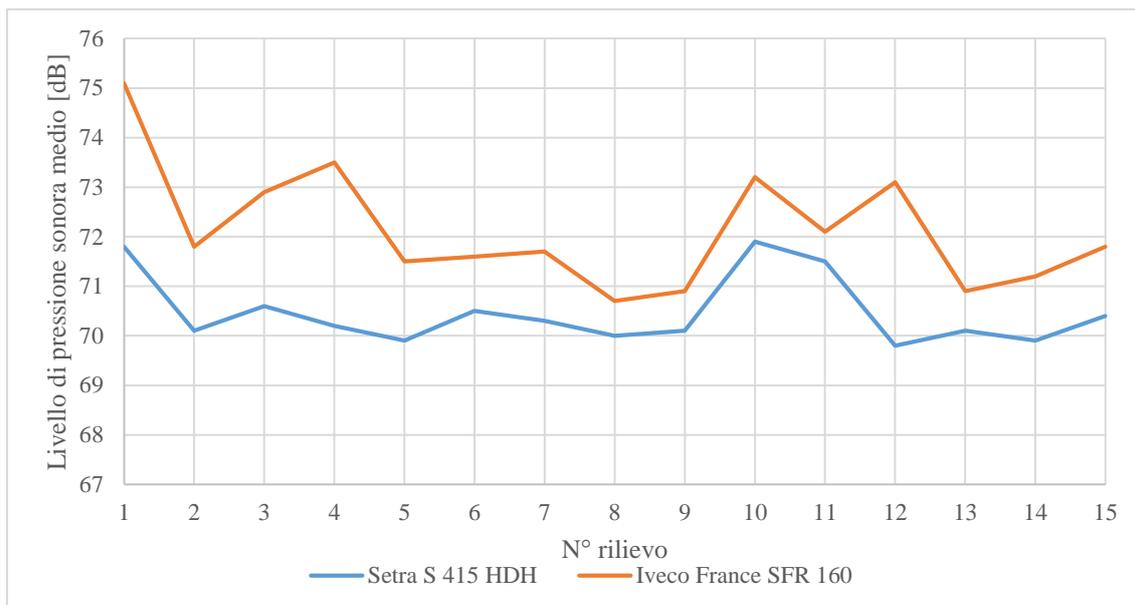


Figura 153: Livelli di pressione sonora medi rilevati lungo il test site extra-urbano durante le sperimentazioni nel viaggio di andata

Tabella 37: Livelli di pressione sonora medi rilevati lungo il test site urbano durante le sperimentazioni nel viaggio di ritorno

Setra S 415 HDH		Iveco France SFR 160	
<i>N° rilievo</i>	<i>Leq (A) [dB]</i>	<i>N° rilievo</i>	<i>Leq (A) [dB]</i>
1	69,1	1	70,6
2	68,9	2	70,2
3	68,5	3	70,1
4	68,4	4	69,7
5	67,9	5	69,8
6	67,5	6	68,5
7	67,8	7	69,1
8	69,1	8	70,1
9	69,2	9	69,4
10	68,7	10	69,7
11	67,8	11	68,9
12	67,6	12	68,3
13	67,3	13	70,3
14	68,7	14	69,2
15	67,2	15	68,8

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

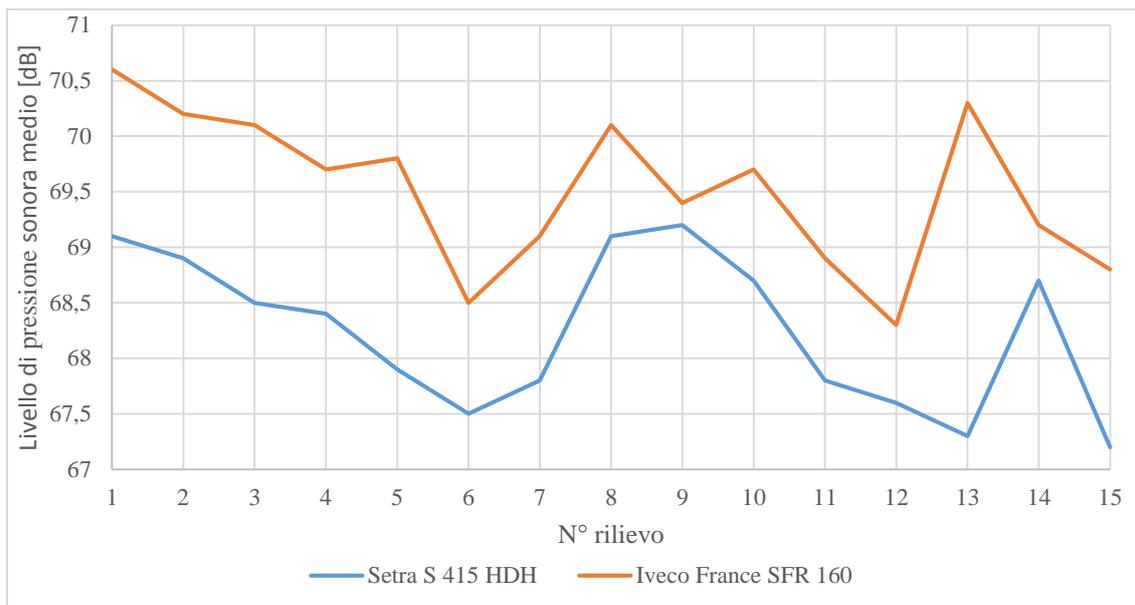


Figura 154: Livelli di pressione sonora medi rilevati lungo il test site urbano durante le sperimentazioni nel viaggio di ritorno

Tabella 38: Livelli di pressione sonora medi rilevati lungo il test site autostradale durante le sperimentazioni nel viaggio di ritorno

Setra S 415 HDH		Iveco France SFR 160	
N° rilievo	Leq (A) [dB]	N° rilievo	Leq (A) [dB]
1	73,1	1	73,3
2	71,2	2	74,1
3	72,1	3	74,5
4	72,4	4	74,6
5	72,6	5	75,1
6	71,9	6	73,9
7	73,6	7	73,8
8	73,2	8	73,4
9	72,5	9	74,1
10	71,8	10	75,7
11	71,5	11	74,9
12	72,2	12	74,2
13	71,6	13	74,8
14	73,8	14	73,9
15	73,3	15	74,1

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

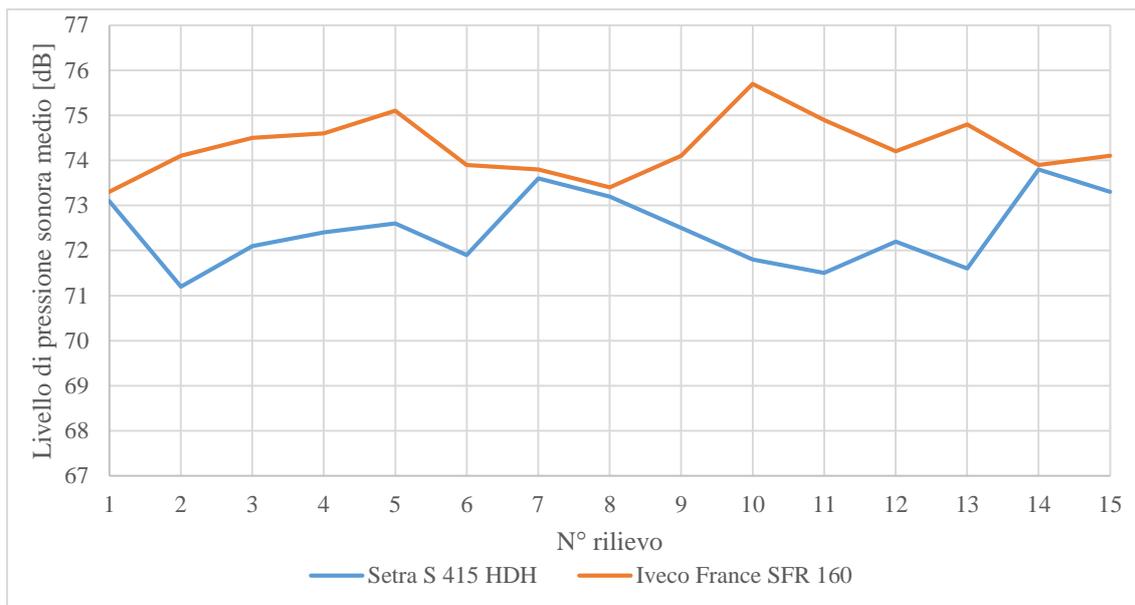


Figura 155: Livelli di pressione sonora medi rilevati lungo il test site autostradale durante le sperimentazioni nel viaggio di ritorno

Tabella 39: Livelli di pressione sonora medi rilevati lungo il test site extra-urbano durante le sperimentazioni nel viaggio di ritorno

Setra S 415 HDH		Iveco France SFR 160	
N° rilievo	Leq (A) [dB]	N° rilievo	Leq (A) [dB]
1	69,8	1	70,2
2	70,1	2	72,1
3	70,2	3	73,1
4	70,6	4	71,9
5	69,1	5	72,3
6	69,5	6	72,4
7	70,2	7	73,2
8	69,8	8	71,8
9	70,5	9	70,9
10	70,4	10	70,7
11	71,1	11	71,2
12	71,5	12	71,9
13	69,9	13	72,9
14	71,8	14	73,5
15	70,9	15	73,1

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

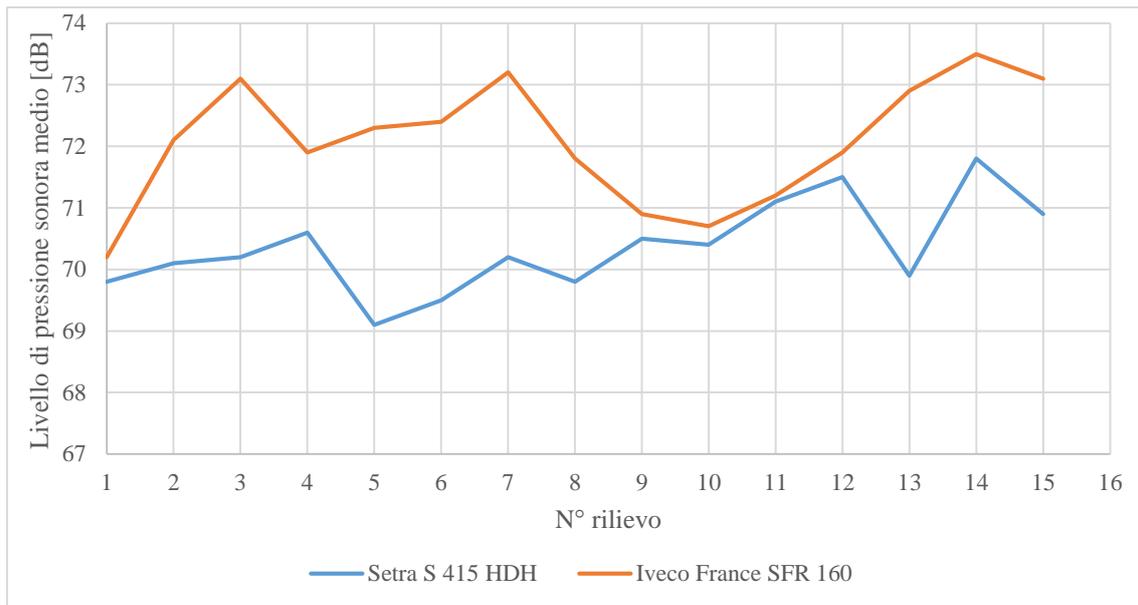


Figura 156: Livelli di pressione sonora medi rilevati lungo il test site extra-urbano durante le sperimentazioni nel viaggio di ritorno

Come si evince dai grafici precedenti, l'andamento del rumore è pressoché simile tra il viaggio di andata e di ritorno sugli autobus, anche se sul tratto autostradale ed extra-urbano si utilizzano carreggiate separate tra andata e ritorno. Si può notare, invece, una differenza tra i due mezzi presi in considerazione su ogni test site considerato, in particolare, il bus *Iveco France SFR 160* risulta essere sempre più rumoroso del *Setra S415 HDH*. Il maggior livello di pressione sonora misurato a bordo veicolo sull'autobus *Iveco* a dispetto del *Setra*, è dovuto principalmente alla migliore insonorizzazione del *Setra* e ad un migliore sistema di sospensioni che consente una diminuzione del rumore prodotto dal contatto pneumatico – manto stradale.

Per ciò che concerne le accelerazioni misurate a bordo veicolo sugli autobus, come si evince dai grafici mostrati in Figura 157, 158, 159, 160, 161 e 162 non ci sono particolari differenze in termini di accelerazioni lungo l'asse longitudinale (asse x) e trasversale (asse y) tra i due mezzi di trasporto considerato, invece, si nota una sostanziale differenza nel modo in cui gli utenti percepiscono le accelerazioni verticali a bordo dei due mezzi. Infatti, il *Setra*, rispetto all'autobus *Iveco*, riesce ad assorbire meglio le accelerazioni verticali causate dalle discontinuità del manto stradale, quali buche, ormaie, fessurazioni, giunti di dilatazione e/o dossi stradali. L'autobus, così come detto per il rumore, ha un migliore sistema di sospensioni che oltre a ridurre il rumore percepito a bordo veicolo, va a ridurre anche le vibrazioni percepite e misurate all'interno del mezzo.

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

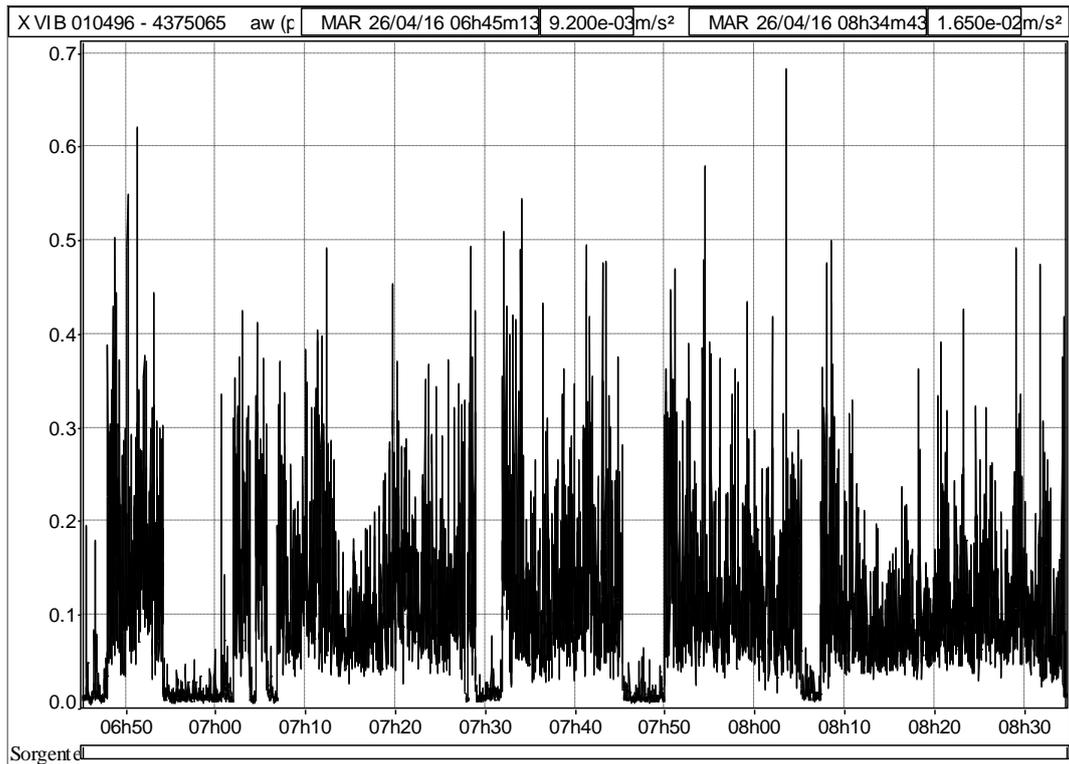


Figura 157: Andamento delle accelerazioni aw_x misurate a bordo veicolo (Setra S 415 HDH)

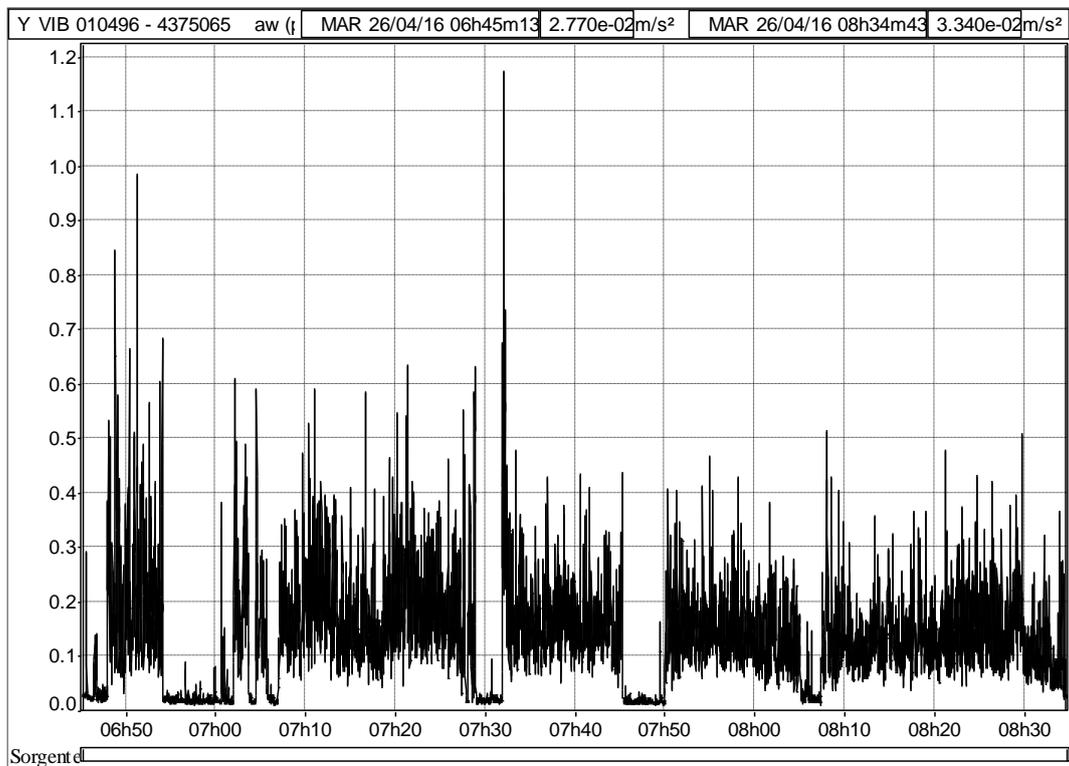


Figura 158: Andamento delle accelerazioni aw_y misurate a bordo veicolo (Setra S 415 HDH)

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

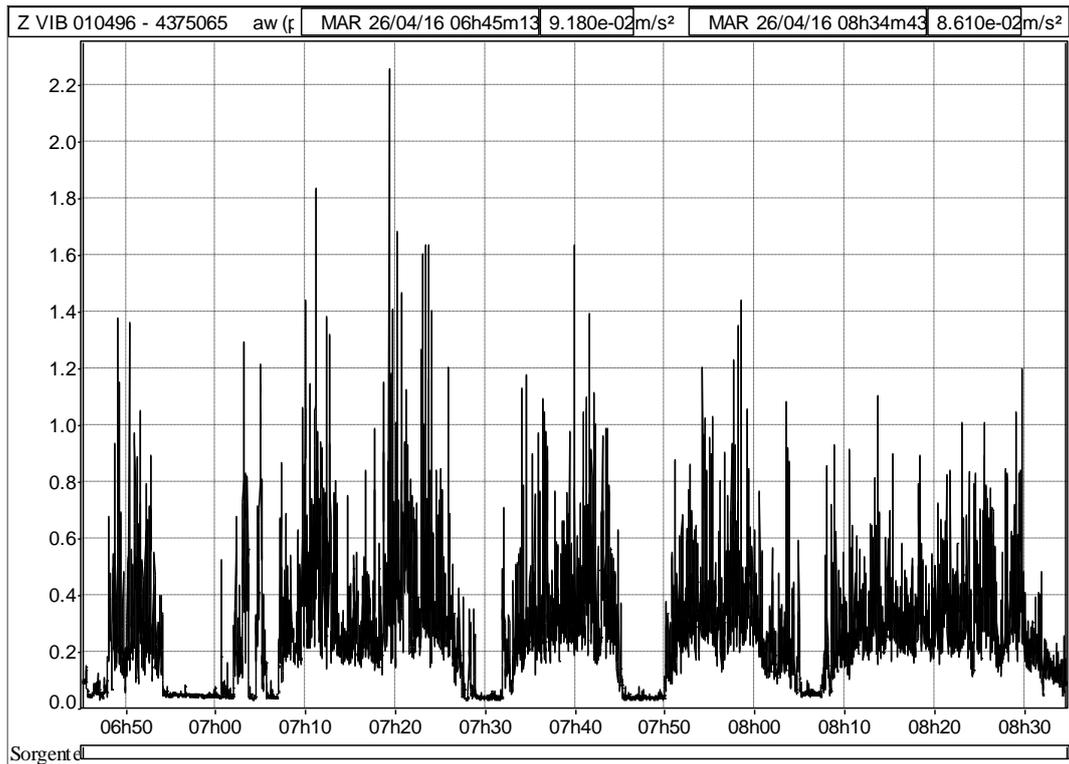


Figura 159: Andamento delle accelerazioni aw_z misurate a bordo veicolo (Setra S 415 HDH)

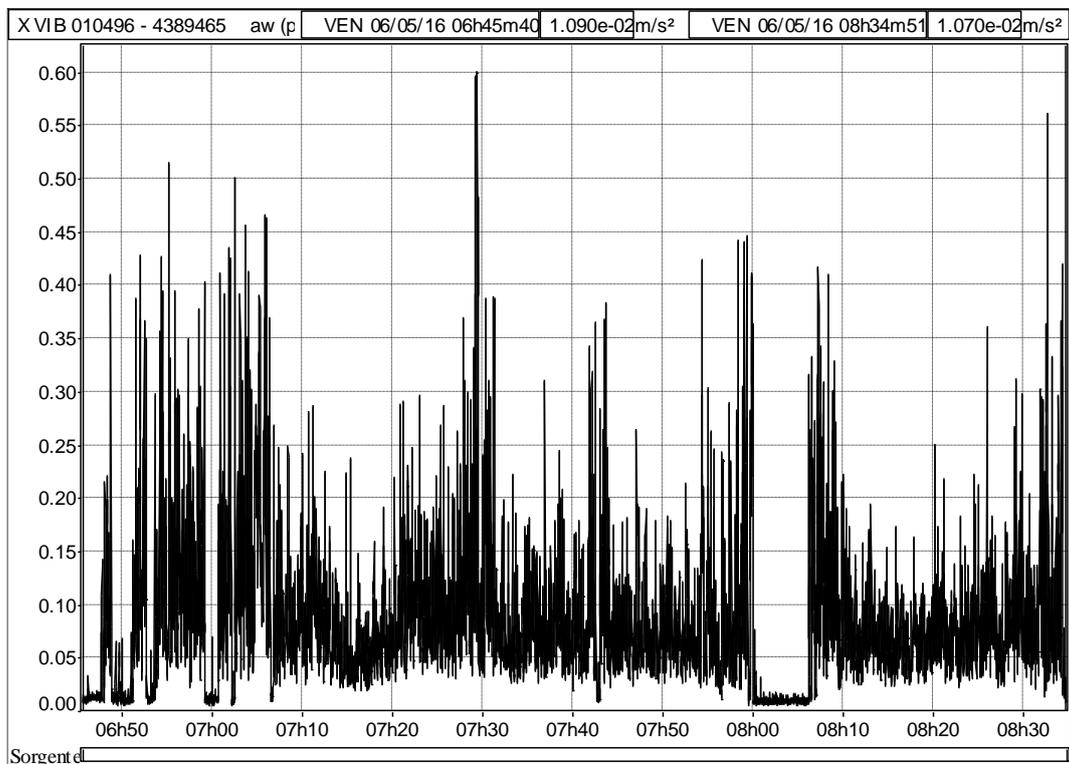


Figura 160: Andamento delle accelerazioni aw_x misurate a bordo veicolo (Iveco France SFR 160)

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

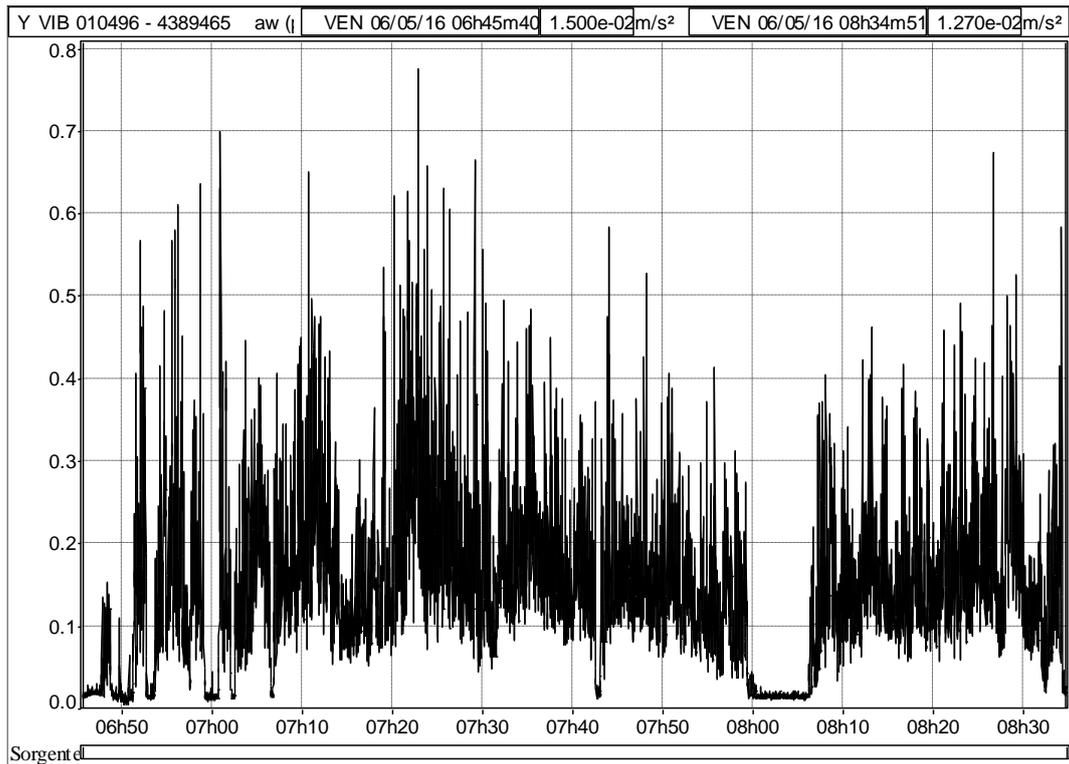


Figura 161: Andamento delle accelerazioni aw_y misurate a bordo veicolo (Iveco France SFR 160)

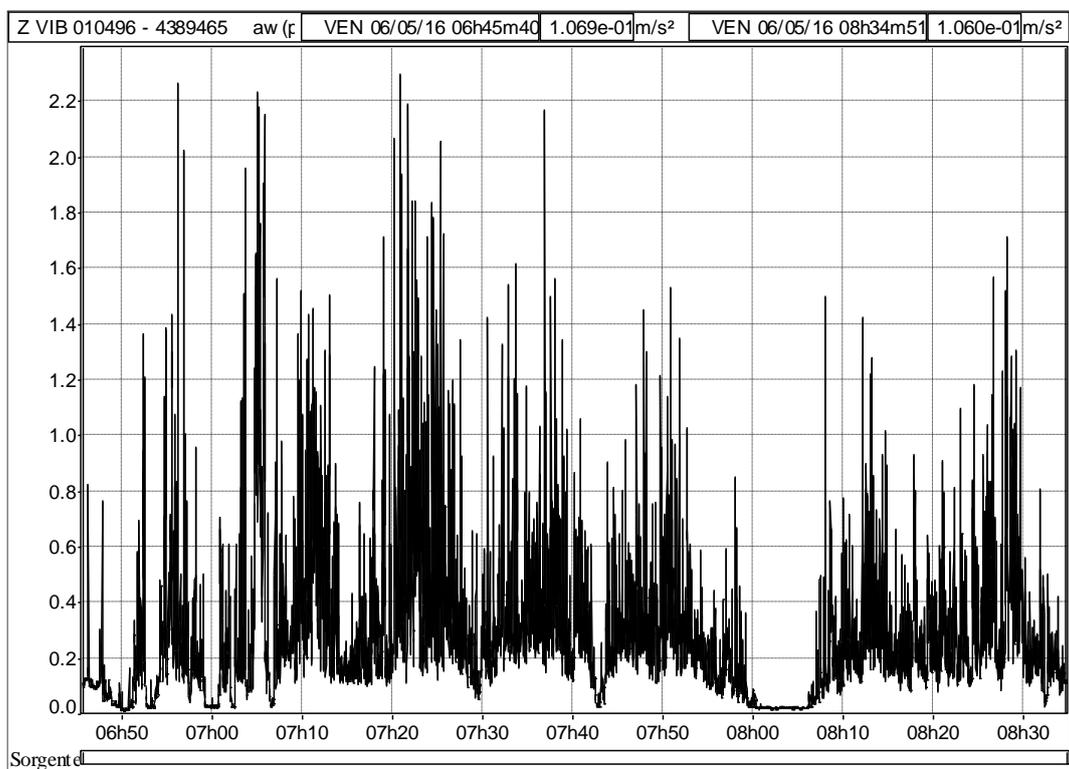


Figura 162: Andamento delle accelerazioni aw_z misurate a bordo veicolo (Iveco France SFR 160)

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

Analogamente a quanto fatto per i treni, dalle accelerazioni a_{wx} , a_{wy} e a_{wz} , come descritto nel paragrafo 3.9., è stata determinata l'accelerazione totale a_v , utile alla determinazione del Comfort Index. Il riepilogo dei valori di a_v calcolati lungo il test site sono riportati di seguito:

- Tabella 40 e Figura 163 (viaggio di andata test site urbano);
- Tabella 41 e Figura 164 (viaggio di andata test site autostradale);
- Tabella 42 e Figura 165 (viaggio di andata test site extra-urbano);
- Tabella 43 e Figura 166 (viaggio di ritorno test site urbano);
- Tabella 44 e Figura 167 (viaggio di ritorno test site autostradale);
- Tabella 45 e Figura 168 (viaggio di ritorno test site extra-urbano).

Tabella 40: Valori di a_v calcolati lungo il test site urbano durante la sperimentazione (viaggio di andata)

Setra S 415 HDH		Iveco France SFR 160	
<i>N° rilievo</i>	<i>a_v (m/s²)</i>	<i>N° rilievo</i>	<i>a_v (m/s²)</i>
1	0,46165	1	0,48997
2	0,44245	2	0,47215
3	0,45742	3	0,46983
4	0,46345	4	0,48410
5	0,43968	5	0,48631
6	0,44031	6	0,47923
7	0,44976	7	0,46918
8	0,46912	8	0,47014
9	0,47012	9	0,48002
10	0,43650	10	0,48036
11	0,44841	11	0,47771
12	0,47116	12	0,46961
13	0,46244	13	0,47103
14	0,44213	14	0,48309
15	0,43968	15	0,48201

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

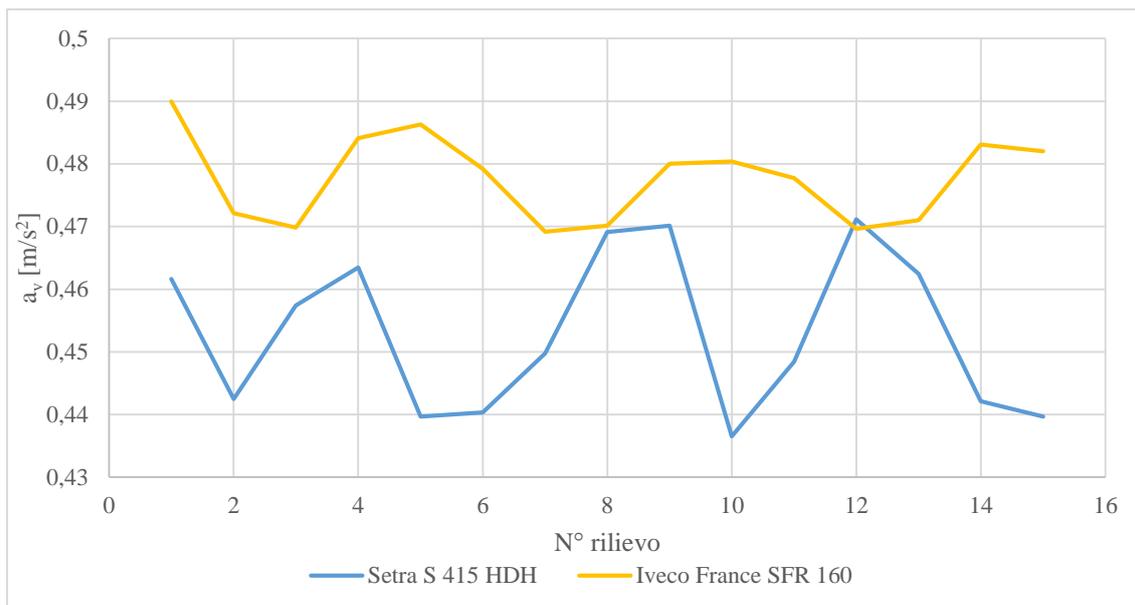


Figura 163: Valori di a_v calcolati lungo il test site urbano durante la sperimentazione (viaggio di andata)

Tabella 41: Valori di a_v calcolati lungo il test site autostradale durante la sperimentazione (viaggio di andata)

Setra S 415 HDH		Iveco France SFR 160	
N° rilievo	a_v (m/s ²)	N° rilievo	a_v (m/s ²)
1	0,50231	1	0,55990
2	0,49688	2	0,55214
3	0,51201	3	0,56974
4	0,50932	4	0,57103
5	0,50741	5	0,52314
6	0,50203	6	0,51687
7	0,49214	7	0,55167
8	0,48993	8	0,58124
9	0,51023	9	0,57412
10	0,50961	10	0,57962
11	0,51003	11	0,54374
12	0,51104	12	0,55697
13	0,50349	13	0,55993
14	0,50198	14	0,58311
15	0,51963	15	0,57786

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

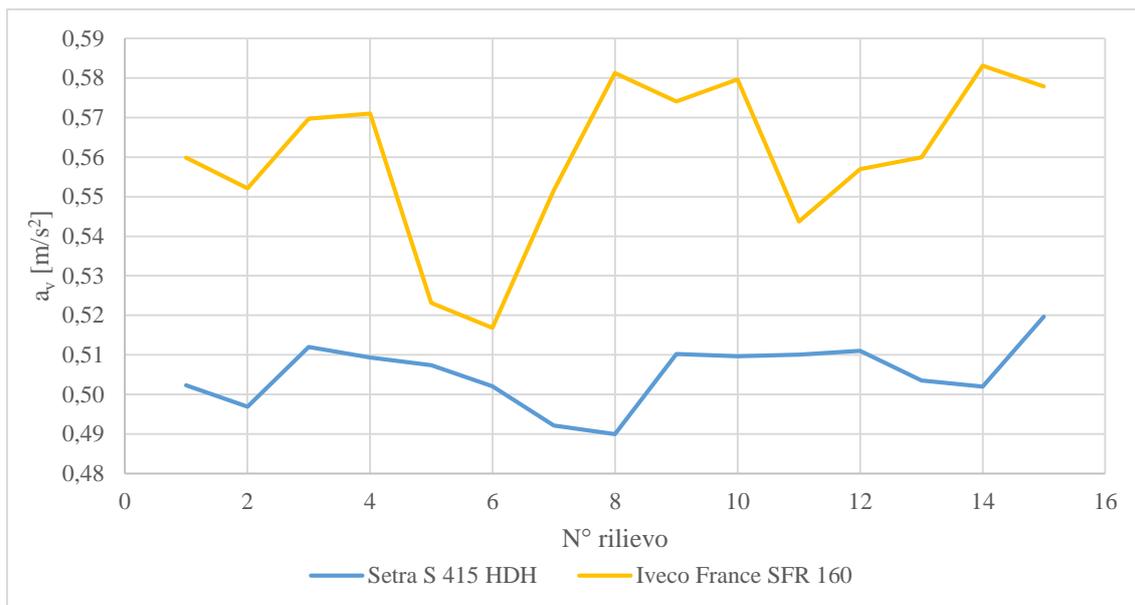


Figura 164: Valori di a_v calcolati lungo il test site autostradale durante la sperimentazione (viaggio di andata)

Tabella 42: Valori di a_v calcolati lungo il test site extra-urbano durante la sperimentazione (viaggio di andata)

Setra S 415 HDH		Iveco France SFR 160	
N° rilievo	a_v (m/s ²)	N° rilievo	a_v (m/s ²)
1	0,40366	1	0,40435
2	0,39765	2	0,40615
3	0,40985	3	0,41216
4	0,40211	4	0,41314
5	0,38943	5	0,40921
6	0,39124	6	0,41009
7	0,39328	7	0,40021
8	0,38997	8	0,39813
9	0,36975	9	0,38621
10	0,34987	10	0,39026
11	0,35103	11	0,40102
12	0,35032	12	0,39301
13	0,36103	13	0,36743
14	0,39874	14	0,38612
15	0,38801	15	0,39323

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

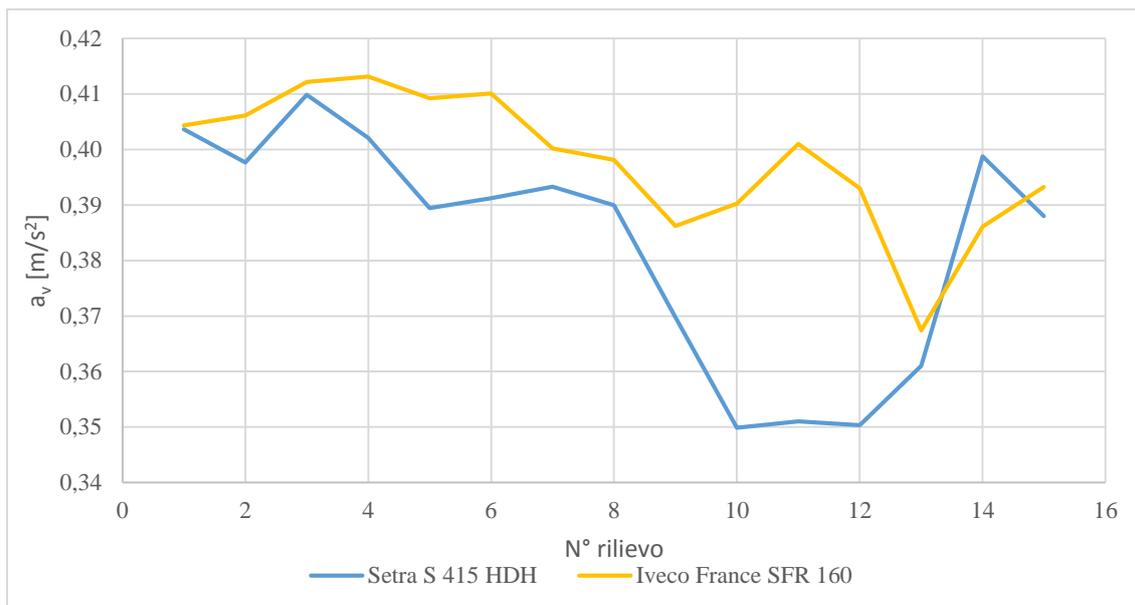


Figura 165: Valori di a_v calcolati lungo il test site extra-urbano durante la sperimentazione (viaggio di andata)

Tabella 43: Valori di a_v calcolati lungo il test site urbano durante la sperimentazione (viaggio di ritorno)

Setra S 415 HDH		Iveco France SFR 160	
<i>N° rilievo</i>	a_v (m/s ²)	<i>N° rilievo</i>	a_v (m/s ²)
1	0,62501	1	0,68639
2	0,61598	2	0,67002
3	0,57635	3	0,62301
4	0,54321	4	0,59631
5	0,52349	5	0,61253
6	0,58124	6	0,62301
7	0,57003	7	0,61198
8	0,56019	8	0,64210
9	0,52358	9	0,59832
10	0,60091	10	0,61031
11	0,55301	11	0,58741
12	0,53286	12	0,57980
13	0,55842	13	0,59321
14	0,60093	14	0,64214
15	0,57101	15	0,61307

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

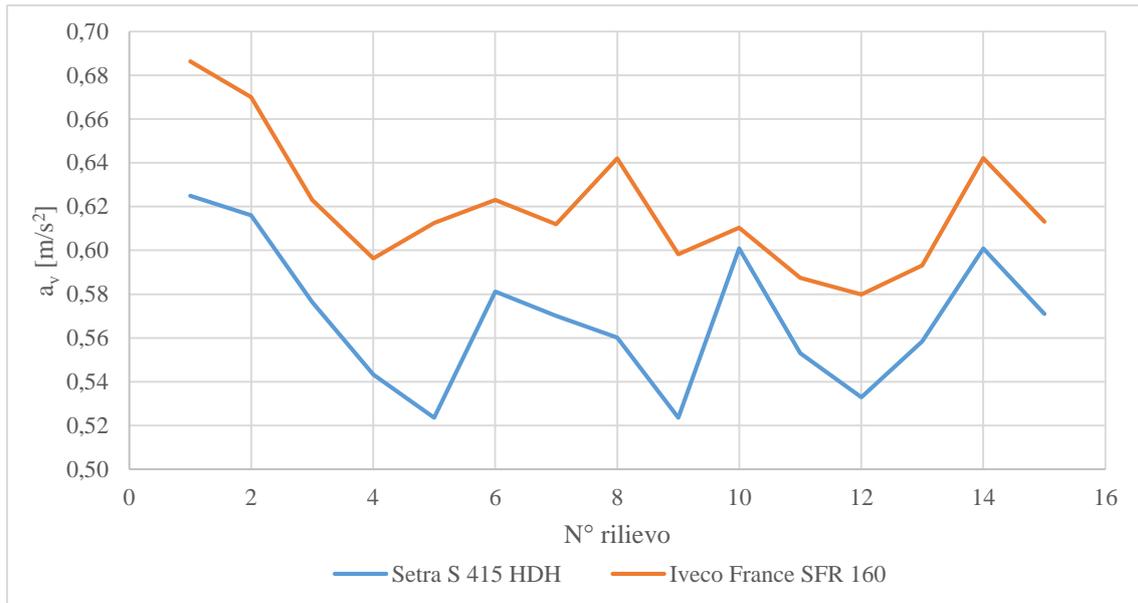


Figura 166: Valori di a_v calcolati lungo il test site urbano durante la sperimentazione (viaggio di ritorno)

Tabella 44: Valori di a_v calcolati lungo il test site autostradale durante la sperimentazione (viaggio di ritorno)

Setra S 415 HDH		Iveco France SFR 160	
N° rilievo	a_v (m/s ²)	N° rilievo	a_v (m/s ²)
1	0,67432	1	0,81825
2	0,66201	2	0,74124
3	0,67254	3	0,69310
4	0,66102	4	0,71201
5	0,61021	5	0,69098
6	0,62301	6	0,70312
7	0,63541	7	0,72364
8	0,64521	8	0,76584
9	0,63009	9	0,74210
10	0,67109	10	0,76303
11	0,66300	11	0,77102
12	0,65107	12	0,69300
13	0,69101	13	0,78012
14	0,67120	14	0,74301
15	0,63046	15	0,69907

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

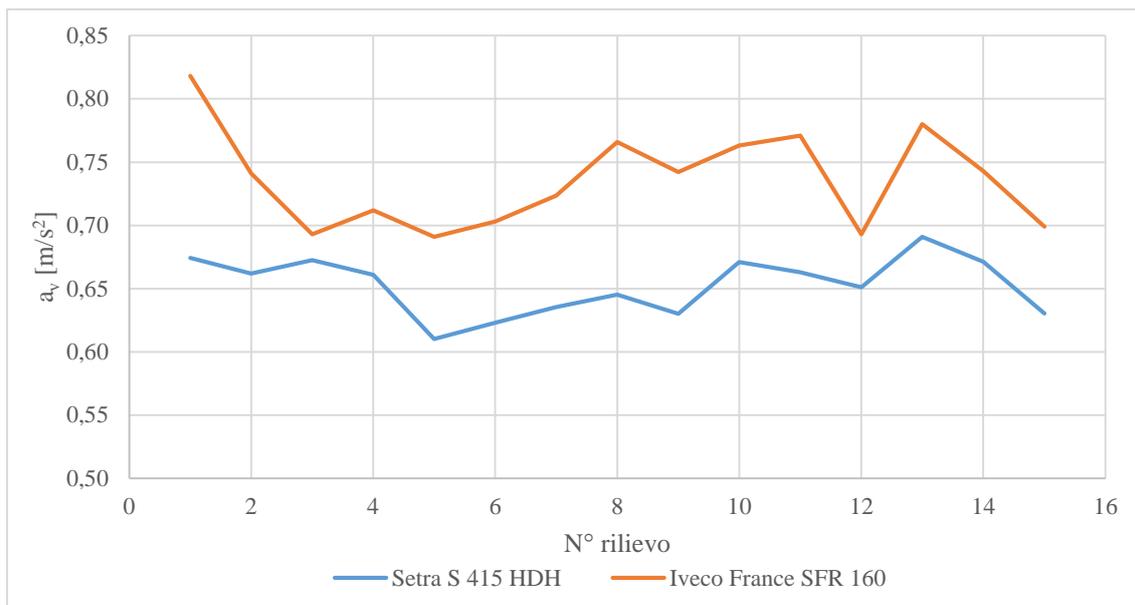


Figura 167: Valori di a_v calcolati lungo il test site autostradale durante la sperimentazione (viaggio di ritorno)

Tabella 45: Valori di a_v calcolati lungo il test site extra-urbano durante la sperimentazione (viaggio di ritorno)

Setra S 415 HDH		Iveco France SFR 160	
N° rilievo	a_v (m/s ²)	N° rilievo	a_v (m/s ²)
1	0,52605	1	0,56431
2	0,47621	2	0,50101
3	0,46312	3	0,51203
4	0,46018	4	0,51099
5	0,45876	5	0,49201
6	0,44102	6	0,47621
7	0,44902	7	0,49689
8	0,49321	8	0,51023
9	0,51003	9	0,52033
10	0,47651	10	0,47510
11	0,47241	11	0,47963
12	0,42310	12	0,46301
13	0,43988	13	0,49879
14	0,47004	14	0,53116
15	0,49311	15	0,51037

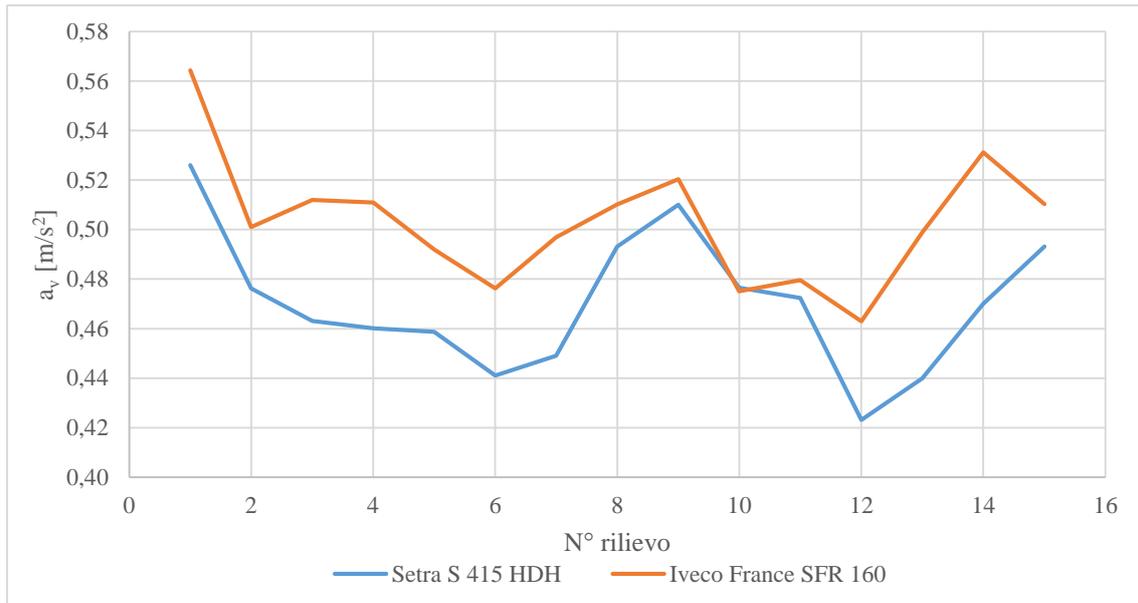


Figura 168: Valori di a_v calcolati lungo il test site extra-urbano durante la sperimentazione (viaggio di ritorno)

A differenza del rumore, nel calcolo del valore di a_v , si nota una differenza nei valori tra il viaggio di ritorno e quello di andata, specie nei test sites extra-urbano e autostradale, dove le carreggiate sono separate e le caratteristiche del manto stradale possono essere diverse.

Bisogna notare come, per entrambi i mezzi considerati, si registrano valori di accelerazioni totale a_v , maggiori nel tratto autostradale. Tali valori sono fortemente influenzati dall'attuale tracciato planimetrico del circuito autostradale, specie nel tratto compreso tra le uscite di Falerna e Rogliano, dove la presenza di numerose curve influenza fortemente le accelerazioni percepite a bordo veicolo dagli utenti. Il tratto del test site maggiormente confortevole risulta essere, sia nel viaggio di andata sia in quello di ritorno, il test site urbano, dove il mezzo mantiene velocità contenute, essendo in ambito urbano, riducendo il rumore prodotto dallo sforzo del motore e/o dal contatto pneumatico-strada e riducendo le accelerazioni percepite a bordo.

7.3. Calcolo del Comfort Index e validazione della metodologia proposta per la determinazione del comfort a bordo veicolo

A valle delle indagini sperimentali sui mezzi di trasporto considerati e dell'analisi dei risultati, trattata nei paragrafi precedenti 7.2.1 e 7.2.2, si è proceduto, per ognuno dei rilievi, al calcolo del CI(treno) e CI(autobus) così come descritto dalle equazioni (1) e (2).

I valori calcolati di CI, secondo quanto descritto nella Tabella 15 (Comfort Index per i treni) e nella Tabella 19 (Comfort Index per gli autobus), vengono riportati nelle Tabelle 46-51 per i treni e Tabelle 52-63 per gli autobus.

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

Tabella 46: Calcolo del CI(treno) lungo il test site Cosenza Vaglio Lise – Rogliano (viaggio di andata) a bordo del treno DE M4c. Stadler per l'intera campagna di sperimentazione

<i>N° rilievo</i>	<i>Leq (A) [dB]</i>	<i>a_v (m/s²)</i>	<i>CI (treni)</i>
1	75,7	0,23998	0,425
2	77,5	0,25626	0,425
3	79,2	0,24692	0,425
4	77,2	0,23872	0,425
5	76,8	0,22354	0,425
6	75,9	0,25123	0,425
7	78,8	0,22136	0,425
8	78,3	0,22387	0,425
9	79,5	0,23235	0,425
10	79,1	0,22987	0,425
11	78,1	0,22174	0,425
12	78,2	0,24685	0,425
13	77,9	0,23658	0,425
14	77,6	0,21985	0,425
15	78,6	0,22359	0,425

Tabella 47: Calcolo del CI(treno) lungo il test site Cosenza Vaglio Lise – Rogliano (viaggio di andata) a bordo del treno FCL M2.200 Breda per l'intera campagna di sperimentazione

<i>N° rilievo</i>	<i>Leq (A) [dB]</i>	<i>a_v (m/s²)</i>	<i>CI (treni)</i>
1	86,8	0,31756	0,775
2	86,3	0,29195	0,775
3	85,9	0,28891	0,775
4	86,4	0,30685	0,775
5	81,9	0,32012	0,6
6	83,4	0,31875	0,6
7	84,5	0,31245	0,6
8	85,8	0,31452	0,775
9	85,4	0,29874	0,775
10	82,6	0,28963	0,6
11	83,2	0,30113	0,6
12	84,1	0,31122	0,6
13	86,1	0,29664	0,775
14	85,2	0,30136	0,775
15	84,7	0,30398	0,6

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

Tabella 48: Calcolo del CI(treno) lungo il test site Cosenza Vaglio Lise – Rogliano (viaggio di andata) a bordo del treno FIAT M4.400 per l'intera campagna di sperimentazione

<i>N° rilievo</i>	<i>Leq (A) [dB]</i>	<i>a_v (m/s²)</i>	<i>CI (treni)</i>
1	88,4	0,23164	0,775
2	88,6	0,22457	0,775
3	87,8	0,21751	0,775
4	86,6	0,22675	0,775
5	87,2	0,23302	0,775
6	89,7	0,24546	0,775
7	89,2	0,24698	0,775
8	89,6	0,23987	0,775
9	88,5	0,24654	0,775
10	90,1	0,24113	0,775
11	89,8	0,25987	0,775
12	89,3	0,24896	0,775
13	90,2	0,25398	0,775
14	88,8	0,26997	0,775
15	89,9	0,24556	0,775

Tabella 49: Calcolo del CI(treno) lungo il test site Rogliano - Cosenza Vaglio Lise (viaggio di ritorno) a bordo del treno DE M4c. Stadler per l'intera campagna di sperimentazione

<i>N° rilievo</i>	<i>Leq (A) [dB]</i>	<i>a_v (m/s²)</i>	<i>CI (treni)</i>
1	74,8	0,22657	0,25
2	74,2	0,22368	0,25
3	75,1	0,22986	0,425
4	75,2	0,22314	0,425
5	74,9	0,22145	0,25
6	77,1	0,21013	0,425
7	76,8	0,22398	0,425
8	77,2	0,21986	0,425
9	76,9	0,23654	0,425
10	75,9	0,23998	0,425
11	77,4	0,22979	0,425
12	75,6	0,22311	0,425
13	76,5	0,21887	0,425
14	77,8	0,23659	0,425
15	76,1	0,24754	0,425

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

Tabella 50: Calcolo del CI(treno) lungo il test site Rogliano - Cosenza Vaglio Lise (viaggio di ritorno) a bordo del treno FCL M2.200 Breda per l'intera campagna di sperimentazione

<i>N° rilievo</i>	<i>Leq (A) [dB]</i>	<i>a_v (m/s²)</i>	<i>CI (treni)</i>
1	80,1	0,31842	0,6
2	81,8	0,29692	0,6
3	81,6	0,30769	0,6
4	80,9	0,31254	0,6
5	83,2	0,29874	0,6
6	81,9	0,30253	0,6
7	84,0	0,30967	0,6
8	85,4	0,29741	0,775
9	84,1	0,29854	0,6
10	82,8	0,28698	0,6
11	81,4	0,28642	0,6
12	80,2	0,29123	0,6
13	84,9	0,28975	0,6
14	81,5	0,29301	0,6
15	80,5	0,30121	0,6

Tabella 51: Calcolo del CI(treno) lungo il test site Rogliano - Cosenza Vaglio Lise (viaggio di ritorno) a bordo del treno FIAT M4.400 per l'intera campagna di sperimentazione

<i>N° rilievo</i>	<i>Leq (A) [dB]</i>	<i>a_v (m/s²)</i>	<i>CI (treni)</i>
1	89,1	0,23386	0,775
2	87,2	0,20211	0,775
3	89,5	0,21912	0,775
4	88,7	0,22452	0,775
5	90,1	0,25695	0,775
6	87,8	0,22359	0,775
7	88,1	0,23448	0,775
8	86,8	0,23684	0,775
9	86,4	0,22985	0,775
10	85,9	0,22114	0,775
11	87,3	0,23411	0,775
12	84,9	0,22986	0,6
13	88,2	0,22356	0,775
14	86,7	0,23654	0,775
15	86,1	0,23145	0,775

Come si evince dalle Tabelle 46-51, e come già anticipato nel paragrafo 7.2.1., il treno più confortevole risulta essere lo *Stadler*, infatti, per tale treno, sia nel viaggio di andata che in quello di ritorno, il valore del comfort a bordo è sempre inferiore a 0.5, risultando essere *confortevole* in ogni rilievo effettuato. Si nota, invece, come nel caso degli altri

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

due treni (*Breda* e *FIAT*), il viaggio di andata risulti essere più sconcertante del viaggio di ritorno e che in ogni rilievo effettuato risultino essere entrambi *mediamente confortevoli* e/o *sconcertati*.

Tabella 52: Calcolo del CI(autobus) lungo il test site urbano (viaggio di andata) a bordo dell'autobus Setra S 415 HDH per l'intera campagna di sperimentazione

<i>N° rilievo</i>	<i>Leq (A) [dB]</i>	<i>a_v (m/s²)</i>	<i>CI (autobus)</i>
1	68,5	0,46165	0,4125
2	67,1	0,44245	0,4125
3	68,1	0,45742	0,4125
4	67,4	0,46345	0,4125
5	67,5	0,43968	0,4125
6	68,2	0,44031	0,4125
7	67,7	0,44976	0,4125
8	68,3	0,46912	0,4125
9	67,6	0,47012	0,4125
10	68,8	0,43650	0,4125
11	68,2	0,44841	0,4125
12	67,9	0,47116	0,4125
13	67,5	0,46244	0,4125
14	67,8	0,44213	0,4125
15	68,8	0,43968	0,4125

Tabella 53: Calcolo del CI(autobus) lungo il test site urbano (viaggio di andata) a bordo dell'autobus Iveco France SFR 160 per l'intera campagna di sperimentazione

<i>N° rilievo</i>	<i>Leq (A) [dB]</i>	<i>a_v (m/s²)</i>	<i>CI (autobus)</i>
1	68,9	0,48997	0,4125
2	69,1	0,47215	0,4125
3	70,1	0,46983	0,5
4	69,1	0,48410	0,4125
5	69,1	0,48631	0,4125
6	68,7	0,47923	0,4125
7	68,2	0,46918	0,4125
8	68,9	0,47014	0,4125
9	70,2	0,48002	0,5
10	69,1	0,48036	0,4125
11	69,5	0,47771	0,4125
12	69,6	0,46961	0,4125
13	70,3	0,47103	0,5
14	68,9	0,48309	0,4125
15	69,3	0,48201	0,4125

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

Tabella 54: Calcolo del CI(autobus) lungo il test site autostradale (viaggio di andata) a bordo dell'autobus Setra S 415 HDH per l'intera campagna di sperimentazione

<i>N° rilievo</i>	<i>Leq (A) [dB]</i>	<i>a_v (m/s²)</i>	<i>CI (autobus)</i>
1	72,2	0,50231	0,5
2	71,2	0,49688	0,5
3	71,8	0,51201	0,5
4	71,3	0,50932	0,5
5	71,6	0,50741	0,5
6	71,9	0,50203	0,5
7	71,4	0,49214	0,5
8	71,6	0,48993	0,5
9	70,8	0,51023	0,5
10	72,6	0,50961	0,5
11	71,6	0,51003	0,5
12	70,2	0,51104	0,5
13	70,1	0,50349	0,5
14	71,1	0,50198	0,5
15	71,9	0,51963	0,5

Tabella 55: Calcolo del CI(autobus) lungo il test site autostradale (viaggio di andata) a bordo dell'autobus Iveco France SFR 160 per l'intera campagna di sperimentazione

<i>N° rilievo</i>	<i>Leq (A) [dB]</i>	<i>a_v (m/s²)</i>	<i>CI (autobus)</i>
1	75,5	0,55990	0,5875
2	72,5	0,55214	0,5
3	74,6	0,56974	0,5
4	76,1	0,57103	0,5875
5	73,4	0,52314	0,5
6	73,5	0,51687	0,5
7	73,9	0,55167	0,5
8	74,1	0,58124	0,5
9	73,8	0,57412	0,5
10	75,3	0,57962	0,5875
11	74,9	0,54374	0,5
12	75,4	0,55697	0,5875
13	74,7	0,55993	0,5
14	72,9	0,58311	0,5
15	73,4	0,57786	0,5

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

Tabella 56: Calcolo del CI(autobus) lungo il test site extra-urbano (viaggio di andata) a bordo dell'autobus Setra S 415 HDH per l'intera campagna di sperimentazione

<i>N° rilievo</i>	<i>Leq (A) [dB]</i>	<i>a_v (m/s²)</i>	<i>CI (autobus)</i>
1	71,8	0,40366	0,5
2	70,1	0,39765	0,5
3	70,6	0,40985	0,5
4	70,2	0,40211	0,5
5	69,9	0,38943	0,4125
6	70,5	0,39124	0,5
7	70,3	0,39328	0,5
8	70,0	0,38997	0,5
9	70,1	0,36975	0,5
10	71,9	0,34987	0,3375
11	71,5	0,35103	0,5
12	69,8	0,35032	0,4125
13	70,1	0,36103	0,5
14	69,9	0,39874	0,4125
15	70,4	0,38801	0,5

Tabella 57: Calcolo del CI(autobus) lungo il test site extra-urbano (viaggio di andata) a bordo dell'autobus Iveco France SFR 160 per l'intera campagna di sperimentazione

<i>N° rilievo</i>	<i>Leq (A) [dB]</i>	<i>a_v (m/s²)</i>	<i>CI (autobus)</i>
1	75,1	0,40435	0,5
2	71,8	0,40615	0,5
3	72,9	0,41216	0,5
4	73,5	0,41314	0,5
5	71,5	0,40921	0,5
6	71,6	0,41009	0,5
7	71,7	0,40021	0,5
8	70,7	0,39813	0,5
9	70,9	0,38621	0,5
10	73,2	0,39026	0,5
11	72,1	0,40102	0,5
12	73,1	0,39301	0,5
13	70,9	0,36743	0,5
14	71,2	0,38612	0,5
15	71,8	0,39323	0,5

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

Tabella 58: Calcolo del CI(autobus) lungo il test site urbano (viaggio di ritorno) a bordo dell'autobus Setra S 415 HDH per l'intera campagna di sperimentazione

<i>N° rilievo</i>	<i>Leq (A) [dB]</i>	<i>a_v (m/s²)</i>	<i>CI (autobus)</i>
1	69,1	0,62501	0,4125
2	68,9	0,61598	0,4125
3	68,5	0,57635	0,4125
4	68,4	0,54321	0,4125
5	67,9	0,52349	0,4125
6	67,5	0,58124	0,4125
7	67,8	0,57003	0,4125
8	69,1	0,56019	0,4125
9	69,2	0,52358	0,4125
10	68,7	0,60091	0,4125
11	67,8	0,55301	0,4125
12	67,6	0,53286	0,4125
13	67,3	0,55842	0,4125
14	68,7	0,60093	0,4125
15	67,2	0,57101	0,4125

Tabella 59: Calcolo del CI(autobus) lungo il test site urbano (viaggio di ritorno) a bordo dell'autobus Iveco France SFR 160 per l'intera campagna di sperimentazione

<i>N° rilievo</i>	<i>Leq (A) [dB]</i>	<i>a_v (m/s²)</i>	<i>CI (autobus)</i>
1	70,6	0,68639	0,6625
2	70,2	0,67002	0,6625
3	70,1	0,62301	0,5
4	69,7	0,59631	0,4125
5	69,8	0,61253	0,4125
6	68,5	0,62301	0,4125
7	69,1	0,61198	0,4125
8	70,1	0,64210	0,5
9	69,4	0,59832	0,4125
10	69,7	0,61031	0,4125
11	68,9	0,58741	0,4125
12	68,3	0,57980	0,4125
13	70,3	0,59321	0,5
14	69,2	0,64214	0,4125
15	68,8	0,61307	0,4125

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

Tabella 60: Calcolo del CI(autobus) lungo il test site autostradale (viaggio di ritorno) a bordo dell'autobus Setra S 415 HDH per l'intera campagna di sperimentazione

<i>N° rilievo</i>	<i>Leq (A) [dB]</i>	<i>a_v (m/s²)</i>	<i>CI (autobus)</i>
1	73,1	0,67432	0,6625
2	71,2	0,66201	0,6625
3	72,1	0,67254	0,6625
4	72,4	0,66102	0,6625
5	72,6	0,61021	0,5
6	71,9	0,62301	0,5
7	73,6	0,63541	0,5
8	73,2	0,64521	0,5
9	72,5	0,63009	0,5
10	71,8	0,67109	0,6625
11	71,5	0,66300	0,6625
12	72,2	0,65107	0,6625
13	71,6	0,69101	0,6625
14	73,8	0,67120	0,6625
15	73,3	0,63046	0,5

Tabella 61: Calcolo del CI(autobus) lungo il test site autostradale (viaggio di ritorno) a bordo dell'autobus Iveco France SFR 160 per l'intera campagna di sperimentazione

<i>N° rilievo</i>	<i>Leq (A) [dB]</i>	<i>a_v (m/s²)</i>	<i>CI (autobus)</i>
1	73,3	0,81825	0,6625
2	74,1	0,74124	0,6625
3	74,5	0,69310	0,6625
4	74,6	0,71201	0,6625
5	75,1	0,69098	0,75
6	73,9	0,70312	0,6625
7	73,8	0,72364	0,6625
8	73,4	0,76584	0,6625
9	74,1	0,74210	0,6625
10	75,7	0,76303	0,75
11	74,9	0,77102	0,6625
12	74,2	0,69300	0,6625
13	74,8	0,78012	0,6625
14	73,9	0,74301	0,6625
15	74,1	0,69907	0,6625

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

Tabella 62: Calcolo del CI(autobus) lungo il test site extra-urbano (viaggio di ritorno) a bordo dell'autobus Setra S 415 HDH per l'intera campagna di sperimentazione

<i>N° rilievo</i>	<i>Leq (A) [dB]</i>	<i>a_v (m/s²)</i>	<i>CI (autobus)</i>
1	69,8	0,52605	0,4125
2	70,1	0,47621	0,5
3	70,2	0,46312	0,5
4	70,6	0,46018	0,5
5	69,1	0,45876	0,4125
6	69,5	0,44102	0,4125
7	70,2	0,44902	0,5
8	69,8	0,49321	0,4125
9	70,5	0,51003	0,5
10	70,4	0,47651	0,5
11	71,1	0,47241	0,5
12	71,5	0,42310	0,5
13	69,9	0,43988	0,4125
14	71,8	0,47004	0,5
15	70,9	0,49311	0,5

Tabella 63: Calcolo del CI(autobus) lungo il test site extra-urbano (viaggio di ritorno) a bordo dell'autobus Iveco France SFR 160 per l'intera campagna di sperimentazione

<i>N° rilievo</i>	<i>Leq (A) [dB]</i>	<i>a_v (m/s²)</i>	<i>CI (autobus)</i>
1	70,2	0,56431	0,5
2	72,1	0,50101	0,5
3	73,1	0,51203	0,5
4	71,9	0,51099	0,5
5	72,3	0,49201	0,5
6	72,4	0,47621	0,5
7	73,2	0,49689	0,5
8	71,8	0,51023	0,5
9	70,9	0,52033	0,5
10	70,7	0,47510	0,5
11	71,2	0,47963	0,5
12	71,9	0,46301	0,5
13	72,9	0,49879	0,5
14	73,5	0,53116	0,5
15	73,1	0,51037	0,5

Nel caso degli autobus, come già anticipato nel paragrafo 7.2.2., il *Setra*, in generale, risulta essere più confortevole dell'autobus *Iveco*, su ognuno dei tre test site considerati (urbano, autostradale ed extra-urbano). Come si evince dalle Tabelle 52-63, il tratto di

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

test site maggiormente confortevole è il tratto urbano in quanto il mezzo procede a velocità contenute riducendo, di fatto, le accelerazioni trasmesse agli utenti a bordo e il rumore percepito dagli stessi utenti. Si nota, tuttavia, come il tratto autostradale, mediamente, risulti essere il meno confortevole con rilievi che in alcuni casi sono risultati essere *sconfortevoli*. Il tratto autostradale in esame, infatti, è oggetto di un ammodernamento che sta modificando il tracciato attuale che comprende numerose curve con raggi di curvatura troppo piccoli per una autostrada, diminuendo, di fatto, il comfort a bordo percepito dagli utenti che percorrono il tratto in esame.

Nel caso dei treni, inoltre, è utile analizzare l'andamento del rumore e delle accelerazioni con il calcolo del CI(treno) tra stazioni successive in modo da analizzare le criticità del tracciato. In tal caso si sono considerati i valori medi di rumore e accelerazioni a_v misurati sui tre treni oggetto di studio tra stazioni successive sul totale dei 30 rilievi.

Tabella 64: Calcolo del CI(treno), tra due stazioni, lungo il test site Cosenza Vaglio Lise – Rogliano a bordo del treno DE M4c. Stadler

Tratta	a_v [m/s ²]	Leq (A) [dB]	CI
<i>Cosenza V.L. - Cosenza Monaco</i>	0,23276	69,43	0,075
<i>Cosenza Monaco - Cosenza Campanella</i>	0,15145	73,98	0,175
<i>Cosenza Campanella - Cosenza Centro</i>	0,13251	70,99	0,175
<i>Cosenza Centro - Casali</i>	0,25231	75,53	0,425
<i>Casali - Bosco</i>	0,31219	77,21	0,425
<i>Bosco - Pedace</i>	0,26223	75,73	0,425
<i>Pedace - Pietrafitta</i>	0,33002	77,78	0,425
<i>Pietrafitta - Aprigliano</i>	0,31015	75,31	0,425
<i>Aprigliano - Piane Crati</i>	0,25105	72,49	0,250
<i>Piane Crati - Figline/Cellara</i>	0,26398	71,54	0,250
<i>Figline/Cellara - Mangone</i>	0,27221	72,65	0,250
<i>Mangone - Piano Lago</i>	0,33023	75,69	0,425
<i>Piano Lago - S. Stefano</i>	0,26087	75,1	0,425
<i>S. Stefano - Rogliano</i>	0,30122	75,37	0,425

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

Tabella 65: Calcolo del CI(treno), tra due stazioni, lungo il test site Cosenza Vaglio Lise – Rogliano a bordo del treno FCL M2.200 Breda

Tratta	a_v [m/s ²]	Leq (A) [dB]	CI
<i>Cosenza V.L. - Cosenza Monaco</i>	0,29318	75,45	0,425
<i>Cosenza Monaco - Cosenza Campanella</i>	0,26210	77,77	0,425
<i>Cosenza Campanella - Cosenza Centro</i>	0,27112	75,27	0,425
<i>Cosenza Centro - Casali</i>	0,23365	81,12	0,600
<i>Casali - Bosco</i>	0,32203	82,94	0,600
<i>Bosco - Pedace</i>	0,31017	87,76	0,775
<i>Pedace - Pietrafitta</i>	0,38452	88,47	0,850
<i>Pietrafitta - Aprigliano</i>	0,32463	82,93	0,525
<i>Aprigliano - Piane Crati</i>	0,33410	80,92	0,600
<i>Piane Crati - Figline/Cellara</i>	0,32321	80,54	0,600
<i>Figline/Cellara - Mangone</i>	0,35012	82,68	0,675
<i>Mangone - Piano Lago</i>	0,31330	79,54	0,425
<i>Piano Lago - S. Stefano</i>	0,30120	80,46	0,600
<i>S. Stefano - Rogliano</i>	0,33007	82,33	0,600

Tabella 66: Calcolo del CI(treno), tra due stazioni, lungo il test site Cosenza Vaglio Lise – Rogliano a bordo del treno FIAT M4.400

Tratta	a_v [m/s ²]	Leq (A) [dB]	CI
<i>Cosenza V.L. - Cosenza Monaco</i>	0,29132	82,01	0,600
<i>Cosenza Monaco - Cosenza Campanella</i>	0,15125	85,3	0,700
<i>Cosenza Campanella - Cosenza Centro</i>	0,21105	81,83	0,600
<i>Cosenza Centro - Casali</i>	0,25203	85,37	0,600
<i>Casali - Bosco</i>	0,22223	80,29	0,600
<i>Bosco - Pedace</i>	0,22010	84,62	0,600
<i>Pedace - Pietrafitta</i>	0,22006	86,08	0,775
<i>Pietrafitta - Aprigliano</i>	0,26117	84,08	0,600
<i>Aprigliano - Piane Crati</i>	0,24125	82,38	0,600
<i>Piane Crati - Figline/Cellara</i>	0,32109	80,46	0,600
<i>Figline/Cellara - Mangone</i>	0,23463	82,94	0,600
<i>Mangone - Piano Lago</i>	0,25287	80,61	0,600
<i>Piano Lago - S. Stefano</i>	0,25345	80,32	0,600
<i>S. Stefano - Rogliano</i>	0,29019	82,87	0,600

Come detto nei paragrafi precedenti, tutti i rilievi sono stati importati in ambiente GIS utilizzando il software open source Quantum GIS, con lo scopo di avere una

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

rappresentazione grafica e geo localizzata dei singoli rilievi e del Comfort Index a bordo veicolo. Di seguito si riportano le Figure che mostrano l'esportazione dei rilievi su Quantum e l'andamento del CI lungo i test sites considerati nello studio.



Figura 169: Identificazione su GIS delle stazioni lungo il test site ferroviario Cosenza Vaglio Lise – Rogliano

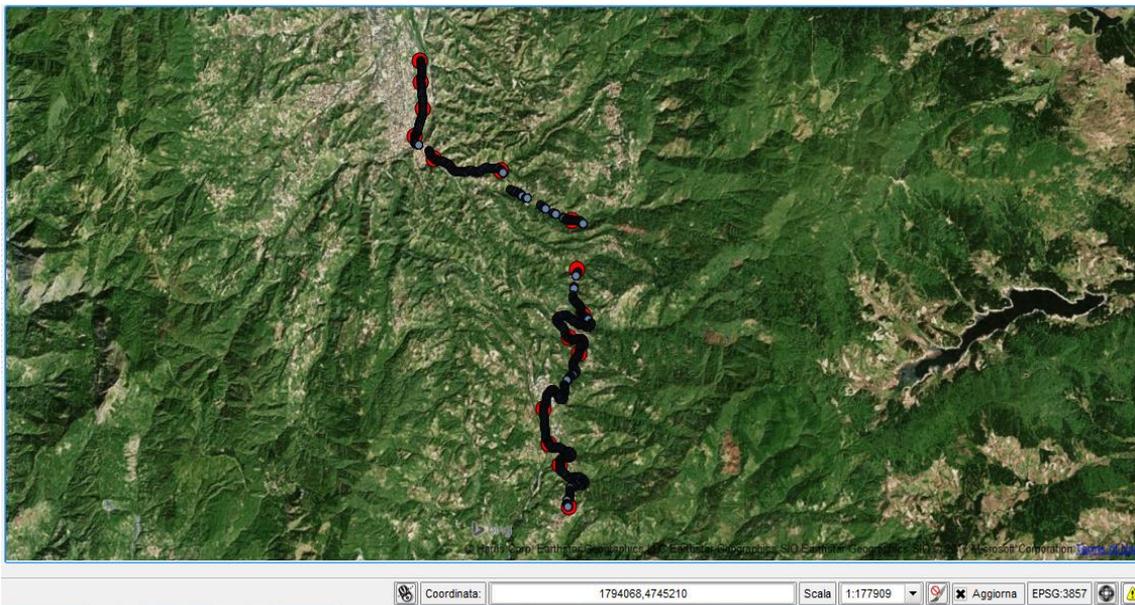


Figura 170: Importazione di un rilievo su treno lungo il test site ferroviario Cosenza Vaglio Lise – Rogliano

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

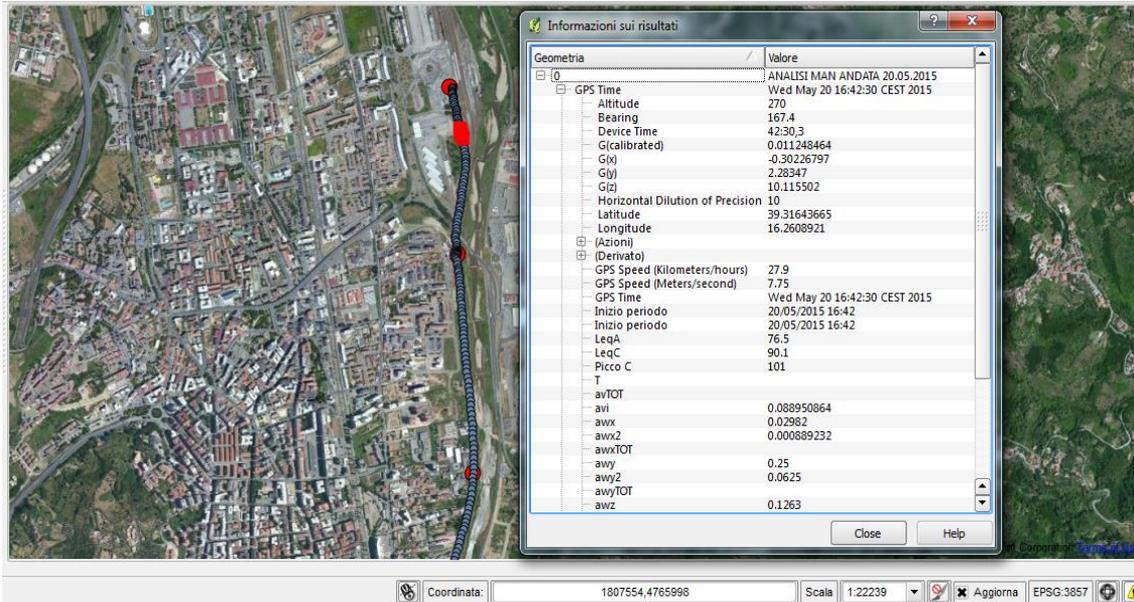


Figura 171: Informazioni ricavabili dal GIS sul singolo punto rilevato lungo il test site ferroviario Cosenza Vaglio Lise – Rogliano



Figura 172: Calcolo del CI(treno) su ambiente GIS tra le stazioni di Cosenza Vaglio Lise e Bosco a bordo del treno DE M4c. Stadler

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo



Figura 173: Calcolo del CI(treno) su ambiente GIS tra le stazioni di Pedace e Rogliano a bordo del treno DE M4c. Stadler



Figura 174: Calcolo del CI(treno) su ambiente GIS tra le stazioni di Cosenza Vaglio Lise e Pedace a bordo del treno FCL M2.200 Breda

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo



Figura 175: Calcolo del CI(treno) su ambiente GIS tra le stazioni di Pietrafitta e Rogliano a bordo del treno FCL M2.200 Breda



Figura 176: Calcolo del CI(treno) su ambiente GIS tra le stazioni di Cosenza Vaglio Lise e Pedace a bordo del treno FIAT M4.400

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo



Figura 177: Calcolo del CI(treno) su ambiente GIS tra le stazioni di Pietrafitta e Rogliano a bordo del treno FIAT M4.400

Anche i rilievi realizzati a bordo degli autobus sono stati importati in ambiente GIS, in questo caso vengono riportate le Figure che mostrano l'andamento del CI(autobus) sui due mezzi considerati. In questo caso il test site viene diviso in ambito urbano, autostradale e extra-urbano.



Figura 178: Calcolo del CI(autobus) su ambiente GIS su test site urbano a bordo dell'autobus Setra S 415 HDH nel viaggio di andata

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

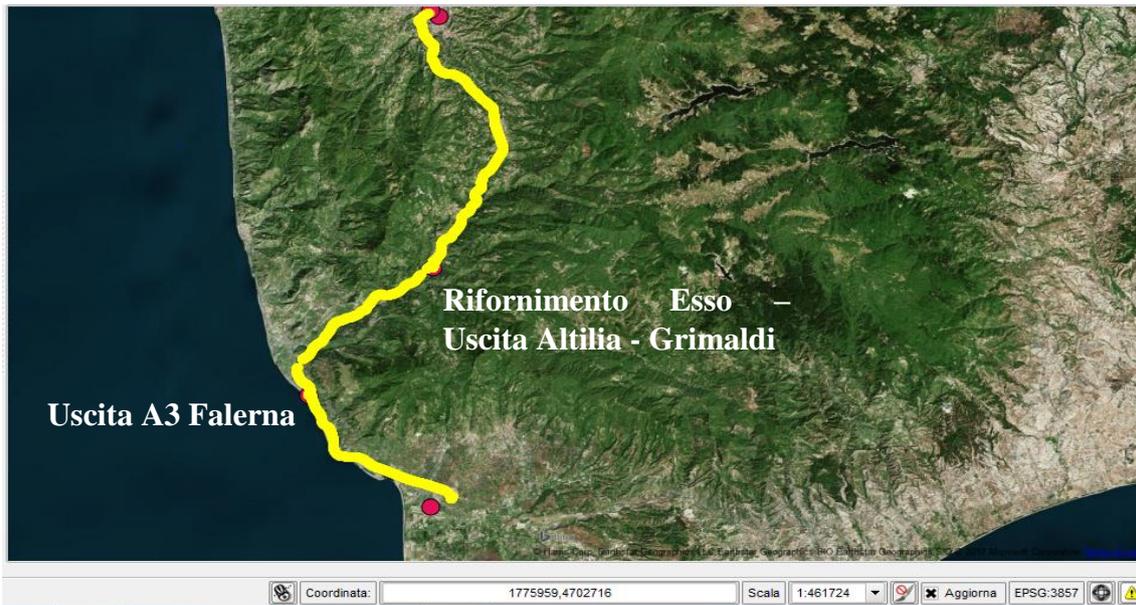


Figura 179: Calcolo del CI(autobus) su ambiente GIS su test site autostradale a bordo dell'autobus Setra S 415 HDH nel viaggio di andata

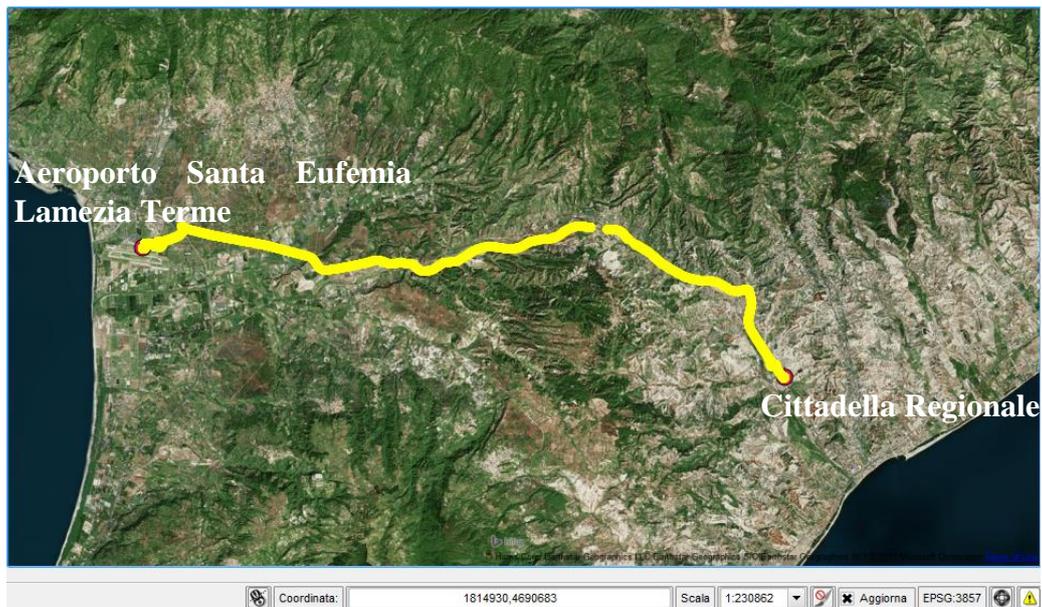


Figura 180: Calcolo del CI(autobus) su ambiente GIS su test site extra-urbano a bordo dell'autobus Setra S 415 HDH nel viaggio di andata

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo



Figura 181: Calcolo del CI(autobus) su ambiente GIS su test site urbano a bordo dell'autobus Iveco France SFR 160 nel viaggio di andata



Figura 182: Calcolo del CI(autobus) su ambiente GIS su test site autostradale a bordo dell'autobus Iveco France SFR 160 nel viaggio di andata

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo



Figura 183: Calcolo del CI(autobus) su ambiente GIS su test site extra-urbano a bordo dell'autobus Iveco France SFR 160 nel viaggio di andata

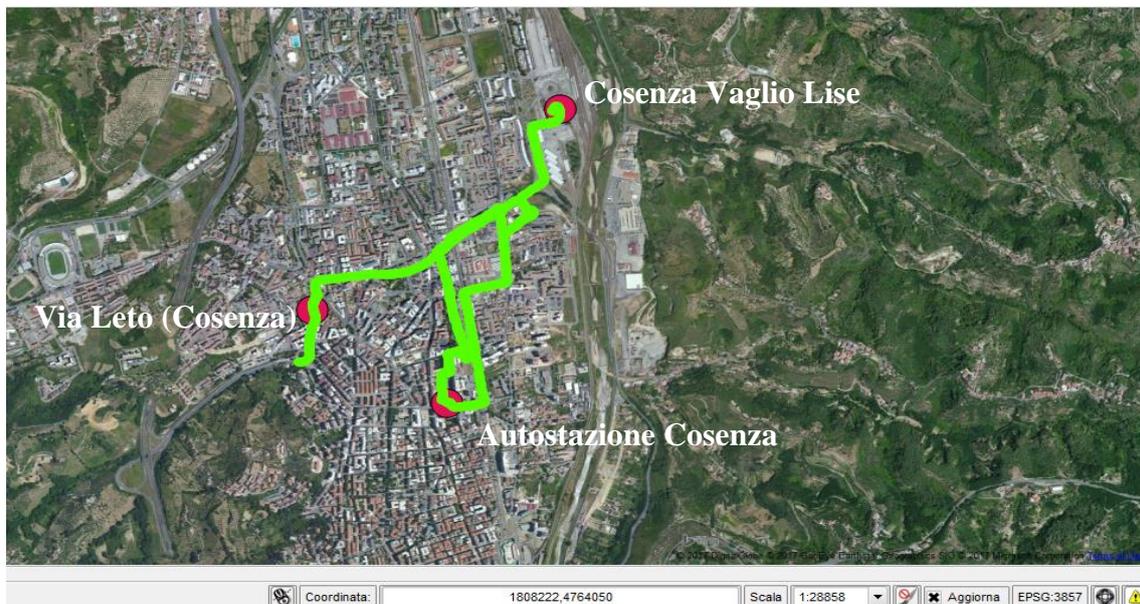


Figura 184: Calcolo del CI(autobus) su ambiente GIS su test site urbano a bordo dell'autobus Setra S 415 HDH nel viaggio di ritorno

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo



Figura 185: Calcolo del CI(autobus) su ambiente GIS su test site autostradale a bordo dell'autobus Setra S 415 HDH nel viaggio di ritorno



Figura 186: Calcolo del CI(autobus) su ambiente GIS su test site extra-urbano a bordo dell'autobus Setra S 415 HDH nel viaggio di ritorno

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo



Figura 187: Calcolo del CI(autobus) su ambiente GIS su test site urbano a bordo dell'autobus Iveco France SFR 160 nel viaggio di ritorno



Figura 188: Calcolo del CI(autobus) su ambiente GIS su test site autostradale a bordo dell'autobus Iveco France SFR 160 nel viaggio di ritorno

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo



Figura 189: Calcolo del CI(autobus) su ambiente GIS su test site extra-urbano a bordo dell'autobus Iveco France SFR 160 nel viaggio di ritorno

In questo caso si nota come il tratto maggiormente confortevole risulti essere il tratto urbano (*confortevole*), invece, i tratti extra-urbano e autostradale risultano essere *mediamente confortevoli*.

I valori che hanno permesso di calcolare su GIS il CI(autobus) mostrati nelle Figure 178-189, vengono riportati nella Tabella 67.

Tabella 67: Calcolo del CI(autobus) lungo i test site oggetti di studio

<i>Autobus</i>	<i>Test site</i>	<i>Leq (A) [dB]</i>	<i>a_v (m/s²)</i>	<i>CI (autobus)</i>
<i>Setra S 415 HDH</i>	Urbano - Andata	67,96	0,452952	0,4125
	Autostradale - Andata	71,42	0,505200	0,5
	Extra-Urbano - Andata	70,47	0,383063	0,5
<i>Iveco France SFR 160</i>	Urbano - Andata	69,27	0,477649	0,4125
	Autostradale - Andata	74,27	0,560070	0,5
	Extra-Urbano - Andata	72,13	0,398048	0,5
<i>Setra S 415 HDH</i>	Urbano - Ritorno	68,25	0,569080	0,4125
	Autostradale - Ritorno	72,45	0,652780	0,6625
	Extra-Urbano - Ritorno	70,36	0,470180	0,5
<i>Iveco France SFR 160</i>	Urbano - Ritorno	69,51	0,619310	0,4125
	Autostradale - Ritorno	74,29	0,735970	0,6625
	Extra-Urbano - Ritorno	72,08	0,502800	0,5

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

Come detto in precedenza, per la validazione dell'indice di comfort $CI(\text{treno})$ e $CI(\text{autobus})$ si sono confrontati gli stessi indici calcolati mediante le formulazioni (1) e (2), con il valore di CP attribuito dagli utenti durante il viaggio.

La Tabella 68, mostra le soglie per la determinazione del valore di $CP(\text{treno})$ e $CP(\text{autobus})$.

Tabella 68: Determinazione soglie per definizione del CP nei treni e negli autobus

	$CP \leq 2$	$2 > CP \geq 4$	$4 > CP \geq 6$	$6 > CP \geq 8$	$8 > CP \geq 10$
CP	Molto sconfortevole	Sconfortevole	Mediamente confortevole	Confortevole	Molto confortevole

Nel caso dei treni si sono considerati un totale di 30 rilievi (15 rilievi andata e 15 rilievi ritorno), confrontando il valore medio di $CI(\text{treno})$ con il valore medio di $CP(\text{autobus})$ fornito dagli utenti a bordo veicolo durante le sperimentazioni (Tabella 69).

Tabella 69: Confronto tra $CI(\text{treno})$ medio e $CP(\text{treno})$ medio

<i>DE M4c. Stadler</i>	
<i>CI (treni)_{medio}</i>	<i>CP (treni)_{medio}</i>
0,4075	7,14
<i>FCL M2.200 Breda</i>	
<i>CI (treni)_{medio}</i>	<i>CP (treni)_{medio}</i>
0,6525	4,95
<i>FIAT M4.400</i>	
<i>CI (treni)_{medio}</i>	<i>CP (treni)_{medio}</i>
0,7692	3,56

Discorso analogo è stato affrontato anche sugli autobus: anche in questo caso, si sono considerati un totale di 30 rilievi (15 rilievi andata e 15 rilievi ritorno), confrontando il valore medio di $CI(\text{autobus})$ con il valore medio di $CP(\text{autobus})$ fornito dagli utenti a bordo veicolo durante le sperimentazioni (Tabella 70).

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

Tabella 70: Confronto tra $CI(\text{autobus})_{\text{medio}}$ e $CP(\text{autobus})_{\text{medio}}$

<i>Setra S 415 HDH</i>	
$CI(\text{autobus})_{\text{medio}}$	$CP(\text{autobus})_{\text{medio}}$
0,4775	6,54
<i>Iveco France SFR 160</i>	
$CI(\text{autobus})_{\text{medio}}$	$CP(\text{autobus})_{\text{medio}}$
0,5151	5,6

In entrambi i mezzi di trasporto collettivo considerati (treni e autobus), si è mostrato come il calcolo del CI effettuato mediante le equazioni (1) e (2), risulta essere un metodo valido per rappresentare il grado di comfort che l'utente percepisce a bordo veicolo durante i propri spostamenti.

Tuttavia, un'ulteriore verifica è stata condotta per validare la metodologia proposta, in particolare, si è pensato di confrontare i valori di $CI(\text{treno})$ e $CI(\text{autobus})$, misurati tra le fermate dei due test site, con i relativi valori di Comfort Perceived (CP). Nello specifico, è stato confrontato il $CI(\text{treno})$ con il $CP(\text{treno})$. Le Figure 190, 191 e 192 mostrano la differenza, in termini di percentuale, tra il $CI(\text{treno})$ misurato tra due stazioni, mediante la formulazione (1), e il $CP(\text{treno})$ fornito dagli utenti a bordo veicolo, con lo scopo di verificare la corrispondenza tra il dato misurato e il dato fornito dall'utente. A tale scopo, è stato effettuato il test chi-quadro, riportato in Tabella 71, al fine di verificare la validità dell'indice di comfort $CI(\text{treno})$. Il test è stato condotto considerando 4 gradi di libertà ed un errore tollerato del 5% ($p \text{ value}=0.05$), ovvero si può scartare l'ipotesi se il valore di chi-quadro risulti superiore 9.49.

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

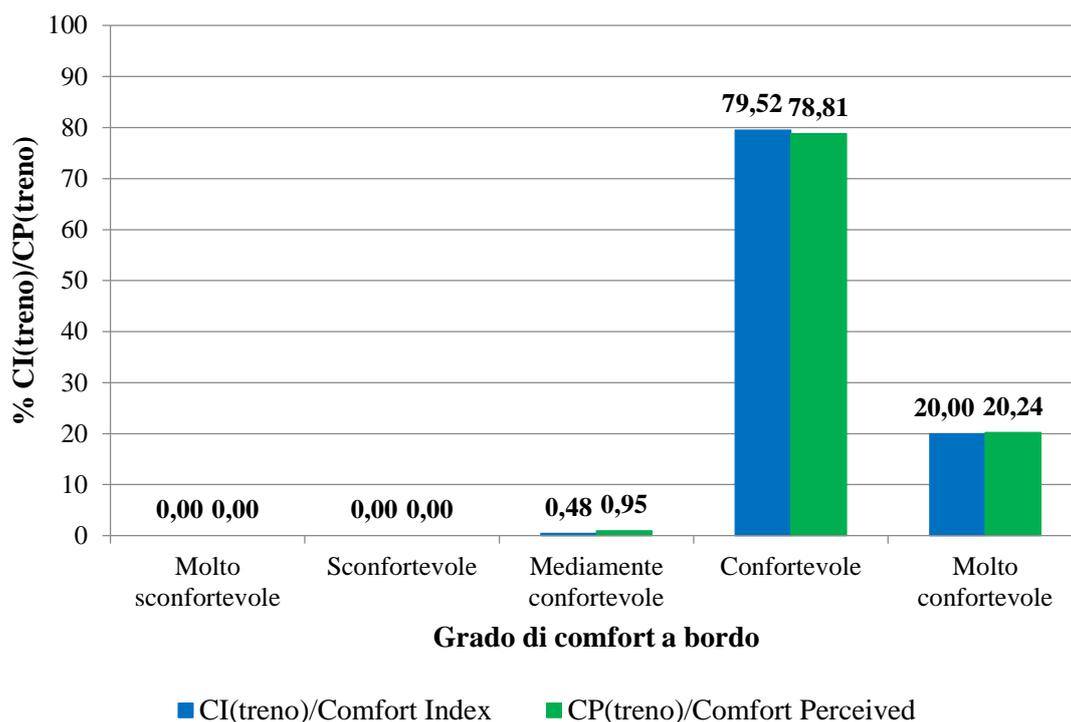


Figura 190: Confronto tra il CI(treno) e il CP(treno) a bordo del treno Stadler DE M4c.

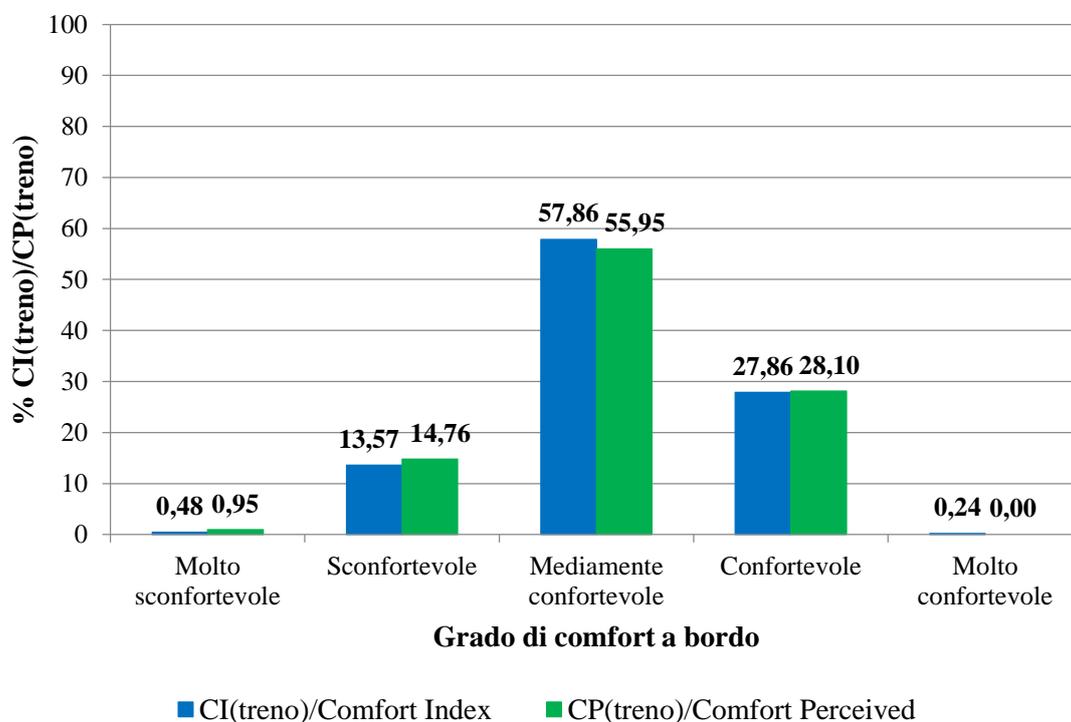


Figura 191: Confronto tra il CI(treno) e il CP(treno) a bordo del treno FCL M2.200 Breda

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

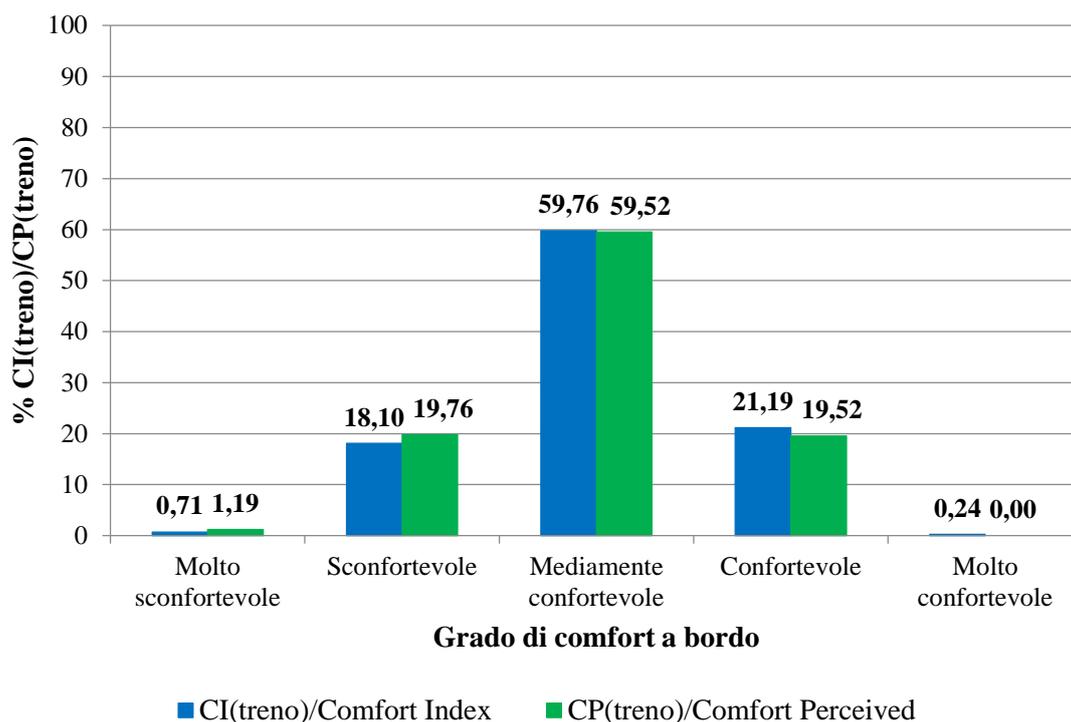


Figura 192: Confronto tra il CI(treno) e il CP(treno) a bordo del treno FIAT M4.400

Tabella 71: Test chi-quadro per i treni

Treno	Chi-sq(4-0,95)
<i>DE M4c.500 Stadler Rail</i>	2,04
<i>FCL M2.200 BREDA</i>	3,71
<i>FIAT M4</i>	3,53

Allo stesso modo negli autobus, Le Figure 193 e 194 mostrano la differenza, in termini di percentuale, tra il CI(autobus) misurato tra due stazioni, mediante la formulazione (2), e il CP(autobus) fornito dagli utenti a bordo veicolo, con lo scopo di verificare la corrispondenza tra il dato misurato e il dato fornito dall'utente. A tale scopo, è stato effettuato il test chi-quadro, riportato in Tabella 72, al fine di verificare la validità dell'indice di comfort CI(autobus). Il test è stato condotto considerando 4 gradi di libertà ed un errore tollerato del 5% ($p \text{ value}=0.05$), ovvero si può scartare l'ipotesi se il valore di chi-quadro risulta superiore 9.49.

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

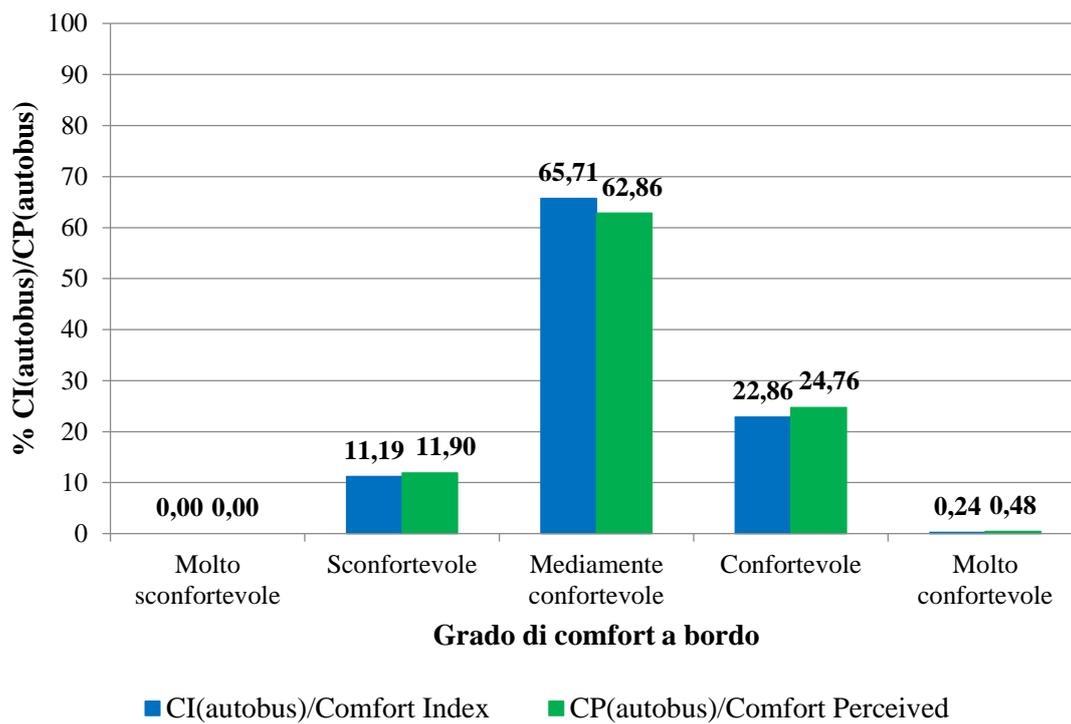


Figura 193: Confronto tra il CI(autobus) e il CP(autobus) a bordo dell'autobus Setra S 415 HDH

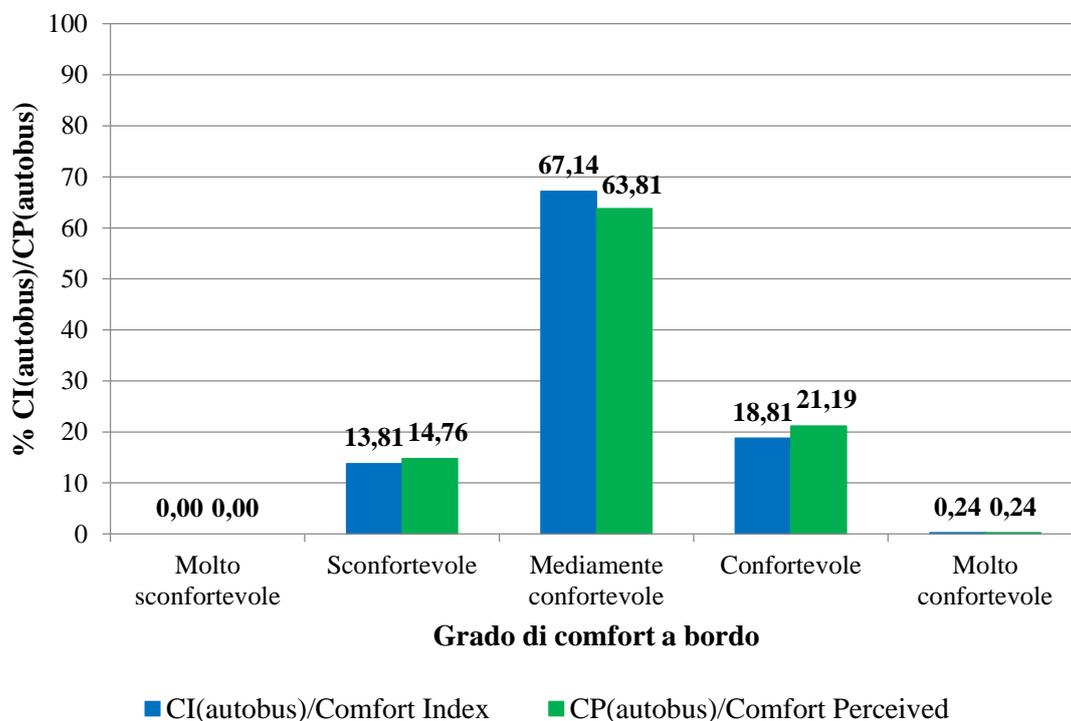


Figura 194: Confronto tra il CI(autobus) e il CP(autobus) a bordo dell'autobus Iveco France SFR 160

Lo sviluppo dei sistemi di trasporto collettivo: studio di un indice per la determinazione del comfort a bordo

Tabella 72: Test chi-quadro per gli autobus

Autobus	Chi-sq(4-0,95)
<i>Setra S 415 HDH</i>	2,38
<i>Iveco France SFR 160</i>	2,24

I test statistici chi-quadro, riportati in Tabella 71 e 72, mostrano come esiste un'elevata corrispondenza tra il valore misurato di CI e il valore di CP fornito dagli utenti.

8. Conclusioni

Il presente lavoro è stato finalizzato a riassumere i contenuti che sono stati sviluppati nel corso dei tre anni di Dottorato di Ricerca in Ingegneria Civile ed Industriale presso l'Università della Calabria. L'attività di ricerca si è sviluppata in collaborazione con diverse aziende private che hanno fornito la strumentazione, i mezzi sui quali effettuare le sperimentazioni e il know-how di base per indirizzare il lavoro verso un modello innovativo in ambito scientifico. Lo scopo principale del presente studio è stato quello di implementare un indice per il calcolo del comfort a bordo dei mezzi di trasporto collettivo utilizzati durante la sperimentazione, ovvero gli autobus e i treni. Come ampiamente detto all'interno del presente lavoro, l'uso dei sistemi di trasporto collettivo è fortemente influenzato dalla qualità del servizio offerto. Tuttavia, misurare la qualità dei servizi di trasporto collettivo, non è semplice, poiché molti sono i fattori che possono incidere sulla qualità stessa, come ad esempio, il ritardo rispetto ai tempi previsti, il costo di viaggio, la pulizia a bordo, la sicurezza etc. Allo stesso tempo, misurare la qualità del servizio di trasporto risulta essere di fondamentale importanza sia per garantire una maggiore qualità all'utente che utilizza il sistema di trasporto, sia per rendere il trasporto collettivo più competitivo rispetto al trasporto privato.

A tal proposito, la ricerca è stata mirata alla determinazione del comfort a bordo veicolo, misurando due indicatori di tipo oggettivo, ovvero le accelerazioni trasmesse al corpo dal moto del veicolo, ed il rumore. Lo scopo della ricerca è stato quello di progettare e validare un indice che ha permesso la determinazione del grado di comfort a bordo per i mezzi di trasporto considerati.

Nella prima parte è stato affrontato lo studio e la classificazione dei sistemi di trasporto collettivo secondo le principali classificazioni proposte in letteratura. Allo stesso modo è stato affrontato lo studio delle metodologie più note in letteratura per la definizione della qualità del servizio, mediante misure oggettive e soggettive.

È stato affrontato, nel terzo capitolo, lo studio del rumore e delle vibrazioni, descrivendo le caratteristiche e i principali fenomeni fisici delle due grandezze.

Nel quarto capitolo è stata descritta la strumentazione utilizzata a bordo veicolo durante le varie sperimentazioni e i software utilizzati per l'estrapolazione ed elaborazione dei dati.

Sono stati descritti, nel quinto capitolo, i sistemi di trasporto oggetto delle sperimentazioni, ovvero gli autobus e i treni di Ferrovie della Calabria.

Nel sesto capitolo sono state descritte le analisi svolte per l'identificazione delle soglie utili alla determinazione dell'indice di comfort a bordo, i test-sites di riferimento per i due sistemi di trasporto oggetto di studio ed infine l'indagine a campione svolta sugli stessi sistemi di trasporto utili a definire, mediante una scheda di rilevazione, l'indice di comfort CI. Nello stesso capitolo, è stato affrontato il problema del grado di affollamento a bordo

utile a capire, in fase di elaborazione, se esistesse una stretta correlazione tra comfort vibrazione/acustico e affollamento a bordo.

Nel settimo, ed ultimo, capitolo, sono stati analizzati i risultati ottenuti nella fase sperimentale a bordo veicolo, è stato calcolato il valore del Comfort Index CI dei mezzi di trasporto oggetto di studio ed è stato mostrato l'utilizzo del GIS per l'elaborazione grafica dei dati. Infine, è stato confrontato il valore del Comfort Index (CI) misurato, sia per i treni sia per gli autobus, con un Comfort Perceived (CP), ovvero un comfort percepito dall'utente, determinato dal questionario proposto a bordo durante le sperimentazioni.

La ricerca ha mostrato ottimi risultati in tal senso, infatti, lo scopo iniziale è stato quello di permettere all'utente di entrare nel processo di referenziazione dei sistemi di trasporto collettivo, consentendogli di poter assegnare un voto al comfort percepito a bordo. Tale comfort percepito è stato usato per confrontarlo con l'indice di comfort proposto nel presente lavoro di tesi. I risultati ottenuti mostrano, infatti, come il Comfort Index (CI) rappresenti perfettamente l'idea di comfort che l'utente intende percepire a bordo veicolo. La ricerca ha quindi portato ad una nuova idea di indicatori di qualità del servizio, infatti, partendo da misure oggettive, quali il rumore e le accelerazioni misurate a bordo veicolo, si è potuto determinare con precisione il comfort acustico e vibrazionale a bordo dei mezzi di trasporto considerato. L'indice mostra come il comfort acustico e vibrazionale non è strettamente correlato all'affollamento a bordo del veicolo, tutt'altro, nel caso dei treni, il mezzo con il maggiore grado di affollamento risulta essere il treno più confortevole, sia dal calcolo del CI, sia secondo le opinioni degli utenti intervistati.

Come ampiamente detto, il rumore e le vibrazioni possono causare numerosi danni all'organismo umano se quest'ultimo viene esposto in modo prolungato a valori elevati di queste due grandezze. Per tale motivo, monitorare in modo costante i valori di rumore e vibrazione a bordo dei mezzi di trasporto pubblico risulta essere di fondamentale importanza sia per i fornitori dei servizi collettivi sia per gli enti interessati dal servizio stesso (Comuni, Province, etc.). Migliorare, infatti, la qualità del servizio di trasporto, secondo gli utenti significa anche ridurre il rumore a bordo, così come le case automobilistiche fanno per il trasporto privato, e garantire un maggior comfort con minori accelerazioni/vibrazioni trasmesse al corpo umano. La presenza di valori di picco di rumore e/o accelerazioni, infatti, dovuti a situazioni di stress improvviso quali urti, buche, etc., possono incidere ancor più negativamente sulla salute umana. A ciò si aggiungano, poi, le condizioni al contorno quali una temperatura bassa, un'alta umidità relativa oppure una forte ventilazione, in associazione ad una situazione di stress a cui potrebbe essere soggetto l'individuo in esame.

In conclusione, l'indice proposto vuole essere un primo passo per il miglioramento acustico e vibrazionale dei mezzi di trasporto pubblico, garantendo, di fatto, un'aumento della domanda di trasporto collettivo ed una relativa diminuzione dell'uso del veicolo privato.

Bibliografia

- Agenzia Europea dell'Ambiente. (2015). *L'ambiente in Europa: stato e prospettive nel 2015 - Relazione di sintesi*. Copenhagen: AEA.
- Alves Filho, J., Lenzi, A., & Zannin, P. (2004). Effects of traffic composition on road noise: a case study. *Transportation Research Part D Transport and Environment*, 75-80.
- Astarita, V., Festa, D., Mongelli, D., & Tassitani, A. (2014). New methodology for the identification of road surface anomalies. *2014 IEEE International Conference* (p. 149-154). IEEE.
- Barone, V., Crocco, F., & Mongelli, D. (2011). A mathematical model for traffic noise prediction in an urban area. *Recent Researches in Mechanics*, 405-410.
- Barone, V., Crocco, F., Mongelli, D., & Aloe, A. (2012). Mathematical modelling of road traffic noise in urban centers. *Recent Researches in Environmental and Geological Sciences*, 228-233.
- Barone, V., Crocco, F., Mongelli, D., & Aloe, A. (2012a). Traffic noise forecasting tools: a mathematical model. *Recent Researches in Environmental and Geological Sciences*, 234-239.
- Bedewi, P., & Bedewi, N. (1996). Modelling of occupant biomechanics with emphasis on the analysis of lower extremity injuries. *International Journal of Crashworthiness*, 50-72.
- Beirão, G., & Sarsfield-Cabral, J. (2006). Enhancing service quality in public transport systems. *Urban Transport XXII: Urban Transport and the Environment in the 21st Century - WIT Transactions on the built environment*, 89.
- Beirão, G., & Sarsfield-Cabral, J. (2007). Understanding attitudes towards public transport and private car: a qualitative study. *Transport Policy*, 14(6), 478-489.
- Bertini, R., & El-Geneidy, A. (2003). Using archived data to generate transit performance measures. *Proceedings of the 82th TRB Annual Meeting*. Washington D. C. Tratto il giorno January 12-16, 2003
- Black, M., & Rao, M. (2004). Evaluation and reduction of steering column vibration of a rear wheel drive sedan. *International Journal of Vehicle noise and vibration* . Vol. 1, 122-141.
- Broch, J. (1984). *Mechanical Vibration and Shock Measurement*. Nearum - Denmark: Bruel&Kjaer.
- Calixto, A., Diniz, F., & Zannin, P. (2003). The statistical modeling of road traffic noise in an urban setting. *Cities* 20, 23-29.

- Canale, S., & Ventura, F. (1986). Rumore da traffico e progettazione stradale: metodologia di previsione e possibilità di attenuazione. *Autostrade*.
- Cirillo, E. (1997). *Acustica Applicata*. Milano: McGraw-Hill.
- Commissione Europea. (2010). *Una strategia per una crescita intelligente, sostenibile e inclusiva*. Bruxelles: Commissione Europea.
- Coni, M. (1994). Previsione dei livelli di rumore e vibrazioni indotti all'interno di un veicolo dalla pavimentazione stradale. *Le Strade*.
- Coni, M., Silanos, G., & Annunziata, F. (2000). Le vibrazioni indotte dalle irregolarità superficiali del profilo stradale. *Traffico e Ambiente*. Trento.
- CTIPLL-INAIL. (2014). www.portaleagentifisici.it. Tratto da Portale Agenti Fisici: http://www.portaleagentifisici.it/DOCUMENTI/FAQ_AFisici_web.pdf?lg=IT
- Daruis, D., Nor, M., Deros, B., & Fouladi, M. (2008). Whole-body vibration and sound quality of Malaysian cars. *9th Asia Pacific Industrial Engineering & Management Systems Conference*. Indonesia.
- de Oliveira, L., Janssens, K., Gajdatsy, P., Van der Auweraer, H., Varoto, P., Sas, P., & Desmet, W. (2009). Active sound quality control of engine induced cavity noise. *Mechanical Systems and Signal Processing - Vol. 23*, 476-488.
- Duhring, M., Jensen, J., & Sigmund, O. (2008). Acoustic design by topology optimization. *Journal of Sound and Vibration*, 557-575.
- Eboli, L., & Mazzulla, G. (2008a). An SP experiment for measuring service quality in public transport. *Transportation Planning and Technology*, 31(5), 509-523.
- Eboli, L., & Mazzulla, G. (2008b). Willingness to pay of public transport users for improvement in service quality. *European Transport*, 38, 107-118.
- Eboli, L., & Mazzulla, G. (2010). How to capture the passengers point of view on a transit service through rating and choice options. *Transport Review*, 30(4).
- El-Geneidy, A., Horning, J., & Krizek, K. (2007). *Using Archived ITS Data to Improve Transit Performance and Management*. Final Report, Minnesota Department of Transportation Research Services Section.
- European Environment Agency. (2014). *Noise in Europe 2014 - Report 10/2014*. Luxembourg: EEA.
- European Union. (2002, giugno 25). Direttiva 2002/49/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio. *Determinazione e gestione del rumore ambientale*.
- Farina, A. (2005). Appunti del Corso di Alta Formazione per Tecnici Competenti. *Propagazione in campo libero*. Università di Parma.

- Farina, A., & Pagliarini, G. (1985). Livello sonoro all'interno dell'abitacolo dei mezzi di trasporto in presenza di materiale fonoassorbente. *Atti del 3° Convegno Nazionale CNR - Progetto finalizzato Trasporti*. Taromina.
- Farina, A., Pagliarini, G., & Pompoli, R. (1988). Campo acustico generato all'interno dell'abitacolo dei mezzi di trasporto; Confronto tra tecniche numeriche e tecniche sperimentali su modelli in scala. *Atti del 3° Nazionale PTF - CNR*. Taormina.
- Ferrer, M., de Diego, A., Pinero, G., & Garcia-Bonito, J. (2003). Sound quality of low-frequency and car engine noises after active noise control. *Journal of Sound and Vibration - Vol. 265*, 663-679.
- Festa, D., Mongelli, D., Astarita, V., & Giorgi, P. (2013). First results of a new methodology for the identification of road surface anomalies. *2013 IEEE International Conference* (p. 192-197). IEEE.
- Friman, M. (2004). Implementing quality improvements in public transport. *Journal of Public Transportation*, 7(4), 49-65.
- Gattuso, D. (2001). *Trasporto collettivo urbano e metropolitano - Capitolo 6 "Introduzione alla tecnica dei trasporti e del traffico con elementi di economia dei trasporti"*. a cura di G.E. Cantarella, UTET.
- Gelmini, P. (1988). *La performance dei diversi sistemi di trasporto - Capitolo 3 in "Città, Trasporti e Ambiente"*. Etas Libri.
- Genell, A., & Vestfjall, D. (2007). Vibration can have both negative and positive effects on the perception of sound. *International Journal of Vehicle Noise and Vibration - Vol. 3*, 172-184.
- Genuit, K. (2004). The sound quality of vehicle interior noise: a challenge for the NVH-engineers. *International Journal of Vehicle noise and vibration - Vol.1*, p. 158-168.
- Gerola, L., & Mattevi, L. (1996). *Controllo della rumorosità da traffico veicolare. La misura, gli effetti, l'analisi dei dati per l'anno 1996 e i sistemi di contenimento*. Trento: Agenzia Provinciale per la Protezione dell'Ambiente.
- Griffin, M. (1990). *Handbook of human vibration*. London: Academic Press.
- Hanouf, Z., & Faris, W. (2009). Investigation into noise problems in vehicle structure using vibro-acoustic approach. *International Journal of Vehicle noise and vibration . Vol. 5*, 238-260.
- Harris, C. (1988). *Shock Vibration Handbook*. Milano: McGraw-Hill.
- Harris, C. (1993). *Manuale di controllo del rumore*. Milano: Tecniche Nuove.
- Hensher, D., Stopper, P., & Bullock, P. (2003). Service quality-developing a service quality index in the provision of commercial bus contracts. *Transportation Research part A*, 37, 499-517.

- Iseki, H., & Taylor, B. (2008). Style versus service? an analysis of user perceptions of transit stops and stations in Los Angeles. *Proceeding of the 87th Annual Meeting of the TRB*. Washington D.C. Tratto il giorno January 13-17, 2008
- ISO 131. (1979). ISO 131. *Acoustics - Expression of physical and subjective magnitudes of sound or noise in air*.
- ISO 354. (s.d.). ISO 354. *Acoustics -- Measurement of sound absorption in a reverberation room*.
- ISO 3745. (2012). ISO 3745. *Acoustics -- Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure -- Precision methods for anechoic rooms and hemi-anechoic rooms*.
- ISO 4866. (2010). ISO 4866. *Mechanical vibration and shock - Vibration of fixed structures - Guidelines for the measurement of vibrations and evaluation of their effects on structures*.
- ISTAT. (2015). *Noi Italia: 100 statistiche per capire il Paese in cui viviamo*. Roma: Istat.
- Joewono, T., & Kubota, H. (2007). User perception of private paratransit operation in Indonesia. *Journal of Public Transportation*, 10(4), 99-118.
- Kindt, P., Sas, P., & Desmet, W. (2009). Measurement and analysis of rolling tire vibrations. *Optics and Lasers in Engineering - Vol. 47*, 443-453.
- King, A. (1984, Maggio). A review of Biomechanical Models - Vol. 106.
- Koenig, J. G. (1980). Indicators of urban accessibility Theory and application. *Trasportation*, 9, 145-172.
- Legambiente. (2016). *Mal'aria di città*. Legambiente.
- Leite, R., Paul, S., & Gerges, S. (2008). A sound quality-based investigation of the HVAC system noise of an automobile model. *Applied Acoustics - Vol.70*, 636-645.
- Liberatore, M. (1994). *Sistemi di trasporto di massa e tecnologie innovative*. Masson.
- Lin, C., Chen, L., & Lee, W. (2010). *A comfort measuring system for public transportation systems using participatory phone sensing*. Sinica - Taiwan: ACM PhoneSense.
- Mattevi, L. (2014). *inquinamentoacustico*. Tratto da www.inquinamentoacustico.it: http://www.inquinamentoacustico.it/livelli_ambienti_chiusi.htm
- Murray, A., & Wu, X. (2003). Accessibility tradeoffs in public transit planning. *Journal of Geographical Systems*, 5(1), 93-107.
- Nahvi, H., Fouladi, M., & Nor, M. (2009). Evaluation of Whole-body vibration and ride comfort in a passenger car. *International Journal of Acoustics and Vibration - Vol. 14*, 143-149.

- Nakanishi, Y. (1997). Bus performance indicators. On-time performance and service regularity. *Transportation Research Record*, 1571, 3-13.
- Nathanail, E. (2008). Measuring the quality of service for passengers on the hellenic railways. *Transportation Resarch Part A*, 42, 48-66.
- Nophiah, Z., Junoh, A., Wan Muhamad, W., Kamal Ariffin Mohd Ihsan, A., Fouladi, M., & Nor, M. (2012). Linear Programming: Optimization of noise and vibration model in passenger car cabin. *International Journal of Soft Computing and Software Engineering - Vol.2*.
- Nor, M., Fouladi, M., Nahvi, H., & Ariffin, A. (2008). Index for vehicle acoustical comfort inside a passenger car. *Journal of Applied Acoustics - Vol. 69*, 343-353.
- Nurul-Habib, K., Kattan, L., & Islaam, T. (2009). Why do the people use transit? A model for explanation personal attitude towards transit service quality. *Proceedings of the 88th Annual Meeting of the TRB*. Washington D.C.
- O'Boy, D., & Dowling, A. (2009). Tire/road interaction noise-A 3D viscoelastic multilayer model of a tire belt. *Journal of sound and vibration* 322(4-5), 829-850.
- O'Boy, D., & Dowling, A. (2009a). Tyre/road interaction noise-Numerical noise prediction of a patterned tyre on a rough road surface. *Journal of Sound and Vibration* 323(1-2), 270-291.
- PAF. (2016). www.portaleagentifisici.it. Tratto da Portale Agenti Fisici.
- Pascali, M. (2012). *Acustica Ambiente Esterno*. Palermo: Grafill.
- Paz, E., Ferreira, A., & Zannin, P. (2005). Comparative study of the perception of urban noise. *Journal of Public Health*, 467-472.
- Prioni, P., & Hensher, D. (2000). Measuring service quality in scheduled bus services. *Journal of Public Transportation*, 3(2), 51-74.
- Qatu, M., Abdelhamid, M., Peng, J., & Sheng, G. (2009). Overview of automotive noise and vibration. *International Journal of Vehicle noise and vibration* . Vol. 5, 1-35.
- Rao, S. S. (2011). *Mechanical Vibrations*. Saddle River (NJ): Prentice Hall.
- Shin, S., Ih, J., Hashimoto, T., & Hatano, S. (2009). Sound quality evaluation of the booming sensation for passenger cars. *Applied Acoustics - Vol. 70*, 309-320.
- Silva, M., Ambrosio, J., & Pereira, M. (1997). Biomechanical Model with Joint Resistance for Impact Simulation. *Multibody System Dynamics I*, p. 65-84.
- Solomon, K., Solomon, R., & Sillien, J. (1968). Passenger psychological dynamics: sources of information on urban transportation New York: American Society of Civil Engineers.

- Tassitani, A., Barone, V., & Mongelli, D. (2016). Vibrational comfort on board the vehicle: influence of speed bumps and comparison between different categories of vehicle. *Advances in Acoustics and Vibration - Vol. 2016*.
- Termolan. (2016). *www.inquinamentoacustico.it*. Tratto da Inquinamento Acustico: http://www.inquinamentoacustico.it/_download/nozioni%20acustica%20-%20termolan.pdf
- Tonti, E. (2005). Oscillazioni ad un grado di libertà. *Dispense del Corso di Meccanica Razionale*. Università di Trieste.
- Transportation Research Board TRB. (1999). *A handbook for measuring customer satisfaction and service quality*. Washington D.C.: TCRP Report 47 - National Academy Press.
- Transportation Research Board TRB. (2003b). *Transit capacity and quality of service manual*. Washington D.C.: TCRP Report 100 - National Academy Press.
- Transportation Research Board TRB. (2003a). *A guidebook for developing a transit performance-measurement system*. Washington D.C.: TCRP Report 88 - National Academy Press.
- Turnquist, M., & Blume, S. (1980). Evaluating potential effectiveness of headway control strategies for transit systems. *Transportation Research Record*, 746, 25-29.
- Tyrinopoulos, Y., & Aifadopoulou, G. (2008). A complete methodology for the quality control of passenger services in the public transport business. *European Transport*, 38, 1-16.
- UNI 9916. (2004). UNI 9916. *Criteri di misura e valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici*.
- UNI EN 13816. (2002). *Trasporto pubblico di passeggeri: Definizione, obiettivi e misurazione della qualità del servizio*. Ente Nazionale di Normazione.
- UNI ISO 2631. (2014). UNI ISO 2631. *Vibrazioni meccaniche e urti - Valutazione dell'esposizione dell'uomo alle vibrazioni trasmesse al corpo intero - Parte 1: Requisiti generali*.
- Velmurugan, P., Kumaraswamidhas, L., & Sankaranarayanan, K. (2012). Optimization of whole body vibration analysis for suspended cabin tractor semi trailer. *International Journal of Vehicle noise and Vibration - Vol. 8*, 152-165.
- Vuchic, V. (1981,1992). *Urban public transportation: Systems and technology*. Urban Public Transportation.
- Wachs, M. (1976). Consumer attitudes towards transit service an interpretive review. *42(1)*, 96-104.
- Wallin Rex, J., & Wright, P. (1974). Factors which influence modal choice. *Traffic Quarterly*, 28, 271-289.

- Wang, Y. (2009). Sound quality estimation for non-stationary vehicle noises based on discrete wavelet transform. *Journal of Sound and Vibration* - Vol. 324, 1124-1140.
- Wang, Y., Lee, C., Kim, D., & Xu, Y. (2007). Sound-quality prediction for non-stationary vehicle interior noise based on wavelet pre-processing neural network model. *Journal of Sound and Vibration* - Vol. 299, 933-947.
- Yildirim, S., & Eski, I. (2008). Sound quality analysis of cars using hybrid neural networks. *Simulation Modelling Practice and Theory* - Vol. 16, 410-418.