

“Progetto LEOPOLDO” Relazione Finale - FASE II 2012

**Risultati e schede riassuntive delle misure effettuate
nel periodo Giugno 2008 – Settembre 2012
sui siti di Arezzo, Firenze, Lucca, Pisa, Pistoia, Massa**

Area Vasta Costa- Settore Agenti Fisici



Progetto “LEOPOLDO”

“predisposizione delle Linee Guida per la progettazione ed il controllo delle pavimentazioni stradali per la viabilità ordinaria”

CONVENZIONE UNIVERSITA’ DI PISA DIP. INGEGNERIA CIVILE – ARPAT

Responsabile della Convenzione

Gaetano Licitra

Rapporto a cura di:

Mauro Cerchiai, Luca Teti

Hanno collaborato all'effettuazione delle indagini e all'elaborazione dei dati.

Personale ARPAT:

Mauro Cerchiai, Duccio Simonetti, Fabrizio Balsini, Daniele Canarini

Personale contrattista non ARPAT:

Luca Alfinito, Luca Teti, Elena Ascari, Michelangelo Coca, Riccardo Zei, Marco Chetoni

Hanno collaborato nell'ambito del proprio lavoro di tesi:

Lorenzo Magni, Esther Ciarrocchi, Alessandro Del Pizzo, Francesco Bianco

CONVENZIONE UNIVERSITA' DI PISA

DIP. INGEGNERIA CIVILE – ARPAT

“Progetto LEOPOLDO”

Relazione Finale - FASE II

**Risultati e schede riassuntive delle misure effettuate
nel periodo Giugno 2008 – Settembre 2012
sui siti di Arezzo, Firenze, Lucca, Pisa, Pistoia, Massa**

INDICE

1.	Introduzione	4
2.	Materiali e metodi	5
2.1	Breve introduzione normativa.....	5
2.2	Obiettivi inerenti la fase II	7
2.3	Metodologia	7
2.4	CPX – ISO/CD 11819-2	8
2.5	SPB-UNI EN ISO 11819-1 (come modificato dal protocollo HARMONOISE).....	11
2.7	ADRIENNE – UNI ISO 13472-1	16
3.	Risultati	18
3.1	Lucca.....	18
3.1.1	Risultati CPX	18
3.1.2	Risultati SPB	23
3.1.3	Risultati ADRIENNE.....	27
3.2	Firenze.....	30
3.2.1	Risultati CPX	30
3.2.2	Risultati SPB	36
3.2.3	Risultati ADRIENNE.....	41
3.3	Arezzo	43
3.3.1	Risultati CPX	43
3.3.2	Risultati SPB	49
3.3.3	Risultati ADRIENNE.....	54
3.4	Pistoia.....	57
3.4.1	Risultati CPX	57
3.4.2	Risultati SPB	62
3.4.3	Risultati ADRIENNE.....	66
3.5	Pisa.....	69
3.5.1	Risultati CPX	70
3.5.2	Risultati SPB	74
3.5.3	Risultati ADRIENNE.....	77
3.6	Massa	78
3.6.1	Risultati CPX	78

3.6.2	Risultati SPB	84
3.6.3	Risultati ADRIENNE.....	86
4.	Conclusioni.	89
	Ringraziamenti e collaboratori	95

1. Introduzione

Il Progetto “Leopoldo”, finalizzato alla “predisposizione delle Linee Guida per la progettazione ed il controllo delle pavimentazioni stradali per la viabilità ordinaria”, è volto alla caratterizzazione prestazionale dei materiali di impiego nelle infrastrutture stradali, nonché alla realizzazione e verifica dei modelli di propagazione dei disturbi sonori e vibrazionali derivanti dall’azione del traffico veicolare.

Tale progetto si inserisce nel quadro della politica ambientale contro l’inquinamento acustico della Regione Toscana ed in generale di tutti gli stati membri della comunità Europea, in accordo con le linee guida della Direttiva 2002/49/CE¹, e vede la partecipazione della Provincia di Lucca, in qualità di capofila del raggruppamento costituito dalla Regione Toscana e dalle dieci Province, del Dipartimento di Ingegneria Civile dell’Università di Pisa e dell’Agenzia Regionale per la Protezione dell’Ambiente (ARPAT): quest’ultima fornisce il proprio supporto per quanto attiene le misure e le elaborazioni finalizzate alla caratterizzazione delle prestazioni acustiche e vibrazionali dell’infrastruttura, nonché alla modellazione della propagazione delle emissioni nell’ambiente, con l’obiettivo finale di studiare misure di mitigazione e contenimento del disturbo sonoro derivante da traffico veicolare, mediante caratterizzazione di siti sensibili della viabilità ordinaria.

Nel mese di giugno 2008 è iniziata operativamente la II fase del progetto che prevede la stesa di pavimentazioni speciali a basso impatto ambientale (acustico e vibrazionale) su sei siti scelti dalle province partecipanti (nelle province di Lucca, Massa, Pistoia, Firenze, Arezzo e Pisa). In particolare nel periodo Giugno-Luglio 2008 sono stati stesi tre dei sei siti previsti: quello sulla SRT 439, in località Maggiano nel Comune di Lucca (LU), sulla SRT 71, in loc. Marcena - Arezzo (AR) e sulla SRT 302 nel Comune di Borgo S Lorenzo (FI). I restanti tre siti sono stati stesi nei mesi di maggio-ottobre 2010. Sui primi tre siti a partire dal mese di giugno 2008 e sugli altri tre a partire dal mese di giugno 2010 sono state condotte una serie di verifiche delle prestazioni sia strutturali che acustiche. Nel seguito verranno riportati i risultati di queste indagini, che forniscono preziose informazioni per la valutazione dell’efficienza acustica nel tempo, come richiesto dal protocollo operativo sviluppato in seno al progetto.

¹ D. Lgs n. 194 del 19 agosto 2005; *Attuazione della direttiva 2002/49/CE relativa alla determinazione e alla gestione del rumore ambientale*; G.U.R.I. serie generale n. 222 del 23 settembre 2005

2. Materiali e metodi

2.1 Breve introduzione normativa

La progressiva sensibilizzazione riguardo ai problemi derivanti dall'inquinamento acustico a cui abbiamo assistito in questi ultimi decenni è stata recepita e tradotta anche a livello normativo. Nell'ambito della politica comunitaria europea è stata emessa a tal proposito la Direttiva 2002/49/CE, relativa alla "determinazione e gestione del rumore ambientale" che, riconoscendo tale problema come uno dei maggiori in Europa dal punto di vista ambientale, fornisce le linee guida ai fini di un approccio armonizzato degli Stati membri al rumore.

Tale direttiva si propone di definire, secondo l'art. 1, "un approccio comune volto ad evitare, secondo le rispettive priorità, gli effetti nocivi, compreso il fastidio, dell'esposizione al rumore ambientale"; in tale direttiva vengono delineati i fondamenti per la realizzazione di una mappatura acustica a livello continentale, introducendo peraltro un nuovo indicatore (L_{DEN}), basato sui livelli equivalenti misurati nei tre periodi di riferimento (Day, Evening, Night), per tenere conto della differente sensibilità della popolazione al disturbo acustico nelle ore serali e notturne. Oltre a tale novità nella ponderazione, la differenza sostanziale rispetto al precedente approccio normativo italiano è dovuta alla richiesta di estendere la valutazione del fenomeno ad un anno, rappresentativo sia delle condizioni delle sorgenti che della propagazione.

Per quanto riguarda il panorama normativo italiano circa il rumore il documento fondamentale è rappresentato dalla "Legge quadro sull'inquinamento acustico" 26/10/95, n. 447; escludendo l'antecedente D.P.C.M. 01/03/91 "Limiti massimi di esposizione al rumore negli ambienti abitativi e nell'ambiente esterno" questa è la prima legge che disciplina in maniera generale, compiuta e organica il problema del controllo e della mitigazione dell'inquinamento acustico, ed a questa fa riferimento tutta la successiva normativa emanata in materia. La Direttiva 2002/49/CE è stata definitivamente trasposta nell'ordinamento italiano con il Decreto Legislativo 19/08/05 n. 194, che sancisce l'obbligo di riferirsi a L_{DEN} come indicatore da usare per la trasmissione dei dati di inquinamento da rumore alla Commissione Europea.

Per completare il quadro nazionale restano da citare il D.P.C.M. 14/11/97 "Determinazione dei valori limite delle sorgenti sonore", che fissa i limiti di rumorosità delle sorgenti, il D.M.A. 16/03/98 "Tecniche di rilevamento e di misurazione dell'inquinamento acustico", il D.M.A. 29/11/2000 "Criteri per la predisposizione, da parte delle società e degli enti gestori dei servizi

pubblici di trasporto o delle relative infrastrutture, dei piani degli interventi di contenimento e abbattimento del rumore”, ove nell’art. 5 si ribadisce la priorità di intervenire direttamente sulla sorgente rispetto ad altre modalità di mitigazione, in linea con gli scopi programmatici del progetto “Leopoldo”.

Per quanto attiene al problema specifico della rumorosità in campo delle infrastrutture viarie stradali citiamo il D.P.R. 31/03/04 n. 142 “Disposizioni per il contenimento e la prevenzione dell’inquinamento acustico derivante dal traffico veicolare”, in cui vengono tra l’altro definite le fasce territoriali di pertinenza acustica e i valori limite di immissione delle infrastrutture stradali sia esistenti che di nuova realizzazione. Il decreto prevede inoltre l’attuazione di interventi mirati al rispetto dei suddetti limiti “con l’adozione delle migliori tecnologie disponibili”, nonché con la realizzazione di sistemi di monitoraggio per il rilevamento dell’inquinamento acustico prodotto nell’esercizio delle infrastrutture in questione, in conformità delle direttive impartite dal Ministero dell’Ambiente e della Tutela del Territorio, ai sensi del D.L. n. 285 del 1992.

A conclusione della panoramica nazionale citiamo il D.M.A. 01/04/04, “Linee guida per l’utilizzo dei sistemi innovativi nelle valutazioni di impatto ambientale”, in cui vengono fornite alcune prescrizioni relativamente all’introduzione delle suddette tecniche per l’abbattimento e la mitigazione dell’inquinamento acustico: in particolare è previsto il supporto dell’APAT (Agenzia per la Protezione dell’Ambiente e per i servizi Tecnici) al fine di verificare la validità dei sistemi innovativi proposti. La scheda tecnica MR-003 del decreto è dedicata all’”Inquinamento acustico delle infrastrutture di trasporto” e, attraverso i riferimenti ivi citati, costituisce un “approccio integrato e completo all’analisi degli impatti acustici, dei criteri di progettazione, della valutazione, esecuzione del contenimento del rumore. Gli obiettivi della ricerca alla base del progetto “Leopoldo”, volta a fornire linee guida per la progettazione integrata delle infrastrutture stradali tipiche della viabilità regionale ottimizzando gli aspetti della sicurezza anche in relazione alle caratteristiche prestazionali acustiche, trovano dunque nella normativa attuale piena giustificazione e supporto.

È poi affidato alle singole regioni il compito di completare la normativa generale, con l’obbligo, naturalmente, di conformarsi ad essa secondo i principi della gerarchia verticale, contesto nel quale si inserisce ad esempio la L.R. Toscana n. 89/98.

2.2 Obiettivi inerenti la fase II

Il progetto “LEOPOLDO” ha previsto un’articolazione delle attività in varie fasi, di cui alcune cronologicamente sovrapponibili. Le attività oggetto della presente relazione, rientrano in quanto previsto all’Art. 3 della Convenzione ARPAT- Dipartimento di Ingegneria Civile dell’Università di Pisa relativamente alla fase II. In particolare questa fase ha previsto il monitoraggio nel tempo ai successivi tre anni dalla stesa delle pavimentazioni test, con periodiche serie di misure secondo i protocolli definiti durante la prima fase, relativamente alle caratteristiche prestazionali delle pavimentazioni di nuova realizzazione al fine di verificare ad intervalli definiti il perdurare delle proprietà richieste da capitolato per i manti stradali sui siti di studio così individuati:

SITI DI STUDIO			
PROVINCIA	DENOMINAZIONE DELLA STRADA	PROGRESSIVA	LOCALITÀ
AREZZO	SRT 71 Umbro Casentinese	dal km 157+044 al km 156+866	Marcena
FIRENZE	SRT 302 Faentina	dal km 27+304 al km 27+548	Lutiano vecchio
LUCCA	SRT 439 Sarzanese Val d’Era	dal km 21+986 al km 21+786	Maggiano
MASSA CARRARA	SRT 445 della Garfagnana	dal km 63+345 al km 63+551	Codiponte
PISA	SRT 439 Sarzanese Val d’Era	dal km 79+208 al km 79+408	La Sterza
PISTOIA	SRT 66 Pistoiese	dal km 53+908 al km 54+054	Le Panche

Tabella 1. - Elenco e localizzazione dei sei siti di studio. In blu i siti realizzati nel 2008 ed in rosso quelli nel 2010

I risultati qui presentati sono relativi ai sei siti previsti dal progetto (Tabella 1), di cui tre realizzati nel 2008 (Arezzo, Firenze e Lucca) e tre realizzati nel 2010 (Massa Carrara, Pisa e Pistoia).

2.3 Metodologia

Nel presente paragrafo vengono descritte le metodologie operative utilizzate per le tecniche di misura sperimentali previste nell’ambito del progetto “Leopoldo”, già inserite e descritte nel protocollo operativo sviluppato all’interno del progetto. In particolare sono state utilizzate la tecnica Pass-By Statistico (ISO 11819-1²), il metodo Adrienne (ISO 13472-1³), la tecnica Close Proximity (CPX – ISO/CD 11819-2⁴).

² UNI EN ISO 11819-1:2004; *Acustica-Misurazione dell’influenza delle superfici stradali sul rumore da traffico-Metodo statistico applicato al traffico passante*

Queste tecniche di caratterizzazione delle proprietà acustiche delle pavimentazioni interessano misurazioni *in situ* e presentano caratteristiche non invasive, in quanto non richiedono alterazioni nelle condizioni di esercizio dell'infrastruttura. I vantaggi associati a questo fatto sono dunque piuttosto evidenti: il campione non deve essere sottratto alla sua sede naturale, dunque la misura delle proprietà acustiche viene effettuata nelle reali condizioni di installazione o esercizio, senza essere affetta da contaminazioni derivanti da condizioni al contorno differenti. Nelle misure in laboratorio, infatti, non sarà in generale possibile riprodurre tutti quei fenomeni (riflessioni spurie, assorbimenti di altre superfici, condizioni al contorno) presenti nel luogo di misura e che quindi possono influire sui risultati finali.

In generale tutte le tecniche di misura presentate sono schematizzabili attraverso un semplice sistema *sorgente-propagazione-ricevitore* in cui, pur nella diversità dei vari approcci sperimentali, lo scopo finale è quello di rilevare le caratteristiche acustiche della pavimentazione sia dal punto di vista della generazione (mediante interazione con lo pneumatico) sia da quello della propagazione dello stesso (studiando gli effetti di "ground attenuation" indotti dalla superficie).

2.4 CPX – ISO/CD 11819-2

Tramite la tecnica CPX è possibile stimare il rumore dell'interazione pneumatico/pavimentazione in prossimità del punto di generazione. La tecnica utilizzata nell'ambito del progetto è già stata spiegata nella precedente documentazione di questo progetto ed è basata sull'uso di un'automobile con una ruota strumentata con due microfoni (basata su ^{5,6}). Tale veicolo percorre un numero di volte sufficiente (dipendente dalla minima e massima velocità possibili sul tratto di strada, tipicamente con passo di 5 km/h) la pavimentazione a varie velocità costanti durante ciascun tragitto. Durante ciascun tragitto vengono registrati i livelli di rumore alla ruota e simultaneamente con un encoder posizionata ad un'altra ruota viene registrata la velocità istantanea del veicolo.

Un fit col metodo del minimo chi quadrato produce una curva descrivente l'andamento dei livelli

³ UNI ISO 13472-1:2004; *Acustica - Misurazione in situ del coefficiente di assorbimento acustico di superfici stradali - Metodo della superficie estesa.*

⁴ ISO/CD 11819-2:2000; *Acoustics — Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise — Part 2: The close-proximity method.*

⁵ F. Anfosso-Lédée; *The development of a new tire-road noise measurement device in France*; Atti di SURF2004 -5th Symposium on Pavement Surface Characteristics for Roads and Airports; Toronto, Canada; 6-10 giugno 2004

⁶ M.S. Roovers; *Round-Robin Test for Measurements Devices on Road Acoustics*; Progetto EU SILVIA; Technical report SILVIA- M+P-009-03-WP2-230605; 23/06/2005

col variare della velocità, per ognuna delle sezioni predefinite in cui è suddivisa la tratta di pavimentazione oggetto di studio. In questo modo è possibile valutare anche la uniformità acustica spaziale della stesa, studiando l'andamento dei livelli CPX nello spazio, per ogni velocità prefissata.

Il calcolo risulta statisticamente indipendente dalle reali condizioni di guida in cui è stato condotto la misurazione, in quanto con questa metodica non è più strettamente necessario andare a velocità perfettamente costante sull'intero tratto oggetto di analisi, né effettuare delle correzioni dei risultati se tale velocità non è stata perfettamente costante.

La metodica utilizzata produce un livello CPX ogni 5.75 m lineari di strada (sezione, corrispondente a 3 giri ruota). Questa distanza è giustificata dal fatto che rappresenta il minimo spazio necessario per avere una buona descrizione statistica del fenomeno con incertezze accettabili a tutte le frequenze. Per ogni sezione viene inoltre restituito lo spettro medio di rumore emesso dal contatto pneumatico/pavimentazione.

Per ogni sito, tipicamente, sono state analizzate le corsie in entrambe le direzioni di marcia. Per poter effettuare una migliore valutazione delle prestazioni acustiche della pavimentazione speciale è stato inoltre scelto un tratto di strada prospiciente il tratto sperimentale che avesse una pavimentazione ad usura standard di stesa molto anteriore alla stesa sperimentale. Inoltre tale usura (di riferimento) doveva essere anche compatibile con la preesistente pavimentazione ante-operam. Anche su questo tratto è stata effettuata una misura CPX su entrambe le direzioni di marcia. Questa scelta è stata necessaria in quanto ogni misura acustica (e quindi anche la misura CPX) è influenzata fortemente dalle condizioni di misura (soprattutto umidità e temperatura, molto meno il vento, poiché la misura CPX ne è, di fatto, immune), ma l'uso di una pavimentazione di riferimento in prossimità di quella speciale ed analoga alla pavimentazione ante-operam permette di effettuare un confronto diretto (quindi nelle stesse precise condizioni meteo) e non influenzato dalla differenza di condizioni presenti all'epoca della misura ante-operam (stesso discorso vale anche per la misura SPB, sotto descritta, ma in questo caso non è possibile ricorrere a correzioni dirette).

Per ogni sito, sessione di misura, tratta di pavimentazione e direzione di marcia così analizzata è stata prodotta una scheda riassuntiva che riporta i risultati ottenuti. In allegato vengono fornite tali schede riassuntive. Nel dettaglio, in tali schede sono riportate:

1. Una sintetica descrizione del sito, della sua localizzazione, della strada e della pavimentazione su essa stesa;
2. Informazioni relative alle condizioni di misura: strumentazione utilizzata, data del test, numero di segmenti (sezioni di lunghezza 5.75 m) di cui è composta la tratta analizzata, limite di

velocità prevalente sul tratto, temperatura, percentuale di acqua presente in pavimentazione, velocità del vento e calibrazione dei microfoni;

3. I valori di Close-Proximity Sound Index for traffic of light vehicles (indice CPX per veicoli leggeri), alle tre velocità di riferimento (50, 80 e 110 km/h), con le relative incertezze di tipo A e di tipo B. I valori sono valori medi sull'intero tratto oggetto di studio. L'incertezza di tipo A è ottenuta come composizione (ovvero somma in quadratura) della variabilità spaziale (ovvero fra sezioni diverse) con la variabilità media in ciascuna sezione. Occorre osservare che il valore dell'indice CPX relativo alla velocità di 110 km/h è ottenuto per estrapolazione dai dati in quanto sulle strade del progetto non era "tecnicamente" possibile andare a tale velocità;
4. I valori di Close-Proximity Sound Level (indice L_{CPX} per veicoli leggeri), alle tre velocità di riferimento (50, 80 e 110 km/h), con le relative incertezze di tipo A e di tipo B. Tale indice, parimenti all'indice CPX sopra esposto è una misura del livello di emissione a banda larga, ricostruito come somma energetica dei livelli di banda di terzi d'ottava nel range 315 Hz e 8000 Hz. I valori sono valori medi sull'intero tratto oggetto di studio. L'incertezza di tipo A è ottenuta come composizione (ovvero somma in quadratura) della variabilità spaziale (ovvero fra sezioni diverse) con la variabilità media in ciascuna sezione. Occorre osservare che il valore dell'indice CPX relativo alla velocità di 110 km/h è ottenuto per estrapolazione dai dati in quanto sulle strade del progetto non era "tecnicamente" possibile andare a tale velocità;
5. Lo spettro non normalizzato alle velocità di 50 e 80 km/h (è stata omessa in questo e nei successivi risultati la velocità di 110 km/h in quanto non pertinente al tipo di strada oggetto del progetto LEOPOLDO), nell'intervallo di frequenze compreso fra 315 e 4kHz e il relativo livello complessivo pesato A. Tali valori sono mediati su tutte le sezioni che compongono la tratta, come già visto per i livelli dell'indice CPX. Analogamente a questo l'incertezza indicata rappresenta la variabilità complessiva del livello spettrale, ottenuta come somma quadratica della variabilità spaziale con la variabilità media in ciascuna sezione. Quindi, riassumendo, sia lo spettro riportato che gli indici CPXL sono valori medi relativi all'intera tratta oggetto di analisi;
6. Una tabella riportante per le due velocità principali il valore dell'indice CPXL per ognuna delle sezioni costituenti l'intera tratta oggetto di studio. Questo è accompagnato dalla relativa incertezza di tipo A (Δ CPXL). In questo caso il valore riportato corrisponde all'intervallo di confidenza del 95% (ovvero quell'intervallo che comprende almeno il 95% dei livelli misurati all'interno della sezione);

7. Un grafico riportante lo spettro medio non normalizzato e le relative incertezze di tipo A descritti al punto 5, alle due velocità di riferimento di 50 e 80 km/h;
8. Un grafico riportante l'andamento nello spazio degli indici CPXL per sezione. In questo grafico sono riportati: per ciascuna sezione sia la distanza dall'inizio del tratto che il livello CPXL corrispondente che la sua incertezza sopra descritti, sovrapposti vi sono il livello medio dell'intero tratta (μ) e la sua incertezza di tipo A (σ , denominata deviazione spaziale standard), descritti al punto 3, per la relativa velocità. Infine è riportata la barra di errore associata all'incertezza di tipo B, comune a tutti i valori presenti nel grafico;
9. Foto della pavimentazione analizzata con scala graduata o oggetto di riferimento;
10. Planimetria del sito contenente la tratta analizzata con evidenziata la tratta stessa.

2.5 SPB-UNI EN ISO 11819-1 (come modificato dal protocollo HARMONOISE)

Questa tecnica è basata sulla misurazione dell'energia acustica associata al passaggio di un veicolo effettuata a bordo strada ad una distanza prefissata (nel nostro caso a 7.5 m dal centro della corsia di marcia) con uno o più microfoni (nel nostro caso 2 posti ad un'altezza di 1.2 e 3 m dal piano della carreggiata stradale). Contemporaneamente viene acquisita la velocità e la tipologia del veicolo transitante di fronte alla postazione microfonica. Le due postazioni microfoniche tengono conto della diversa direttività dei veicoli circolanti e migliorano quindi la definizione della caratterizzazione acustica della sorgente stradale.

Dalla storia temporale dei livelli relativa ad ogni passaggio viene calcolato il livello sonoro di singolo evento (SEL) e questo viene correlato con la velocità del passaggio⁷. Dalla legge di correlazione così ricavata per ogni categoria di veicoli (per semplicità i veicoli vengono identificati con lo schema previsto dal protocollo HARMONOISE⁸, ma poi nelle correlazioni riaggregati secondo le categorie previste dalla norma tecnica ISO) si ricava il valore dell'indice SPB alle

⁷ Occorre notare che nella originale norma tecnica ISO SPB è richiesta l'acquisizione esclusivamente del livello massimo fast pesato A del passaggio e solo questo viene messo in correlazione con la velocità del passaggio. All'interno del progetto HARMONOISE ciò era stato criticato ed è stato considerato più corretto considerare la correlazione fra il SEL, direttamente proporzionale all'energia totale dell'evento, e la velocità del veicolo. L'evento viene identificato nello stesso modo proposta dalla norma ISO, ovvero la parte che supera di almeno 10 dB(A) il fondo.

⁸ HARMONOISE; *Harmonised Accurate and Reliable Methods for the EU Directive on the Assessment and Management Of Environmental Noise*; funded by the EC under the Information Society and Technology (IST) Programme – Contract n. IST-2000-28419; <http://www.imagine-project.org/>

velocità di riferimento previste.

Pur basandoci sulla metodica prevista dalla norma ISO che prevede una regressione del tipo $L_{veh} = A + B \cdot \log(v)$, ove L_{veh} rappresenta il livello medio per ogni veicolo alla velocità v , con la velocità espressa in km/h, nell'ambito del presente progetto si è deciso di procedere in modo diverso.

In analogia con quanto proposto dal progetto HARMONOISE si è utilizzata⁹ una regressione del tipo $L_{veh} = A + B \cdot \log(v/50)$, ove L_{veh} rappresenta invece il SEL medio di ogni veicolo appartenente alla categoria corrispondente. In questo caso però il parametro A ha il semplice ed immediato significato di SEL medio a 50 km/h per la categoria di veicoli. Questo permette di calcolare direttamente l'indice SPB alla velocità di 50 km/h (una delle tre previste dalla norma) senza ulteriori calcoli. Dal momento che l'incertezza è calcolata a partire dall'intervallo di confidenza al 95% associata ai parametri del fit (e quest'ultimo è funzione del rapporto fra la velocità e la velocità di riferimento), questa ridefinizione della legge permette di avere incertezze minori rispetto alla legge proposta dalla norma ISO (ove implicitamente la velocità di riferimento è 1 km/h).

Un altro problema che è stato affrontato riguarda la significatività delle regressioni ottenute. Occorre ricordare che originariamente questa tecnica è stata sviluppata per valutare la rumorosità dei veicoli transitanti su pavimentazioni test in condizione di misura perfette e ben controllate, stese su tratti sperimentali isolati da altre fonti di rumore e con singoli passaggi ben distinti e distinguibili, su tratti perfettamente piani di pavimentazione senza alcun tipo di ostacolo né di disomogeneità nella propagazione.

Ma questo non è quasi mai possibile in ambito reale: infatti in questo caso si devono monitorare dei passaggi di veicoli che avvengono su una strada comunque trafficata, con presenza di elementi disturbanti la propagazione acustica (cartelli stradali, guardrail, banchine, fossi, muretti, curve e dossi).

Per questo motivo occorre rivedere la tecnica in modo che sia possibile effettuare la misura anche su strade in reali condizioni di traffico, ove raramente il rapporto segnale rumore supera i 10 dB(A) richiesti in teoria dalla norma ISO. Quindi sia il rumore più elevato che le disomogeneità

⁹ H. Jonasson, U. Sandberg, G. van Blokland, J. Ejsmont, G. Watts, M. Luminari; *Source modelling of road vehicles*; progetto EU HARMONOISE; Deliverable 9 - Document n. HAR11TR-041210-SP10; 17 Dicembre 2004; Si veda anche:

L. Alfinito, G. Licitra, M. Cerchiai, L. Magni, M. Losa; *Road noise characterization by Harmonoise procedures reviewed for the Italian case*; Atti di Acoustics'08; Parigi, Francia; 29 Giugno-4 Luglio 2008

acustiche presenti possono influire negativamente sulla qualità dei dati a disposizione. Inoltre il traffico stesso è fonte di disomogeneità: infatti raramente i guidatori dei veicoli hanno gli stessi comportamenti alla guida, né tutti i veicoli transitanti sono eguali in età, cilindrata e stato meccanico. Questo comporta per i dati ottenuti il cosiddetto “*effetto nuvola*”: tutti i dati si addensano in una “nuvola” centrata attorno ad una velocità (che coincide quasi sempre con il limite di velocità della strada) e a parità di velocità sono possibili livelli di rumore differenti fra loro anche molto più di 10 dB(A), effetto delle diverse condizioni di marcia dei veicoli transitanti davanti ai microfoni (Figura 1).

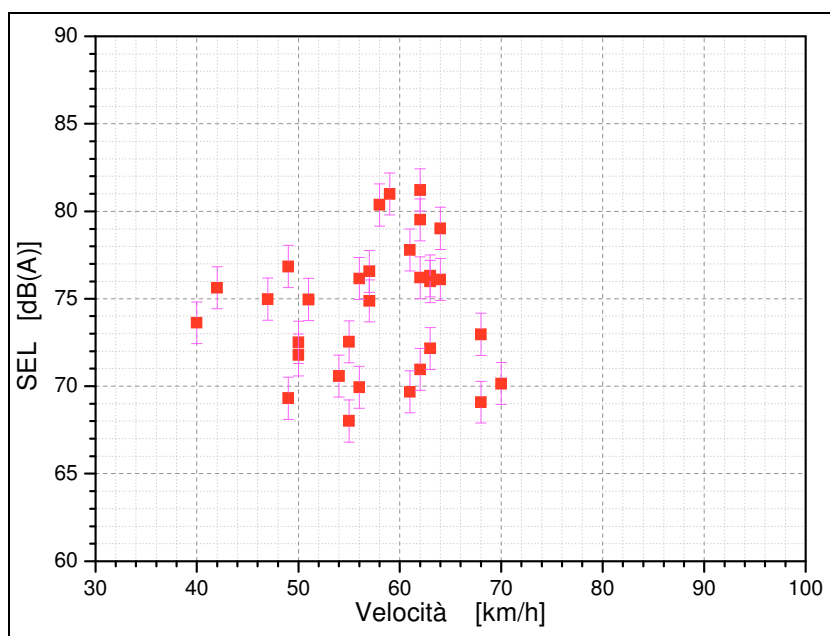


Figura 1. – Tipico esempio di distribuzione dei livelli (riportati con la loro incertezza) in funzione della velocità. In questo caso sono veicoli pesanti. Si osserva un significativo addensamento entro una caratteristica “nuvola”.

Un altro fenomeno piuttosto caratteristico (e sarà ben visibile nelle schede riassuntive SPB presenti in allegato) è, soprattutto per alcune categorie di veicoli, la bassa variabilità delle velocità registrate, che, unita al fenomeno precedentemente descritto crea appunto la caratteristica nuvola di valori sopra detta. Questo comporta una grossa difficoltà nell’ottenere una regressione corretta ed i parametri ricavati avranno sempre un’alta incertezza, rendendo di fatto molto difficile effettuare confronti.

Anche se i dati sono “ben disposti” in funzione della velocità, pochi dati “errati” (i cosiddetti *outlier*, ovvero valori affetti da altri fenomeni che ne alterano l’appartenenza alla legge indagata) possono alterare significativamente i parametri della regressione.

Per ovviare a tutto ciò, in fisica è stata sviluppata la tecnica del “binning”, ovvero i dati vengono

raggruppati in classi secondo particolari algoritmi e ciascuna classe viene rappresentata da un *valore centrale* caratteristico e da un'incertezza ad esso associata funzione della distribuzione dei dati all'interno di ciascuna classe. Quindi si può dimostrare che effettuare la regressione sui dati iniziali è del tutto equivalente ad effettuarla sui valori centrali di ciascun bin, pur operando nel primo caso su un numero di dati molto maggiore.

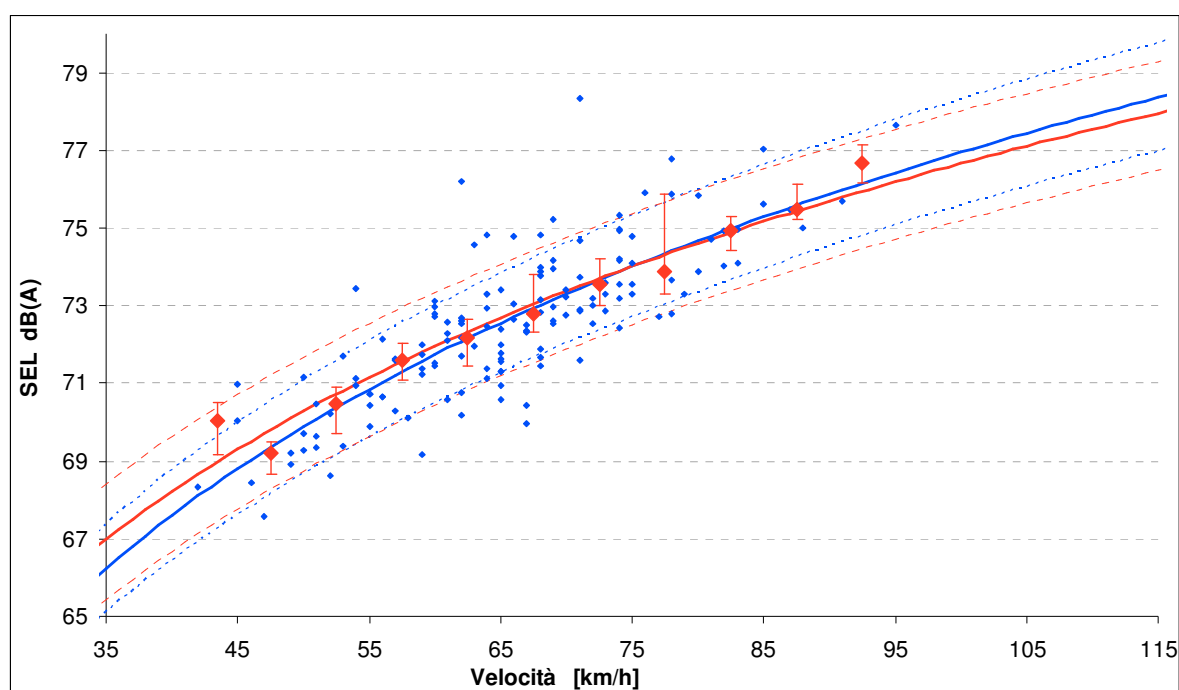


Figura 2. – Confronto fra la regressione SEL/velocità col metodo del minimo quadrato e col metodo del binning utilizzato

Categoria di veicoli		Categoria di velocità stradale					
		Bassa		Media		Alta	
Nome	N°	Velocità di riferimento [km/h]	W_x	Velocità di riferimento [km/h]	W_x	Velocità di riferimento [km/h]	W_x
Autovetture	1	50	0,900	80	0,800	110	0,700
Veicoli pesanti a doppio assale	2a	50	0,075	70	0,100	85	0,075
Veicoli pesanti multiassale	2b	50	0,025	70	0,100	85	0,225

Tabella 2. - Velocità di riferimento e fattori di ponderazione (W_x) nelle differenti categorie di velocità stradale

In Figura 2 è mostrato un esempio di questa tecnica. I punti rappresentano i dati, le linee continue rappresentano le curve ottenute con le regressioni e le curve tratteggiate rappresentano l'intervallo di confidenza corrispondente al 95° percentile. In blu è evidenziata la curva corrispondente alla regressione logaritmica calcolata su tutti i dati (per questi ultimi non è stata

riportata l'incertezza al fine di non rendere illeggibile il grafico). Si nota la presenza di alcuni dati anomali, in alto nell'intervallo di velocità fra 65 e 75 km/h, un accenno di effetto nuvola attorno alla velocità di 70÷75 km/h e molti dati a velocità inferiori a 65 km/h con livelli più bassi di altri. Questo comporta una leggera distorsione della curva verso il basso a basse velocità e verso l'alto ad alte velocità. Viceversa applicando la tecnica del binning (in rosso nella figura, ove ciascun bin, con passo di circa 5 km/h è rappresentato da un rombo rosso con relativa barra di incertezza) si nota che laddove vi è una maggiore variabilità dei livelli rispetto al valore centrale si ha un corrispondente aumento della barra di incertezza (ovviamente asimmetrica). Questo comporta una automatica penalizzazione nel calcolo della regressione e quindi una reazione corretta alla distorsione dei dati.

Per ogni sessione di misura e per ogni sito è stata prodotta una scheda riassuntiva dei risultati dell'analisi dei dati SPB acquisiti. Occorre ricordare che il risultato descrive acusticamente il passaggio di ciascun veicolo su un tratto di pavimentazione lungo tipicamente circa 100 m (ovvero con un angolo totale di vista di circa 90° rispetto al punto di misura), centrato sul punto di misura che quindi è stato situato ad almeno 50 m dall'estremità della pavimentazione oggetto di studio. In tali schede sono presenti le seguenti informazioni:

1. Una sintetica descrizione del sito, della sua localizzazione, della strada e della pavimentazione su essa stesa;
2. Informazioni relative alle condizioni di misura: strumentazione utilizzata, data del test, limite di velocità prevalente sul tratto, temperatura, percentuale di acqua presente in pavimentazione, velocità del vento;
3. I valori di Statistical Pass-by Index (SPBI) relativi al traffico totale e il livello relativo alla sola categoria dei veicoli leggeri (L_1) alle tre velocità di riferimento (50, 80 e 110 km/h), con le relative incertezze di tipo A e di tipo B. L'indice SPBI è calcolato con la formula ed i pesi presenti nella norma ISO corrispondente (Tabella 2 - anche questa è una criticità emersa negli studi condotti nei vari progetti Europei quali SILVIA¹⁰, HARMONOISE, QCITY¹¹ ed IMAGINE¹², ovvero i dati andrebbero pesati con le percentuali reali di traffico presente sul

¹⁰ SILVIA; *Silenda Via – Sustainable Road Surfaces for Traffic Noise Control*; progetto finanziato dalla Commissione Europea - DG TREN, all'interno del FP5 – GROWTH; contract N°GRD2-2000-31801-SI2.335701; <http://www.trl.co.uk/silvia/>

¹¹ QCITY; *Quiet city transport*; cofunded by the sixth framework Programme by the European Commission – Contract N. TIP4-CT-2005-516420; <http://www.silence-ip.org>

¹² IMAGINE; *Improved Methods for the Assessment of the Generic Impact of Noise in the Environment*; funded by the EC under the 6th Framework Programme – Area 1.2.1 (i) - Policy oriented research – Priority 1.5, Environmental assessment – Contract n. SSPI-CT-2003-503549-IMAGINE; <http://www.imagine-project.org/>

tratto e andrebbero considerate un numero maggiore di categorizzazioni del traffico, ovvero tener conto anche della diversa rumorosità dei motocicli, dei bus ecc.). I risultati sono forniti per le misurazioni effettuate alle due altezze microfoniche considerate: 1.2 m e 3 m;

4. i valori dei coefficienti delle regressioni logaritmiche calcolate sulle varie categorie di veicoli con le relative incertezze ed i rispettivi grafici relativi ai bin calcolati dai dati per le due postazioni microfoniche. Nei grafici è riportato sia il valore del chi quadro calcolato sul fit che il numero di gradi di libertà corrispondenti che la probabilità associata alla bontà del fit. Si ricorda che il termine A rappresenta il SEL medio associato alla velocità di 50 km/h
5. I valori dei parametri (con le rispettive incertezze) delle regressioni per lo spettro non normalizzato in banda di terzi d'ottava nell'intervallo di frequenze compreso fra 315 e 8kHz. I valori sono relativi alle due altezze microfoniche utilizzate. Vengono inoltre riportati i grafici relativi ai fit con informazioni analoghe a quanto descritto al precedente punto 4;
6. I parametri di cui ai punti 4 e 5 sono state calcolati per tutte le categorie di veicoli previste dalla norma SPB con l'aggiunta di alcune categorie speciali previste dal progetto HARMONOISE se presenti con un numero significativo di eventi (ad esempio la categoria 1b, pertinente i SUV, piccoli furgoni a due assi, grossi fuoristrada o la categoria 5 pertinente le macchine agricole, frequenti sulla tratta di pavimentazione speciale fiorentina);
7. Foto della pavimentazione analizzata con scala graduata o oggetto di riferimento;
8. Foto del tratto di pavimentazione oggetto di indagine;
9. Planimetria del sito contenente la tratta analizzata con evidenziata la tratta stessa.

2.7 ADRIENNE – UNI ISO 13472-1

Questa tecnica fornisce il coefficiente di assorbimento superficiale medio su un'area circolare, di raggio circa 1.3 m, della superficie della pavimentazione. In generale sono stati monitorati più punti spostandosi longitudinalmente lungo il senso di marcia sulle due corsie di marcia delle strade oggetto di studio (da un minimo di tre ad un massimo di 11). Per ogni punto sono state effettuate più misure spaziate di circa 1 m su un asse ortogonale alla corsia in modo da avere un valor medio sull'intera corsia e la relativa deviazione spaziale standard. Il software di controllo provvede ad effettuare automaticamente le correzioni previste dalla norma tecnica per la temperatura. Tale software fornisce direttamente il valore dell'assorbimento acustico in funzione della frequenza in bande di terzi d'ottava nell'intervallo compreso fra 250 e 4000 Hz.

Vista la scarsa significatività delle varie misure prese singolarmente in modo puntuale, al fine di non produrre una serie di informazioni di scarsa utilità è stato deciso di riportare su apposite schede solo la media spaziale dei coefficienti di assorbimento in funzione della frequenza e la relativa deviazione spaziale standard.

Le sopra citate schede contengono le seguenti informazioni:

1. Una sintetica descrizione del sito, della sua localizzazione, della strada e della pavimentazione su essa stesa;
2. Informazioni relative alle condizioni di misura: strumentazione utilizzata, impostazioni principali del software di analisi;
3. I valori di assorbimento acustico medio sull'intera tratta in bande di terzi d'ottava nell'intervallo compreso fra 250 e 4000 Hz, con la relativa dispersione rappresentata dalla deviazione spaziale standard. Come previsto dalla norma stessa i risultati sono forniti con due cifre decimali. Alla deviazione spaziale standard (che può essere assimilata ad una incertezza di tipo A) occorre "aggiungere" in quadratura un'incertezza propria del metodo che è pari a circa 0.1 al fine di avere l'incertezza complessiva sulla misura;
4. Un grafico rappresentante i valori di assorbimento descritti al punto 3, ove le barre di errore rappresentano la sola deviazione standard spaziale.

3. Risultati

Verranno di seguito riportati l'evoluzione dei risultati nel tempo relativi alle principali tecniche di misura utilizzate in seno al progetto. I risultati sono presentati per sito e per tecnica di indagine.

3.1 Lucca

Nel sito in provincia di Lucca è stata stesa una pavimentazione con usura a tessitura ottimizzata stesa il **09 Luglio 2008**.

SESSIONE	CPX	SPB	Adrienne
Ante-operam	22/08/2006	02/02/2006	---
Estate 2008	15/07/2008	---	29/07/2008
Inverno 2009	26/02/2009	26/02/2009	22/01/2009
Estate 2009	13/07/2009	14/07/2009	---
Autunno 2009	27/10/2009	27/10/2009	20/10/2009
Primavera 2010	20/04/2010	29/04/2010	28/04/2010
Autunno 2010	15/10/2010	---	---
Primavera 2011	19/05/2011	12/05/2011	13/04/2011
Autunno 2011	02/09/2011	02/09/2011	14/11/2011
Estate 2012	10/07/2012	23/08/2012	---

Tabella 3. – Sessioni di misura eseguite sul sito di Lucca

In Tabella 3 sono riportate le date delle indagini condotte sullo studio delle caratteristiche acustiche e la loro evoluzione per ogni tecnica di misura utilizzata.

3.1.1 Risultati CPX

In Tabella 4 vengono mostrati i risultati ottenuti con le misure CPX effettuate sul sito. In tabella sono riportati i Livelli CPXL relativi alla velocità di 50 km/h (indicati nel seguito e nelle didascalie con l'acronimo CPXL(50)), il loro confronto con la pavimentazione di riferimento in situ ed il confronto con la misura effettuata ante-operam. Per ogni livello o differenza è riportata la relativa incertezza.

In Tabella 5 è invece riportato il valore CPXL medio alla velocità di 50 km/h sulla corsia di marcia per ciascuna direzione e la differenza fra le due corsie di marcia, con le rispettive incertezze, per ogni sessione di misura effettuata. Si nota che le differenze sono molto piccole (entro 0.6

dB(A)), soprattutto se confrontate con le rispettive incertezze, per cui non vi sono differenze significative fra le stese nelle due corsie.

data	RIFERIMENTO		SPERIMENTALE		Differenza		Confronto Ante-Post	
	CPXL	Δ	CPXL	Δ	Diff	Δ	Diff	Δ
22/08/2006 (Ante-operam)	93.1	1.3						
15/07/2008	91.6	0.4	87.1	0.6	4.5	0.9	6.0	1.5
26/02/2009	92.9	0.3	89.0	0.5	3.9	0.7	4.1	1.4
13/07/2009	91.8	0.4	87.8	0.6	4.0	0.7	5.3	1.4
27/10/2009	94.6	0.3	90.5	0.5	4.2	0.9	2.6	1.5
20/04/2010	93.2	0.3	88.4	0.5	4.8	0.7	4.7	1.4
15/10/2010	94.0	0.3	88.8	0.6	5.2	0.9	4.4	1.5
19/05/2011	93.6	0.4	88.3	0.5	5.3	0.6	4.8	1.4
02/09/2011	93.6	0.4	88.5	0.5	5.1	0.6	4.6	1.4
10/07/2012	93.7	0.4	88.8	0.7	4.9	0.8	4.3	1.6

Tabella 4. – Confronto fra i valori CPXL(50) misurati durante le varie sessioni. Sono riportati sia le differenze rispetto alla misura sulla pavimentazione di riferimento che rispetto alla misura ante-operam. Δ indica l'incertezza di tipo A associata ai livelli o relativa alla differenza. Tutti i livelli sono in dB(A).

DATA	Direzione Lucca		Direzione Viareggio		Differenza	
	CPXL	Δ	CPXL	Δ	VIA-LU	Δ
15/07/2008	87.1	0.6	87.2	0.5	0.1	0.8
26/02/2009	88.8	0.4	89.2	0.5	0.4	0.6
13/07/2009	87.8	0.6	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>
27/10/2009	90.2	0.5	90.8	0.6	0.6	0.8
20/04/2010	88.1	0.5	88.6	0.4	0.5	0.6
15/10/2010	88.8	0.5	88.7	0.6	-0.1	0.8
19/05/2011	88.2	0.5	88.4	0.4	0.2	0.7
02/09/2011	88.5	0.5	88.4	0.5	-0.1	0.7
10/07/2012	88.7	0.7	88.9	0.6	-0.2	0.9

Tabella 5. – Confronto fra i valori CPXL(50) ottenuti per le due corsie di marcia per ciascuna sessione di misura sulla pavimentazione speciale. Δ indica l'incertezza di tipo A associata ai livelli o relativa alla differenza. Tutti i livelli sono in dB(A).

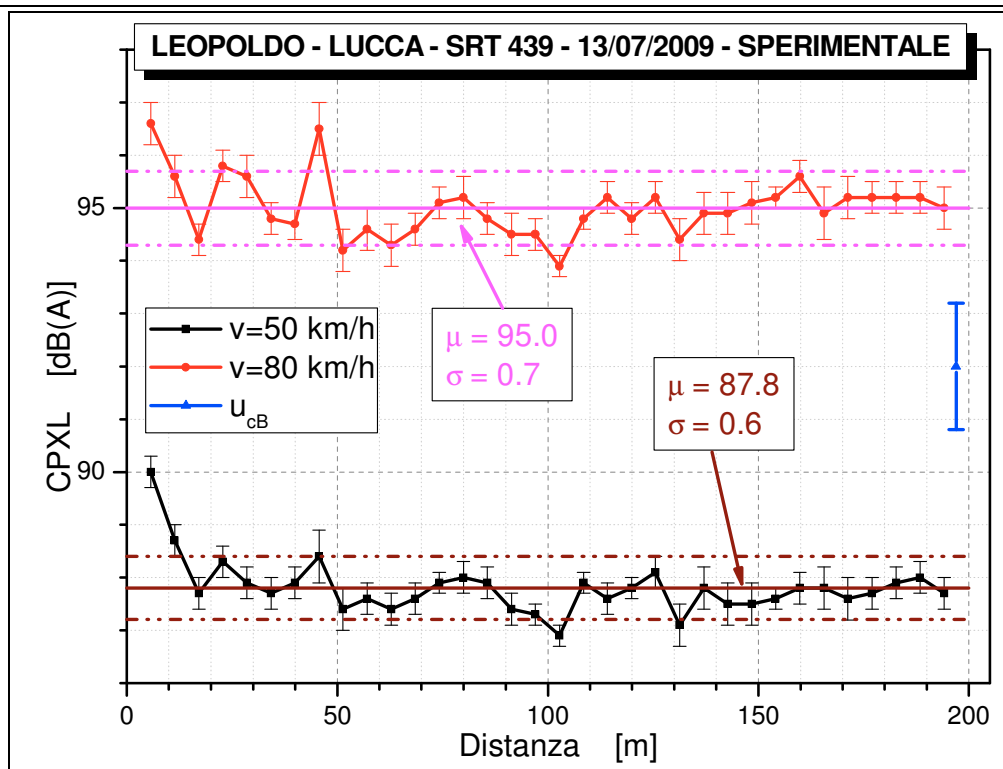


Figura 3. - Andamento dei valori di CPXL in funzione dello spazio sulla corsia strumentata. È riportata sia la media spaziale μ che la deviazione spaziale standard σ . È riportata l'incertezza estesa di tipo B (U_{CB}) pari ad 1.0 dB(A).

In Figura 3 è invece mostrato l'andamento spaziale dei livelli CPXL alle due velocità principali nello spazio, ove ogni punto rappresenta un livello calcolato su uno spazio di 5.75 m, con la relativa incertezza. E' stata qui riportata la misura effettuata un *anno dopo*, quando ormai la pavimentazione si era assestata e la figura si riferisce alla sola corsia strumentata. Si nota una lieve disomogeneità all'inizio della stesa ed una dopo 45 m dall'inizio, ma per il resto la stesa risulta abbastanza omogenea spazialmente. Si osserva comunque che la deviazione standard composta σ (si veda il paragrafo 2.4 per la sua descrizione) risulta abbastanza contenuta sia a 50 che a 80 km/h.

In tutte le figure successive relative ai livelli CPXL è stato preso in esame il valore corrispondente alla velocità di 50 km/h. Risultati analoghi si avranno per le altre due velocità di riferimento: 80 e 110 km/h.

In Figura 4 è riportato l'andamento nel tempo dei livelli CPXL(50), mentre in Figura 5 è riportato l'andamento delle differenze riscontrate fra la misura sulla pavimentazione sperimentale e la misura effettuata sulla pavimentazione usata come riferimento.

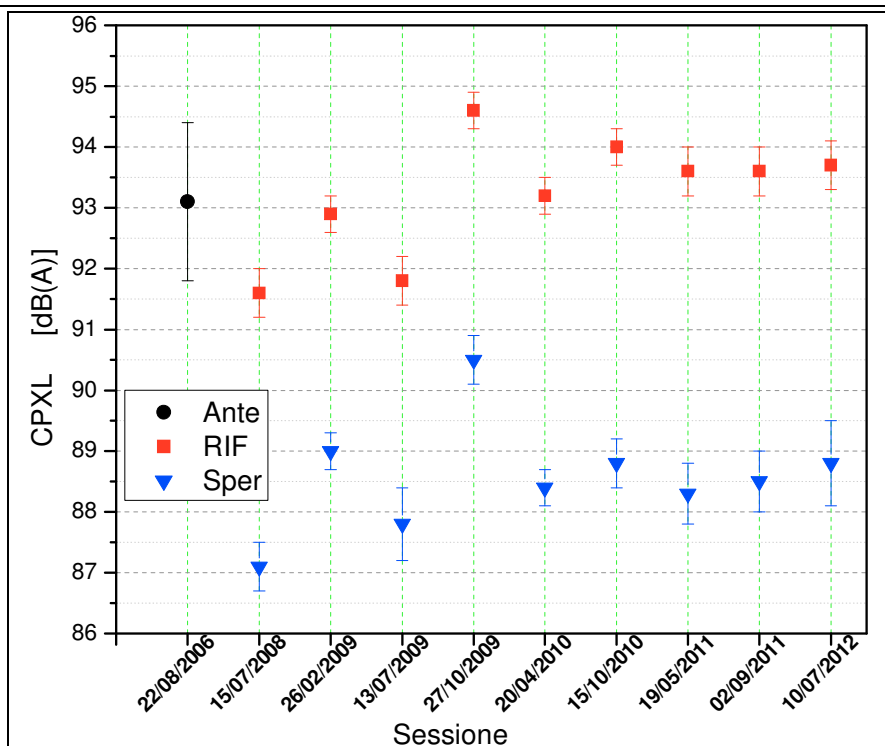


Figura 4. – Confronto fra i valori CPXL(50) per le pavimentazioni ante-operam (ante), di riferimento (rif) e sperimentale (sper). Sono riportate le rispettive incertezze di tipo A come barre di errore.

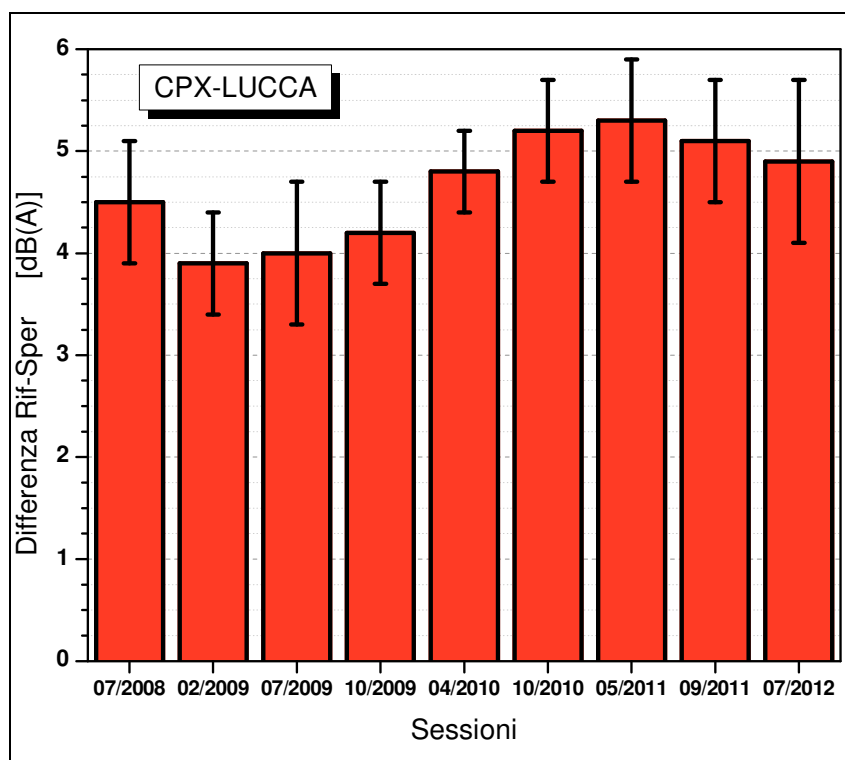


Figura 5. – Andamento nel tempo della differenza fra i livelli CPXL(50) misurati sulla pavimentazione di usura di riferimento e quella sperimentale.

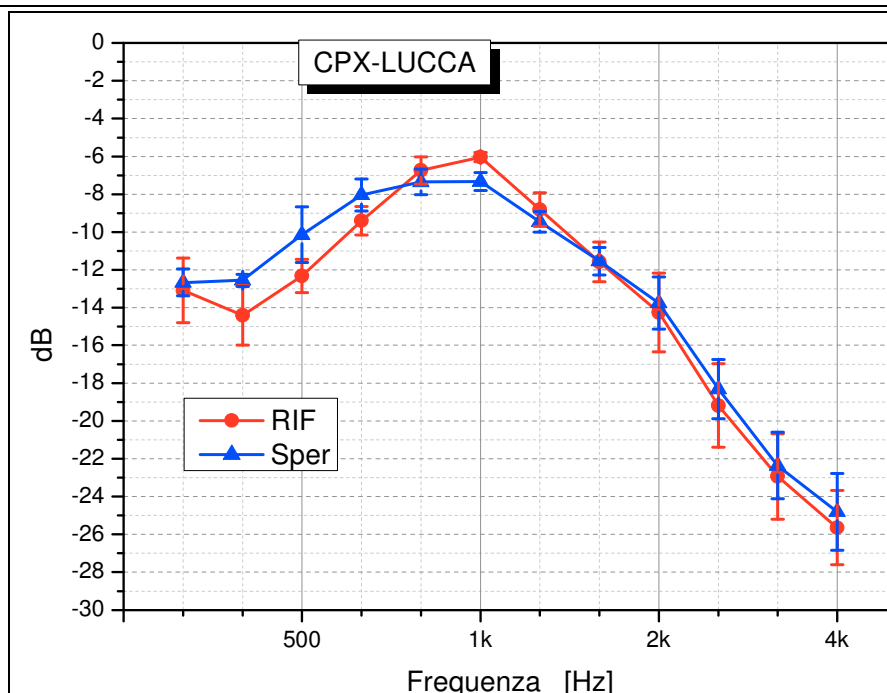


Figura 6. – Confronto fra lo spettro normalizzato CPX della pavimentazione sperimentale (sper) e lo spettro normalizzato della pavimentazione di riferimento (rif), ove le barre d'errore indicano la deviazione standard temporale dello spettro, relativa ai primi tre anni di misura (2008-2010).

Freq	Riferimento	Δ	Sperimentale	Δ	Differenza	Δ
315	-13.1	1.7	-12.7	0.7	-0.4	1.8
400	-14.4	1.6	-12.6	0.3	-1.8	1.6
500	-12.3	0.9	-10.1	1.5	-2.2	1.7
630	-9.4	0.8	-8.0	0.8	-1.4	1.1
800	-6.7	0.7	-7.3	0.7	0.6	1.0
1000	-6.0	0.2	-7.3	0.5	1.3	0.5
1250	-8.8	0.9	-9.5	0.5	0.7	1.0
1600	-11.6	1.1	-11.5	0.7	-0.1	1.3
2000	-14.3	2.1	-13.8	1.4	-0.5	2.5
2500	-19.2	2.2	-18.3	1.6	-0.9	2.7
3150	-22.9	2.3	-22.4	1.8	-0.5	2.9
4000	-25.6	2.0	-24.8	2.0	-0.8	2.8

Tabella 6. – Confronto fra gli spettri normalizzati della pavimentazione di riferimento e della pavimentazione sperimentale. Δ indica la deviazione standard temporale calcolata su tutte le sessioni di misura effettuate nei primi tre anni dalla stesa (2008-2010). È riportata anche la differenza con relativa incertezza fra livello di riferimento e livello sperimentale. Tutti i livelli sono in dB.

Dai risultati si osserva una variazione della differenza inizialmente dipendente, oltre che dall'età della pavimentazione anche dal periodo dell'anno in cui si sono svolte le indagini. In particolare le

differenze sono sensibilmente minori per la misura del 27/10/2009, dove probabilmente la percentuale di acqua presente sulla strada era maggiore causa piogge dei giorni precedenti. Si nota altresì che da maggio 2011 si ha un lieve diminuzione dell'efficienza acustica (attualmente comunque molto contenuta) a partire dalla differenza massima ottenuta nella sessione di maggio 2011 nei rilievi effettuati negli ultimi due anni, sicuramente collegata all'invecchiamento del manto e al suo progressivo deterioramento

In Figura 6 è riportato il confronto fra gli spettri acustici normalizzati sia della pavimentazione speciale che della pavimentazione di riferimento. Le “barre d'errore” indicano la deviazione standard calcolata sugli spettri misurati durante le varie sessioni di misura per le due pavimentazioni nel periodo corrispondente ai primi tre anni di monitoraggio.

Si osserva una differenza molto lieve fra gli spettri, che soprattutto alle basse ed alle alte frequenze, hanno mostrato una sensibile variabilità nel tempo, come mostrato dalle deviazioni standard maggiori di un dB. In generale il picco di emissione risulta leggermente spostato verso le basse frequenze (Tabella 6).

3.1.2 Risultati SPB

In Tabella 7 vengono mostrati i risultati ottenuti con le misure SPB effettuate sul sito. In tabella sono riportati i livelli SPB relativi alla categoria 1 di traffico (veicoli leggeri, ovvero automobili, piccoli van) calcolati alla velocità di 50 km/h, il confronto con la misura effettuata ante-operam, sia per la misura effettuata all'altezza di 1.2 m (ISO 11819-1:2004 e Progetto HARMONOISE) che per la misura a 3.0 m di altezza (progetto HARMONOISE). Per ogni livello e differenza è riportata la relativa incertezza composta statistica (di tipo A) ottenuta con fattore di copertura $k=2$ e rappresenta l'incertezza dovuta alla dispersione dei dati nel fit alla base del calcolo del parametro L_1 . (si veda il paragrafo 2.5).

Dall'analisi dell'andamento nel tempo riportato in tabella si osserva quanto segue: per la misura del 27/10/2009 la differenza risulta inferiore rispetto alla sessione precedente e seguente in quanto, come già osservato nel caso dei risultati delle misure CPX, probabilmente la percentuale di acqua presente sulla strada era maggiore causa piogge dei giorni precedenti; Per le altre misure si nota che dopo un iniziale aumento (in valore assoluto) della differenza, a partire dalla sessione di luglio 2009 si osserva una progressiva diminuzione della differenza fra il valore misurato nell'ante-operam e quello della sessione post-operam analizzata. Da un valore massimo di **-4.7** per la misura effettuata

ad 1.2m sul piano stradale misurato a circa un anno dalla stesa siamo passati al valore di **-3.5 dB(A)** nell'ultima sessione di agosto 2012.

Sessione	h=1.2m	Δ	Differenza	Δ	H=3.0 m	Δ	Differenza	Δ
02/02/2006 (anteoperam)	68.3	1.0			71.4	1.0		
26/02/2009	64.6	1.1	- 3.7	1.5	66.5	1.1	- 4.9	1.5
14/07/2009	63.6	0.8	- 4.7	1.3	65.2	0.8	- 6.2	1.3
27/10/2009	65.8	0.9	- 2.5	1.3	68.3	0.9	- 3.1	1.3
29/04/2010	63.8	1.4	- 4.5	1.7	66.1	1.4	- 5.3	1.7
12/05/2011	64.2	2.2	- 4.1	2.4	67.0	2.8	- 4.4	3.0
02/09/2011	64.5	5.9	- 3.8	5.9	67.1	5.5	- 4.3	5.6
23/08/2012	64.8	2.7	- 3.5	2.9	67.5	2.5	- 3.5	2.3

Tabella 7. – Confronto fra i valori $L_1(50 \text{ km/h})$ misurati durante le varie sessioni. Sono riportati le differenze rispetto alla misura ante-operam. Δ indica l'incertezza. Tutti i livelli sono in dB(A).

Analogamente per la misura a 3.0 m di altezza dove si passa dal massimo per la differenza misurato nella sessione di luglio 2009 di **-6.2** al valore misurato nell'agosto 2012 di **-3.5 dB(A)**.

Da notare la grossa incertezza di tipo A presente nella sessione di settembre 2011 (molto superiore a quella delle altre sessioni). Questa è stata causata dalla dispersione dei valori presente nei dati acquisiti durante quella sessione, a sua volta caratterizzata da un numero non molto elevato di eventi validi ottenuti nel corso della successiva analisi ed elaborazione dei dati effettuata in laboratorio.

In Figura 7 è riportato l'andamento nel tempo dei livelli SPB L_1 precedentemente descritti, mentre in Figura 8 è riportato l'andamento delle differenze riscontrate fra la misura sulla pavimentazione sperimentale e il risultato ottenuto con la pavimentazione ante-operam.

In Figura 9 ed in Figura 10 è riportato il confronto fra lo spettro medio temporale normalizzato SPB relativo alla categoria di veicoli 1 alla velocità di 50 km/h (lo spettro è ottenuto come media pesata fra gli spettri ottenuti in ogni sessione, ove il peso è costituito dall'incertezza statistica di tipo A per ciascuna banda; le barre d'errore indicano l'incertezza composta ottenuta dalla deviazione standard temporale sulle sessioni dello spettro e dall'incertezza pesata associata alla media pesata) e lo spettro normalizzato delle pavimentazione ante-operam, ove invece le barre d'errore indicano l'incertezza della misura.

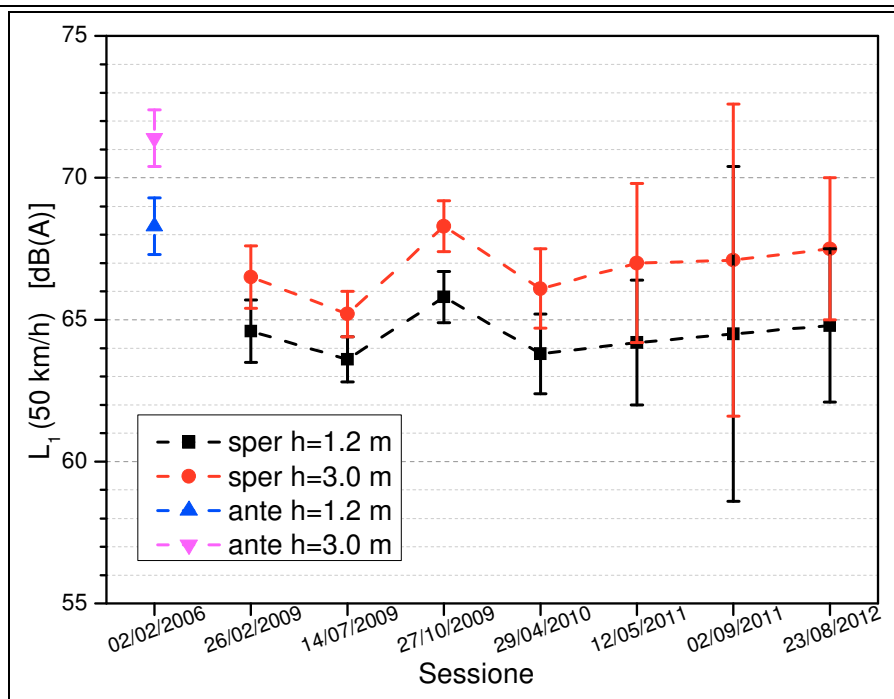


Figura 7. – Confronto fra i livelli SPB $L_1(50 \text{ km/h})$ per la pavimentazione ante-operam (ante) e per quella sperimentale nelle varie sessioni di misura effettuate (sper).

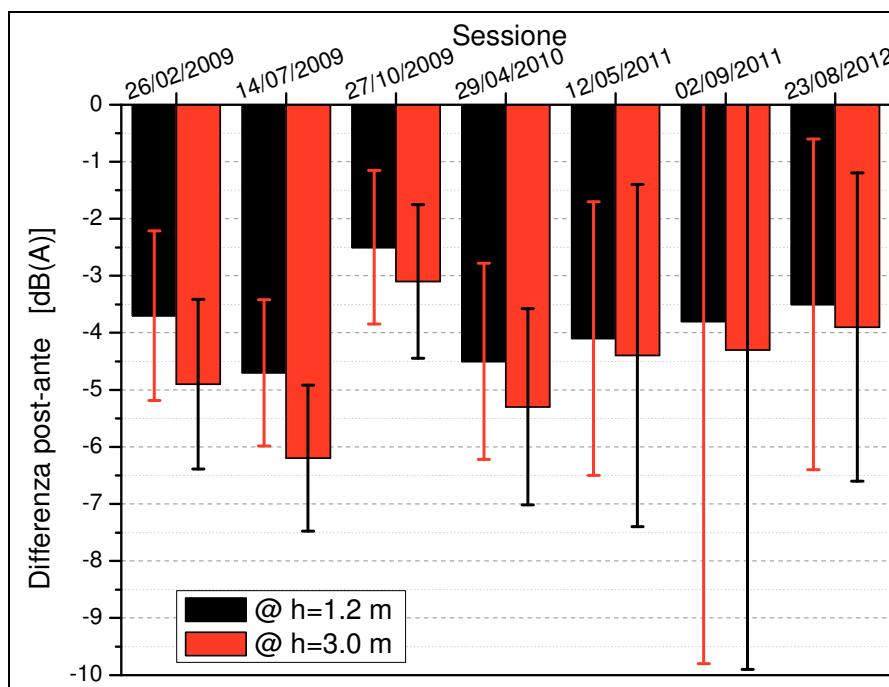


Figura 8. – Differenza fra i livelli SPB $L_1(50 \text{ km/h})$ misurati sulla pavimentazione sperimentale e quella ante-operam, alle due altezze considerate, con le relative incertezze.

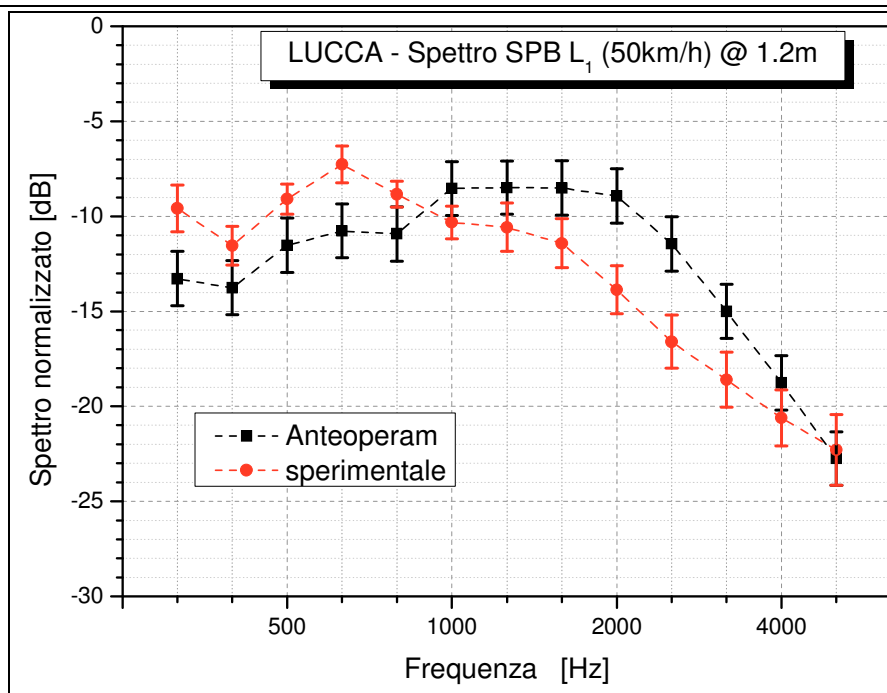


Figura 9. – Confronto fra lo spettro pesato medio temporale normalizzato SPB relativo a L_1 (50 km/h) della pavimentazione speciale e quello ante-operam ottenuti dalla misura a 1.2 m di altezza.

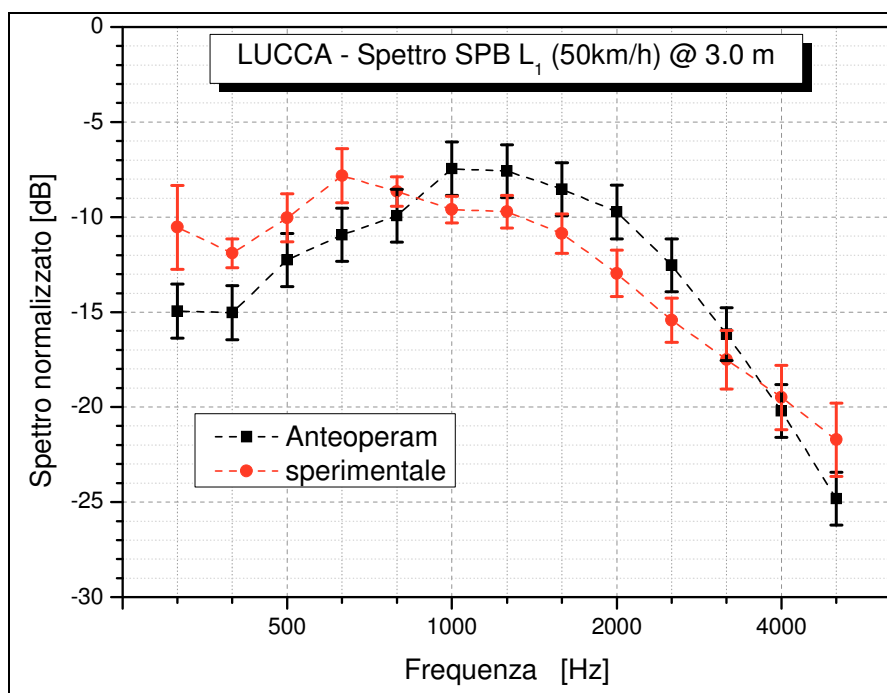


Figura 10. – Confronto fra lo spettro pesato medio temporale normalizzato SPB relativo a L_1 (50 km/h) della pavimentazione speciale e quello ante-operam ottenuti dalla misura a 3.0 m di altezza.

Si nota lo spostamento del picco di emissione verso la frequenza di 630 Hz con innalzamento dei livelli di emissione alle frequenze inferiori a 1000 Hz. Tale spostamento è molto più accentuato

rispetto alle misure CPX sopra descritte.

In Tabella 8 sono riportati i valore dei livelli normalizzati di banda di terzo d'ottava ottenuti nella misura ante-operam e dello spettro medio temporale post operam e le differenze fra tali livelli, con le relative incertezze, alle due altezze di misura.

Frequenza [Hz]	h=1.2 m						h = 3.0 m					
	Ante	Δ	post	Δ	Diff.	Δ	Ante	Δ	Post	Δ	Diff.	Δ
315	-13.3	1.4	-9.6	1.2	-3.7	1.9	-14.9	1.4	-10.5	2.2	-4.4	2.6
400	-13.8	1.4	-11.6	1.0	-2.2	1.8	-15.0	1.4	-11.9	0.8	-3.1	1.6
500	-11.5	1.4	-9.1	0.8	-2.4	1.6	-12.3	1.4	-10.0	1.3	-2.2	1.9
630	-10.8	1.4	-7.3	1.0	-3.5	1.7	-10.9	1.4	-7.8	1.4	-3.1	2.0
800	-10.9	1.4	-8.8	0.7	-2.1	1.6	-9.9	1.4	-8.7	0.8	-1.3	1.6
1000	-8.5	1.4	-10.3	0.9	1.8	1.7	-7.5	1.4	-9.6	0.7	2.1	1.6
1250	-8.5	1.4	-10.6	1.3	2.1	1.9	-7.6	1.4	-9.7	0.9	2.1	1.6
1600	-8.5	1.4	-11.4	1.3	2.9	1.9	-8.5	1.4	-10.9	1.0	2.3	1.7
2000	-8.9	1.4	-13.9	1.3	4.9	1.9	-9.7	1.4	-13.0	1.2	3.2	1.9
2500	-11.4	1.4	-16.6	1.4	5.2	2.0	-12.5	1.4	-15.4	1.2	2.9	1.8
3150	-15.0	1.4	-18.6	1.4	3.6	2.0	-16.2	1.4	-17.5	1.5	1.3	2.1
4000	-18.8	1.4	-20.6	1.5	1.8	2.1	-20.2	1.4	-19.5	1.7	-0.7	2.2
5000	-22.7	1.4	-22.3	1.9	-0.4	2.3	-24.8	1.4	-21.7	1.9	-3.1	2.4

Tabella 8. - Confronto fra gli spettri SPB $L_p(50 \text{ km/h})$ anteoperam (ante) e post operam (post) alle due altezze. Δ indica la deviazione standard temporale calcolata sulle sessioni di misura. Diff indica la differenza fra i livelli ante e quelli post-operam. Δ_d indica la rispettiva incertezza. I livelli sono in dB.

3.1.3 Risultati ADRIENNE

In questo caso si considera l'assorbimento proprio della pavimentazione. In Figura 11 è riportata una serie di istogrammi corrispondenti alle varie sessioni di misura valide e fornisce un'indicazione della variabilità nel tempo del coefficiente dia assorbimento acustico.

Nella pavimentazione sperimentale presente nel sito di Lucca non si notano particolari assorbimenti e si nota che al passare del tempo in media i valori di assorbimento si sono conservati pressoché costanti, con l'esclusione dei risultati ottenuti nella sessione primaverile del 2011, dove l'assorbimento acustico risulta leggermente superiore alla media degli altri risultati.

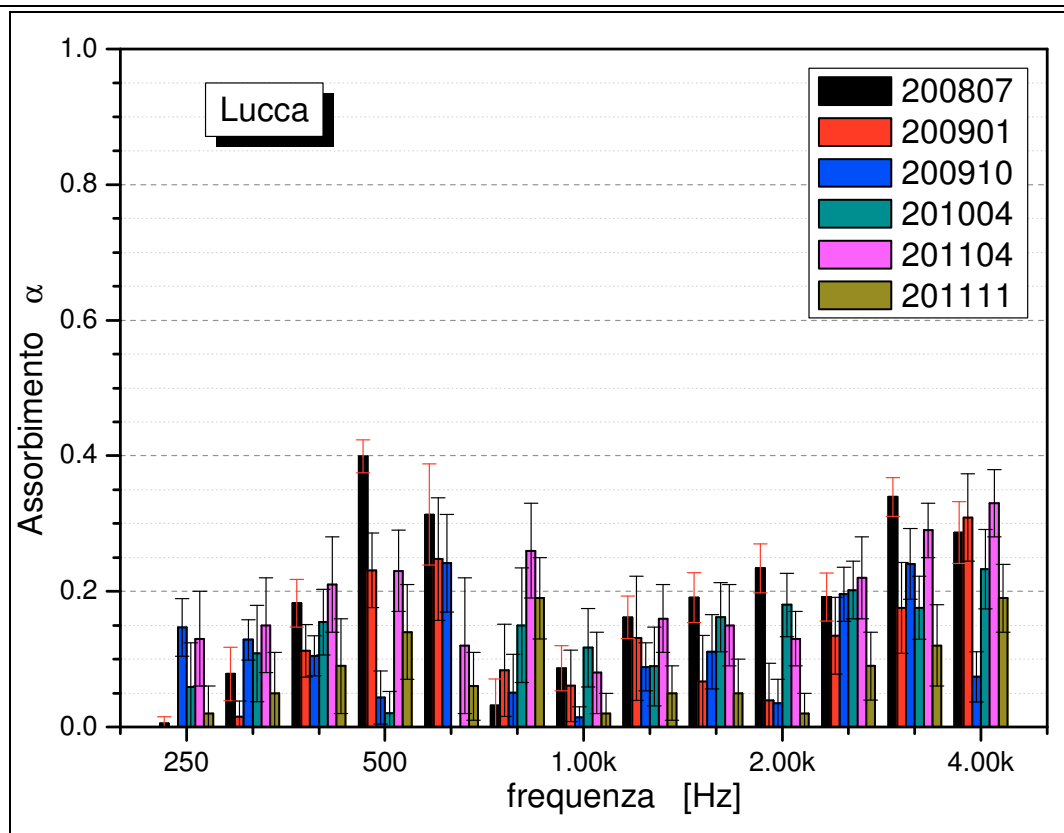


Figura 11. – *Evoluzione temporale dei coefficienti di assorbimento in funzione della frequenza. Sono state esclusi i dati delle sessioni che hanno presentato risultati anomali. Le barre d'errore corrispondono alla variabilità spaziale del dato all'interno della sessione.*

In Figura 12 è riportato il valor medio dell'assorbimento in funzione della frequenza e la sua variabilità complessiva (deviazione standard totale) composta dalla somma in quadratura della deviazione standard spaziale (variabilità del coefficiente sulle singole prove all'interno di una sessione) e dalla deviazione standard temporale (variabilità nel tempo delle medie per sessione). Anche in questo caso si osserva che questa pavimentazione è caratterizzata da uno scarso assorbimento acustico (compreso fra 0.24 a 4 KHz e 0.06 a 250 Hz) con una variabilità complessiva non eccessiva (compresa fra 0.05 e 0.15).

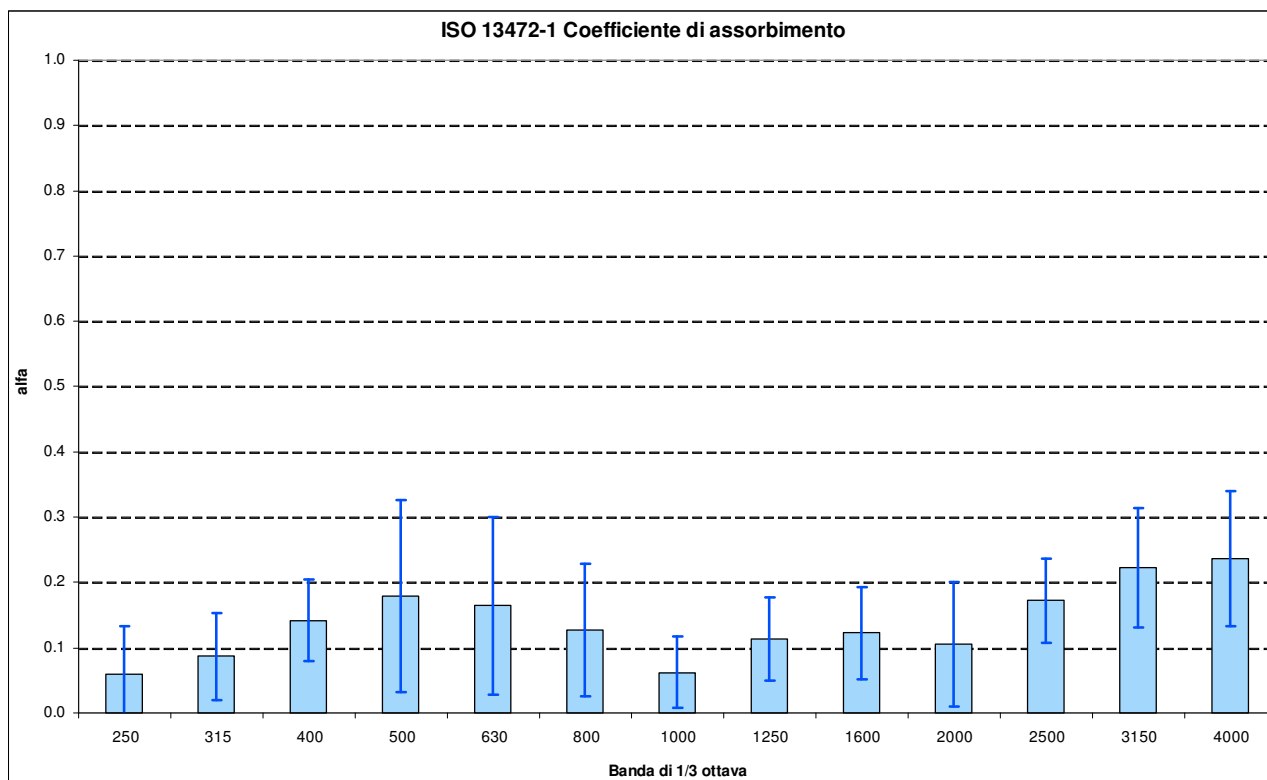


Figura 12. – Variabilità complessiva del coefficiente di assorbimento in funzione della frequenza. È indicata la deviazione standard complessiva composta partendo dalla variabilità temporale e da quella spaziale

Infine in Tabella 9 vengono riportati i valori del coefficiente di assorbimento medio a banda larga della pavimentazione con la relativa deviazione spaziale standard. Anche in questo caso notiamo lo scarso assorbimento della pavimentazione (sempre inferiore a 0.2) e la sua relativa costanza nel tempo (ovviamente legato alla tipologia di pavimentazione utilizzata in questo sito che non ha intrinseche capacità di assorbimento sonoro).

Sessione	Assorbimento medio $\bar{\alpha}$	Dev. Spaz. Std.
Luglio 2008	0.19	0.04
Gennaio 2009	0.12	0.06
Ottobre 2009	0.11	0.04
Aprile 2010	0.13	0.05
Aprile 2011	0.19	0.06
Novembre 2011	0.08	0.05

Tabella 9 – Valori di assorbimento medio ottenuti nelle varie sessioni di misura effettuate nel sito di Lucca, con il relativo valore di deviazione spaziale standard.

3.2 Firenze

Nel sito in provincia di Firenze è stata stesa una pavimentazione con usura gap graded stesa il **25 Giugno 2008**.

In Tabella 10 sono riportate le date delle indagini condotte sullo studio delle caratteristiche acustiche e la loro evoluzione per ogni tecnica di misura utilizzata.

SESSIONE		CPX	SPB	Adrienne
Ante-operam		12/09/2006	14/02/2006	---
Estate	2008	07/07/2008	---	30/07/2008
Primavera	2009	08/04/2009	10/03/2009	---
Estate	2009	17/07/2009	17/07/2009	---
Autunno	2009	26/11/2009	26/11/2009	11/11/2009 ^(*)
Primavera	2010	13/04/2010	---	27/04/2010
Estate	2010	15/07/2010	15/07/2010	---
Autunno	2010	27/10/2010	19/10/2010	---
Primavera	2011	17/05/2011	17/05/2011	05/05/2011
Autunno	2011	03/10/2011	22/09/2011	30/11/2011
Estate	2012	12/07/2012	---	---

Tabella 10. – Sessioni di misura eseguite sul sito di Firenze.

(*) sessione eliminata durante l'analisi dei risultati per problemi tecnici.

3.2.1 Risultati CPX

In Tabella 11 vengono mostrati i risultati ottenuti con le misure CPX effettuate sul sito. In tabella sono riportati i Livelli CPXL relativi alla velocità di 50 km/h (indicati nel seguito e nelle didascalie con l'acronimo CPXL(50)), il loro confronto con la pavimentazione di riferimento *in situ* ed il confronto con la misura effettuata *ante-operam*. Per ogni livello o differenza è riportata la relativa incertezza.

In Tabella 12 è invece riportato il valore CPXL medio alla velocità di 50 km/h sulla corsia di marcia per ciascuna direzione e la differenza fra le due corsie di marcia, con le rispettive incertezze, per ogni sessione di misura effettuata.

data	RIFERIMENTO		SPERIMENTALE		Differenza		Confronto Ante-Post	
	CPXL	Δ	CPXL	Δ	Diff	Δ	Diff	Δ
12/09/2006 (anteoperam)	94.7	0.6						
07/07/2008	93.7	0.5	87.4	0.4	6.3	0.6	7.3	0.7
08/04/2009	95.2	0.5	90.2	0.5	5.0	0.7	4.5	0.8
17/07/2009	94.0	0.5	88.6	0.4	5.4	0.6	6.1	0.7
26/11/2009	96.0	0.7	90.8	0.5	5.2	0.9	3.9	0.8
13/04/2010	96.0	0.8	91.8	0.4	4.2	0.9	3.0	0.7
15/07/2010	94.5	0.8	90.5	0.5	4.1	0.9	4.3	0.8
27/10/2010	95.8	0.8	92.0	0.4	3.8	0.9	2.7	0.7
17/05/2011	95.3	0.7	92.0	0.4	3.3	0.8	2.7	0.7
03/10/2011	95.4	0.7	91.8	0.5	3.6	0.8	2.9	0.8
12/07/2012	91.7	0.4	88.8	0.4	2.9	0.6	6.0	0.7

Tabella 11. –Confronto fra i valori CPXL(50) misurati durante le varie sessioni. Sono riportati sia le differenze rispetto alla misura sulla pavimentazione di riferimento che rispetto alla misura ante-operam. Δ indica l'incertezza di tipo A associata ai livelli o relative la differenza. Tutti i livelli sono in dB(A).

DATA	Direzione B. S. Lorenzo		Direzione Firenze		Differenza	
	CPXL	Δ	CPXL	Δ	FI-BSL	Δ
07/07/2008	87.6	0.5	87.2	0.6	-0.4	0.8
08/04/2009	90.0	0.5	90.4	0.8	0.4	0.9
17/07/2009	88.6	0.4	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
26/11/2009	90.5	0.4	91.1	1.0	0.6	1.1
13/04/2010	91.3	0.5	92.2	0.7	0.9	0.9
15/07/2010	90.1	0.5	90.8	0.8	0.7	0.9
27/10/2010	91.6	0.5	92.3	0.6	0.7	0.8
17/05/2011	91.7	0.4	92.3	0.4	0.6	0.6
03/10/2011	91.5	0.5	92.1	0.5	0.6	0.7
12/07/2012	88.6	0.4	88.9	0.4	0.3	0.6

Tabella 12. – Confronto fra i valori CPXL(50) ottenuti per le due corsie di marcia per ciascuna sessione di misura sulla pavimentazione speciale. Δ indica l'incertezza associata ai livelli o relative la differenza. Tutti i livelli sono in dB(A).

Si evidenzia una lieve differenza di livello fra le stese nelle due direzioni, in quanto la corsia in direzione Firenze risulta leggermente più rumorosa della corsia in direzione Borgo S. Lorenzo. Tale differenza è contenuta, anche relativamente all'incertezza associata, e ha una tendenza a diminuire nelle ultime sessioni di misura.

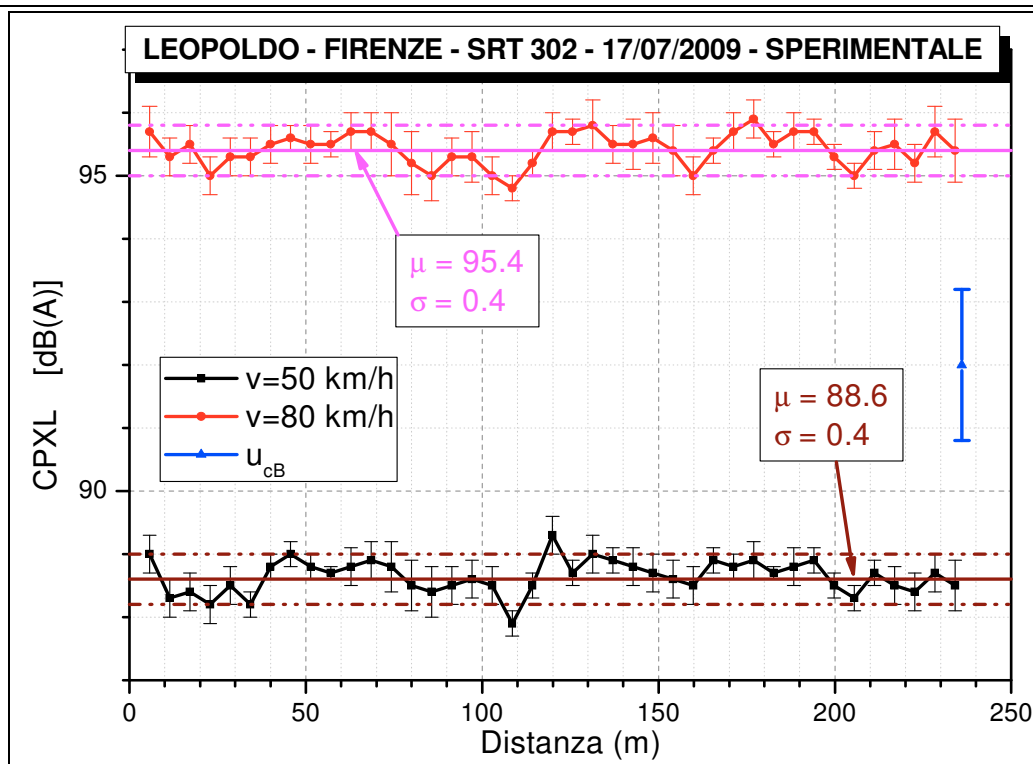


Figura 13. - Andamento dei valori di CPXL(50) in funzione dello spazio sulla corsia strumentata. È riportata sia la media spaziale μ che la deviazione spaziale standard σ . È riportata l'incertezza estesa di tipo B U_{CB} , pari ad 1.0 dB(A).

In Figura 13 è invece mostrato l'andamento spaziale dei livelli CPXL alle due velocità principali nello spazio, ove ogni punto rappresenta un livello calcolato su uno spazio di 5.75 m, con la relativa incertezza. E' stata qui riportata la misura effettuata *un anno dopo*, quando ormai la pavimentazione si era assestata meccanicamente e la figura si riferisce alla sola corsia strumentata. Si nota una buona omogeneità spaziale dei livelli CPXL dall'inizio alla fine della stesa, tanto che la deviazione standard composta σ (si veda il paragrafo 2.4 per la sua descrizione) risulta molto contenuta (0.4) sia a 50 che a 80 km/h.

In tutte le figure successive relative ai livelli CPXL è stato preso in esame il valore corrispondente alla velocità di 50 km/h. Risultati analoghi si avranno per le altre due velocità di riferimento: 80 e 110 km/h.

In Figura 14 è riportato l'andamento nel tempo dei livelli CPXL(50), mentre in Figura 15 è riportato l'andamento delle differenze riscontrate fra la misura sulla pavimentazione sperimentale e la misura effettuata sulla pavimentazione usata come riferimento.

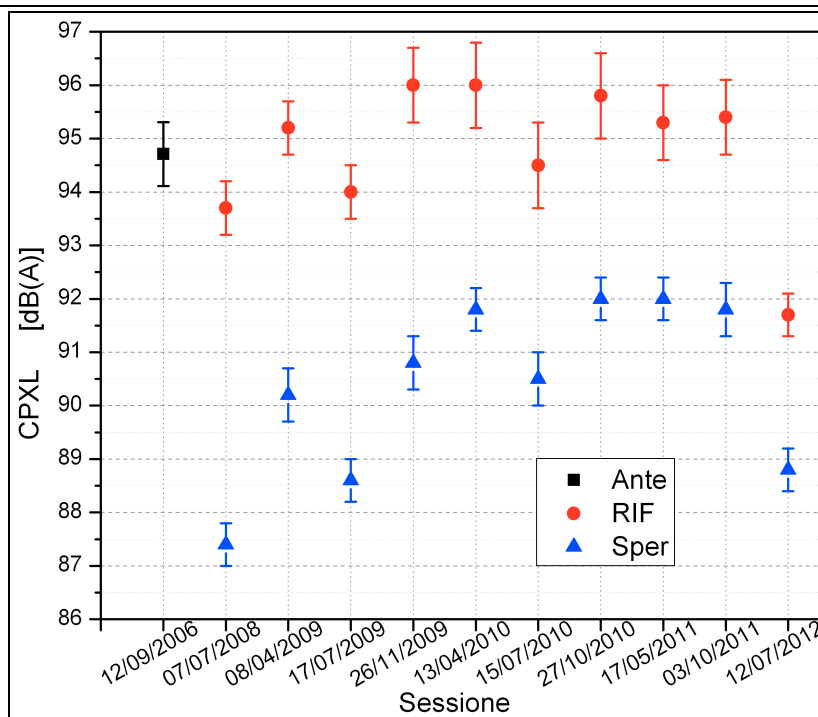


Figura 14. – Confronto fra i valori CPXL(50) per le pavimentazioni ante-operam (ante), di riferimento (rif) e sperimentale (sper) nelle varie sessioni di misura. Sono riportate le rispettive incertezze di tipo A sottoforma di barre di errore.

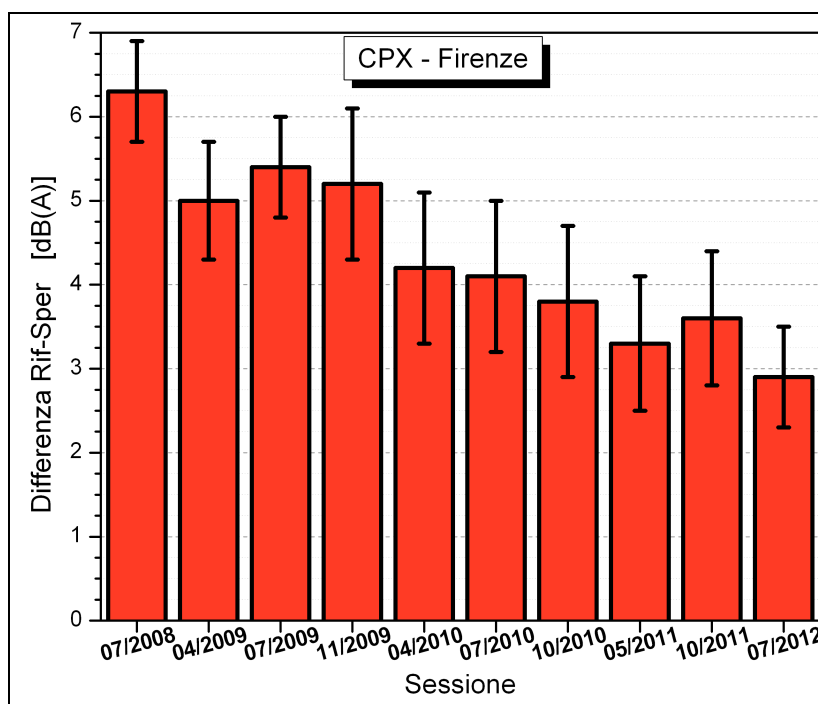


Figura 15. – Andamento nel tempo della differenza fra i livelli CPXL(50) misurati sulla pavimentazione di usura di riferimento e quella sperimentale. La barra rappresenta l'incertezza associata alla differenza.

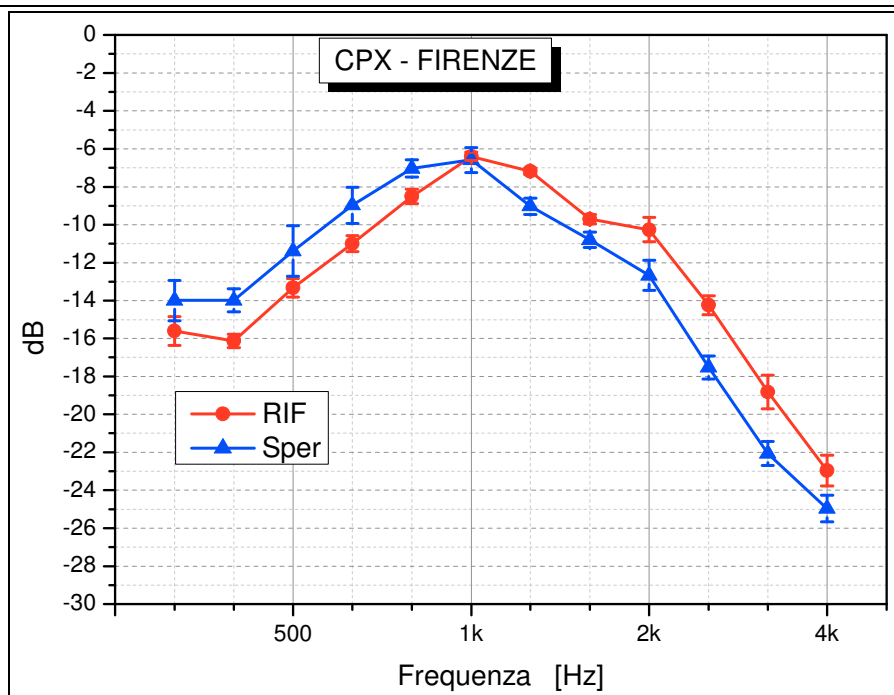


Figura 16. – Confronto fra lo spettro normalizzato CPX della pavimentazione sperimentale (sper) e lo spettro normalizzato della pavimentazione di riferimento (rif), ove le barre d'errore indicano la deviazione standard temporale dello spettro, relativa ai primi tre anni di misura (2008-2010).

Frequenza	Riferimento	Δ	Sperimentale	Δ	Differenza	Δ
315	-15.6	0.7	-14.0	1.1	-1.6	1.3
400	-16.1	0.3	-14.0	0.6	-2.1	0.7
500	-13.3	0.5	-11.4	1.3	-1.9	1.4
630	-11.0	0.4	-9.0	1.0	-2.0	1.1
800	-8.5	0.4	-7.0	0.5	-1.5	0.6
1000	-6.4	0.2	-6.6	0.7	0.2	0.7
1250	-7.2	0.2	-9.0	0.4	1.8	0.4
1600	-9.7	0.2	-10.8	0.4	1.1	0.4
2000	-10.3	0.6	-12.7	0.8	2.4	1.0
2500	-14.2	0.5	-17.5	0.6	3.3	0.8
3150	-18.8	0.9	-22.1	0.6	3.3	1.1
4000	-23.0	0.8	-25.0	0.7	2.0	1.1

Tabella 13. – Confronto fra gli spettri normalizzati della pavimentazione di riferimento e della pavimentazione sperimentale. Δ indica la deviazione standard temporale calcolata su tutte le sessioni di misura effettuate nei primi tre anni dalla stesa (2008-2010). È riportata anche la differenza con relativa incertezza fra livello di riferimento e livello sperimentale. Tutti i livelli sono in dB.

Dai risultati si osserva una variazione della differenza dipendente, oltre che dall'età della

pavimentazione anche dal periodo dell'anno in cui si sono svolte le indagini. In particolare si nota un progressivo lento peggioramento delle prestazioni acustiche (ovvero un progressivo aumento dell'emissione di contatto pneumatico/pavimentazione). Dal valore massimo rilevato nel mese di luglio 2009, **5.4 dB(A)** di differenza rispetto al riferimento, si passa al valore misurato nel luglio 2012 con differenza pari a **2.9 dB(A)**.

Pertanto si nota bene in Figura 14 uno dei principali limiti della tecnica CPX ed il fatto che la metodica sviluppata da ARPAT nell'ambito del progetto LEOPOLDO contribuisca a superare tale limite: i risultati sono fortemente dipendenti da situazioni meteorologiche locali e se non correttamente correlati fra loro possono portare a errate considerazioni.

Infatti, per motivi non ben giustificabili in maniera analitica nella misura di luglio 2012 (Figura 14) i livelli di emissione di contatto ruota/pavimentazione sono risultati molto inferiori a quelli misurati nelle altre sessioni, per cui, il mero confronto fra le rumorosità della sola pavimentazione speciale con la misura *ante-operam*, avrebbe comportato l'errata considerazione di un improvviso miglioramento delle prestazioni acustiche medie della pavimentazione speciale.

Invece, poiché il fenomeno ha coinvolto l'intera misura, il fatto di disporre di una pavimentazione di riferimento ha permesso di correttamente valutare le prestazioni acustiche (Figura 15) con conseguente identificazione di un lieve ulteriore peggioramento delle stesse prestazioni acustiche medie rispetto alla sessione di misura precedente.

In Figura 16 è riportato il confronto fra gli spettri acustici *normalizzati* sia della pavimentazione speciale che della pavimentazione di riferimento. Le "barre d'errore" indicano la deviazione standard calcolata sugli spettri misurati durante le varie sessioni di misura per le due pavimentazioni nel periodo corrispondente ai primi tre anni di monitoraggio.

Il picco ante-operam/pavimentazione di riferimento coincide sostanzialmente col picco di emissione della pavimentazione sperimentale (1000 Hz). Si osserva solo un maggior contenuto energetico alle basse frequenze per la pavimentazione speciale, rispetto all'usura tradizionale di riferimento e conseguentemente si osserva una significativa minor emissione alle medie ed alle alte frequenze.

Entrambe le pavimentazioni hanno mantenuto pressoché inalterate la forma degli spettri di emissione nel tempo, come dimostrato dalla bassa deviazione standard temporale (Tabella 13).

3.2.2 Risultati SPB

In Tabella 14 vengono mostrati i risultati ottenuti con le misure SPB effettuate sul sito. In tabella sono riportati i livelli SPB relativi alla categoria 1 di traffico (veicoli leggeri, ovvero automobili, piccoli van) calcolati alla velocità di 50 km/h, il confronto con la misura effettuata ante-operam, sia per la misura effettuata all'altezza di 1.2 m (ISO 11819-1:2004 e Progetto HARMONOISE) che per la misura a 3.0 m di altezza (progetto HARMONOISE). Per ogni livello e differenza è riportata la relativa incertezza.

Sessione	h=1.2m	Δ	Differenza	Δ	h=3.0 m	Δ	Differenza	Δ
14/02/2006 (anteoperam)	72	1.0			72.7	1.0		
10/03/2009	65.4	1.1	-6.6	1.5	66.1	1.1	-6.6	1.5
17/07/2009	65.3	2.2	-6.7	2.4	67.3	2.2	-5.4	2.4
26/11/2009	68.4	1.2	-3.6	1.6	69.9	1.2	-2.8	1.6
15/07/2010	68.3	1.3	-3.7	1.6	68.3	1.3	-4.4	1.6
19/10/2010	69.9	1.2	-2.1	1.6	69.6	1.2	-3.1	1.6
17/05/2011	70.9	1.4	-1.1	1.7	70.5	1.5	-1.8	2.5
22/09/2011	70.2	2.3	-1.8	2.5	69.9	2.6	-2.8	2.8

Tabella 14. – Confronto fra i valori $L_1(50 \text{ km/h})$ misurati durante le varie sessioni. Sono riportati le differenze rispetto alla misura ante-operam. Δ indica l'incertezza associata ai livelli o relative la differenza. Tutti i livelli sono in dB(A).

In Figura 17 è riportato l'andamento nel tempo dei livelli SPB, mentre in Figura 18 è riportato l'andamento delle differenze riscontrate fra la misura sulla pavimentazione sperimentale e quella relativa alla pavimentazione anteoperam.

Sia dalla tabella che dai grafici si nota un andamento di progressiva diminuzione della differenza fra i livelli SPB ante-operam e quelli post-operam con fluttuazioni fra le varie sessioni, legate sostanzialmente alla bontà del campione acquisito di passaggi.

Occorre ricordare infatti la forte criticità che ha questa misura: essendo una misura assoluta, dipende fortemente dalla distribuzione dei veicoli che transitano di volta in volta e dal numero di eventi validi realmente acquisiti in ogni sessione, non programmabile a priori, a causa degli eventi esterni che si possono verificare durante la misura. Infatti la presenza di sorgenti alternative, condizioni meteorologiche differenti fra le varie sessioni, può disturbare in modo diverso la misura e, insieme allo scarso tempo tipicamente a disposizione durante le sessioni di acquisizione, comportano effetti negativi sull'insieme dei dati.

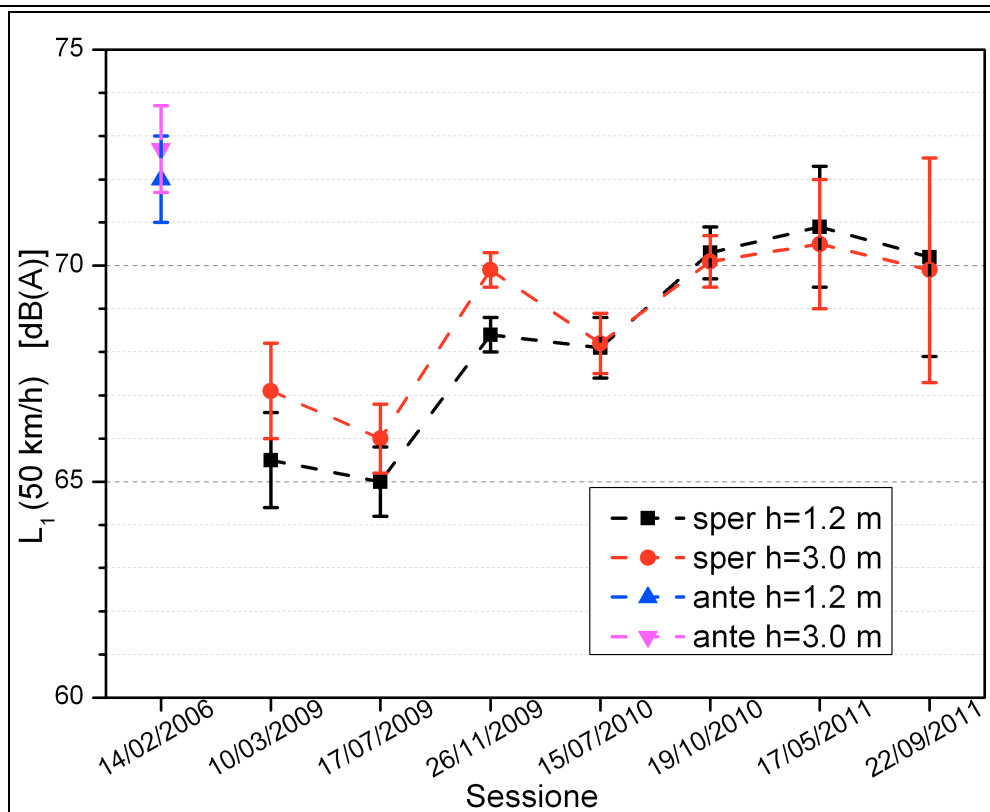


Figura 17. – Confronto fra i livelli SPB $L_1(50 \text{ km/h})$ per la pavimentazione ante-operam (ante) e per quella sperimentale nelle varie sessioni di misura effettuate (sper).

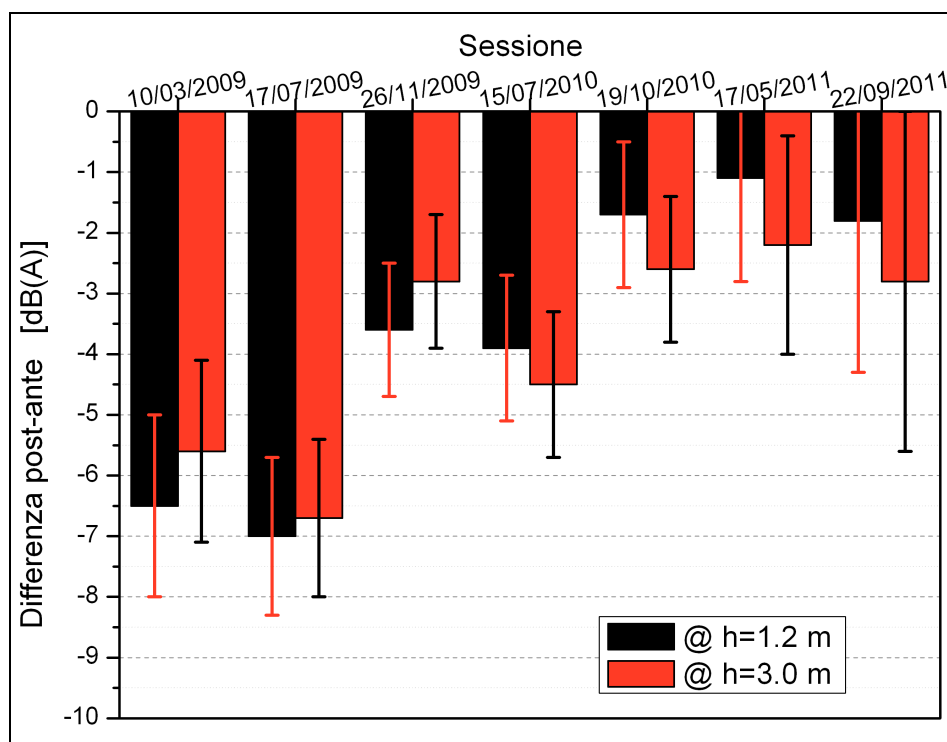


Figura 18. – Differenza fra i livelli SPB $L_1(50 \text{ km/h})$ misurati sulla pavimentazione sperimentale e quella ante-operam, alle due altezze considerate, con le relative incertezze.

In particolare durante le ultime due sessioni (maggio e settembre 2011) si osserva una forte variabilità statistica (espressa dalle barre di errore presenti nei due grafici) che sicuramente aumenta in modo fortemente significativo l'incertezza complessiva dei risultati espressi e comunque sembra essere legata anche ad una diversa risposta della pavimentazione al passaggio dei diversi veicoli transitanti sulla strada.

Ricordiamo infatti che questa misura non è stata effettuata su una pista di prova con veicoli ben caratterizzati, ma su una strada reale soggetta al traffico reale formato da veicoli di tutte le età, in stato di manutenzione molto variegato, guidate da persone con stili di guida anche molto differenti, con pneumatici aventi chilometraggi molto differenti, per cui ci si deve aspettare una forte variabilità dei risultati misurati a bordo strada per i singoli passaggi.

Nel caso dell'analisi SPB, relativamente alla misura a 1.2 m di altezza, si passa da un massimo della differenza fra ante-operam e post-operam di **6.7 dB(A)** misurato nel luglio 2009 fino ad un minimo di **1.1 dB(A)** misurato nel mese di maggio 2011, con una lieve ripresa nella successiva misura di settembre 2011.

Per la misura a 3 m di altezza si passa invece da una differenza di **5.4** (luglio 2009) ad una di **1.8 dB(A)** (maggio 2011), con una differenza a settembre 2011 (ultima sessione effettuata) di 2.8 dB(A).

Sempre dai dati si osserva uno strano (paragonato col comportamento delle altre pavimentazioni afferenti il progetto) fenomeno che riguarda i livelli misurati a 3 m di altezza se paragonati con quelli a 1.2 m: si osserva, a partire dalla sessione di luglio 2010, ed in maniera sempre più accentuata col passare del tempo, tanto da ritenere questo un comportamento proprio legato all'invecchiamento della pavimentazione, un 'inversione del valore SPB L_1 (50 km/h) (ma vale anche per le altre velocità). Inizialmente, infatti, è maggiore (come accade per le altre pavimentazioni) quello misurato a 3, m poi diviene maggiore quello relativo a 1.2 m di altezza. Dal momento che la pavimentazione (si veda il paragrafo successivo) non ha caratteristiche fonoassorbenti, non sembra che questo comportamento sia legato a fenomeni di assorbimento acustico (si ricorda che la corsia monitorata è quella opposta rispetto alla posizione dei microfoni, che in questo sito sono a bordo strada nella corsia direzione Borgo San Lorenzo), per cui al momento non esiste una spiegazione chiara per questo fenomeno. L'unica possibilità è che la pavimentazione sia fortemente diffondente per cui molta energia acustica rimane confinata a basse altezze sopra il piano stradale e che quindi la parte riflessa verso l'alto sia molto inferiore a quanto ci si possa aspettare da semplici considerazioni geometriche.

In Figura 19 ed in Figura 20 (e in Tabella 15 sono riportati i corrispondenti valori) è riportato il confronto fra lo spettro pesato medio normalizzato SPB (lo spettro è ottenuto come media pesata fra gli spettri ottenuti in ogni sessione, ove il peso è costituito dall'incertezza statistica di tipo A per ciascuna banda) relativo alla categoria di veicoli 1 alla velocità di 50 km/h (le barre d'errore indicano l'incertezza composta ottenuta dalla deviazione standard temporale sulle sessioni dello spettro e dall'incertezza pesata associata alla media pesata) e quello relativo alla pavimentazione anteoperam, ove invece le barre d'errore indicano l'incertezza statistica di tipo A della misura.

Si nota un lieve spostamento del picco di emissione verso la frequenza di 630 Hz già intravisto con la tecnica CPX. Questo spostamento è più pronunciato nel caso della misura a tre metri di altezza. In generale si nota una maggior energia localizzata alle basse frequenze (minori di 1KHz) rispetto alle alte.

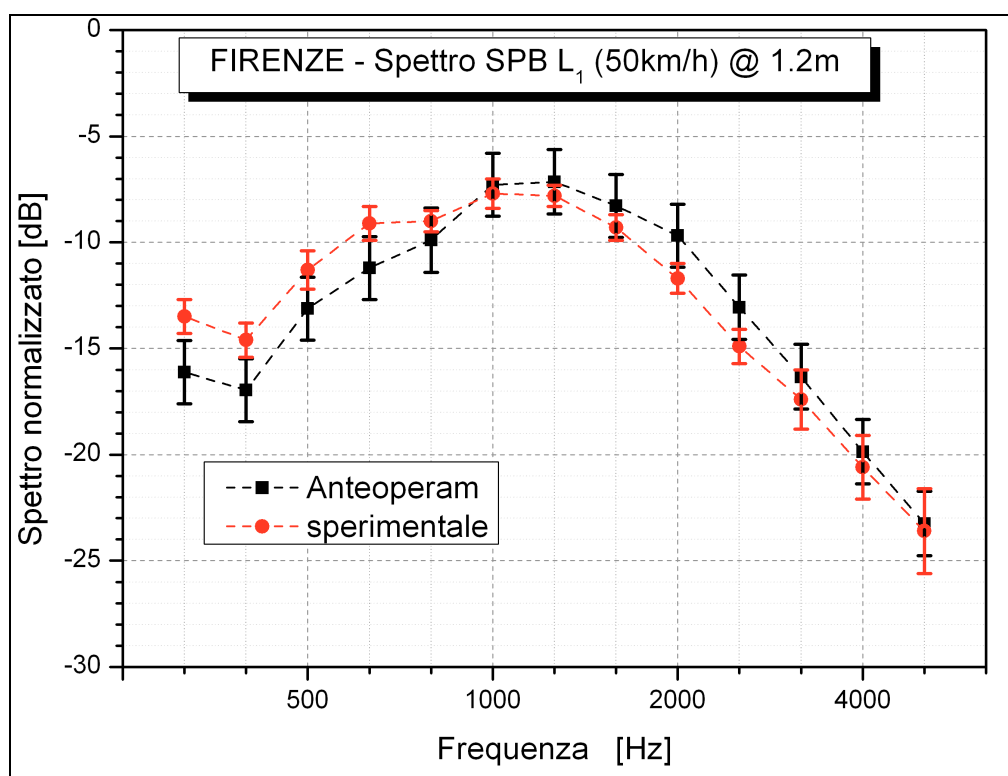


Figura 19. – Confronto fra lo spettro medio pesato temporale normalizzato SPB relativo a $L_1(50 \text{ km/h})$ della pavimentazione speciale e quello ante-operam ottenuti dalla misura a 1.2 m di altezza.

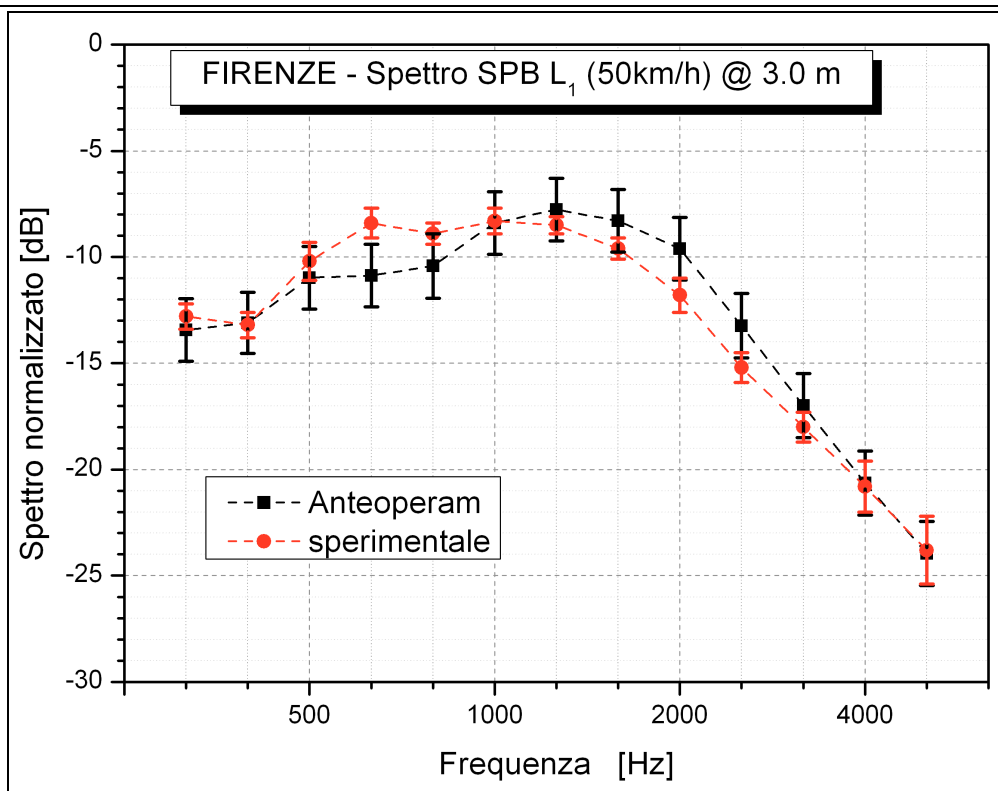


Figura 20. – Confronto fra lo spettro pesato medio temporale normalizzato SPB relativo a $L_1(50 \text{ km/h})$ della pavimentazione speciale e quello ante-operam ottenuti dalla misura a 3.0 m di altezza.

Frequenza [Hz]	h=1.2 m						h = 3.0 m					
	Ante	Δ	post	Δ	Diff.	Δd	Ante	Δ	Post	Δ	Diff.	Δd
315	-16.1	1.5	-13.5	0.8	-2.7	1.7	-13.4	1.5	-12.8	0.6	-0.6	1.6
400	-17.0	1.5	-14.6	0.8	-2.4	1.7	-13.1	1.4	-13.2	0.6	0.1	1.5
500	-13.1	1.5	-11.3	0.9	-1.8	1.7	-11.0	1.5	-10.2	0.9	-0.7	1.8
630	-11.2	1.5	-9.1	0.8	-2.1	1.7	-10.9	1.5	-8.4	0.7	-2.5	1.7
800	-9.9	1.5	-9.0	0.5	-0.9	1.6	-10.4	1.5	-8.9	0.5	-1.5	1.6
1000	-7.3	1.5	-7.7	0.7	0.5	1.6	-8.4	1.5	-8.3	0.6	-0.1	1.6
1250	-7.1	1.5	-7.8	0.5	0.7	1.6	-7.8	1.5	-8.5	0.4	0.7	1.5
1600	-8.3	1.5	-9.3	0.6	1.0	1.6	-8.3	1.5	-9.6	0.5	1.3	1.6
2000	-9.7	1.5	-11.7	0.7	2.1	1.6	-9.6	1.5	-11.8	0.8	2.2	1.7
2500	-13.1	1.5	-14.9	0.8	1.9	1.7	-13.2	1.5	-15.2	0.7	2.0	1.7
3150	-16.3	1.5	-17.4	1.4	1.1	2.0	-17.0	1.5	-18.0	0.7	1.0	1.7
4000	-19.9	1.5	-20.6	1.5	0.7	2.2	-20.6	1.5	-20.8	1.2	0.2	1.9
5000	-23.3	1.5	-23.6	2.0	0.3	2.5	-24.0	1.5	-23.8	1.6	-0.2	2.2

Tabella 15 – Confronto fra gli spettri normalizzati SPB $L_1(50 \text{ km/h})$ anteoperam (ante) e medio pesato temporale post operam (post) alle due altezze. Δ l'incertezza composta calcolata sulle sessioni di misura. Diff indica la differenza fra i livelli ante e quelli post-operam. Δd indica la rispettiva incertezza. I livelli sono in dB.

3.2.3 Risultati ADRIENNE

In questo caso si considera l'assorbimento proprio della pavimentazione. In Figura 21 è riportata una serie di istogrammi corrispondenti alle varie sessioni di misura valide e fornisce un'indicazione della variabilità nel tempo del coefficiente di assorbimento acustico.

Nella pavimentazione sperimentale presente nel sito di Firenze non si notano particolari assorbimenti (con l'esclusione delle frequenze superiori a 3 KHz per le prime due sessioni di misura, probabilmente più legato alla diffusione superficiale della pavimentazione che ad un suo reale assorbimento).

La pavimentazione si è assestata su valori di assorbimento acustico praticamente trascurabili a tutte le frequenze.

In Figura 22 è riportato il valor medio dell'assorbimento in funzione della frequenza e la sua variabilità complessiva (deviazione standard totale) composta dalla somma in quadratura della deviazione standard spaziale (variabilità del coefficiente sulle singole prove all'interno di una sessione) e dalla deviazione standard temporale (variabilità nel tempo delle medie per sessione).

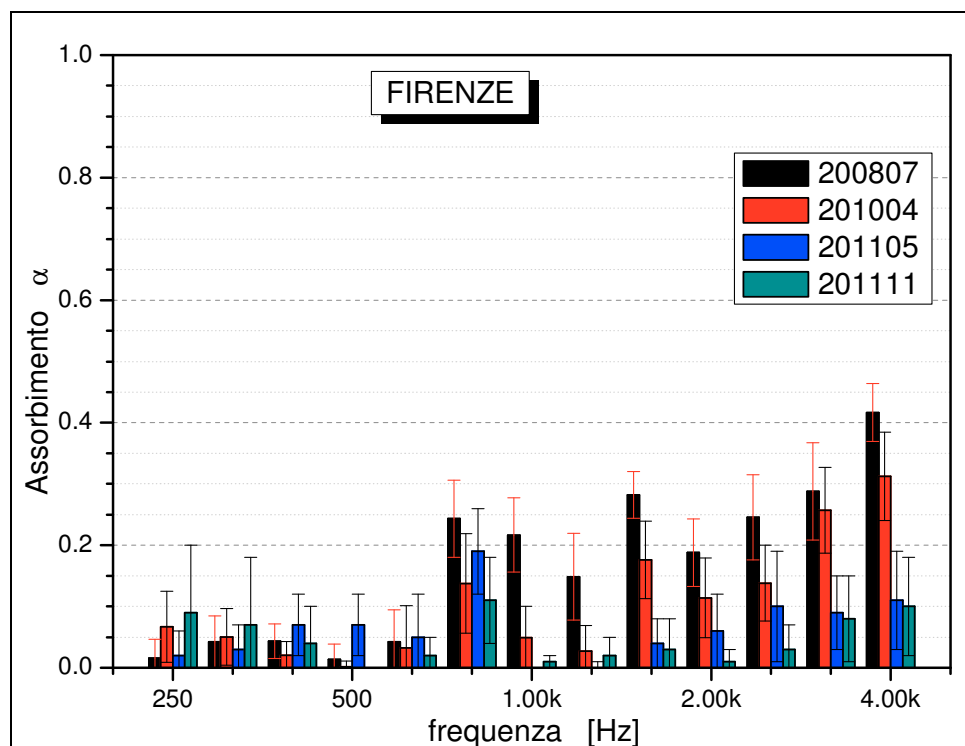


Figura 21. – *Evoluzione temporale dei coefficienti di assorbimento in funzione della frequenza. Sono state esclusi i dati delle sessioni che hanno presentato risultati anomali. Le barre d'errore corrispondono alla variabilità spaziale del dato.*

Come nel caso di Lucca, si osserva che questa pavimentazione è caratterizzata da uno scarso

assorbimento acustico (compreso fra 0.23 a 4 KHz e 0.02 a 500 Hz) con una variabilità complessiva non eccessiva (compresa fra 0.03 e 0.16).

Infine in Tabella 16 vengono riportati i valori del coefficiente di assorbimento medio a banda larga della pavimentazione con la relativa deviazione spaziale standard. Anche in questo caso l'assorbimento della pavimentazione è assente (sempre significativamente inferiore a 0.2) con valori pressoché costanti nel tempo (ovviamente tale risultato è coerente con la pavimentazione utilizzata in questo sito che non ha intrinseche capacità dia assorbimento).

Sessione	Assorbimento medio $\bar{\alpha}$	Dev. Spaz. Std.
Luglio 2008	0.17	0.05
Novembre 2009	0.04	0.03
Aprile 2010	0.11	0.05
Maggio 2011	0.06	0.05
Novembre 2011	0.05	0.05

Tabella 16 - Valori di assorbimento medio ottenuti nelle varie sessioni di misura effettuate nel sito di Firenze, con il relativo valore di deviazione spaziale standard.

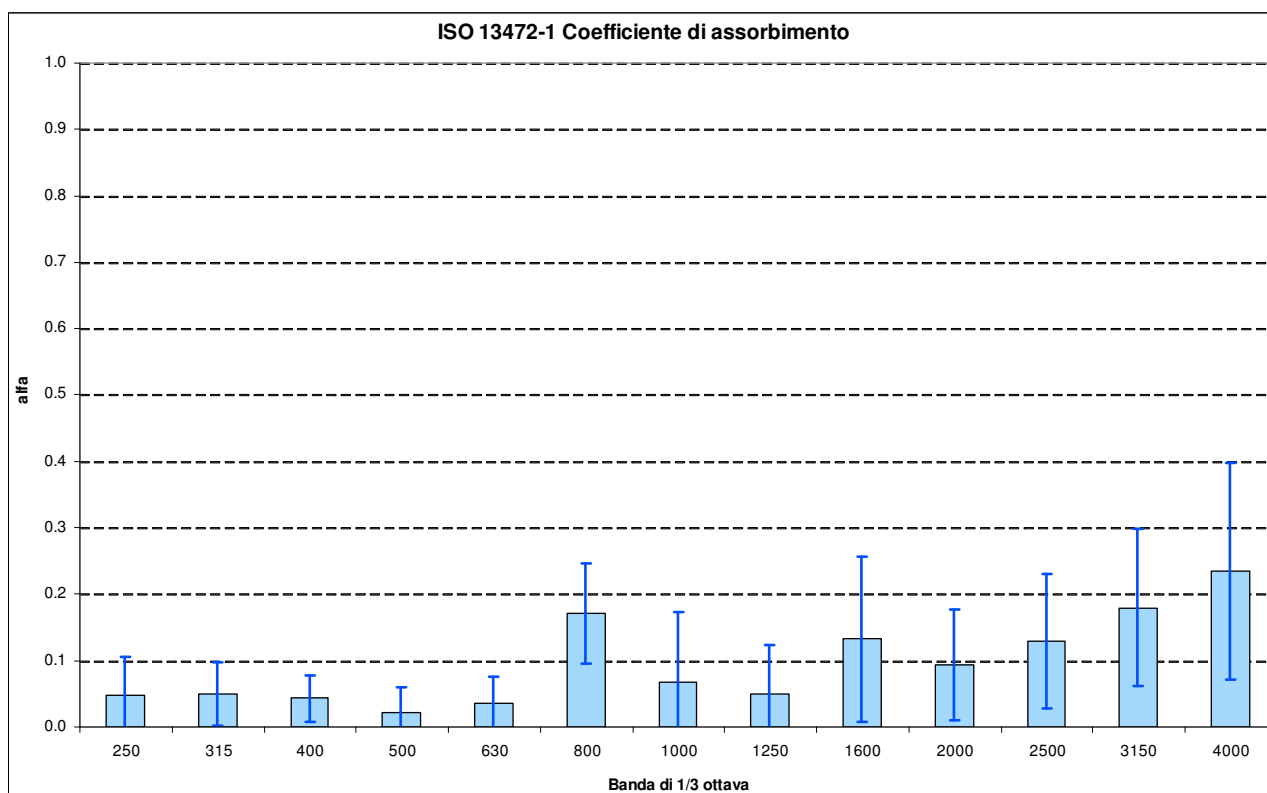


Figura 22. – Variabilità complessiva del coefficiente di assorbimento in funzione della frequenza. È indicata la deviazione standard complessiva composta partendo dalla variabilità temporale e da quella spaziale

3.3 Arezzo

Nel sito in provincia di Arezzo è stata stesa una pavimentazione con un tappeto microdrenante con usura open graded stesa il **03 Giugno 2008**.

In Tabella 17 sono riportate le date delle indagini condotte sullo studio delle caratteristiche acustiche e la loro evoluzione per ogni tecnica di misura utilizzata.

SESSIONE	CPX	SPB	Adrienne
Ante-operam	12/09/2006	08/03/2006	---
Estate 2008	10/06/2008	---	---
Estate 2008 (II)	17/07/2008	17/07/2008	10/07/2008
Primavera 2009	08/04/2009	---	29/01/2009
Estate 2009	22/07/2009	22/07/2009	---
Autunno 2009	27/11/2009 (*)	27/11/2009 (*)	---
Primavera 2010	21/04/2010	---	16/04/2010
Primavera 2011	20/04/2011	20/04/2011	12/04/2011
Autunno 2011	27/09/2011	28/09/2011	24/11/2011
Estate 2012	12/07/2012	---	---

Tabella 17.- Sessioni di misura eseguite sul sito di Arezzo.
(*) Pavimentazione umida. Piogge nei giorni precedenti.

3.3.1 Risultati CPX

In Tabella 18 vengono mostrati i risultati ottenuti con le misure CPX effettuate sul sito. In tabella sono riportati i Livelli CPXL relativi alla velocità di 50 km/h (indicati nel seguito e nelle didascalie con l'acronimo CPXL(50)), il loro confronto con la pavimentazione di riferimento *in situ* ed il confronto con la misura effettuata ante-operam. Per ogni livello o differenza è riportata la relativa incertezza.

In Tabella 19 è invece riportato il valore CPXL medio alla velocità di 50 km/h sulla corsia di marcia per ciascuna direzione e la differenza fra le due corsie di marcia, con le rispettive incertezze, per ogni sessione di misura effettuata. Si nota che le differenze nel tempo sono molto fluttuanti se confrontate con le rispettive incertezze e che la corsia in direzione Anghiari risulta nella maggior

parte dei casi più rumorosa della corsia in direzione Firenze. Tale differenza si sta accentuando nel tempo anche a causa della progressiva otturazione dei vuoti presenti nella pavimentazione (drenante) soprattutto nella corsia in direzione Anghiari (si veda oltre). Per cui, mediamente, vi sono differenze fra i risultati per le due corsie.

	RIFERIMENTO		SPERIMENTALE		Differenza		Confronto Ante-Post	
data	CPXL	Δ	CPXL	Δ	Diff	Δ	Diff	Δ
12/09/2006 (anteoperam)	95.1	0.5	---	---	---	---	---	---
10/06/2008	93.3	0.6	89.6	0.8	3.7	1.0	5.5	1.0
17/07/2008	92.7	0.4	89.7	0.8	2.9	0.9	5.4	1.0
08/04/2009	93.7	0.4	89.3	0.6	4.3	0.7	5.8	0.7
22/07/2009	92.7	0.4	90.5	0.7	2.2	0.8	4.6	0.8
27/11/2009	96.1	0.4	91.4	0.7	4.6	0.8	3.7	0.9
21/04/2010	95.0	0.4	90.0	0.6	5.0	0.8	5.1	0.8
20/04/2011	94.9	0.7	90.5	1.3	4.4	1.5	4.6	1.4
27/09/2011	94.5	0.7	90.3	1.1	4.2	1.3	4.8	1.2
12/07/2012	94.2	0.5	90.5	1.2	3.7	1.3	4.6	1.3

Tabella 18. – Confronto fra i valori CPXL(50) misurati durante le varie sessioni. Sono riportati sia le differenze rispetto alla misura sulla pavimentazione di riferimento che rispetto alla misura ante-operam. Δ indica l'incertezza associata ai livelli o relativa alla differenza. Tutti i livelli sono in dB(A).

DATA	Direzione Anghiari		Direzione Capolona		Differenza	
	CPXL	Δ	CPXL	Δ	CAP-ANG	Δ
10/06/2008	89.9	1.0	89.2	0.7	- 0.7	1.2
17/07/2008	90.2	0.9	89.2	0.7	- 1.0	1.2
08/04/2009	89.5	0.7	89.1	0.5	- 0.5	0.8
22/07/2009	90.5	0.7	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>
27/09/2009	91.2	0.8	91.6	0.6	0.3	1.0
21/04/2010	90.2	0.8	89.8	0.5	- 0.4	0.9
20/04/2011	91.3	1.6	89.6	1.1	- 1.7	1.9
27/09/2011	91.1	1.5	89.5	0.4	- 1.6	1.5
12/07/2012	91.5	1.6	89.5	0.5	- 2.0	1.7

Tabella 19. – Confronto fra i valori CPXL(50) ottenuti per le due corsie di marcia per ciascuna sessione di misura sulla pavimentazione speciale. Δ indica l'incertezza associata ai livelli o relativa la differenza. Tutti i livelli sono in dB(A).

In Figura 23 è invece mostrato l'andamento spaziale dei livelli CPXL alle due velocità principali nello spazio, ove ogni punto rappresenta un livello calcolato su uno spazio di 5.75 m, con la relativa incertezza. E' stata qui riportata la misura effettuata *un anno dopo*, quando ormai la pavimentazione si era assestata e la figura si riferisce alla sola corsia strumentata. Si nota una serie di disomogeneità dei livelli CPXL, maggiormente evidenti all'inizio ed alla fine del tratto, tanto che la deviazione standard composta σ (si veda il paragrafo 2.4 per la sua descrizione) risulta poco contenuta (0.6 a 50 km/h e 0.7 a 80 km/h).

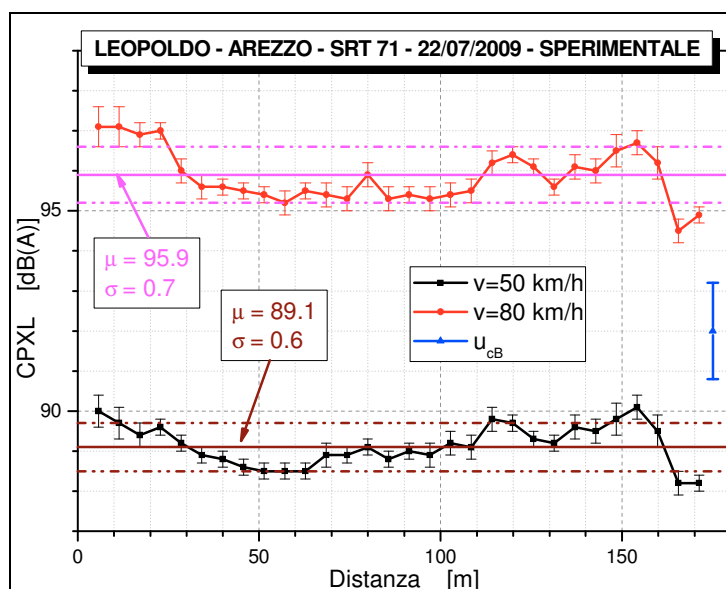


Figura 23. - Andamento dei valori di CPXL in funzione dello spazio sulla corsia strumentata dopo un anno dalla stesa. È riportata sia la media spaziale μ che la deviazione spaziale standard σ . È riportata l'incertezza estesa di tipo B U_{CB} , pari a 1.0 dB(A)

In Figura 24 è invece riportato lo stesso andamento dei livelli misurati sulla corsia strumentata misurato tre anni dopo la stesa, durante le indagini condotte nel settembre 2011. Si osserva un forte peggioramento dell'omogeneità spaziale della pavimentazione e nel tratto prossimo l'ingresso di Marcena i livelli di emissione sono molto più elevati di quelli rilevati del tratto terminale della pavimentazione speciale (circa 3 dB(A) per entrambe le velocità riportate).

Il fenomeno è quasi sicuramente legato al progressivo otturazione dei vuoti presenti nella pavimentazione drenante. Questo è maggiormente evidente nel primo tratto di pavimentazione, ove la protezione del muro di contenimento laterale è assente e quindi è più facile che ci sia della terra trasportata dal vento proveniente dai campi lavorati presenti attorno al sito.

Inoltre il mese di settembre 2011 è stato caratterizzato da quasi completa assenza di piogge, per cui l'azione dilavante del passaggio dei veicoli sulla strada bagnata è stata quasi completamente assente. Questo comporta un progressivo degrado delle caratteristiche di assorbimento acustico proprie della pavimentazione speciale, che sarà evidente anche analizzando i risultati ottenuti con le misure "Adrienne" di assorbimento acustico presentate nel seguito.

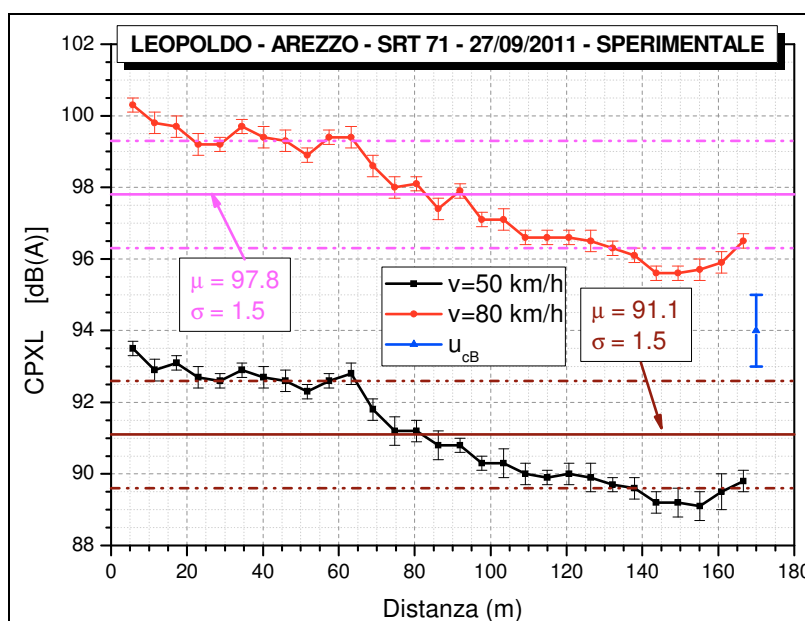


Figura 24. - Andamento dei valori di CPXL in funzione dello spazio sulla corsia strumentata dopo oltre tre anni dalla stesa. È riportata sia la media spaziale μ che la deviazione spaziale standard σ . È riportata l'incertezza estesa di tipo B U_{cB}

In tutte le figure successive relative ai livelli CPXL è stato preso in esame il valore corrispondente alla velocità di 50 km/h. Risultati analoghi si avranno per le altre due velocità di riferimento: 80 e 110 km/h.

In Figura 25 è riportato l'andamento nel tempo dei livelli CPXL(50), mentre in Figura 26 è riportato l'andamento delle differenze riscontrate fra la misura sulla pavimentazione sperimentale e la misura effettuata sulla pavimentazione usata come riferimento.

Dai risultati (Tabella 18) si osserva un andamento poco fluttuante dei livelli nel tempo rispetto all'anteoperam, che sembra assestarsi ad una riduzione di circa 4.7 dB(A) nell'ultimo anno di indagini, più fluttuante se invece confrontata con la pavimentazione di riferimento (che sta comunque peggiorando progressivamente, anche se lentamente, nel tempo; ovvero l'emissione di contatto fra pavimentazione e pneumatico sembra che sia sempre meno inferiore sulla pavimentazione sperimentale rispetto a quella di riferimento, eccetto che per la misura effettuata il 27/11/2009, dove la pavimentazione era ancora umida dalle piogge dei giorni precedenti).

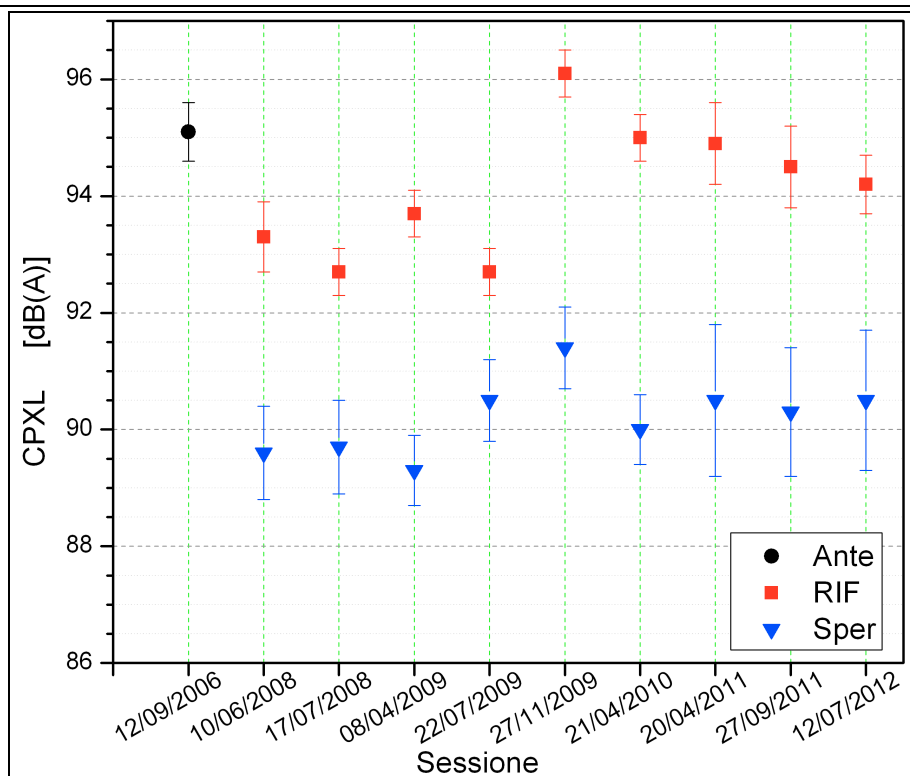


Figura 25. – Confronto valori CPXL(50) per le pavimentazioni ante-operam (ante), di riferimento (rif) e sperimentale (sper). Sono riportate le rispettive incertezze di tipo A come barre d'errore.

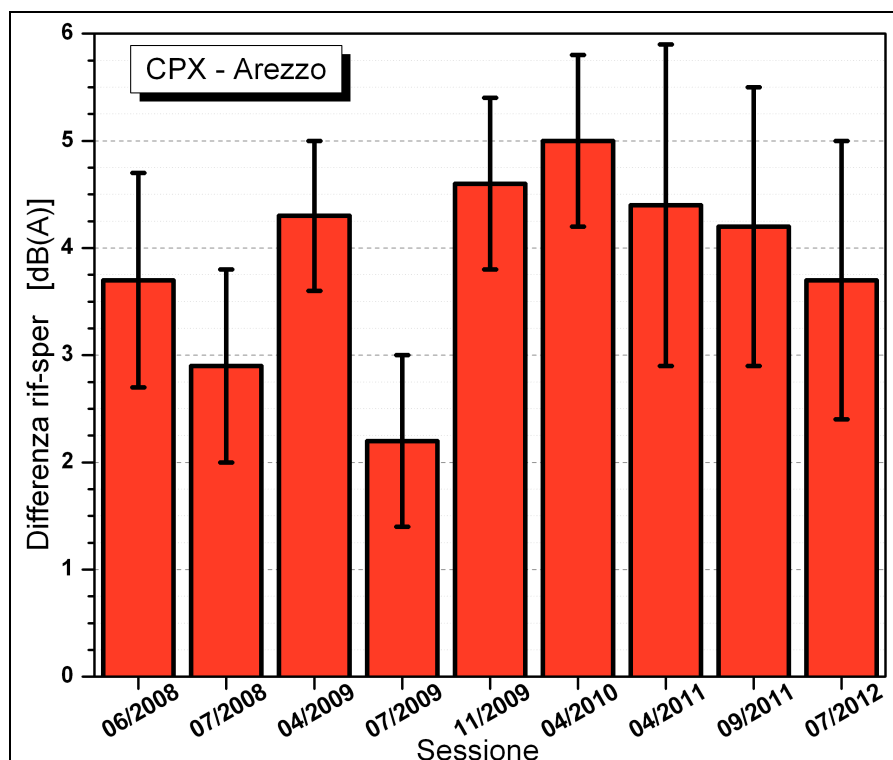


Figura 26. – Andamento nel tempo della differenza fra i livelli CPXL(50) misurati sulla pavimentazione di usura di riferimento e quella sperimentale. La barra rappresenta l'incertezza associata alla differenza ottenuta considerando solo la parte statistica dell'incertezza totale.

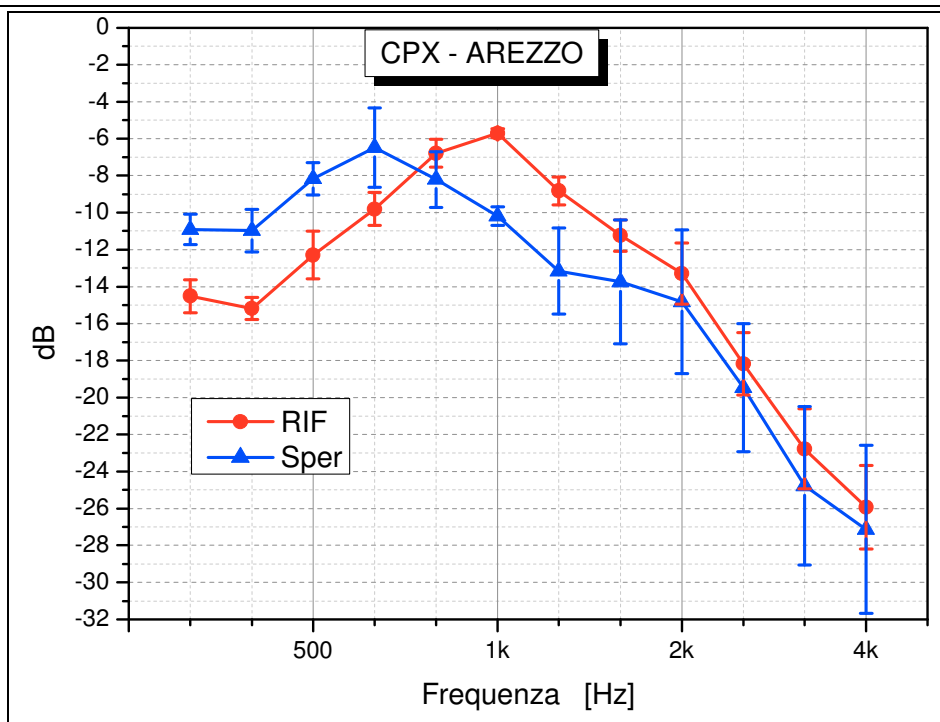


Figura 27. – Confronto fra lo spettro normalizzato CPX della pavimentazione sperimentale (sper) e lo spettro normalizzato della pavimentazione di riferimento (rif), ove le barre d'errore indicano la deviazione standard temporale dello spettro, relativa ai primi tre anni di misura (2008-2010).

Frequenza	Riferimento	Δ	Sperimentale	Δ	Differenza	Δ
315	-14.5	0.9	-10.9	0.8	-3.6	1.2
400	-15.2	0.6	-11.0	1.2	-4.2	1.3
500	-12.3	1.3	-8.2	0.9	-4.1	1.6
630	-9.8	0.9	-6.5	2.1	-3.3	2.3
800	-6.8	0.8	-8.2	1.5	1.4	1.7
1000	-5.7	0.2	-10.2	0.5	4.5	0.5
1250	-8.8	0.8	-13.2	2.3	4.4	2.4
1600	-11.2	0.9	-13.7	3.4	2.5	3.5
2000	-13.3	1.6	-14.8	3.9	1.5	4.2
2500	-18.2	1.7	-19.5	3.5	1.3	3.9
3150	-22.8	2.2	-24.8	4.3	2.0	4.8
4000	-25.9	2.3	-27.1	4.5	1.2	5.1

Tabella 20. – Confronto fra gli spettri normalizzati della pavimentazione di riferimento e della pavimentazione sperimentale. Δ indica la deviazione standard temporale calcolata su tutte le sessioni di misura effettuate nei primi tre anni dalla stesa (2008-2010). È riportata anche la differenza con relativa incertezza fra livello di riferimento e livello sperimentale. Tutti i livelli sono in dB.

In questo caso nell'ultimo anno la differenza fra le due pavimentazioni si assesta attorno a 4.3 dB(A). Da notare anche l'alta variabilità dei livelli, soprattutto nelle ultime sessioni di misura, legata al progressivo deterioramento della percentuale dei vuoti precedentemente discussa.

In Figura 27 è riportato il confronto fra gli spettri acustici sia della pavimentazione speciale che della pavimentazione di riferimento. Le "barre d'errore" indicano la deviazione standard calcolata sugli spettri misurati durante le varie sessioni di misura per le due pavimentazioni, nel periodo corrispondente ai primi tre anni di monitoraggio.

Il picco di emissione della pavimentazione sperimentale è sensibilmente spostato verso 630 Hz rispetto al picco dell'ante-operam/pavimentazione di riferimento. Questo rispecchia le caratteristiche costruttive del manto (pavimentazione drenante).

La pavimentazione sperimentale ha mostrato una grande variabilità nel tempo (il periodo esaminato, per omogeneità fra tutte le pavimentazioni descritte nel presente rapporto, è quello relativo ai primi tre anni di vita, in questo caso copre gli anni 2008-2010), come si vede dalla deviazione standard temporale (Tabella 20) molto superiore ad 1 dB a quasi tutte le frequenze d'interesse, mentre lo spettro della pavimentazione di riferimento ha mostrato una minor variabilità nel tempo.

Ancora una volta questo può in parte essere spiegato con il progressivo deterioramento della percentuale dei vuoti presenti, che genera, soprattutto ad alta frequenza, un innalzamento dei livelli di rumore emessi a causa del minor assorbimento presente.

3.3.2 Risultati SPB

In Tabella 21 vengono mostrati i risultati ottenuti con le misure SPB effettuate sul sito. In tabella sono riportati i livelli SPB relativi alla categoria 1 di traffico (veicoli leggeri, ovvero automobili, piccoli van) calcolati alla velocità di 50 km/h, il confronto con la misura effettuata ante-operam, sia per la misura effettuata all'altezza di 1.2 m (ISO 11819-1:2004 e Progetto HARMONOISE) che per la misura a 3.0 m di altezza (progetto HARMONOISE). Per ogni livello e differenza è riportata la relativa incertezza.

In Figura 28 è riportato l'andamento nel tempo dei livelli SPB L_1 , precedentemente descritti, mentre in Figura 29 è riportato l'andamento delle differenze riscontrate fra la misura sulla pavimentazione sperimentale e il risultato ottenuto con la pavimentazione anteoperam.

Sessione	h=1.2m	Δ	Differenza	Δ	h=3.0 m	Δ	Differenza	Δ
08/03/2006 (anteoperam)	72.4	1.0			74.6	1.5		
17/07/2008	66.7	1.3	-5.7	1.4	66.4	1	-8.2	1.8
22/07/2009	65.4	.9	-7.0	1.3	66.1	0.8	-8.5	1.7
27/11/2009	73.4	0.9	1.0	1.3	73.7	0.9	-0.9	1.7
20/04/2011	71.0	1.2	-1.4	1.6	71.5	1.3	-3.1	2.0
28/09/2011	70.8	1.9	-1.6	2.1	72.3	1.6	-2.3	2.2

Tabella 21. – Confronto fra i valori SPB $L_1(50 \text{ km/h})$ misurati durante le varie sessioni. Sono riportati le differenze rispetto alla misura ante-operam. Δ indica l'incertezza associata ai livelli o relative la differenza. Tutti i livelli sono in dB(A).

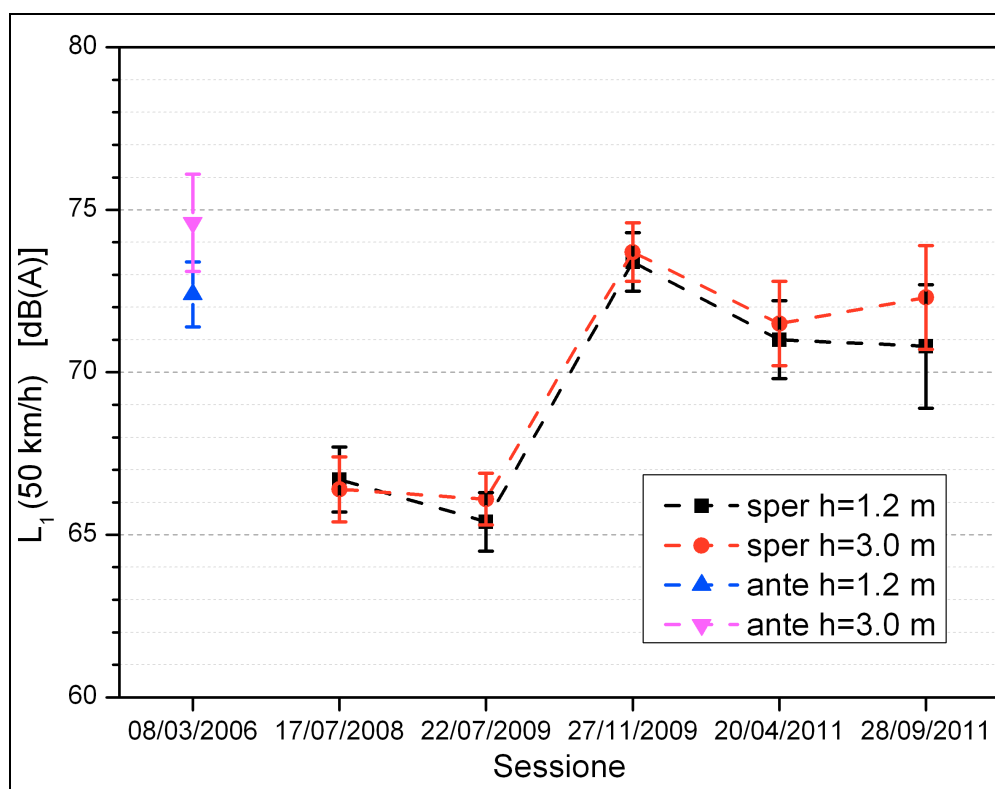


Figura 28. – Confronto fra i livelli SPB $L_1(50 \text{ km/h})$ per la pavimentazione ante-operam (ante) e per quella sperimentale nelle varie sessioni di misura effettuate (sper).

Sia dalla tabella che dai grafici si nota una forte diminuzione della differenza fra i livelli SPB ante-operam e quelli post-operam ad entrambe le altezze di misura fra quanto inizialmente misurato (con una differenza ante-post **massima** di **7.0 dB(A)** a 1.2 m e di **8.5 dB(A)** a 3 m registrata nella sessione di luglio 2009) e quanto misurato successivamente.

Si ricorda che la misura del 27/11/2009 è stata eseguita su pavimentazione umida, bagnata dalle piogge dei giorni precedenti la misura stessa e questo forse spiega l'incremento dei livelli SPB L1 misurato nella sessione di misura.

Le successive sessioni hanno fatto registrare livelli SPB L₁ che differiscono per valori di circa **1.5 dB(A)** a 1.2 m di altezza e per quanto riguarda la misura a 3.0 m, valori con andamento della differenza in diminuzione fino ad un **minimo di 2.3 dB(A)** registrato nella sessione di settembre 2011.

Anche in questo caso si può attribuire questa perdita di prestazioni alla progressiva otturazione dei vuoti presenti nella pavimentazione. Nel caso della misura con tecnica SPB questo fenomeno è maggiormente avvertibile rispetto a quanto visto con il CPX, in quanto la misura è effettuata in prossimità del tratto iniziale di pavimentazione drenante (ovvero prossimo all'entrata di Marcena) e si riferisce al traffico transitante sulla corsia direzione Anghiari, che, nell'analisi CPX sopra riportata, risulta maggiormente compromesso dal fenomeno.

Infatti, considerando solo i primi 60 m (vedi Figura 24) per calcolare il valor medio sull'intera tratta dell'indice CPX, si troverebbe un valore di differenza CPX di circa 2.2, molto prossimo a quanto misurato come differenza ante-post per l'indice SPB.

In Figura 30 ed in Figura 31 è riportato il confronto fra lo spettro medio temporale normalizzato SPB relativo alla categoria di veicoli 1 alla velocità di 50 km/h (lo spettro è ottenuto come media pesata fra gli spettri ottenuti in ogni sessione, ove il peso è costituito dall'incertezza statistica di tipo A per ciascuna banda; le barre d'errore indicano l'incertezza composta ottenuta dalla deviazione standard temporale sulle sessioni dello spettro e dall'incertezza pesata associata alla media pesata) e lo spettro normalizzato delle pavimentazione ante-operam, ove invece le barre d'errore indicano l'incertezza della misura.

Si nota un appiattimento dei livelli in frequenza nella regione di frequenza compresa fra 630 e 1600 Hz e non c'è di fatto traccia dello spostamento del picco di emissione verso la frequenza di 630 Hz visto con la tecnica CPX. In generale l'emissione acustica è lievemente spostato verso le basse frequenze. Questo andamento è più pronunciato nel caso della misura a tre metri di altezza.

In Tabella 22 sono riportati i valori corrispondenti.

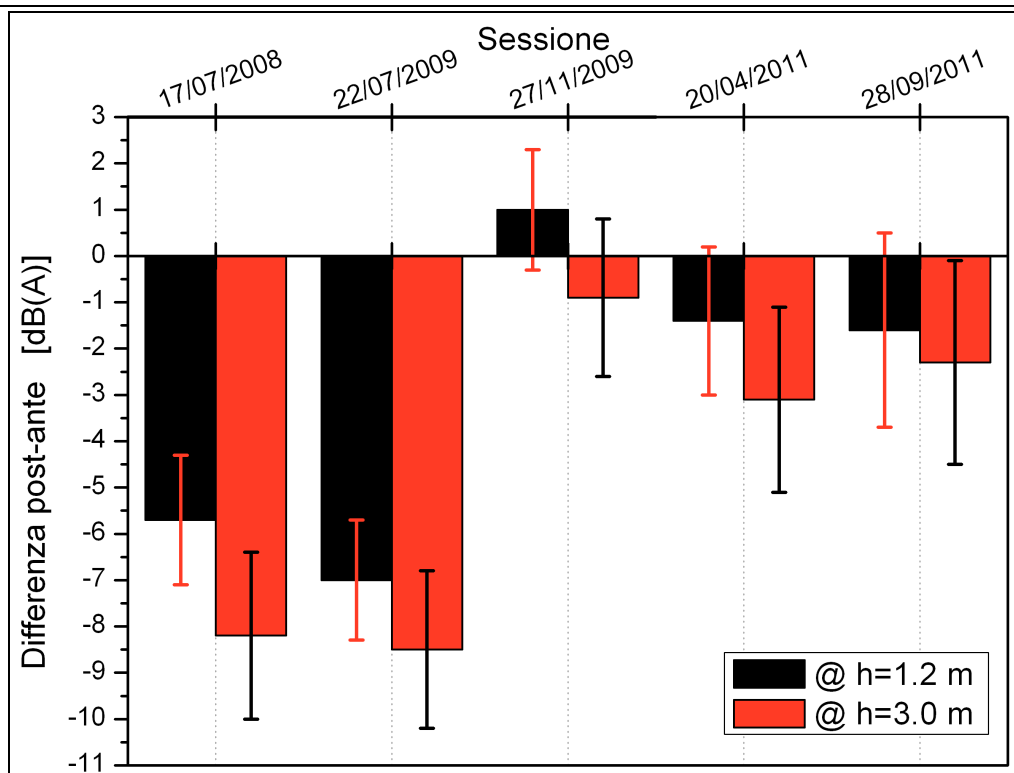


Figura 29. – Differenza fra i livelli SPB $L_1(50 \text{ km/h})$ misurati sulla pavimentazione sperimentale e quella ante-operam, alle due altezze considerate, con le relative incertezze.

Frequenza [Hz]	h=1.2 m						h = 3.0 m					
	Ante	Δ	post	Δ	Diff.	Δd	Ante	Δ	Post	Δ	Diff.	Δd
315	-11.7	2.1	-12.3	3.0	0.7	3.7	-11.5	2.1	-11.7	2.4	0.2	3.2
400	-12.2	2.1	-13.2	2.8	1.0	3.7	-12.8	2.1	-13.1	2.3	0.3	3.1
500	-10.2	2.1	-11.4	3.1	1.2	4.3	-11.8	2.1	-11.7	2.4	-0.2	3.2
630	-9.7	2.1	-9.8	3.1	0.1	4.5	-10.2	2.1	-9.6	2.4	-0.7	3.2
800	-10.4	2.1	-9.9	2.3	-0.5	3.5	-9.7	2.1	-9.2	1.4	-0.5	2.5
1000	-9.5	2.1	-9.6	2.0	0.1	2.5	-9.6	2.1	-9.0	1.4	-0.6	2.5
1250	-8.6	2.2	-9.2	3.0	0.6	3.9	-8.7	2.1	-8.9	2.1	0.2	3.0
1600	-9.2	2.2	-9.4	2.9	0.2	4.2	-8.3	2.1	-9.5	2.5	1.2	3.3
2000	-10.2	2.2	-11.7	3.0	1.5	4.2	-9.4	2.1	-11.7	2.9	2.3	3.6
2500	-12.8	2.2	-15.6	2.6	2.8	4.2	-12.6	2.1	-15.6	2.7	3.0	3.4
3150	-15.1	2.2	-18.7	2.6	3.6	5.0	-15.5	2.1	-18.4	2.3	2.9	3.1
4000	-18.6	2.2	-21.8	2.3	3.2	6.1	-19.3	2.1	-21.4	1.8	2.2	2.8
5000	-21.0	2.2	-25.1	2.1	4.1	7.4	-22.8	2.1	-24.7	1.5	1.9	2.6

Tabella 22 – Confronto fra gli spettri normalizzati SPB $L_1(50 \text{ km/h})$ anteoperam (ante) e post operam (post) alle due altezze. Δ indica l'incertezza composta calcolata sulle sessioni di misura. Diff indica la differenza fra i livelli ante e quelli post-operam. Δd indica la rispettiva incertezza. I livelli sono in dB.

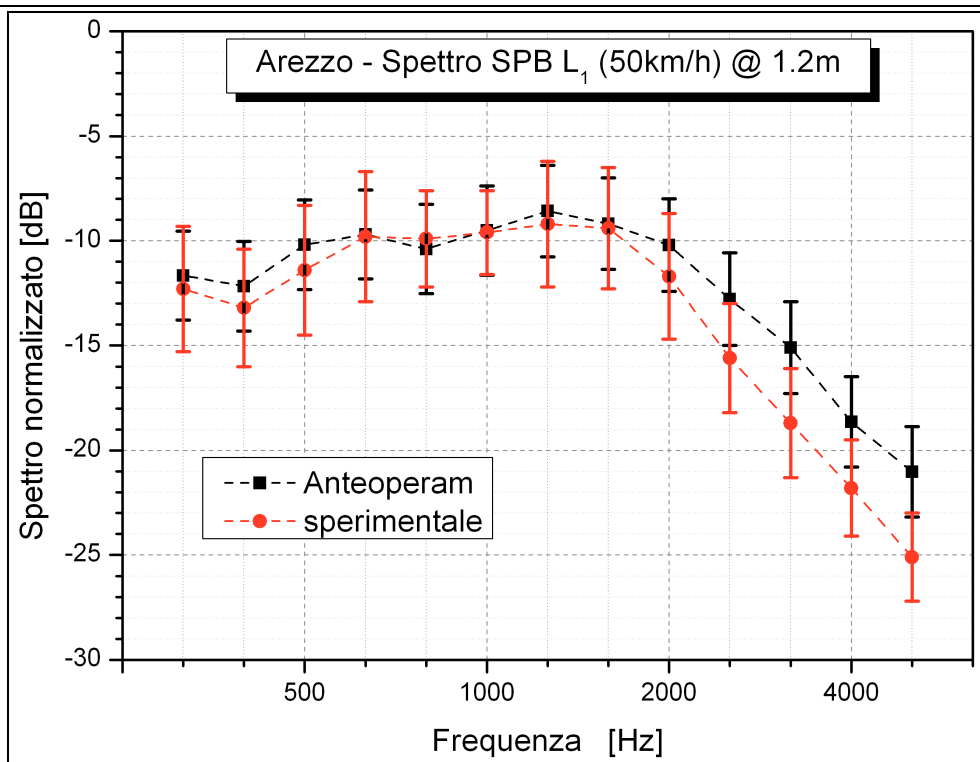


Figura 30. – Confronto fra lo spettro pesato medio temporale normalizzato SPB relativo a L_1 (50 km/h) della pavimentazione speciale e quello ante-operam ottenuti dalla misura a 1.2 m di altezza.

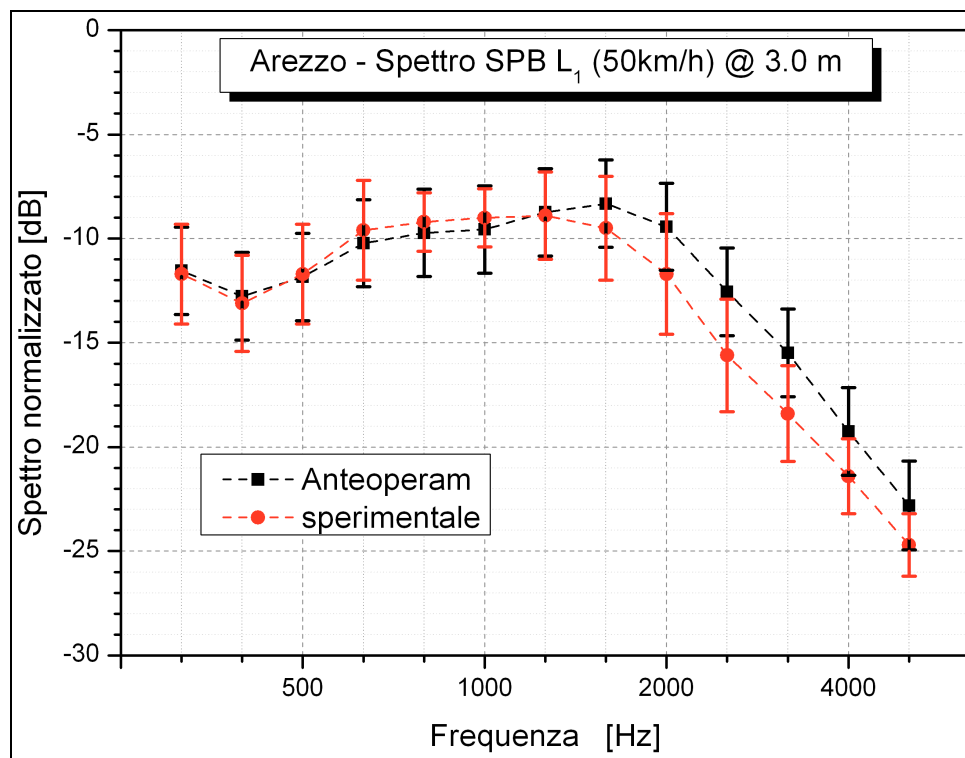


Figura 31. – Confronto fra lo spettro pesato medio temporale normalizzato SPB relativo a L_1 (50 km/h) della pavimentazione speciale e quello ante-operam attenuati all'altezza di 3.0 m.

3.3.3 Risultati ADRIENNE

In questo caso si considera l'assorbimento proprio della pavimentazione. In Figura 32 è riportata una serie di istogrammi corrispondenti alle varie sessioni di misura valide e fornisce un'indicazione della variabilità nel tempo del coefficiente di assorbimento acustico. Nella pavimentazione sperimentale presente nel sito di Arezzo si nota un sensibile assorbimento iniziale fra 800 Hz ed 1k Hz. Nel tempo invece l'assorbimento si è spostato verso le basse frequenze si è fortemente attenuato alle alte frequenze. Questo fenomeno può essere spiegato col progressivo riempimento dei vuoti presenti nella pavimentazione (di tipo drenante) a causa dello sporco che si accumula sul manto stradale. Il tutto è stato aggravato dal fatto che nel mese di settembre 2011, quando è stata effettuata l'ultima sessione di misura, non ci sono state precipitazioni atmosferiche significative, per cui l'azione dilavante esercitata dai mezzi transitanti sulla carreggiata è stata fortemente compromessa.

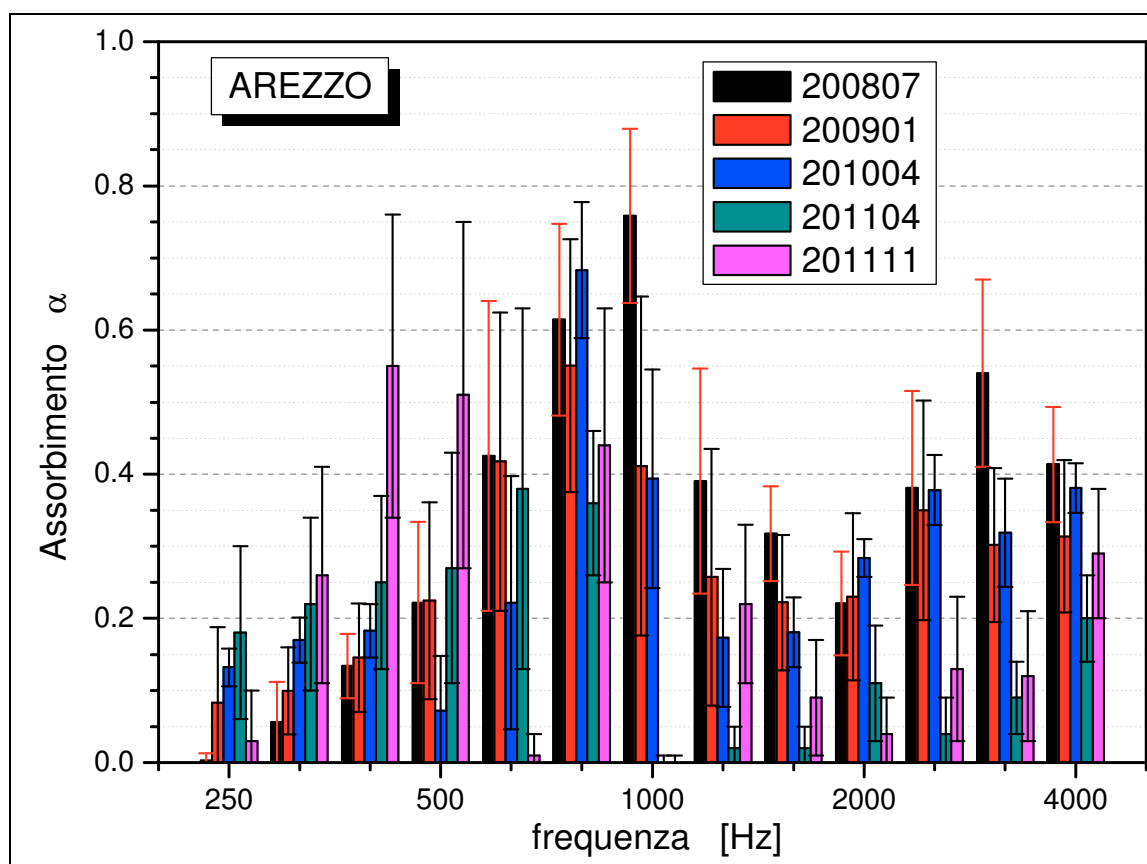


Figura 32. – Evoluzione temporale dei coefficienti di assorbimento in funzione della frequenza. Sono state esclusi i dati delle sessioni che hanno presentato risultati anomali. Le barre d'errore corrispondono alla variabilità spaziale del dato.

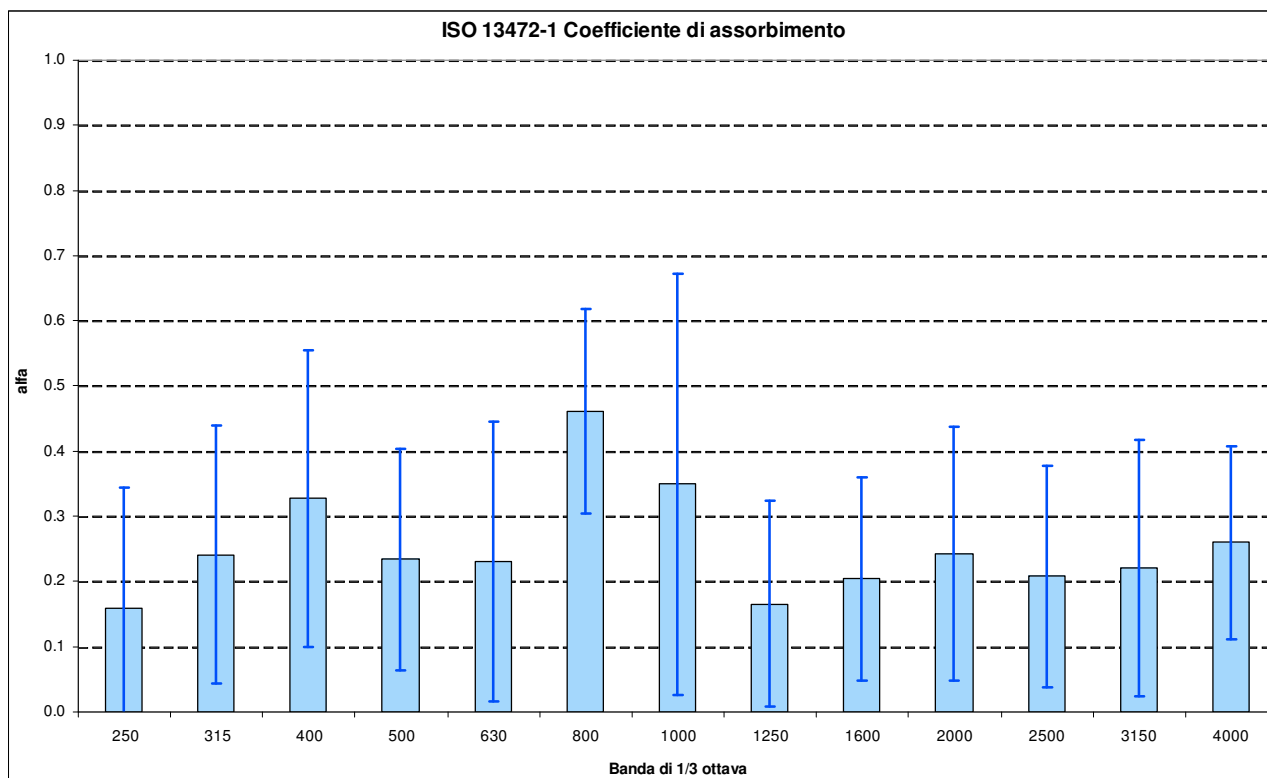


Figura 33. – Variabilità complessiva del coefficiente di assorbimento in funzione della frequenza. È indicata la deviazione standard complessiva composta partendo dalla variabilità temporale e da quella spaziale

In Figura 33 è riportato il valor medio dell'assorbimento in funzione della frequenza e la sua variabilità complessiva (deviazione standard totale) composta dalla somma in quadratura della deviazione standard spaziale (variabilità del coefficiente sulle singole prove all'interno di una sessione) e dalla deviazione standard temporale (variabilità nel tempo delle medie per sessione).

Anche in questo caso si osserva che questa pavimentazione è caratterizzata da un apprezzabile assorbimento acustico a 800 Hz ($\alpha=0.46$) con bassa variabilità (0.16), mentre alle altre frequenze si osservano dei valori medi molto meno significativi e soprattutto una forte variabilità nel tempo dei risultati. Si segnala in particolare il caso della frequenza 1KHz caratterizzato da un valor medio di assorbimento di 0.35, con una deviazione standard temporale di 0.32, causata, come evidenziato in Figura 32, dalla progressiva scomparsa nel tempo (da un valore iniziale di 0.76 ad un valore finale prossimo a 0.00) dell'attenuazione del suono in quella banda.

Infine in Tabella 23 vengono riportati i valori del coefficiente di assorbimento medio a banda larga della pavimentazione con la relativa deviazione spaziale standard.

In questo caso l'assorbimento della pavimentazione è inizialmente apprezzabile (0.34 nella sessione di Luglio 2008 con una variabilità spaziale contenuta e dello stesso ordine di grandezza

dell'incertezza di tipo B associata alla metodica, 0.1) ed è coerente col tipo di pavimentazione presente (drenante) anche se comunque non elevata.

Invece ripetendo l'indagine nel tempo si osserva che questa progressivamente si riduce fino a scendere sotto 0.2 nella sessione di Aprile 2011, per poi risalire leggermente ma non significativamente nella successiva sessione.

Anche questo è coerente con quanto osservato in precedenza e quindi col fatto che la pavimentazione drenante non è la soluzione ottimale laddove è richiesto un risanamento acustico in contesti in cui non è presente l'effetto di dilavamento dovuto a intenso traffico ad alta velocità media di percorrenza, in quanto in relativamente poco tempo si ha la perdita delle proprietà fonoassorbenti proprie di questo tipo di pavimentazione.

In questo caso specifico occorre notare comunque che dopo 4 anni dalla stesa sono comunque presenti in parte le caratteristiche di bassa emissione come le misure CPX evidenziano.

Sessione	Assorbimento medio $\bar{\alpha}$	Dev. Spaz. Std.
Luglio 2008	0.34	0.10
Gennaio 2009	0.28	0.13
Novembre 2009	0.29	0.17
Aprile 2010	0.24	0.11
Aprile 2011	0.16	0.09
Novembre 2011	0.21	0.11

Tabella 23 - Valori di assorbimento medio ottenuti nelle varie sessioni di misura effettuate nel sito di Firenze, con il relativo valore di deviazione spaziale standard. L'incertezza di tipo B per questa metodica è stimabile in 0.1.

3.4 Pistoia

Nel sito in provincia di Pistoia è stata stesa una pavimentazione con un manto di usura realizzato con conglomerato bituminoso gap graded tipo Asphalt Rubber®, stesa il **27 Maggio 2010**.

In Tabella 24 sono riportate le date delle indagini condotte sullo studio delle caratteristiche acustiche e la loro evoluzione per ogni tecnica di misura utilizzata.

SESSIONE		CPX	SPB	Adrienne
Ante-operam		22/08/2006	22/11/2005	---
Estate	2010	20/07/2010	04/08/2010	14/07/2010
Autunno	2010	14/10/2010	14/10/2010	04/11/2010
Primavera	2011	19/05/2011	19/05/2011	14/04/2011
Autunno	2011	07/09/2011	07/09/2011	16/11/2011
Estate	2012	19/07/2012	19/07/2012	---

Tabella 24.- Sessioni di misura eseguite sul sito di Pistoia.

3.4.1 Risultati CPX

In Tabella 25 vengono mostrati i risultati ottenuti con le misure CPX effettuate sul sito. In tabella sono riportati i Livelli CPXL relativi alla velocità di 50 km/h (indicati nel seguito e nelle didascalie con l'acronimo CPXL(50)), il loro confronto con la pavimentazione di riferimento in situ ed il confronto con la misura effettuata ante-operam. Per ogni livello o differenza è riportata la relativa incertezza.

In Tabella 26 è invece riportato il valore CPXL medio alla velocità di 50 km/h sulla corsia di marcia per ciascuna direzione e la differenza fra le due corsie di marcia, con le rispettive incertezze, per ogni sessione di misura effettuata. Si nota che mediamente vi sono solo lievi differenze fra le stese nelle due corsie in quanto la corsia in direzione Pistoia risulta nella maggior parte dei casi lievemente più rumorosa della corsia in direzione Modena, se pur entro l'incertezza associata alla differenza. Nell'ultima sessione la differenza fra le due corsie è completamente scomparsa.

In Figura 34 è invece mostrato l'andamento spaziale dei livelli CPXL alle due velocità principali nello spazio, ove ogni punto rappresenta un livello calcolato su uno spazio di 5.75 m, con la relativa incertezza. E' stata qui riportata la misura effettuata *un anno dopo*, quando ormai la

pavimentazione si era assestata e la figura si riferisce alla sola corsia strumentata. Si nota una buona omogeneità dei livelli CPXL: infatti la deviazione standard composta σ (si veda il paragrafo 2.4 per la sua descrizione) risulta contenuta (0.4 dB(A) sia a 50 che a 80 km/h). Dai risultati presenti nelle precedenti due tabelle (in particolare dalle incertezze di tipo A riportate) si osserva che tale omogeneità è mantenuta per tutto il periodo di monitoraggio analizzato.

Si osserva inoltre che si la differenza fra Livello CPX relativo alla pavimentazione di riferimento e quello relativo alla pavimentazione speciale è compresa fra un **massimo di 5.2** (sessione ottobre 2010) ad una **minima di 4.4 dB(A)** (Maggio 2011), con una variazione sull'intero periodo molto contenuta (nell'ultima sessione è pari a 4.6 dB(A))

DATA	RIFERIMENTO		SPERIMENTALE		Differenza		Confronto Ante-Post	
	CPXL	Δ	CPXL	Δ	Diff	Δ	Diff	Δ
22/08/2006 (ante operam)	97.5	0.5						
20/07/2010	97.5	0.5	93.3	0.3	4.2	0.6	4.1	0.5
14/10/2010	99.4	0.5	94.2	0.3	5.2	0.6	3.3	0.5
19/05/2011	97.3	0.5	92.9	0.3	4.4	0.6	4.6	0.6
07/09/2011	97.9	0.5	93.1	0.2	4.8	0.6	4.4	0.4
19/07/2012	97.4	0.5	92.9	0.3	4.6	0.6	2.3	0.6

Tabella 25. – Confronto fra i valori CPXL(50) misurati durante le varie sessioni. Sono riportati sia le differenze rispetto alla misura sulla pavimentazione di riferimento che rispetto alla misura ante-operam. Δ indica l'incertezza di tipo A associata ai livelli o relative la differenza. Tutti i livelli sono in dB(A).

DATA	Direzione Pistoia		Direzione Modena		Differenza	
	CPXL	Δ	CPXL	Δ	PT – MO	Δ
20/07/2010	93.3	0.3	93.4	0.3	- 0.2	0.4
14/10/2010	94.3	0.3	94.1	0.3	0.2	0.4
19/05/2011	93.0	0.3	92.7	0.4	0.3	0.5
07/09/2011	93.3	0.2	92.8	0.3	0.4	0.3
19/07/2012	92.9	0.3	92.8	0.3	0.1	0.4

Tabella 26. – Confronto fra i valori CPXL(50) ottenuti per le due corsie di marcia per ciascuna sessione di misura sulla pavimentazione speciale. Δ indica l'incertezza di tipo A associata ai livelli o relativa alla differenza. Tutti i livelli sono in dB(A).

In tutte le figure successive relative ai livelli CPXL è stato preso in esame il valore corrispondente alla velocità di 50 km/h. Risultati analoghi si avranno per le altre due velocità di riferimento: 80 e 110 km/h.

In Figura 35 è riportato l'andamento nel tempo dei livelli CPX, mentre in Figura 36 è

riportato l'andamento delle differenze riscontrate fra la misura sulla pavimentazione sperimentale e la misura effettuata sulla pavimentazione usata come riferimento.

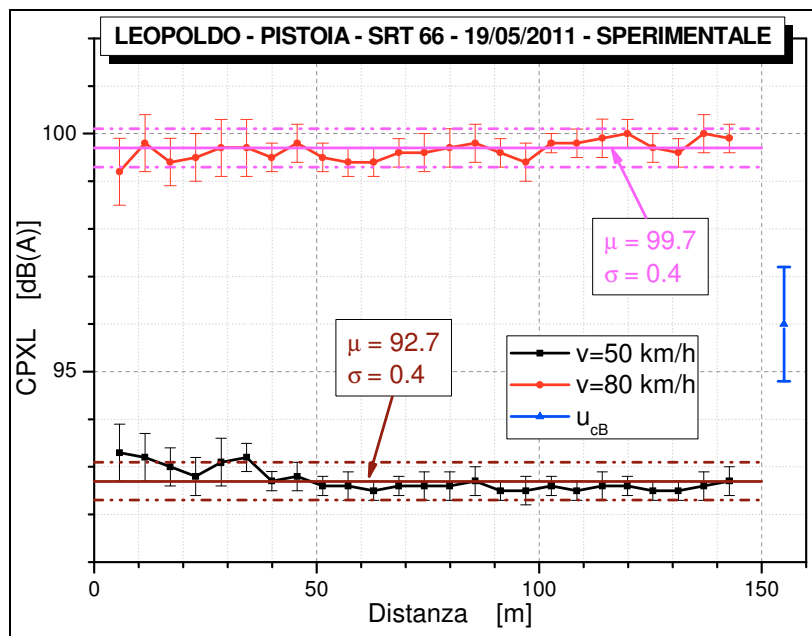


Figura 34. - Andamento dei valori di CPXL in funzione dello spazio sulla corsia strumentata dopo un anno dalla stesa. È riportata sia la media spaziale μ che la deviazione spaziale standard σ . È riportata l'incertezza estesa di tipo B U_{cB} , pari a 1.0 dB(A).

Dai risultati si osserva una costanza dei livelli nel tempo, con una riduzione leggermente superiore a 4.5 dB(A) rispetto alla pavimentazione di riferimento, ma molto più fluttuante se invece confrontata con la pavimentazione anteoperam, soprattutto se si osservano i risultati relativi alla sessione effettuata il 14/10/2010, dove le condizioni meteo-climatiche erano sensibilmente diverse dalle condizioni presenti nelle altre quattro sessioni (peraltro, effettuate in giornate meteorologicamente simili).

In Figura 37 è riportato il confronto fra gli spettri acustici sia della pavimentazione speciale che della pavimentazione di riferimento (in Tabella 27 sono riportati i relativi valori). Le “barre d'errore” indicano la deviazione standard calcolata sugli spettri misurati durante le varie sessioni di misura per le due pavimentazioni nel periodo corrispondente al primo anno di monitoraggio.

Si osserva che il picco di emissione della pavimentazione sperimentale coincide col picco di emissione della pavimentazione di riferimento ed entrambe le pavimentazioni mostrano una variabilità contenuta nel tempo. La pavimentazione speciale mostra una minore emissione alle basse frequenze mentre alle alte la sua emissione risulta maggiore rispetto a quella della pavimentazione di riferimento (a partire da 2kHz con differenze superiori a 0.7 dB fino a 1 dB a 4kHz).

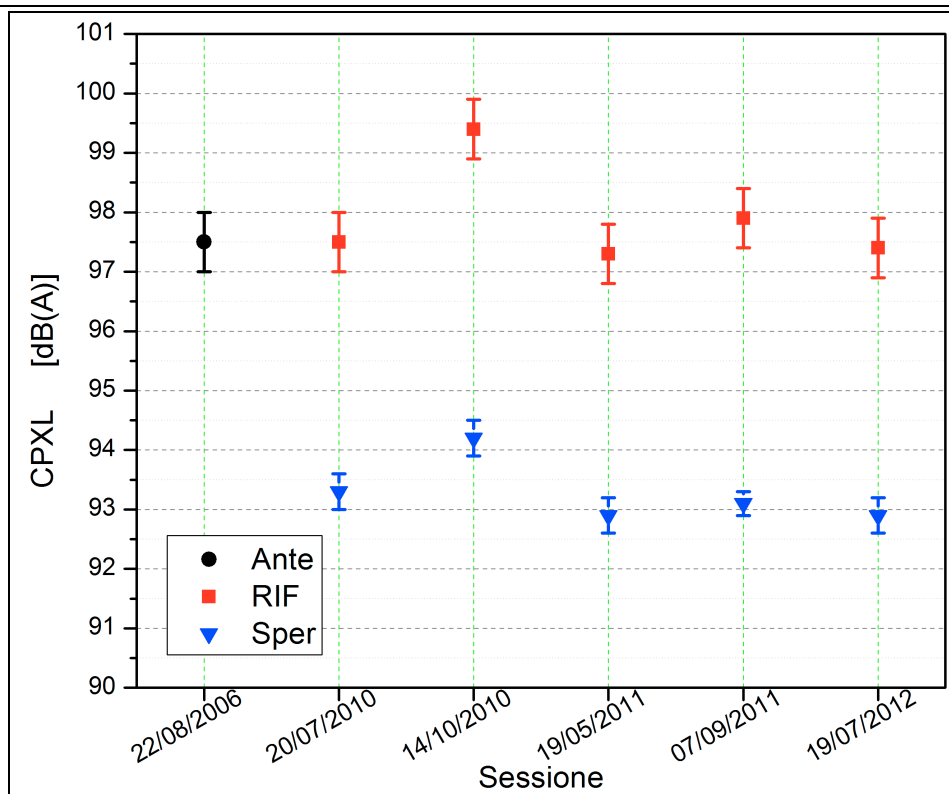


Figura 35. – Confronto fra i valori CPXL(50) ottenute nelle varie sessioni di indagine per le pavimentazioni ante-operam (ante), di riferimento (rif) e sperimentale (sper).

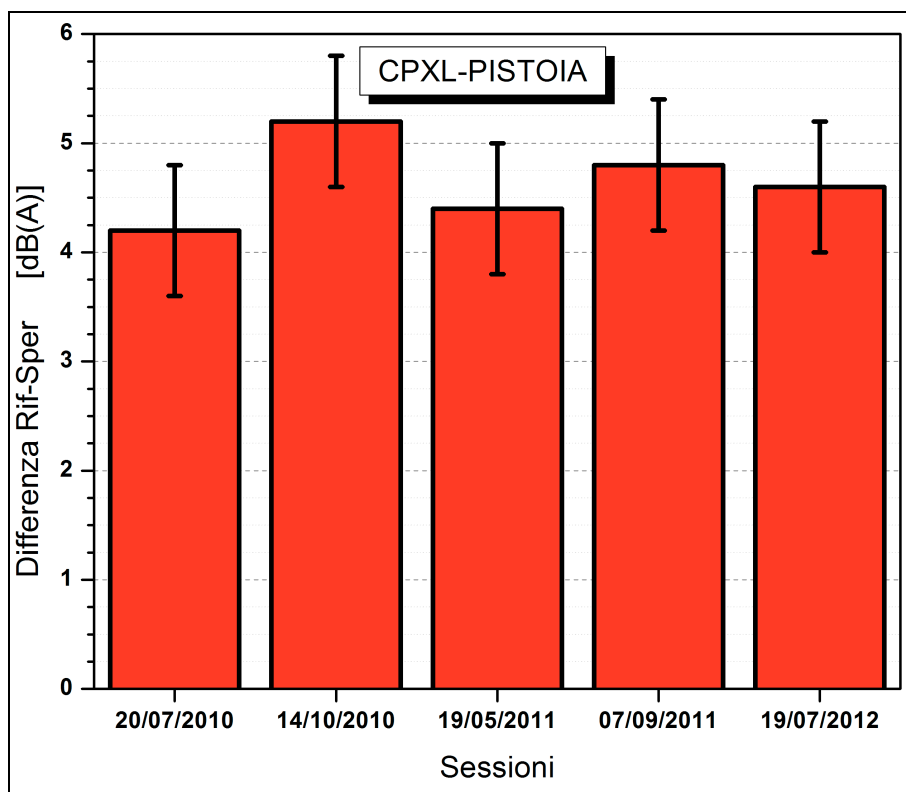


Figura 36. – Andamento nel tempo della differenza fra i livelli CPXL(50) misurati sulla pavimentazione di usura di riferimento e quella sperimentale. La barra rappresenta l'incertezza associata alla differenza.

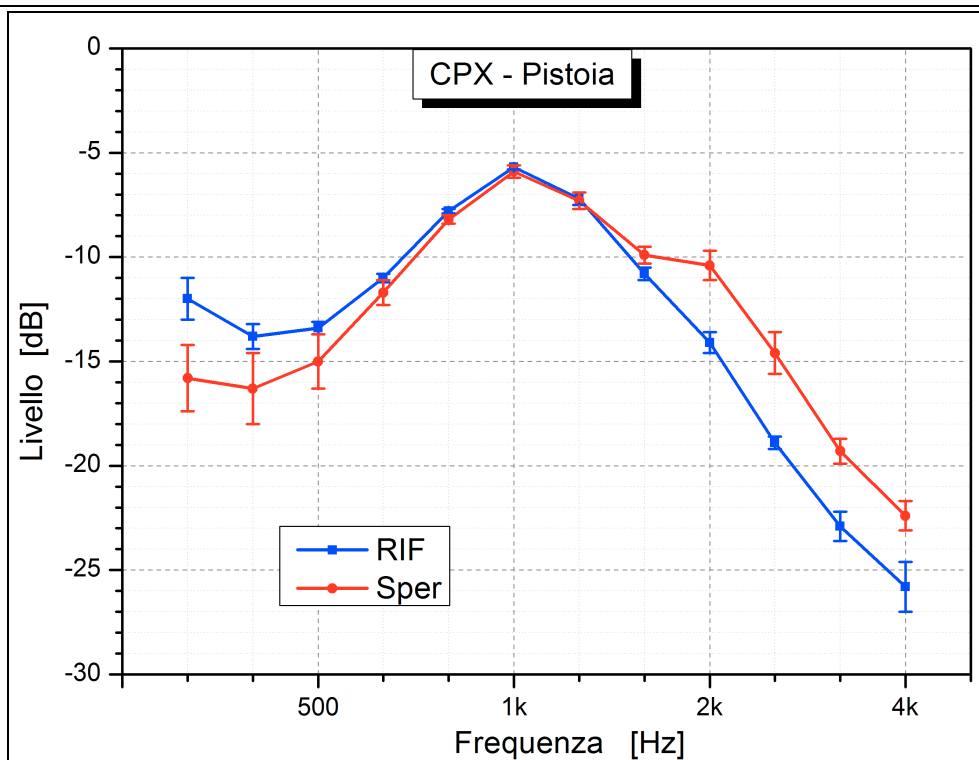


Figura 37. – Confronto fra lo spettro normalizzato CPXL(50) della pavimentazione sperimentale (sper) e lo spettro normalizzato della pavimentazione di riferimento (rif), ove le barre d'errore indicano la deviazione standard temporale sulle sessioni dello spettro relative ai primi tre anni di misura (2010-2012).

Frequenza	Riferimento	Δ	Sperimentale	Δ	Differenza	Δ
315	-12.0	1.0	-15.8	1.6	3.8	1.9
400	-13.8	0.6	-16.3	1.7	2.5	1.8
500	-13.4	0.3	-15.0	1.3	1.5	1.4
630	-11.0	0.2	-11.7	0.6	0.7	0.6
800	-7.8	0.1	-8.2	0.2	0.4	0.2
1000	-5.7	0.1	-5.9	0.3	0.1	0.3
1250	-7.2	0.3	-7.3	0.4	0.1	0.5
1600	-10.8	0.3	-9.9	0.4	-0.9	0.5
2000	-14.1	0.5	-10.4	0.7	-3.7	0.9
2500	-18.9	0.3	-14.6	1.0	-4.3	1.1
3150	-22.9	0.7	-19.3	0.6	-3.6	0.9
4000	-25.8	1.2	-22.4	0.7	-3.3	1.4

Tabella 27. – Confronto fra gli spettri normalizzati della pavimentazione di riferimento e della pavimentazione sperimentale. Δ indica la deviazione standard temporale calcolata su tutte le sessioni di misura effettuate nei primi tre anni dalla stesa (2010-2012). È riportata anche la differenza con relativa incertezza fra livello di riferimento e livello sperimentale. Tutti i livelli sono in dB.

3.4.2 Risultati SPB

In Tabella 28 vengono mostrati i risultati ottenuti con le misure SPB effettuate sul sito. In tabella sono riportati i livelli SPB relativi alla categoria 1 di traffico (veicoli leggeri, ovvero automobili, piccoli van) calcolati alla velocità di 50 km/h, il confronto con la misura effettuata ante-operam, sia per la misura effettuata all'altezza di 1.2 m (ISO 11819-1:2004 e Progetto HARMONOISE) che per la misura a 3.0 m di altezza (progetto HARMONOISE). Per ogni livello e differenza è riportata la relativa incertezza.

Sessione	h=1.2m	Δ	Differenza	Δ	h=3.0 m	Δ	Differenza	Δ
22/11/2005 (anteoperam)	72.6	1.8			74.1	1.8		
04/08/2010	64.3	2.1	- 8.3	2.8	65.4	2.7	- 8.7	3.2
14/10/2010	64.0	5.1	- 8.6	5.4	63.9	3.6	- 10.2	4.0
19/05/2011	68.7	1.9	- 3.9	2.6	71.8	1.5	- 2.3	2.3
07/09/2011	68.2	2.7	- 4.4	3.2	71.6	2.6	- 2.5	3.2
19/07/2012	67.3	1.6	- 5.3	2.4	69.8	2.7	- 4.3	3.2

Tabella 28. – Confronto fra i valori $L_1(50 \text{ km/h})$ misurati durante le varie sessioni. Sono riportati le differenze rispetto alla misura ante-operam. Δ indica l'incertezza associata ai livelli o relative la differenza. Tutti i livelli sono in dB(A).

In Figura 38 è riportato l'andamento nel tempo dei livelli SPB, mentre in Figura 39 è riportato l'andamento delle differenze riscontrate fra la misura sulla pavimentazione sperimentale e con il risultato ottenuto con la pavimentazione anteoperam.

Sia dalla tabella che dai grafici si nota un andamento discontinuo della differenza fra i livelli SPB anteoperam e quelli postoperam ad entrambe le altezze di misura. I valori della differenza ante-post per la misura a 1.2m di altezza, 7.5 m di distanza, riferiti alla corsia direzione Modena, hanno un **massimo di 8.6 dB(A)** registrato nella sessione di ottobre 2010. Si registra un **minimo** (pari a **3.9 dB(A)**) nella successiva sessione di maggio 2011 (corrispondente a circa un anno dalla stesa, quindi quando ormai la pavimentazione si sarebbe dovuta essere assestata) e quindi si sono misurati valori della differenza crescenti nelle sessioni di misura seguenti. Analogamente, e in maniera più dilatata, per i valori ottenuti a 3.0 m di altezza, dove il massimo corrisponde a 10.2 ed il minimo a 2.3 dB(A).

I valori delle ultime tre sessioni sono comunque confrontabili con le differenze CPX precedentemente riportate.

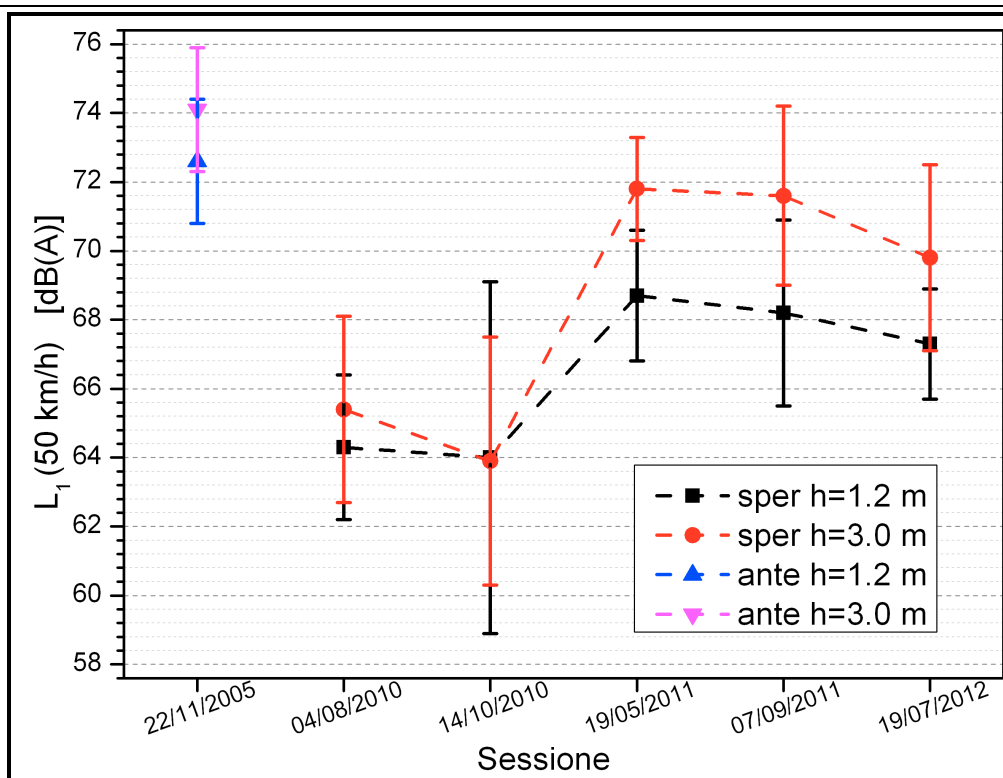


Figura 38. – Confronto fra i livelli SPB $L_1(50 \text{ km/h})$ per la pavimentazione ante-operam (ante) e per quella sperimentale nelle varie sessioni di misura effettuate (sper).

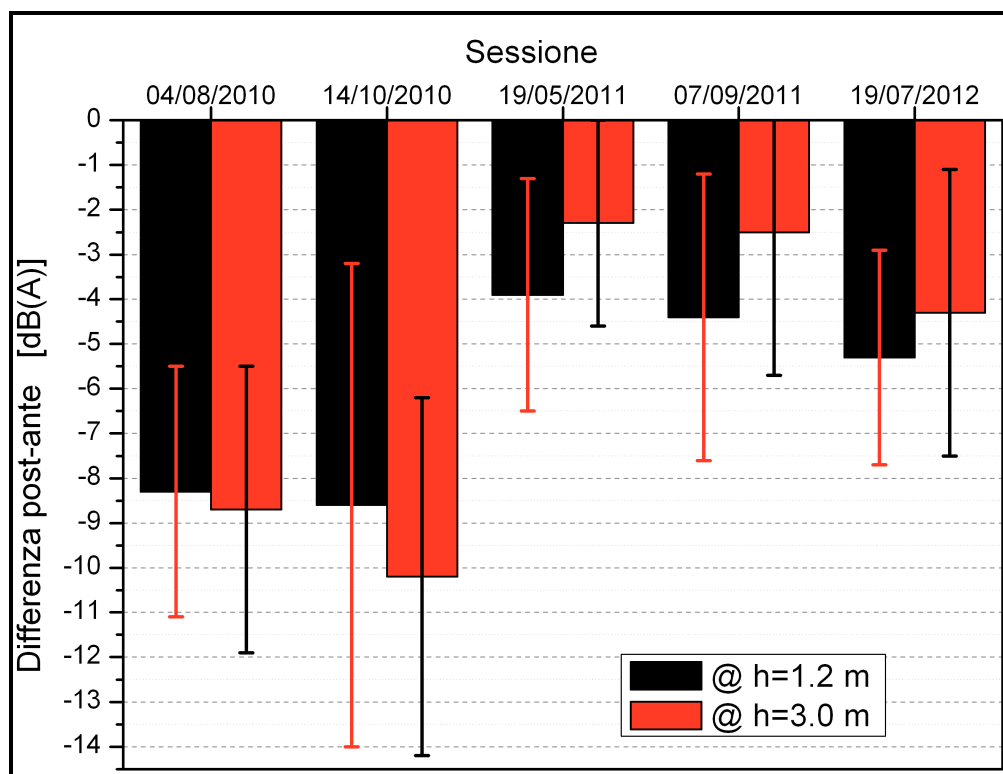


Figura 39. – Differenza fra i livelli SPB $L_1(50 \text{ km/h})$ misurati sulla pavimentazione sperimentale e quella ante-operam, alle due altezze considerate, con le relative incertezze.

Da notare che le incertezze statistiche sono molto grandi, in alcuni casi superiori a 2 dB(A), indice questo di una forte variabilità della rumorosità dei veicoli transitanti sulla pavimentazione. Il tratto di prova è posizionato alla fine di un rettilineo (procedendo in direzione Modena), e subito dopo di questo vi è una serie di curve e la strada procede in salita. Questo può far sì che la guida sia caratterizzata da un moto non regolare (accelerazioni e decelerazioni improvvise, spesso associate al fatto che i guidatori scambiano l'attrezzatura utilizzata per le misure in un sistema tipo autovelox) e quindi i livelli possono essere alterati da questo comportamento. Inoltre l'orografia del sito è particolare così come il fatto che le misure sono sempre state eseguite con livelli variabili di brezza (entro i parametri di accettabilità delle misure acustiche).

Inoltre il sito è caratterizzato dalla presenza di un autolavaggio, che spesso ha influenzato (e quindi inficiato) i rilievi relativi ad alcuni passaggi di autoveicoli, rendendo di fatto molto difficoltosa la misura.

In Figura 40 ed in Figura 41 è riportato il confronto fra lo spettro medio temporale normalizzato SPB relativo alla categoria di veicoli 1 alla velocità di 50 km/h (lo spettro è ottenuto come media pesata fra gli spettri ottenuti in ogni sessione, ove il peso è costituito dall'incertezza statistica di tipo A per ciascuna banda; le barre d'errore indicano l'incertezza composta ottenuta dalla deviazione standard temporale sulle sessioni dello spettro e dall'incertezza pesata associata alla media associata) e lo spettro normalizzato delle pavimentazione anteoperam, ove invece le barre d'errore indicano l'incertezza statistica di tipo A della misura.

Si nota un comportamento in frequenza diverso a quanto visto con la misura CPX. Qui si ha una lieve minor emissione della pavimentazione speciale alle frequenze centrali (attorno ad 1 kHz) e nelle basse frequenze, mentre in generale questa risulta leggermente più rumorosa della pavimentazione ante-opaeram nelle altre zone di frequenza.

Comunque sia lo spettro *ante* che quello *post* risultano molto dispersi attorno al valor medio come testimonia l'incertezza composta di tipo A riportata sia in tabella che nei grafici, per molte bande molto sopra 2 dB.

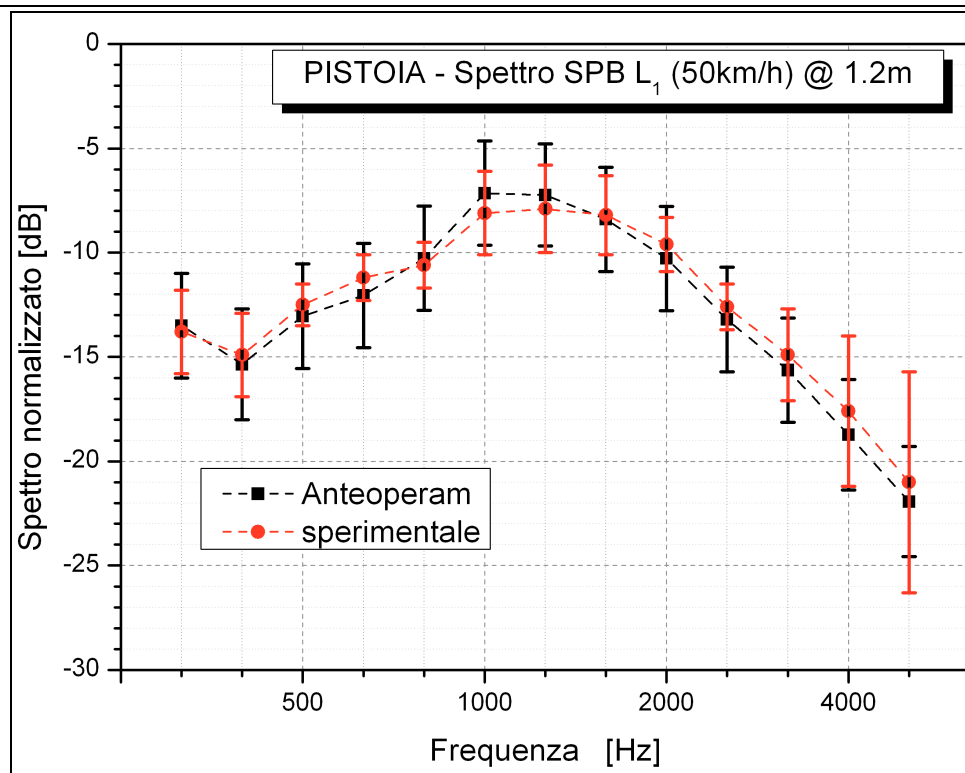


Figura 40. – Confronto fra lo spettro medio temporale normalizzato SPB relativo a $L_1(50 \text{ km/h})$ della pavimentazione speciale e lo spettro normalizzato ante-operam ottenuti dalla misura a 1.2 m di altezza.

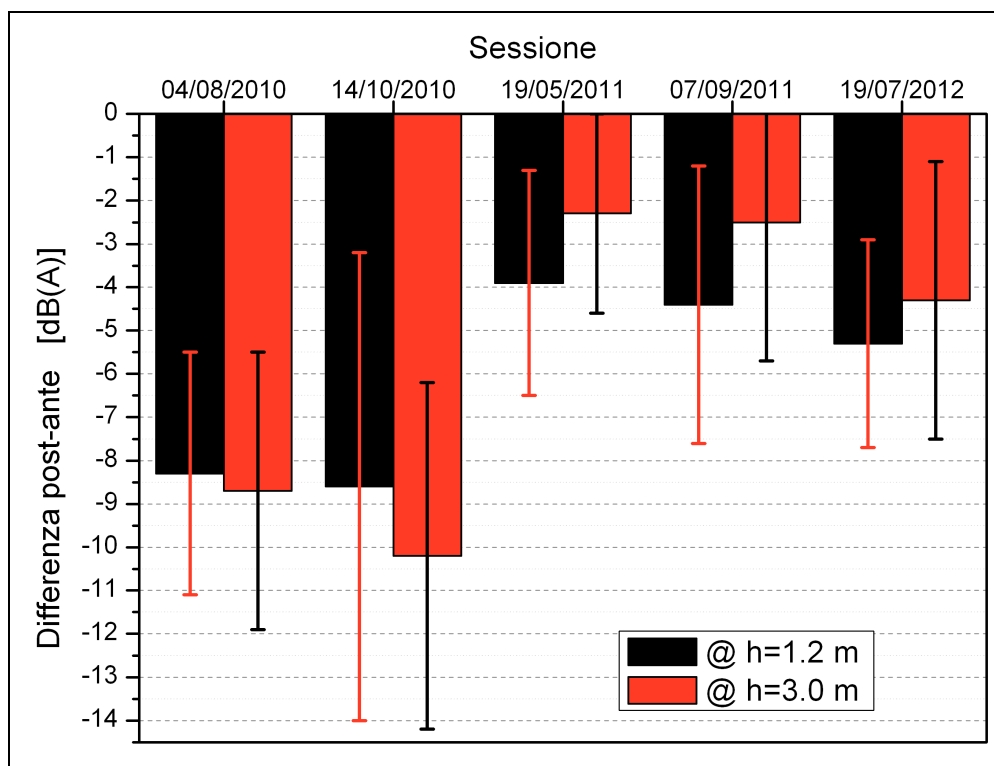


Figura 41. – Confronto fra lo spettro medio temporale normalizzato SPB relativo a $L_1(50 \text{ km/h})$ della pavimentazione speciale e lo spettro normalizzato ante-operam ottenuti dalla misura effettuata all'altezza di 3.0 m.

In Tabella 29 sono riportati i valori dei livelli normalizzati in banda di terzo d'ottava ottenuti dalla misura *ante-operam* e dallo spettro medio temporale *post operam* e le differenze fra tali livelli, con le relative incertezze, alle due altezze di misura.

Frequenza [Hz]	h=1.2 m						h = 3.0 m					
	Ante	Δ	post	Δ	Diff.	Δd	Ante	Δ	Post	Δ	Diff.	Δd
315	-13.5	2.5	-13.8	2.0	0.3	3.2	-13.9	2.5	-14.9	1.6	1.0	3.0
400	-15.4	2.7	-14.9	2.0	-0.4	3.3	-15.3	2.7	-15.1	1.8	-0.1	3.2
500	-13.0	2.5	-12.5	1.0	-0.5	2.7	-12.9	2.5	-12.2	1.0	-0.7	2.7
630	-12.1	2.5	-11.2	1.1	-0.9	2.7	-11.9	2.5	-10.2	1.5	-1.7	2.9
800	-10.3	2.5	-10.6	1.1	0.4	2.7	-10.2	2.7	-9.7	1.3	-0.5	3.0
1000	-7.2	2.5	-8.1	2.0	1.0	3.2	-7.5	2.7	-7.7	2.1	0.2	3.4
1250	-7.2	2.5	-7.9	2.1	0.7	3.2	-7.2	2.5	-7.8	2.0	0.6	3.2
1600	-8.4	2.5	-8.2	1.9	-0.2	3.1	-8.0	2.5	-8.3	1.8	0.4	3.1
2000	-10.3	2.5	-9.6	1.3	-0.6	2.8	-9.6	2.5	-10.1	1.1	0.5	2.8
2500	-13.2	2.5	-12.6	1.1	-0.6	2.7	-13.9	2.5	-13.7	1.4	-0.2	2.9
3150	-15.6	2.5	-14.9	2.2	-0.7	3.3	-17.0	2.5	-16.3	2.5	-0.7	3.6
4000	-18.7	2.7	-17.6	3.6	-1.1	4.5	-20.0	2.3	-19.4	4.0	-0.7	4.6
5000	-21.9	2.7	-21.0	5.3	-0.9	5.9	-23.4	2.7	-22.3	5.4	-1.1	6.0

Tabella 29 – Confronto fra gli spettri *normalizzati* SPB $L_1(50 \text{ km/h})$ anteoperam (ante) e post operam (post) alle due altezze. Δ indica l'incertezza pesata calcolata sulle sessioni di misura. Diff indica la differenza fra i livelli ante e quelli post-operam. Δd indica la rispettiva incertezza. I livelli sono in dB.

3.4.3 Risultati ADRIENNE

In questo caso si considera l'assorbimento proprio della pavimentazione. In Figura 42 è riportata una serie di istogrammi corrispondenti alle varie sessioni di misura valide e fornisce un'indicazione della variabilità nel tempo del coefficiente dia assorbimento acustico. Nella pavimentazione sperimentale presente nel sito di Pistoia si nota solo un lieve assorbimento nella banda di 630 Hz, peraltro fluttuante nel tempo, ma mediamente non si evidenzia un carattere assorbente. I risultati non sono omogenei nel tempo né è possibile identificarne un andamento temporale.

In Figura 43 è riportato il valor medio dell'assorbimento in funzione della frequenza e la sua variabilità complessiva (deviazione standard totale) composta dalla somma in quadratura della deviazione standard spaziale (variabilità del coefficiente sulle singole prove all'interno di una sessione) e dalla deviazione standard temporale (variabilità nel tempo delle medie per sessione).

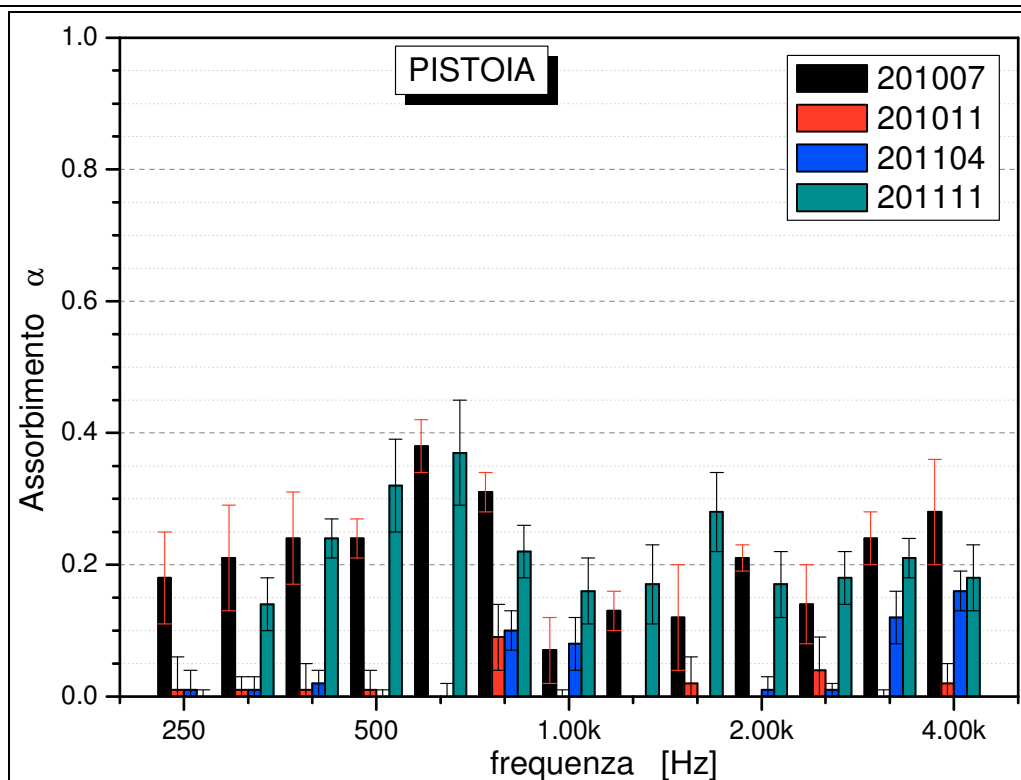


Figura 42. – *Evoluzione temporale dei coefficienti di assorbimento in funzione della frequenza. Sono state esclusi i dati delle sessioni che hanno presentato risultati anomali. Le barre d'errore corrispondono alla variabilità spaziale del dato.*

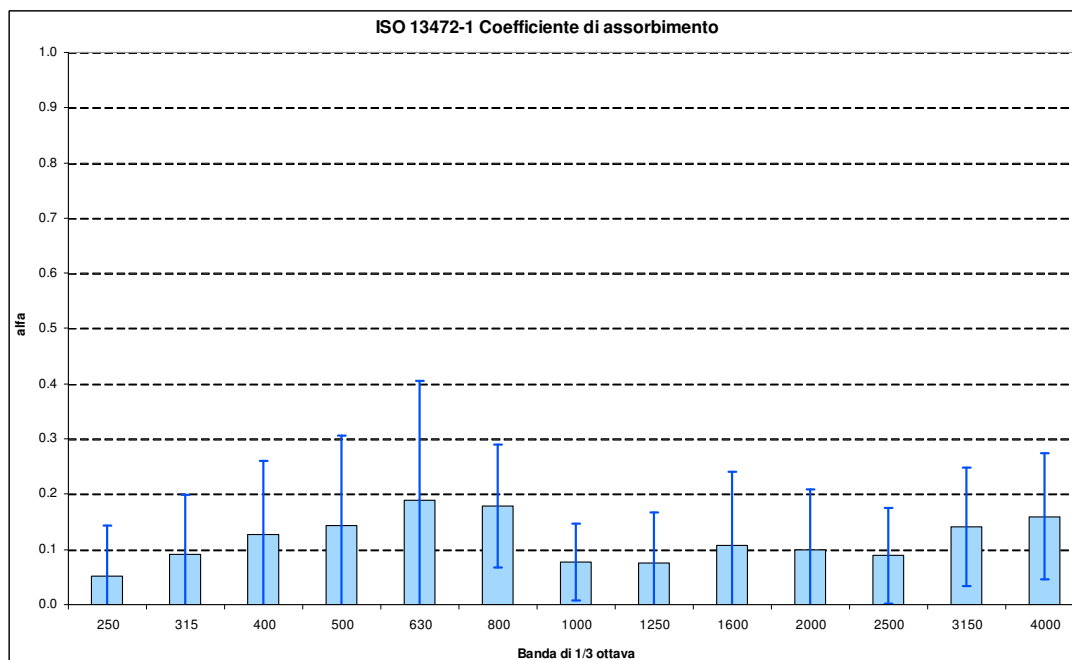


Figura 43. – *Variabilità complessiva del coefficiente di assorbimento in funzione della frequenza. È indicata la deviazione standard complessiva composta partendo dalla variabilità temporale e da quella spaziale*

Anche in questo grafico occorre notare l'incertezza associata ai dati che, di fatto, li rende non

significativi. Quindi in base ai dati relativi al monitoraggio effettuato nel primo anno e mezzo di vita della pavimentazione, si può affermare che la stessa non presenta carattere assorbente.

Infine in Tabella 30 vengono riportati i valori del coefficiente di assorbimento medio a banda larga della pavimentazione con la relativa deviazione spaziale standard. Anche in questo caso notiamo lo scarso assorbimento della pavimentazione (sempre inferiore o eguale a 0.2) e la sua fluttuazione nel tempo (ovviamente legato alla tipologia di pavimentazione utilizzata in questo sito che non ha intrinseche capacità di assorbimento sonoro).

Sessione	Assorbimento medio $\bar{\alpha}$	Dev. Spaz. Std.
Luglio 2010	0.21	0.05
Novembre 2010	0.02	0.02
Aprile 2011	0.04	0.02
Novembre 2011	0.20	0.05

Tabella 30 – Valori di assorbimento medio ottenuti nelle varie sessioni di misura effettuate nel sito di Pistoia, con il relativo valore di deviazione spaziale standard.

3.5 Pisa

Nel sito in provincia di Pisa è stata stesa una pavimentazione con un tappeto di usura realizzato con argilla espansa (percentuale di argilla espansa di tipo strutturale: 20%; diametro massimo degli aggregati: 6.0 mm; percentuale di bitume modificato Hard: 8.5%) stesa il **17 Giugno 2010**.

Occorre notare che in prossimità del sito è presente un'industria che tratta inerti e materiali derivanti dalle scarifiche stradali, con un'area di deposito e con impianti di frantumazione e trasformazione di materiali lapidei e detriti di lavorazioni stradali o edilizie. Questa attività è basata su alcuni processi lavorativi che immettono nell'ambiente circostante livelli di rumore molto significativi. Questo ha interferito con le analisi condotte nel sito di Pisa, e tale interferenza è stata valutata e presa in considerazione nelle varie indagini. Inoltre i cicli produttivi dell'industria hanno condizionato la scelta delle date per i monitoraggi effettuati. L'indagine che più ha risentito è stata quella associata alla tecnica SPB, dove i livelli di ciascun evento sono potenzialmente influenzabili dalla rumorosità dell'attività, soprattutto alle basse frequenze. Questo ha comportato che un certo numero di eventi sia risultato invalidato da tale rumore di fondo durante le analisi e le verifiche sui dati compiute in laboratorio, riducendo in modo significativo il numero di eventi validi.

Per le altre due tecniche di misura la rumorosità residua associata all'attività è risultata completamente ininfluente: per la tecnica CPX, a causa dell'alta rumorosità della sorgente indagata (contatto ruota/pavimentazione) e per la tecnica ADRIENNE, in quanto la metodica di misura utilizzata è di fatto scarsamente influenzata dal rumore di fondo residuo presente.

In Tabella 31 sono riportate le date delle indagini condotte sullo studio delle caratteristiche acustiche e la loro evoluzione per ogni tecnica di misura utilizzata.

SESSIONE	CPX	SPB	Adrienne
Ante-operam	23/08/2006	25/10/2005	---
Estate 2010	22/07/2010	18/08/2010	13/07/2010
Autunno 2010	05/11/2010	05/11/2010	---
Primavera 2011	24/05/2011	24/05/2011	03/05/2011
Estate 2011	---	18/08/2011	---
Autunno 2011	03/10/2011	---	---
Estate 2012	10/07/2012	28/08/2012	---

Tabella 31.- Sessioni di misura eseguite sul sito di Pisa.

3.5.1 Risultati CPX

In Tabella 32 vengono mostrati i risultati ottenuti con le misure CPX effettuate sul sito. In tabella sono riportati i Livelli CPXL relativi alla velocità di 50 km/h (indicati nel seguito e nelle didascalie con l'acronimo CPXL(50)), il loro confronto con la pavimentazione di riferimento in situ ed il confronto con la misura effettuata ante-operam. Per ogni livello o differenza è riportata la relativa incertezza di tipo A.

	RIFERIMENTO		SPERIMENTALE		Differenza		Confronto Ante-Post	
data	CPXL	Δ	CPXL	Δ	Diff	Δ	Diff	Δ
23/08/2006 (anteoperam)	97.3	0.5	---	---	---	---	---	---
22/07/2010	97.6	0.5	91.2	0.3	6.4	0.6	6.2	0.6
05/11/2010	98.8	0.6	93.3	0.5	5.6	0.8	4.1	0.6
24/05/2011	96.3	0.6	92.3	0.4	4.0	0.7	5.1	0.6
03/10/2011	96.6	0.6	92.3	0.3	4.3	0.7	5.1	0.6
10/07/2012	95.9	0.6	92.3	0.4	3.6	0.7	5.0	0.6

Tabella 32. – Confronto fra i valori CPXL(50) misurati durante le varie sessioni. Sono riportati sia le differenze rispetto alla misura sulla pavimentazione di riferimento che rispetto alla misura ante-operam. Δ indica l'incertezza di tipo A associata ai livelli o relativa alla differenza. Tutti i livelli sono in dB(A).

DATA	Direzione Volterra		Direzione Pisa		Differenza	
	CPXL	Δ	CPXL	Δ	PIS-VOL	Δ
22/07/2010	91.2	0.4	91.1	0.3	- 0.1	0.5
05/11/2010	93.5	0.4	93.0	0.5	- 0.5	0.6
24/05/2011	92.1	0.3	92.4	0.5	0.4	0.6
03/10/2011	91.9	0.3	92.7	0.3	0.8	0.5
10/07/2012	91.8	0.3	92.8	0.4	1.0	0.5

Tabella 33. – Confronto fra i valori CPXL(50) ottenuti per le due corsie di marcia per ciascuna sessione di misura sulla pavimentazione speciale. Δ indica l'incertezza associata ai livelli o relative la differenza. Tutti i livelli sono in dB(A).

In Tabella 33 è invece riportato il valore CPXL medio alla velocità di 50 km/h sulla corsia di marcia per ciascuna direzione e la differenza fra le due corsie di marcia, con le rispettive incertezze, per ogni sessione di misura effettuata. Si nota che le differenze progressivamente si modificano passando da una situazione iniziale in cui la corsia direzione Volterra è leggermente più rumorosa ad una situazione opposta, con una differenza sempre più marcata col passare del tempo. In parte si può spiegare col fatto che nel corso delle misure le corsie erano sporche in modo diverso a causa

dell'intenso traffico di mezzi pesanti trasportanti detriti e pietrisco verso l'adiacente industria sopra citata. Tali mezzi, durante il trasporto, disperdono piccole quantità di materiale che trasportano (in particolare dagli pneumatici) che si deposita superficialmente sulla strada. Questo contribuisce a rendere la rumorosità della strada maggiore.

In Figura 44 è invece mostrato l'andamento spaziale dei livelli CPXL alle due velocità principali nello spazio, ove ogni punto rappresenta un livello calcolato su uno spazio di 5.75 m, con la relativa incertezza di tipo A. L'incertezza di tipo B è pari a 1.0 dB(A). E' stata qui riportata la misura effettuata *un anno dopo*, quando ormai la pavimentazione si era assestata e la figura si riferisce alla sola corsia strumentata. Si nota una certa omogeneità nella stesa, ma dopo il metro 150 si osservano dei livelli di emissione leggermente inferiori, probabilmente legati ad una maggior pulizia del manto stradale, in quanto la direzione di marcia procede allontanandosi dalla sopraccitata area di deposito di detriti.

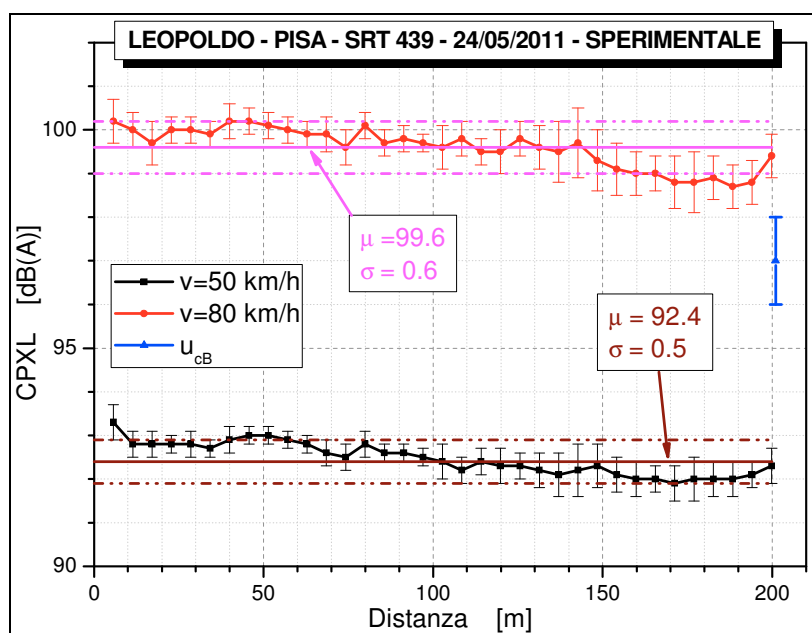


Figura 44. - Andamento dei valori di CPXL in funzione dello spazio sulla corsia strumentata dopo un anno dalla stesa. È riportata sia la media spaziale μ che la deviazione spaziale standard σ . È riportata l'incertezza estesa di tipo B U_{CB} , pari a

In tutte le figure successive relative ai livelli CPXL è stato preso in esame il valore corrispondente alla velocità di 50 km/h. Risultati analoghi si avranno per le altre due velocità di riferimento: 80 e 110 km/h.

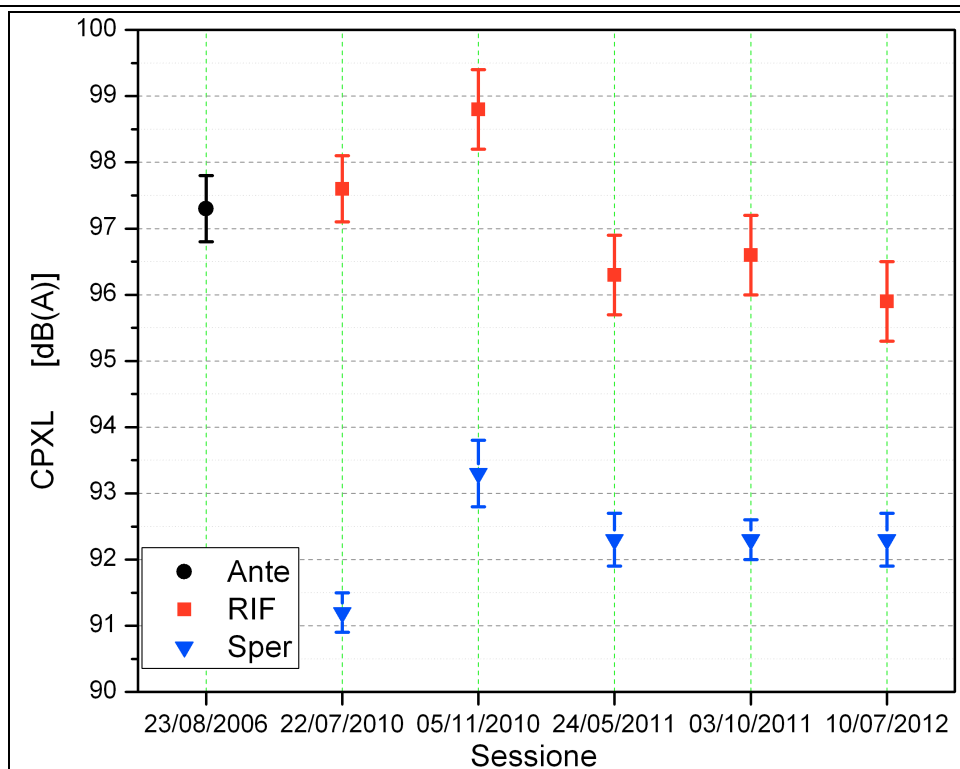


Figura 45. – Confronto valori CPXL(50) per le pavimentazioni ante-operam (ante), di riferimento (rif) e sperimentale (sper). Sono riportate le rispettive incertezze di tipo A come barre di errore

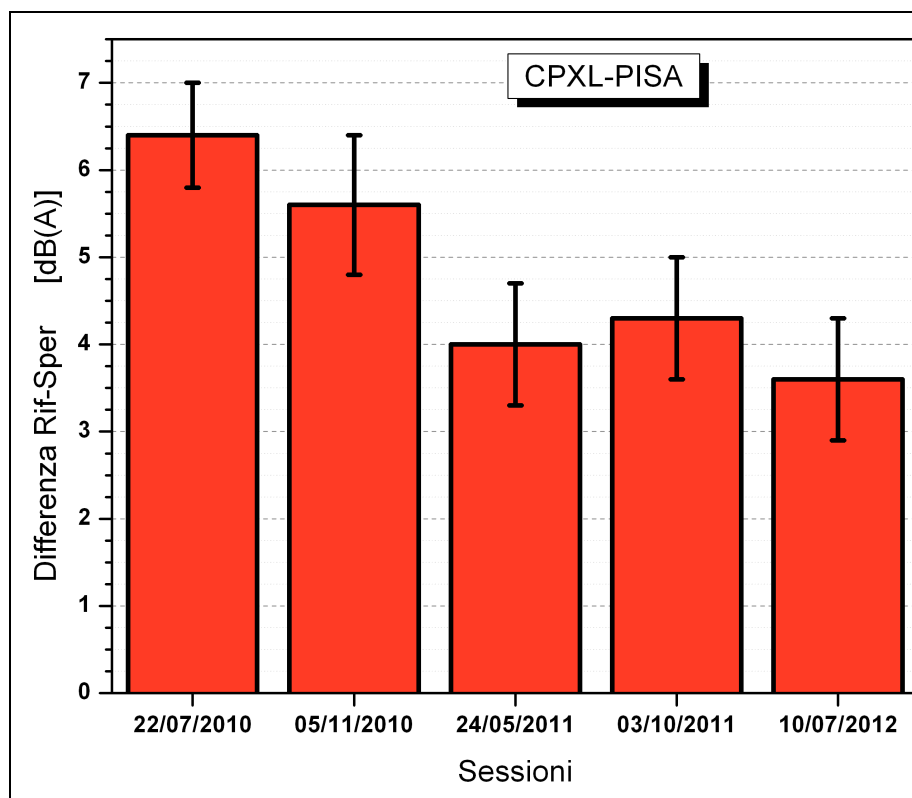


Figura 46. – Andamento nel tempo della differenza fra i livelli CPXL(50) misurati sulla pavimentazione di usura di riferimento e quella sperimentale. La barra d'errore rappresenta l'incertezza associata alla differenza.

In Figura 45 è riportato l'andamento nel tempo dei livelli CPXL(50), mentre in Figura 46 è riportato l'andamento delle differenze riscontrate fra la misura sulla pavimentazione sperimentale e la misura effettuata sulla pavimentazione usata come riferimento.

Dai risultati (Tabella 32 e Figura 46) si osserva che la differenza fra pavimentazione di riferimento e pavimentazione speciale si riduce progressivamente al passare del tempo. Da un iniziale differenza pari a **6.4** si passa all'attuale valore minimo di **3.6 dB(A)**, misurata a due anni dalla stesa, con una lieve fluttuazione nel tempo associata alla penultima sessione di misura.

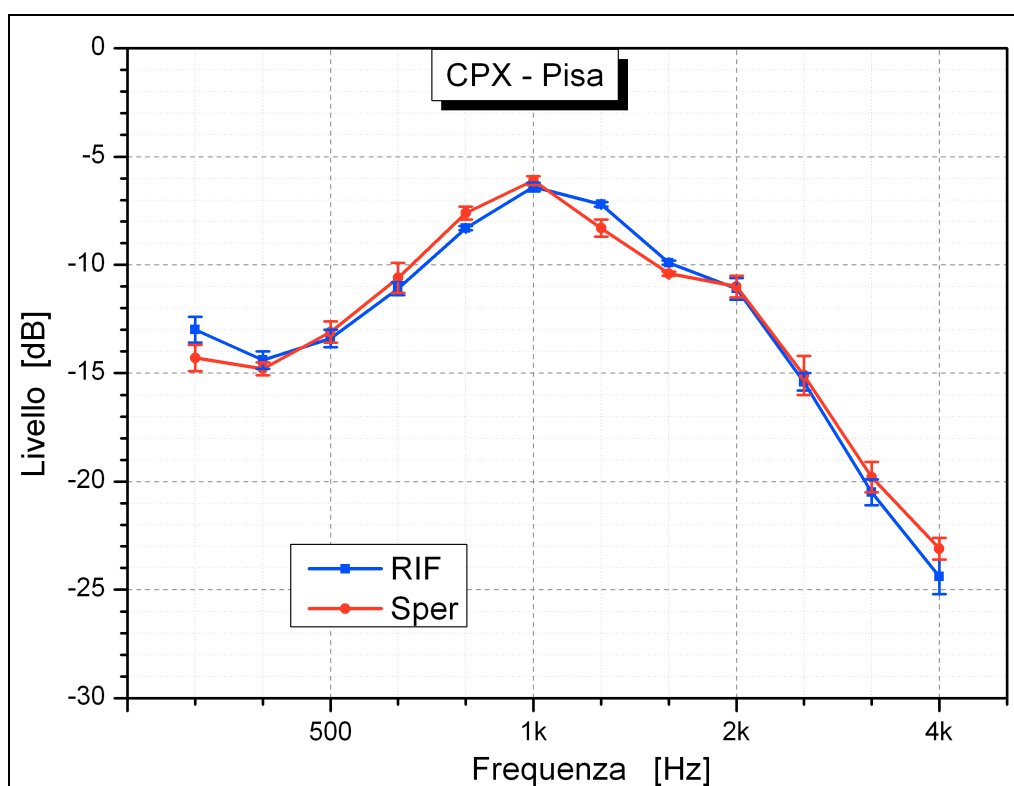


Figura 47. – Confronto fra gli spettri temporali medi normalizzati CPX della pavimentazione sperimentale (sper) e della pavimentazione di riferimento (rif), ove le barre d'errore indicano la deviazione standard temporale dello spettro, relativa ai primi tre anni di misura (2010-2012). Dati relativi alla velocità di 50 km/h

In Figura 47 è riportato il confronto fra gli spettri acustici in bande di terzi d'ottava (relativi alla velocità di riferimento di 50km/h) sia della pavimentazione speciale che della pavimentazione di riferimento. Le “barre d'errore” indicano la deviazione standard calcolata sugli spettri misurati durante le varie sessioni di misura per le due pavimentazioni. In Tabella 34 sono riportati i relativi valori numerici e la differenza fra i corrispondenti valori della pavimentazione di riferimento e della pavimentazione sperimentale.

Il picco di emissione della pavimentazione sperimentale coincide col picco dell'ante-operam/pavimentazione di riferimento. La pavimentazione sperimentale ha mostrato una scarsa

variabilità nel tempo soprattutto alle medie frequenze (800-2000 Hz), come si vede dalla deviazione standard temporale (Tabella 34) inferiore a 0.5 dB in questa regione dello spettro, si nota inoltre una leggera maggior emissione della pavimentazione di riferimento solo nella regione delle bande di terzi d'ottava centrate su 1250 e 1600 Hz.

Frequenza	Riferimento	Δ	Sperimentale	Δ	Differenza	Δ
315	-13.0	0.6	-14.3	0.6	1.3	0.8
400	-14.4	0.4	-14.8	0.3	0.4	0.5
500	-13.4	0.4	-13.1	0.5	-0.3	0.6
630	-11.1	0.3	-10.6	0.7	-0.5	0.8
800	-8.3	0.1	-7.6	0.3	-0.8	0.4
1000	-6.4	0.2	-6.1	0.2	-0.3	0.3
1250	-7.2	0.1	-8.3	0.4	1.1	0.4
1600	-9.9	0.1	-10.4	0.1	0.5	0.2
2000	-11.1	0.5	-11.0	0.5	-0.1	0.7
2500	-15.4	0.4	-15.1	0.9	-0.3	0.9
3150	-20.5	0.6	-19.8	0.7	-0.7	0.9
4000	-24.4	0.8	-23.1	0.5	-1.3	0.9

Tabella 34. – Confronto fra gli spettri temporali medi normalizzati della pavimentazione di riferimento e della pavimentazione sperimentale. Δ indica la deviazione standard temporale calcolata su tutte le sessioni di misura effettuate nei primi tre anni dalla stesa (2010-2012). È riportata anche la differenza con relativa incertezza fra livello di riferimento e livello sperimentale. Tutti i livelli sono in dB. Dati relativi alla velocità di 50 km/h

3.5.2 Risultati SPB

In Tabella 35 vengono mostrati i risultati ottenuti con le misure SPB effettuate sul sito. In tabella sono riportati i livelli SPB relativi alla categoria 1 di traffico (veicoli leggeri, ovvero automobili, piccoli van) calcolati alla velocità di 50 km/h, il confronto con la misura effettuata ante-operam, sia per la misura effettuata all'altezza di 1.2 m (ISO 11819-1:2004 e Progetto HARMONOISE) che per la misura a 3.0 m di altezza (progetto HARMONOISE). Per ogni livello e differenza è riportata la relativa incertezza. In questo caso la corsia monitorata è quella opposta al punto di misura, ovvero la corsia di marcia direzione Volterra, in quanto non era possibile effettuare il monitoraggio della corsia strumentata direzione Pisa, a causa della mancanza dello spazio necessario.

In Figura 48 è riportato l'andamento nel tempo dei livelli SPB, mentre in Figura 49 è riportato l'andamento delle differenze riscontrate fra la misura sulla pavimentazione sperimentale e il risultato ottenuto con la pavimentazione anteoperam.

Sia dalla tabella che dai grafici si nota una progressiva e netta diminuzione della differenza fra i livelli SPB *ante-operam* e quelli *post-operam* ad entrambe le altezze di misura.

Il confronto risente marginalmente della differenza di condizioni meteorologiche in quanto gran parte delle sessioni di misura si è tenuta nel mese di agosto degli anni interessati, e gli ultimi tre anni sono stati caratterizzati da mesi di agosto molto caldi e con assenza di piogge.

La sessione estiva del 2011, inoltre, è stata effettuata in un periodo di fermo degli impianti dell'industria, per cui i livelli misurati erano completamente privi di contributi diversi dalla strada misurata.

Dai dati, si osserva che, relativamente alla differenza fra il valore dell'indice SPB L_1 misurato *ante-operam* e quello *post-operam*, si passa da una differenza marcata relativamente alla sessione di agosto 2010 (con differenze di **9.7** e **11.5 dB(A)**, valori questi molto elevati, rispettivamente alle altezze di 1.2 e 3 m) a valori rapidamente sempre più bassi nel tempo fino ad una inversione di segno (ovvero il livello *post* è maggiore di quello *ante*, ovviamente bisogna prestare attenzione all'incertezza statistica che è molto elevata) nella misura a 1.2 m dell'ultima sessione. Questa perdita prestazionale così netta è in contrasto con quanto visto con le misure CPX, che però sono relative alla sola differenza di emissione del contatto ruota/pneumatico.

Sessione	h=1.2m	Δ	Differenza	Δ	h=3.0 m	Δ	Differenza	Δ
08/03/2006 (anteoperam)	71.4	0.7			74.2	0.8		
18/08/2010	61.7	3.3	- 9.7	3.4	62.7	2.9	- 11.5	3.0
05/11/2010	64.8	3.4	- 6.6	3.5	64.8	3.6	- 9.4	3.7
24/05/2011	70.8	2.3	- 0.6	2.4	69.6	2.3	- 4.6	2.4
18/08/2011	70.9	1.4	- 0.5	1.6	70.7	1.4	- 3.5	1.6
28/08/2012	72.2	3.0	0.8	3.1	72.3	3.3	- 1.9	3.4

Tabella 35. – Confronto fra i valori $L_1(50 \text{ km/h})$ misurati durante le varie sessioni. Sono riportati le differenze rispetto alla misura ante-operam. Δ indica l'incertezza associata ai livelli o relative la differenza. Tutti i livelli sono in dB(A).

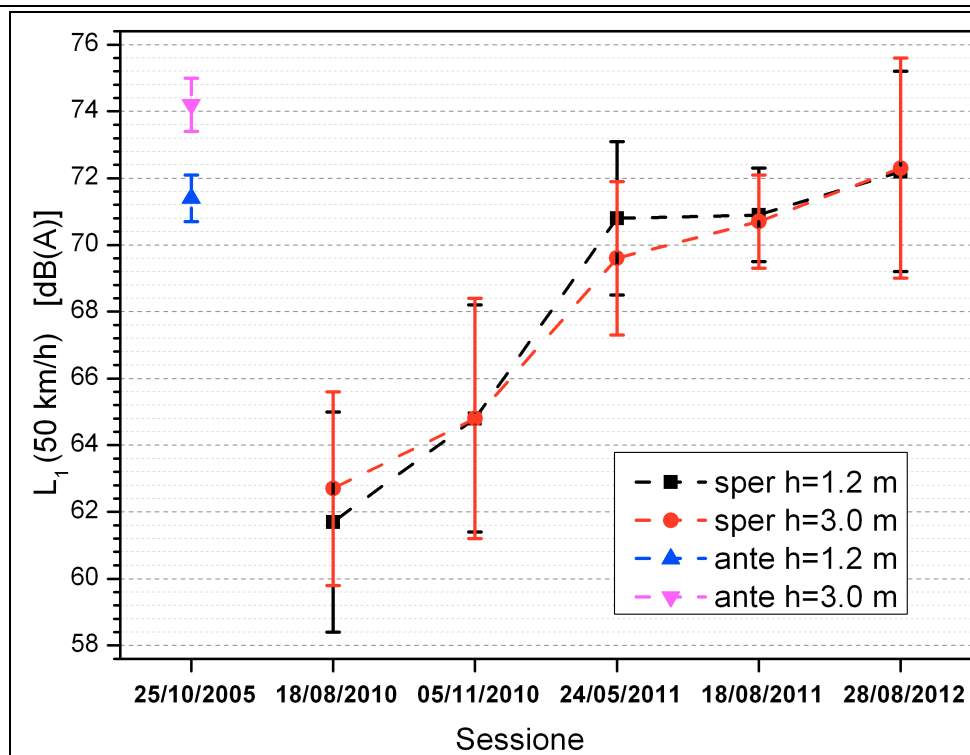


Figura 48. – Confronto fra i livelli SPB $L_1(50 \text{ km/h})$ per la pavimentazione ante-operam (ante) e per quella sperimentale nelle varie sessioni di misura effettuate (sper).

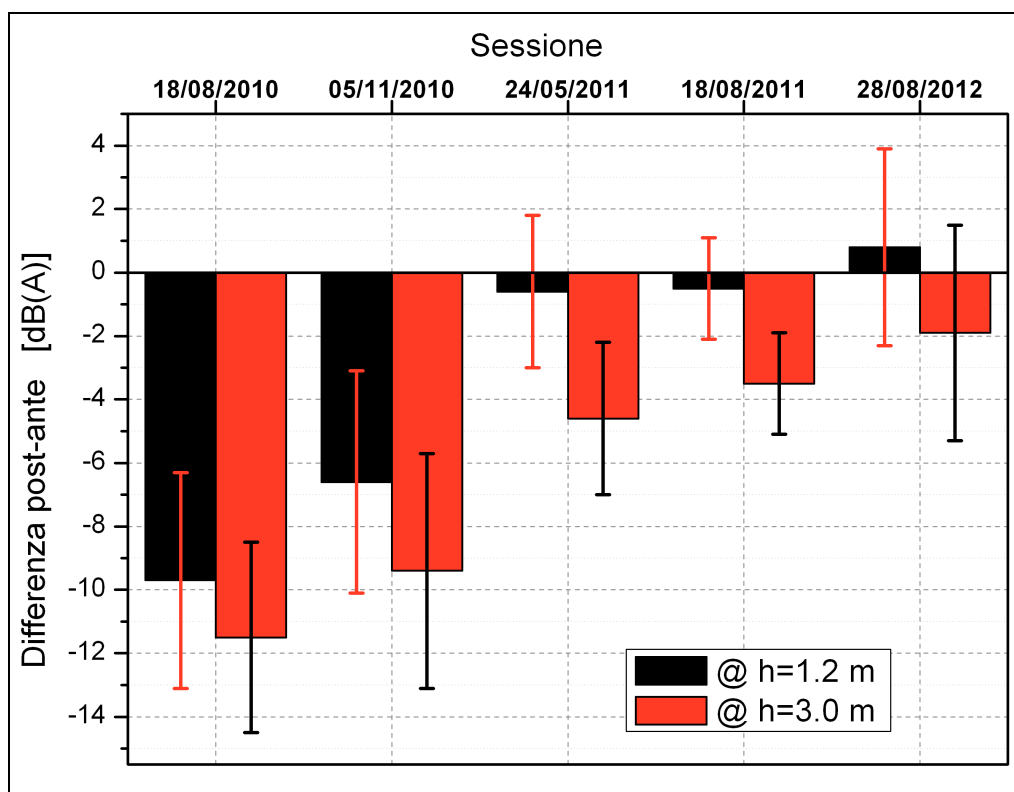


Figura 49. – Differenza fra i livelli SPB $L_1(50 \text{ km/h})$ misurati sulla pavimentazione sperimentale e quella ante-operam, alle due altezze considerate, con le relative incertezze.

3.5.3 Risultati ADRIENNE

In questo caso si considera l'assorbimento proprio della pavimentazione. In Figura 50 è riportata una serie di istogrammi corrispondenti alle due sessioni di misura valide e fornisce una prima indicazione della variabilità nel tempo del coefficiente di assorbimento acustico.

Come evidenziato anche in Tabella 36, nella pavimentazione sperimentale presente nel sito di Pisa non si notano assorbimenti apprezzabili sia nella prima che nella seconda sessione di misura, quest'ultima effettuata dopo circa un anno dalla stesa e quindi con pavimentazione assestata acusticamente.

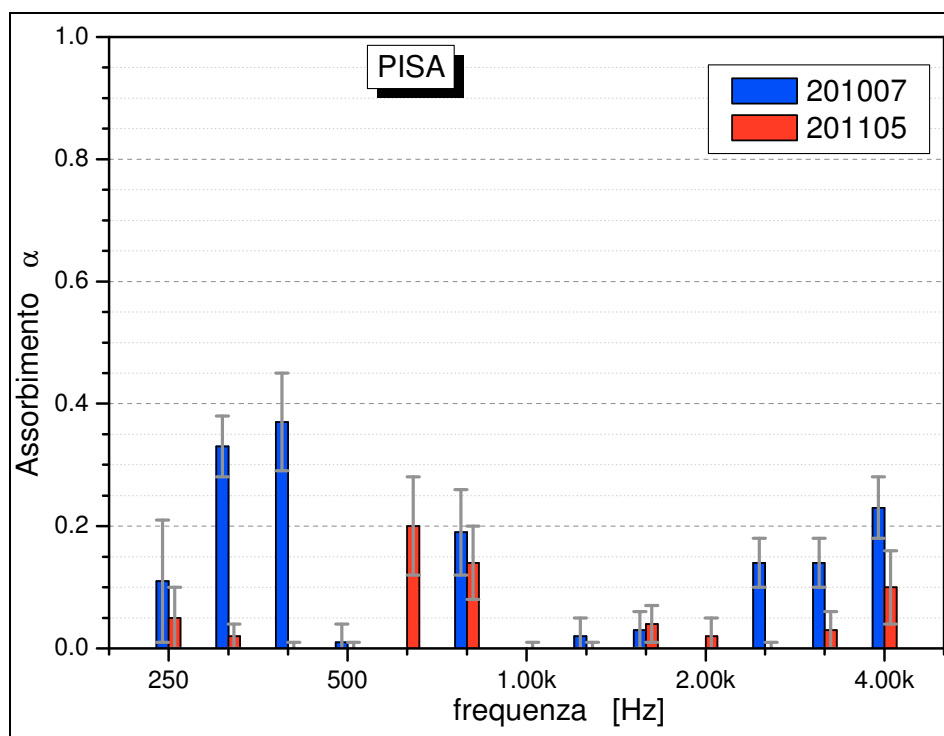


Figura 50. – Evoluzione temporale dei coefficienti di assorbimento in funzione della frequenza. Sono state esclusi i dati delle sessioni che hanno presentato risultati anomali. Le barre d'errore corrispondono alla variabilità spaziale del dato.

Sessione	Assorbimento medio $\bar{\alpha}$	Dev. Spaz. Std.
Luglio 2010	0.12	0.04
Maggio 2011	0.05	0.03

Tabella 36 – Valori di assorbimento medio ottenuti nelle varie sessioni di misura effettuate nel sito di Pisa, con il relativo valore di deviazione spaziale standard.

3.6 Massa

Nel sito in provincia di Massa è stata stesa una pavimentazione con un tappeto microdrenante con usura open graded stesa il **11 Ottobre 2011**.

La strada scelta per questo sito è caratterizzata da un piccolo tratto in rettilineo con agli estremi, in direzione Aulla, l'abitato di Codiponte, con la strada che si restringe e compie una serie di curve, mentre dall'altro lato, in direzione Casola, il sito termina con un ultimo tratto in curva, seguito da una serie di curve. Questo rende molto difficoltoso affrontare il tratto di strada con pavimentazione speciale con velocità superiori a 50 km/h, e ha influenzato in modo significativo i risultati ottenuti con la tecnica SPB, in quanto quasi tutti i veicoli erano compresi in un intervallo di velocità molto ristretto (con la formazione dell'“effetto nuvola” visto nel paragrafo 2.5). Anche la misura CPX è influenzata negativamente dal fatto che non sono di fatto possibili velocità costanti superiori a 65 km/h durante l'effettuazione dei passaggi sui tratti oggetto di indagine.

In Tabella 37 sono riportate le date delle indagini condotte sullo studio delle caratteristiche acustiche e la loro evoluzione per ogni tecnica di misura utilizzata.

SESSIONE	CPX	SPB	Adrienne
Ante-operam	14/10/2006		
Autunno 2010	24/11/2010	---	24/11/2010
Primavera 2011	10/05/2011	10/05/2011	21/04/2011
Autunno 2011	13/09/2011	13/09/2011	13/09/2011
Estate 2012	17/07/2012	17/07/2012	17/07/2012

Tabella 37.- Sessioni di misura eseguite sul sito di Massa.

3.6.1 Risultati CPX

In Tabella 38 vengono mostrati i risultati ottenuti con le misure CPX effettuate sul sito. In tabella sono riportati i Livelli CPXL relativi alla velocità di 50 km/h (indicati nel seguito e nelle didascalie con l'acronimo CPXL(50)), il loro confronto con la pavimentazione di riferimento in situ ed il confronto con la misura effettuata ante-operam. Per ogni livello o differenza è riportata la relativa incertezza.

	RIFERIMENTO		SPERIMENTALE		Differenza		Confronto Ante-Post	
data	CPXL	Δ	CPXL	Δ	Diff	Δ	Diff	Δ
14/10/2006 (anteoperam)	91.1	1.3	---	---	---	---	---	---
24/11/2010	96.4	0.6	89.3	1.1	7.1	1.2	1.8	1.7
10/05/2011	95.3	0.6	88.5	1.0	6.8	1.1	2.6	1.6
13/09/2011	94.4	0.6	88.2	0.8	6.2	1.0	2.9	1.6
17/07/2012	94.3	0.6	88.6	0.9	5.8	1.1	2.5	1.1

Tabella 38. – Confronto fra i valori CPXL(50) misurati durante le varie sessioni. Sono riportati sia le differenze rispetto alla misura sulla pavimentazione di riferimento che rispetto alla misura ante-operam. Δ indica l'incertezza di tipo A associata ai livelli o relativa alla differenza. Tutti i livelli sono in dB(A).

DATA	Direzione Massa		Direzione Lucca		Differenza	
	CPXL	Δ	CPXL	Δ	MAS-LUC	Δ
24/11/2010	89.3	1.4	89.2	0.7	0.1	1.5
10/05/2011	88.6	1.1	88.4	0.8	0.2	1.4
13/09/2011	88.3	0.9	88.0	0.7	0.3	1.2
17/0/2012	89.0	1.1	88.1	0.7	0.9	1.3

Tabella 39. – Confronto fra i valori CPXL(50) ottenuti per le due corsie di marcia per ciascuna sessione di misura sulla pavimentazione speciale. Δ indica l'incertezza di tipo A associata ai livelli o relativa alla differenza. Tutti i livelli sono in dB(A).

In Tabella 39 è invece riportato il valore CPXL medio alla velocità di 50 km/h sulla corsia di marcia per ciascuna direzione e la differenza fra le due corsie di marcia, con le rispettive incertezze, per ogni sessione di misura effettuata.

Si nota che le differenze sono inizialmente molto piccole se confrontate con le rispettive incertezze, che, occorre osservare, sono molto alte, segno di una forte variabilità dell'emissione sul tratto sperimentale. Col passare del tempo però la differenza sta aumentando, anche se continua ad essere confrontabile con l'incertezza statistica propagata.

A riguardo della variabilità sopra evidenziata, in Figura 51 è riportato il confronto fra i risultati degli indici CPX misurati ogni 5.75 m lungo le due corsie, ottenuti nella sessione autunnale 2011. La sessione di misura è stata effettuata un anno dopo la stesa, e quindi con pavimentazione ormai assestata. Si osserva la forte disomogeneità della stesa e le intrinseche differenze fra le stese nelle due direzioni. Complessivamente la differenza fra le due corsie, come sopra detto, è poco significativa, ma in realtà, come il grafico evidenzia, sono fortemente disomogenee fra loro e

all'interno della stessa corsia. Questo fatto innalza la deviazione standard composta spaziale (Δ nelle tabelle successive) a livelli superiori al decibel.

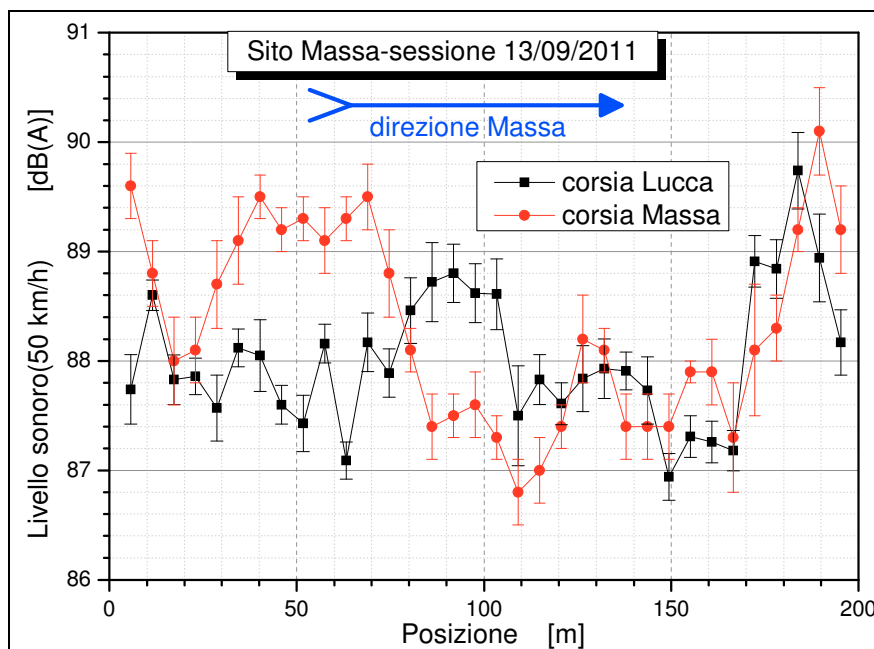


Figura 51. – Confronto fra i livelli di rumore misurati a 50 km/h sulle due corsie di marcia durante la misura della sessione autunnale 2011. I dati sono riportati affiancati in modo da rappresentare il valori di CPXL misurati in posizioni corrispondenti sulle due corsie lungo la direzione Massa.

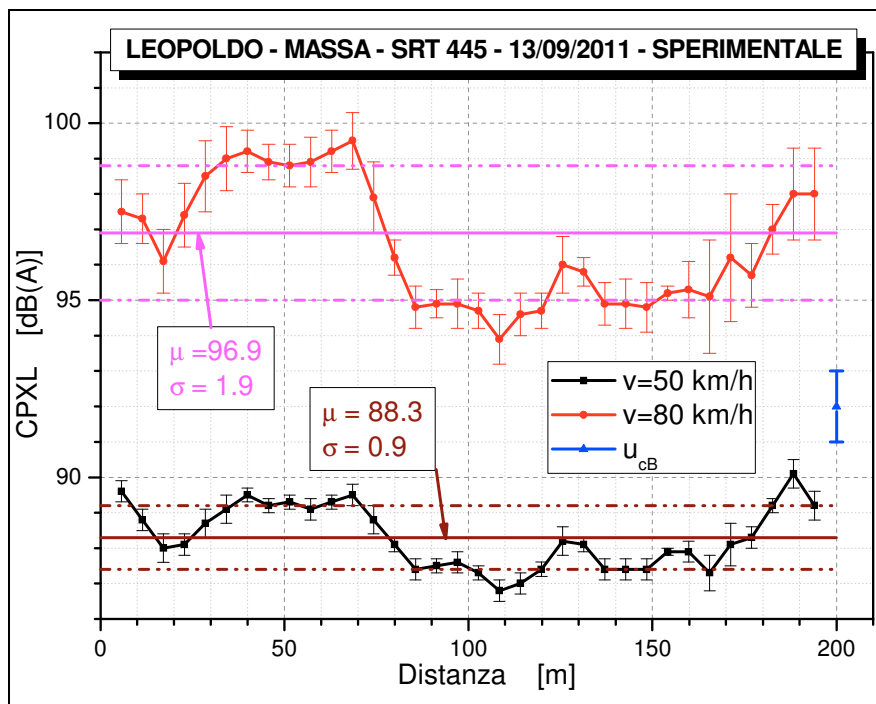


Figura 52. - Andamento dei valori di CPXL in funzione dello spazio sulla corsia strumentata dopo un anno dalla stesa. È riportata sia la media spaziale μ che la deviazione spaziale standard σ . È riportata l'incertezza estesa di tipo B U_{cB} , pari a 1 dB(A).

In Figura 52 è mostrato l'andamento spaziale dei livelli CPXL relativo alla stessa sessione di misura della figura precedente, ma alle due velocità principali nello spazio, ove ogni punto rappresenta un livello calcolato su uno spazio di 5.75 m, con la relativa incertezza.. Si nota che le disomogeneità precedentemente descritte aumentano all'aumentare della velocità. Qui la disomogeneità è molto evidente alla velocità di 80 km/h (di fatto non praticabile in condizioni di marcia ordinaria, a causa della presenza di una serie di curve ai margini del tratto speciale), maggiormente evidenti all'inizio ed nella parte centrale del tratto, tanto che la deviazione standard composta σ (si veda il paragrafo 2.4 per la sua descrizione) risulta molto alta (0.9 a 50 km/h e 1.9 a 80 km/h).

Questo può essere spiegato con la progressiva otturazione del microdrenante, soprattutto all'inizio del tratto, dove, essendo all'uscita di una curva, le velocità sono molto ridotte e lo sporco superficiale non può essere eliminato dal passaggio dei veicoli. Il tratto in oggetto non è inoltre soggetto a flussi di traffico intenso, per cui non vi possono essere importanti effetti di ripulitura a seguito del passaggio degli pneumatici sulla pavimentazione. Per questo motivo si osservano delle forti variazioni di rumorosità in funzione dello spazio.

In tutte le figure successive relative ai livelli CPXL è stato preso in esame il valore corrispondente alla velocità di 50 km/h. Risultati analoghi si avranno per le altre due velocità di riferimento: 80 e 110 km/h.

In Figura 53 è riportato l'andamento nel tempo dei livelli CPX, mentre in Figura 54 è riportato l'andamento delle differenze riscontrate fra la misura sulla pavimentazione sperimentale e la misura effettuata sulla pavimentazione usata come riferimento.

Dai risultati (rif. Figura 54 e Tabella 38) si osserva una lieve diminuzione della differenza della pavimentazione speciale rispetto a quella di riferimento nel tempo, partendo dall'iniziale valore di **7.1** fino al valore ottenuto nell'ultima sessione di **5.8 dB(A)**, con una riduzione invece più fluttuante se confrontata con la misura effettuata anteoperam (in questo caso la pavimentazione speciale sembra stia migliorando progressivamente nel tempo, passando da un iniziale 1.8 al finale 2.9 misurato nella sessione di settembre 2011).

In Figura 55 è riportato il confronto fra gli spettri acustici sia della pavimentazione speciale che della pavimentazione di riferimento. Le "barre d'errore" indicano la deviazione standard calcolata sugli spettri misurati durante le varie sessioni di misura per le due pavimentazioni.

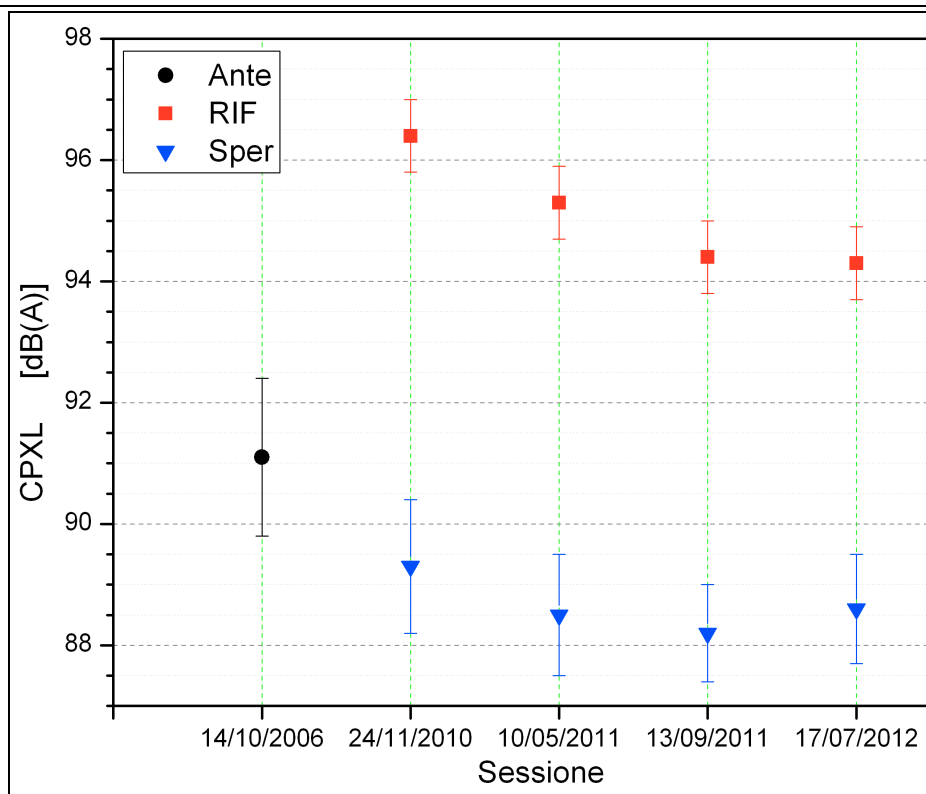


Figura 53. – Confronto valori CPXL(50) per le pavimentazioni ante-operam (ante), di riferimento (rif) e sperimentale (sper). Sono riportate le rispettive incertezze di tipo A come barre di errore

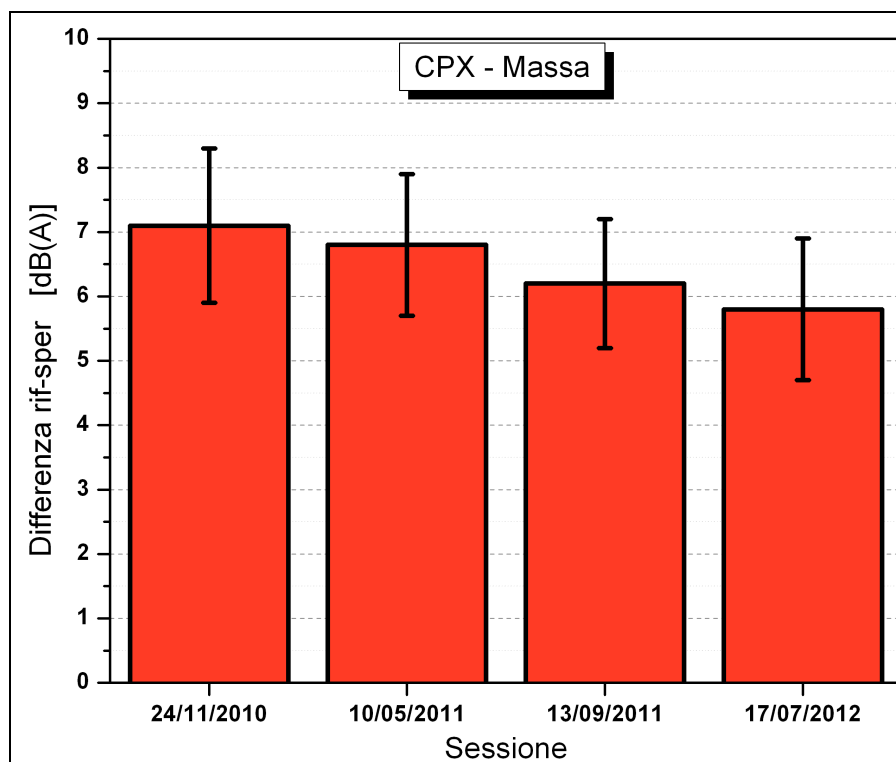


Figura 54. – Andamento nel tempo della differenza fra i livelli CPXL(50) misurati sulla pavimentazione di usura di riferimento e quella sperimentale. La barra rappresenta l'incertezza associata alla differenza. Le barre di errore sono relative alle incertezze di tipo A.

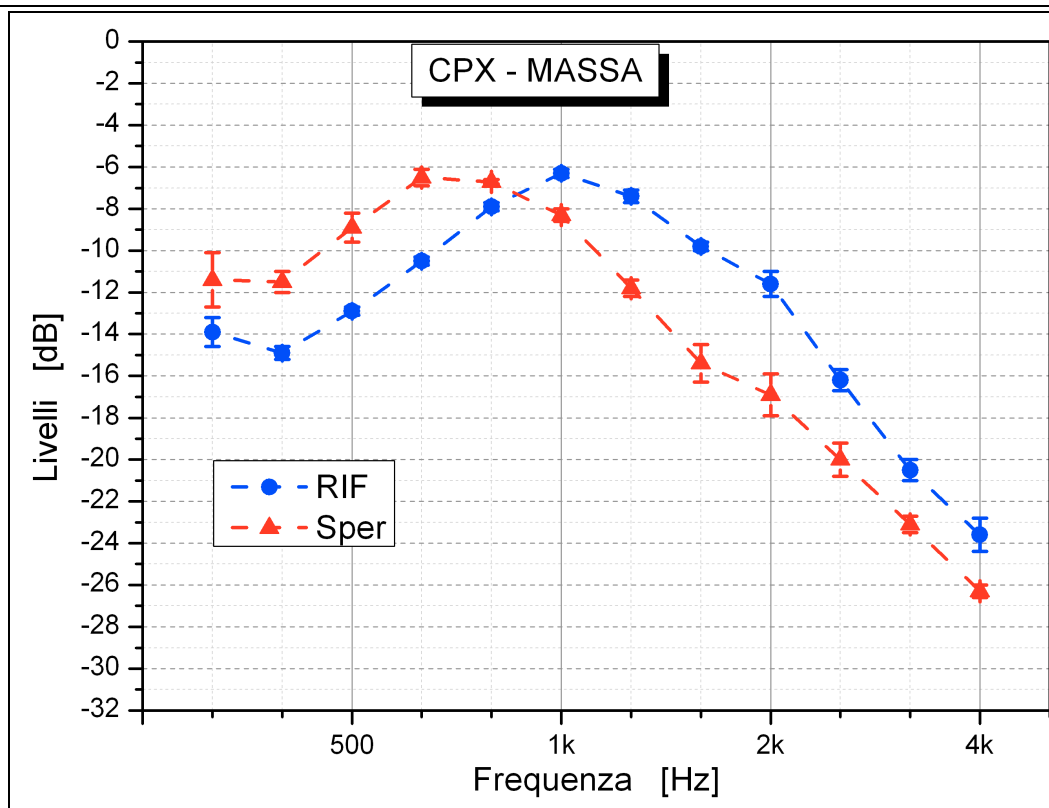


Figura 55. – Confronto fra lo spettro normalizzato CPX della pavimentazione sperimentale (sper) e lo spettro normalizzato della pavimentazione di riferimento (rif), ove le barre d'errore indicano la deviazione standard temporale sulle sessioni dello spettro relativamente ai primi tre anni di misura (2010-2012).

Frequenza	Riferimento	Δ	Sperimentale	Δ	Differenza	Δ
315	-13.9	0.7	-11.4	1.3	-2.5	1.5
400	-14.9	0.3	-11.5	0.5	-3.3	0.6
500	-12.9	0.2	-8.9	0.7	-4.0	0.7
630	-10.5	0.2	-6.5	0.4	-4.1	0.5
800	-7.9	0.2	-6.7	0.1	-1.2	0.2
1000	-6.3	0.2	-8.3	0.3	1.9	0.3
1250	-7.4	0.3	-11.8	0.4	4.4	0.4
1600	-9.8	0.2	-15.4	0.9	5.6	0.9
2000	-11.6	0.6	-16.9	1.0	5.3	1.2
2500	-16.2	0.5	-20.0	0.8	3.8	0.9
3150	-20.5	0.5	-23.1	0.4	2.6	0.6
4000	-23.6	0.8	-26.3	0.3	2.8	0.9

Tabella 40. – Confronto fra gli spettri normalizzati della pavimentazione di riferimento e della pavimentazione sperimentale. Δ indica la deviazione standard temporale calcolata su tutte le sessioni di misura effettuate nei primi tre anni di misura. È riportata anche la differenza con relativa incertezza fra livello di riferimento e livello sperimentale. Tutti i livelli sono in dB.

Il picco di emissione della pavimentazione sperimentale è sensibilmente spostato verso 630 Hz rispetto al picco dell'ante-operam/pavimentazione di riferimento. La pavimentazione sperimentale ha comunque mostrato nel primo anno di vita una lievissima variabilità nel tempo, come si vede dalla deviazione standard temporale (Tabella 40) molto contenuta (con l'eccezione delle frequenze estreme, sempre inferiore a 0.5 dB a quasi tutte le frequenze d'interesse), così come lo spettro della pavimentazione di riferimento.

3.6.2 Risultati SPB

In Tabella 41 vengono mostrati i risultati ottenuti con le misure SPB effettuate sul sito. In tabella sono riportati i livelli SPB relativi alla categoria 1 di traffico (veicoli leggeri, ovvero automobili, piccoli van) calcolati alla velocità di 50 km/h, il confronto con la misura effettuata ante-operam, sia per la misura effettuata all'altezza di 1.2 m (ISO 11819-1:2004 e Progetto HARMONOISE) che per la misura a 3.0 m di altezza (progetto HARMONOISE). Per ogni livello e differenza è riportata la relativa incertezza.

In Figura 56 è riportato l'andamento nel tempo dei livelli SPB, mentre in Figura 57 è riportato l'andamento delle differenze riscontrate fra la misura sulla pavimentazione sperimentale e il risultato ottenuto con la pavimentazione *ante-operam*.

Sessione	h=1.2m	Δ	Differenza	Δ	h=3.0 m	Δ	Differenza	Δ
14/10/2006 (anteoperam)	68.2	0.3			68.1	0.3		
10/05/2011	65.0	1.9	- 3.2	1.9	65.7	1.8	- 2.4	1.8
13/09/2011	63.1	0.6	- 5.1	0.7	63.8	0.7	- 4.3	0.8
17/07/2012	62.8	1.9	- 5.4	1.9	63.7	1.5	- 4.4	1.7

Tabella 41. – Confronto fra i valori $L_1(50 \text{ km/h})$ misurati durante le varie sessioni. Sono riportati le differenze rispetto alla misura ante-operam. Δ indica l'incertezza associata ai livelli o relative la differenza. Tutti i livelli sono in dB(A).

Sia dalla tabella che dai grafici si nota un progressivo aumento della differenza fra i livelli SPB *ante-operam* e quelli *post-operam* ad entrambe le altezze di misura. Questo può essere attribuibile ad un complessivo assestamento della pavimentazione (ricordiamo che la pavimentazione è stata stesa piuttosto in ritardo rispetto alle altre due del secondo blocco di stese. L'età della pavimentazione al momento della sessione 2012 di misura era di circa 21 mesi) e comunque i valori ottenuti nell'ultima sessione SPB sono comparabili con le differenze riscontrate

con la tecnica CPX. Solo ulteriori indagini permetteranno di valutare il reale andamento nel tempo delle caratteristiche acustiche di questa pavimentazione.

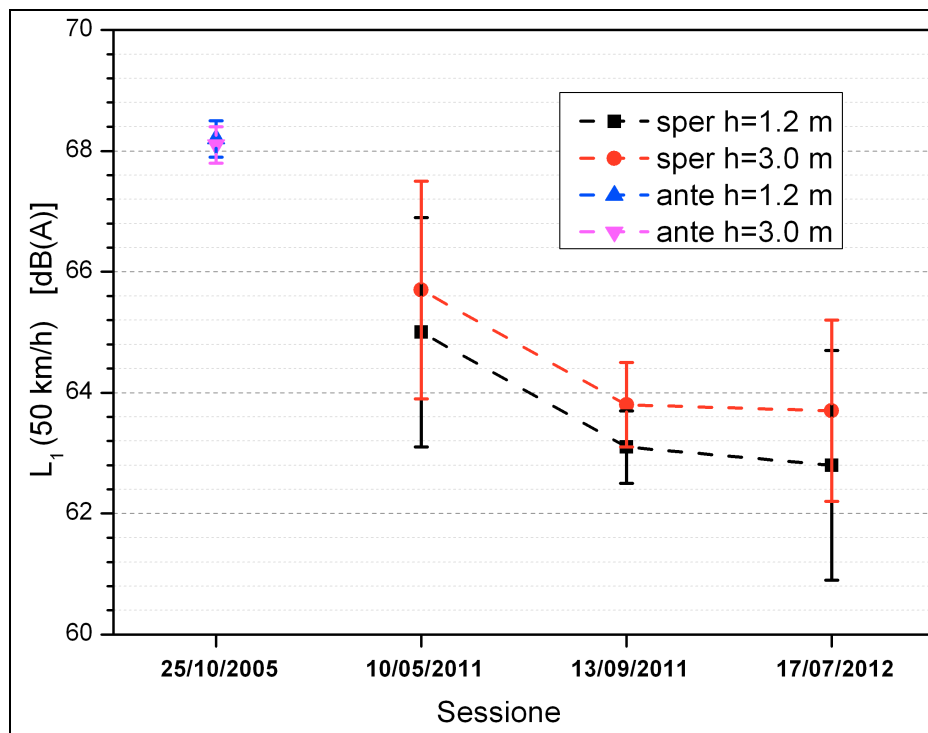


Figura 56. – Confronto fra i livelli SPB $L_1(50 \text{ km/h})$ per la pavimentazione ante-operam (ante) e per quella sperimentale nelle varie sessioni di misura effettuate (sper).

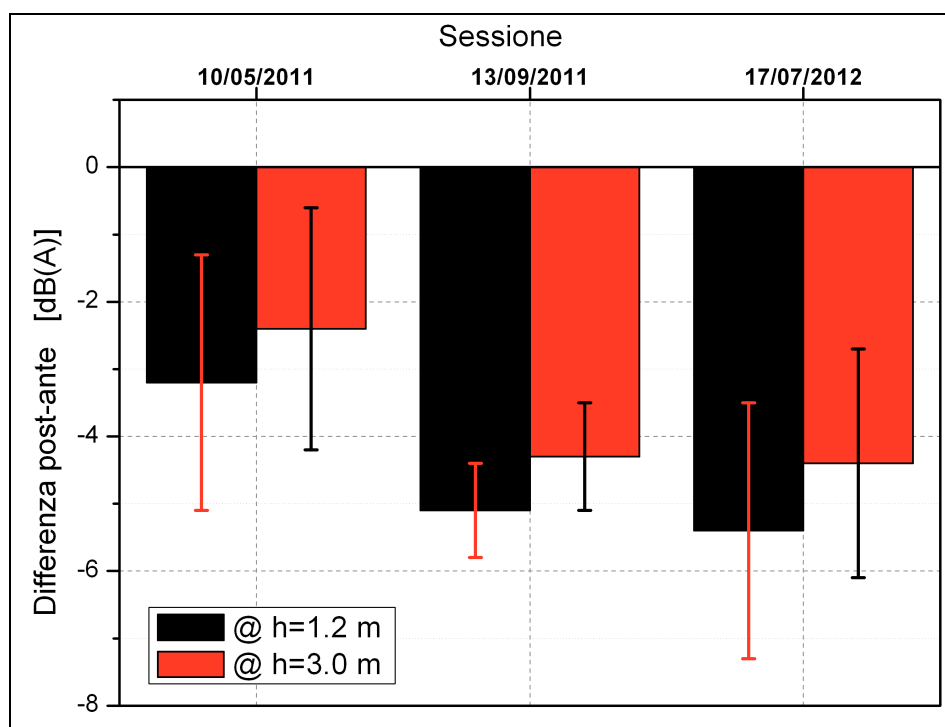


Figura 57. – Differenza fra i livelli SPB $L_1(50 \text{ km/h})$ misurati sulla pavimentazione sperimentale e quella ante-operam, alle due altezze considerate, con le relative incertezze.

3.6.3 Risultati ADRIENNE

In questo caso si considera l'assorbimento proprio della pavimentazione. In Figura 58 è riportata una serie di istogrammi corrispondenti alle varie sessioni di misura valide e fornisce un'indicazione della variabilità nel tempo del coefficiente di assorbimento acustico. Nella pavimentazione sperimentale presente nel sito di Massa si nota un sensibile assorbimento a frequenze superiori a 630 Hz. Nel tempo, causa la progressiva otturazione dei pori presenti nella pavimentazione l'attenuazione si è attenuata, con l'eccezione della misura effettuata nel mese di aprile 2011 dove invece si è misurato un sensibile assorbimento a tutte le frequenze. Probabilmente questo comportamento è legato a cause esterne, ad esempio le rigide temperature presenti, che hanno alterato sensibilmente il comportamento della pavimentazione.

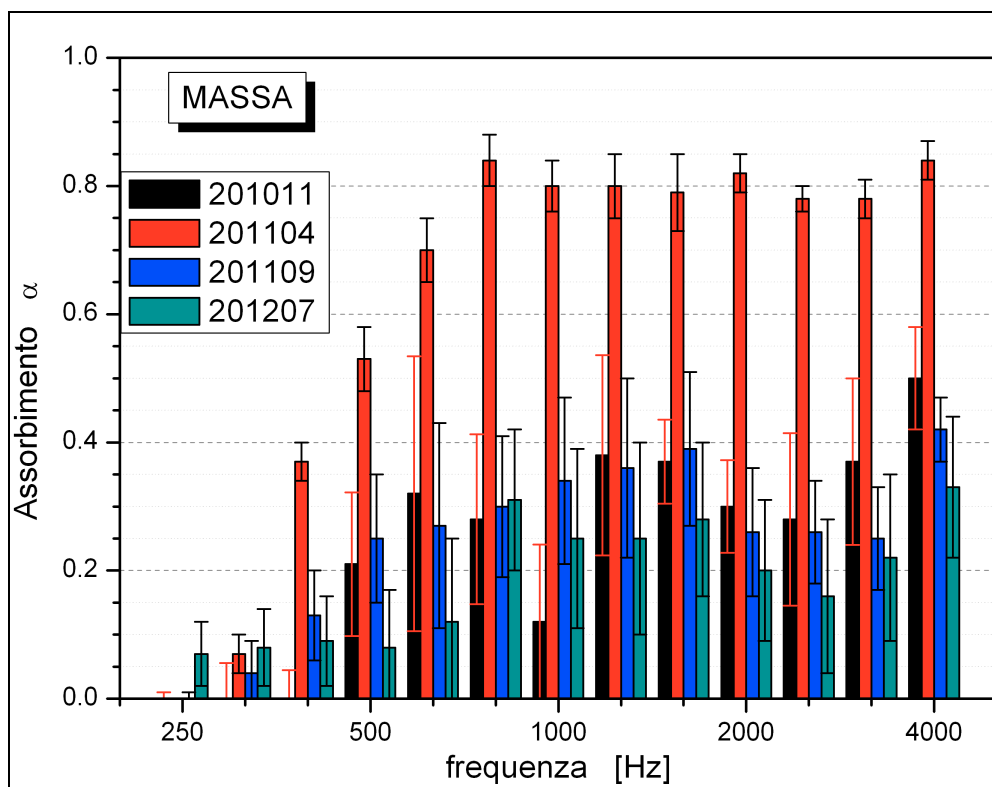


Figura 58. – Evoluzione temporale dei coefficienti di assorbimento in funzione della frequenza. Sono state esclusi i dati delle sessioni che hanno presentato risultati anomali. Le barre d'errore corrispondono alla variabilità spaziale del dato.

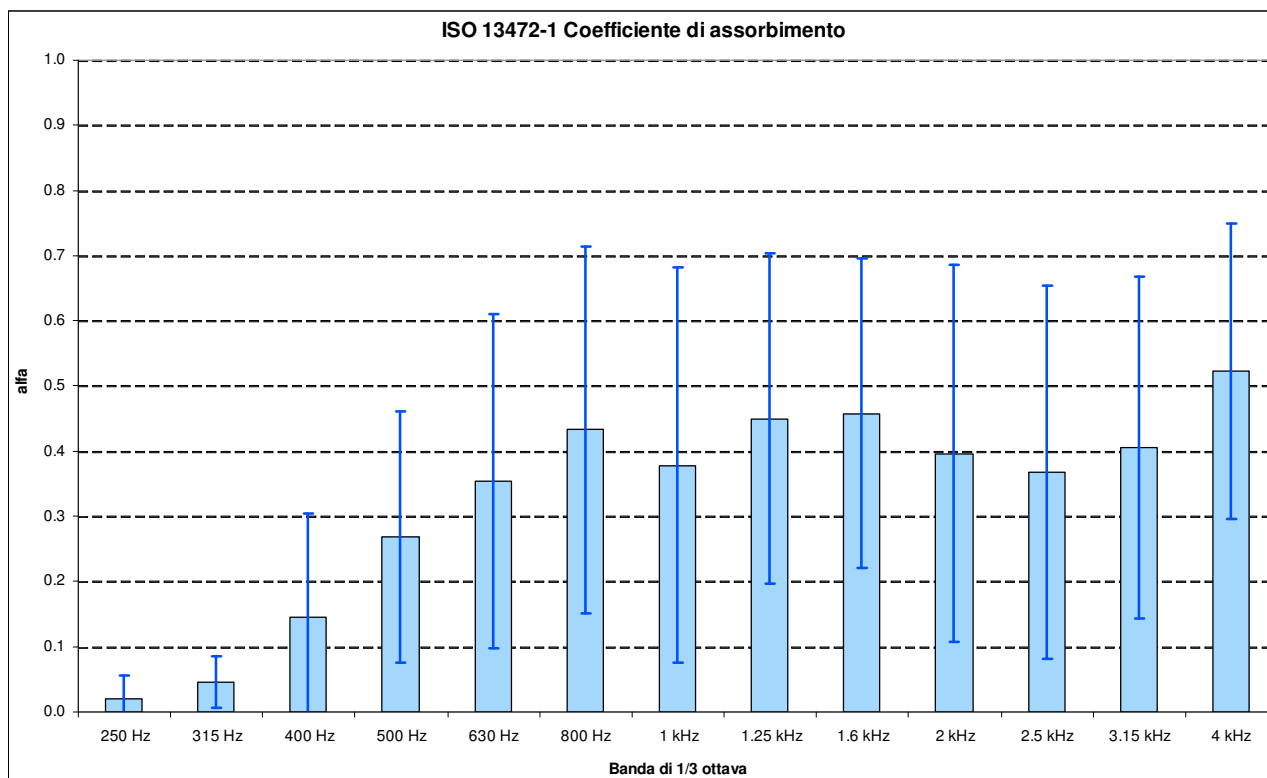


Figura 59. – Variabilità complessiva del coefficiente di assorbimento in funzione della frequenza. È indicata la deviazione standard complessiva composta partendo dalla variabilità temporale e da quella spaziale

In Figura 59 è riportato il valor medio dell'assorbimento in funzione della frequenza e la sua variabilità complessiva (deviazione standard totale) composta dalla somma in quadratura della deviazione standard spaziale (variabilità del coefficiente sulle singole prove all'interno di una sessione) e dalla deviazione standard temporale (variabilità nel tempo delle medie per sessione).

Anche in questo caso si osserva che questa pavimentazione è caratterizzata da un apprezzabile assorbimento acustico a frequenze superiori a 630 Hz con massimo a 1250 Hz ($\alpha = 0.46$) però con un'alta variabilità (pari a 0.24), a causa della misura effettuata nel mese di aprile 2011.

Infine in Tabella 42 vengono riportati i valori del coefficiente di assorbimento medio a banda larga della pavimentazione con la relativa deviazione spaziale standard.

In questo caso l'assorbimento della pavimentazione è inizialmente poco apprezzabile (0.24 nella sessione di Novembre 2010 con una variabilità spaziale contenuta e dello stesso ordine di grandezza dell'incertezza di tipo B associata alla metodica, 0.1) subisce un forte incremento nella sessione di aprile 2011 (0.63 con deviazione spaziale standard di 0.04) per poi tornare sui livelli iniziali nelle successive sessioni di analisi. In generale l'assorbimento acustico non è coerente con i risultati che si trovano in letteratura per le pavimentazioni drenanti anche in quanto è piuttosto contenuto, ma

sicuramente hanno influito le condizioni di utilizzo non ottimali della pavimentazione, sottoposta a flussi di traffico molto scarsi e il fatto che le misure sono state effettuate in periodi non molto piovosi, per cui il dilavamento della strada era scarso.

Anche questo è coerente con quanto osservato in precedenza nel sito di Arezzo e quindi col fatto che il traffico nel sito di Massa è poco intenso e limitato in velocità, la pavimentazione drenante non è soggetta a fenomeni di dilavamento ed in relativamente poco tempo si ha la perdita delle proprietà fonoassorbenti proprie di questo tipo di pavimentazione.

In questo caso specifico occorre notare comunque che dopo 3 anni dalla stesa sono comunque presenti in parte le caratteristiche di bassa emissione come le misure CPX evidenziano.

Sessione	Assorbimento medio $\bar{\alpha}$	Dev. Spaz. Std.
Novembre 2010	0.24	0.12
Aprile 2011	0.63	0.04
Settembre 2011	0.25	0.09
Luglio 2012	0.19	0.11

Tabella 42 - Valori di assorbimento medio ottenuti nelle varie sessioni di misura effettuate nel sito di Massa, con il relativo valore di deviazione spaziale standard. L'incertezza di tipo B per questa metodica è stimabile in 0.1.

4. Conclusioni.

Il progetto LEOPOLDO nasce con l'intento di fornire le "linee guida per la progettazione ed il controllo delle pavimentazioni stradali per la viabilità ordinaria", quindi ha il compito di definire le tipologie, i metodi di analisi, studiare e fornire indicazioni su pavimentazioni speciali utilizzabili per il risanamento acustico di infrastrutture stradali calate nel loro reale contesto ambientale e geografico.

Sicuramente questo progetto è uno dei più importanti progetti di studio su pavimentazioni stradali effettuati al mondo, in quanto solo in pochi casi è stato effettuato un monitoraggio delle prestazioni strutturali ed acustiche per così lungo tempo (dal 2008 al 2012; solo alcuni progetti danesi e olandesi hanno avuto durate superiori) soprattutto su un numero così significativo di pavimentazioni stradali diverse (drenanti e non; con diversi tipo di curva granulometrica; con tessitura ottimizzata; con aggiunta di polverino di gomma o con inserimento di argilla espansa).

Tutto questo grazie all'impegno sia della Regione Toscana che delle province che hanno aderito ad un progetto così importante per il futuro benessere dei cittadini, e grazie agli enti coinvolti direttamente alla progettazione, realizzazione e monitoraggio di tali pavimentazioni nel tempo.

I dati raccolti in questi anni saranno in futuro preziosi per la redazione dei piani di risanamento stradale e forniranno preziose indicazioni a chi scriverà i capitolati di gara per la corretta definizione delle caratteristiche e delle metodiche di stesa per poter avere dei buoni risultati di mitigazione del rumore alla sorgente.

Dal punto di vista acustico, dentro al progetto sono state studiate messe a punto e applicate le più recenti tecniche di analisi del rumore previste dalla norme tecniche internazionali o disponibili nella letteratura scientifica.

Al fine di preparare un protocollo di verifica per le prestazioni acustiche e vibrazionali, sono state utilizzate molte tecniche per determinare la rumorosità delle pavimentazioni stradali, alcune invasive (come il tubo di Kundt - UNI EN ISO 10534-2 per la determinazione del coefficiente di assorbimento acustico di campioni sia di laboratorio che estratti dalla pavimentazione stradale), altre effettuate direttamente *in situ* e non distruttive (Adrienne, per la misura dell'assorbimento medio superficiale su un area di qualche m²; CPX per la misura alla sorgente dell'emissione del

rumore da rotolamento; SPB misura del rumore immesso bordo strada dal passaggio dei veicoli sulla pavimentazione speciale).

Queste tecniche sono state sperimentate e validate da importanti progetti internazionali europei (SILVIA, HARMONOISE, IMAGINE, QCITY) e costituiscono una base sia per l'etichettatura acustica (labelling) che per la verifica di conformità (COP) di pavimentazioni in opera.

All'interno del progetto LEOPOLDO sono state sviluppate sei pavimentazioni sperimentali, una per ciascuna delle province partecipanti alla II fase: Arezzo, Firenze, Lucca, Massa, Pisa e Pistoia.

Per quanto riguarda i risultati complessivi fin qui ottenuti si può osservare quanto segue.

- 1) **Pavimentazione di Arezzo.** Il tratto sperimentale è sito in località Marcena sulla SRT 71. Questo tratto è lungo 168 m e la pavimentazione su esso stesa è costituita da uno strato superficiale di tipo *open graded*. La strada è caratterizzata da alti volumi di traffico, con una significativa presenza di mezzi pesanti, con carreggiata ampia, banchine laterali e con buona visibilità sul tratto, in piano. Lateralmente sono presenti dei muri di contenimento, per cui sul tratto in oggetto la pavimentazione scorre per buona parte in trincea. La velocità limite è per buona parte del tratto 90 km/h. Dal punto di vista acustico la pavimentazione, essendo di tipo aperto, quindi drenante, mostra caratteristiche assorbenti, con un assorbimento massimo nell'intervallo di frequenza posto fra 800 e 1000 Hz. Tale caratteristica che si è mantenuta nel tempo pur subendo un'attenuazione dell'assorbimento, dovuta al progressivo riempimento dei vuoti presenti causato dall'azione dello sporco negli anni. Per quanto riguarda l'emissione da interazione di contatto pneumatico/pavimentazione dopo quattro anni si osserva una riduzione della rumorosità rispetto alla pavimentazione di riferimento di circa 3.7 dB(A). Per quanto riguarda invece la rumorosità a bordo strada, le misure purtroppo sono state affette da una serie di problemi sia meteorologici che tecnici, comunque si è osservato una progressiva riduzione della differenza ante-post da un iniziale valore di ca. 7 dB(A) fino al valore di 1.6 dB(A) ottenuto nella sessione di settembre 2011. Per quanto riguarda gli spettri di emissione i risultati ricalcano quanto già visto con l'assorbimento acustico, quindi un abbassamento dei livelli per frequenze superiori a 800 Hz, anche se tale andamento molto meno evidente negli spettri ottenuti a bordo strada, caratterizzati da una forte variabilità nel tempo.
- 2) **Pavimentazione di Firenze.** Il tratto sperimentale è sito in località Lutiano Vecchio (Borgo S. Lorenzo) sulla SRT 302. Questo tratto è lungo 244 m e la pavimentazione su esso stesa è

costituita da uno strato superficiale di tipo *gap graded* a tessitura ottimizzata. La strada è caratterizzata da bassi volumi di traffico, con una limitata presenza di mezzi pesanti, e presenta una carreggiata non molto ampia, priva di banchine laterali e con una non buona visibilità sul tratto posto non in piano (che corre compreso fra una curva ed un dosso). Lateralmente è presente un avvallamento del terreno sulla corsia in direzione B. S. Lorenzo e alcune case e terreno in discesa sulla corsia direzione Firenze. La velocità limite è per buona parte del tratto 50 km/h. Dal punto di vista acustico la pavimentazione, essendo di tipo chiuso, non mostra particolari caratteristiche assorbenti, con un modesto assorbimento per frequenze superiori a 3000 Hz. Questa caratteristica è mutata nel tempo in quanto l'assorbimento è complessivamente diminuito negli anni, e questo a causa dell'asestamento della pavimentazione. Per quanto riguarda l'emissione da interazione di contatto pneumatico/pavimentazione si osserva nel tempo un progressivo aumento della rumorosità e dopo quattro anni la riduzione si è attestata su circa 3 dB(A). Per quanto riguarda la rumorosità a bordo strada, i risultati confermano in pieno quanto visto con le misure CPX, ovvero un progressivo peggioramento della rumorosità della pavimentazione. Si è osservato sia per l'emissione di contatto ruota/pavimentazione che a bordo strada un lieve spostamento dello spettro di emissione verso le basse frequenze.

- 3) **Pavimentazione di Lucca.** Il tratto sperimentale è sito in località Maggiano (Lucca) sulla SRT 439. Questo tratto è lungo 200 m e la pavimentazione su esso stesa è costituita da uno strato superficiale di tipo *dense graded* a tessitura ottimizzata. La strada è caratterizzata da medi volumi di traffico, con una limitata presenza di mezzi pesanti, presenta una carreggiata non molto ampia, priva di banchine laterali e con una buona visibilità sul tratto (che però termina in prossimità di una curva). Il tratto strumentato è in discesa (direzione Lucca). Lateralmente è presente la scarpata di una collina sulla corsia in direzione Viareggio e sulla corsia direzione Lucca il terreno è in discesa con forte pendenza per la presenza di un torrente molto più in basso rispetto alla quota della strada. Oltre il torrente vi è l'autostrada A11 bretella Lucca -Viareggio. La velocità limite è per buona parte del tratto 70 km/h. Dal punto di vista acustico la pavimentazione, essendo di tipo chiuso, non mostra nel tempo alcun assorbimento degno di rilievo, con un modesto assorbimento iniziale a 500 Hz subito scomparso. Per quanto riguarda l'emissione da interazione di contatto pneumatico/pavimentazione si osserva nel tempo un andamento non perfettamente costante nel tempo, comunque con differenze rispetto al riferimento comprese fra 4 e 5 dB(A), e dopo quattro anni tale riduzione si è attestata su circa 5 dB(A). Per quanto riguarda la rumorosità a bordo strada, i risultati confermano in pieno

quanto visto con le misure CPX, ovvero una sostanziale costanza delle differenze ante-post, superiori a 4 dB(A) dopo quattro anni, anche se la misura è caratterizzata da una grossa fluttuazione statistica. Per quanto riguarda lo spettro di frequenza del rumore generato dalla pavimentazione nel caso delle misure CPX si osserva la sostanziale eguaglianza fra lo spettro *ante* e quello *post-operam*, con una leggera preponderanza delle basse frequenze, mentre per quanto concerne le misure bordo strada si nota una marcata predominanza delle basse frequenze nella pavimentazione speciale, così come visto, in modo meno accentuato, anche con l'altra pavimentazione a tessitura ottimizzata presente nel sito di Firenze.

- 4) **Pavimentazione di Massa.** Il tratto sperimentale è sito in località Codiponte, comune di Casola in Lunigiana (Massa) sulla SRT 435. Questo tratto è lungo 200 m e la pavimentazione stesa è costituita da un microtappeto drenante in conglomerato bituminoso *open graded* di spessore 2.5 cm. La strada è caratterizzata da scarsi volumi di traffico, con una significativa percentuale diurna di mezzi pesanti, presenta carreggiata stretta (in alcuni punti non arriva a 7 m), priva di banchine laterali e con una non buona visibilità sul tratto (che essenzialmente è in curva, delimitata in direzione Casola da una serie di curve in salita e in direzione Aulla da una strettoia in ingresso all'abitato di Codiponte). Il tratto strumentato è in discesa (direzione Aulla). Lateralmente è presente un avvallamento del terreno sulla corsia in direzione Casola con terreno in discesa con forte pendenza. Sul lato direzione Aulla invece c'è, in prossimità del punto di ove è localizzata la strumentazione, un ampio parcheggio asfaltato. La velocità limite è 50 km/h. Dal punto di vista acustico la pavimentazione, essendo di tipo aperto, mostra inizialmente un buon assorbimento, che lentamente sta diminuendo nel tempo, a causa della progressiva otturazione dei vuoti, con un meccanismo simile a quanto visto nella pavimentazione di Arezzo. Si passa da un assorbimento iniziale massimo di 0.63 fino a 0.19 misurato nella sessione di luglio 2012. Lo spettro inizialmente presenta un primo picco di assorbimento a 800 Hz ed un secondo picco, leggermente più stabile nel tempo, a 1600 Hz. Per quanto riguarda l'emissione da interazione di contatto pneumatico/pavimentazione si osserva nel tempo una lenta diminuzione della differenza rispetto al riferimento, ma comunque superiore a 5.8 dB(A) (differenza misurata nel corso della sessione di luglio 2012). Per quanto riguarda la rumorosità a bordo strada, i risultati confermano in pieno quanto visto con le misure CPX, ovvero una progressiva attenuazione della differenze ante-post, che comunque si aggira su circa 5.4 dB(A) dopo 2 anni dalla stesa, anche se la misura è caratterizzata da una grossa fluttuazione statistica a causa dei bassi volumi di traffico presenti e della forte variabilità nei modi di guida dei veicoli misurati. Per quanto

riguarda lo spettro di frequenza del rumore generato dalla pavimentazione nel caso delle misure CPX si osserva la sostanziale predominanza delle basse frequenze, con il caratteristico picco di emissione compreso fra 630 e 800 Hz.

- 5) **Pavimentazione di Pisa.** Il tratto sperimentale è sito in località La Sterza, nel comune di Terricciola (Pisa) sulla SRT 439. Questo tratto è lungo 200 m e la pavimentazione stesa è costituita da uno strato conglomerato bituminoso modificato con argilla espansa. La strada è caratterizzata da alti volumi di traffico, con una buona presenza di mezzi pesanti, presenta carreggiata ampia, priva di banchine laterali e con una buona visibilità sul tratto (in rettilineo). Il tratto strumentato è in piano (direzione Pisa). Lateralmente è presente un avvallamento del terreno sulla corsia in direzione Volterra con terreno in lieve salita. In direzione Pisa il terreno è invece aperto, con un campo libero per molte centinaia di metri. In prossimità al sito è presente un'attività di lavorazione di materiali lapidei, scarti di costruzione edilizia, scavi e materiali provenienti da scarifiche stradali, attività caratterizzata da significativi livelli di immissione sonora nell'ambiente circostante. Inoltre i mezzi pesanti transitanti diretti verso le aree di stoccaggio di detta attività hanno fortemente contribuito a sporcare la pavimentazione, rendendo difficoltoso effettuare le misure e alterando potenzialmente i risultati misurati. La velocità limite è 70 km/h. Dal punto di vista acustico la pavimentazione, essendo di tipo chiuso, non mostra nel tempo alcun assorbimento degno di rilievo. Per quanto riguarda l'emissione da interazione di contatto pneumatico/pavimentazione si osserva nel tempo una progressiva diminuzione della differenza di rumorosità fra pavimentazione speciale e pavimentazione di riferimento da un iniziale valore di 6.4 dB(A) al valore misurato nella sessione di luglio 2012 di 3.6 dB(A). Per quanto riguarda invece la rumorosità a bordo strada, i risultati mostrano un drastico peggioramento della differenza ante-post., passata da un iniziale differenza di 9.7 dB(A) e arrivata a valori prossimi (e superiori) a 0 dB(A) nella sessione di misura di agosto 2012, pur caratterizzata da una grande incertezza statistica (3.1 dB(A)). Da notare che la differenza misurata nella sessione di agosto 2011, a circa un anno dalla stesa, in condizione di impianto industriale spento dava una differenza ante-post pari a 0.5 dB(A) (con incertezza statistica pari a 1.6) a 1.2 m di altezza e 3.5 dB(A) a 3 m di altezza (sempre con incertezza di 1.6 dB(A)). Per quanto riguarda lo spettro di emissione di contatto ruota/pavimentazione non si è riscontrata alcuna differenza apprezzabile rispetto allo spettro della pavimentazione di riferimento.
- 6) **Pavimentazione di Pistoia.** Il tratto sperimentale è sito in località Le Panche, nel comune di Pistoia sulla SRT 66. Questo tratto è lungo 156 m e la pavimentazione stesa è costituita da uno

strato di usura da 3 cm formato da un conglomerato bituminoso *gap graded* tipo Asphalt Rubber. La strada è caratterizzata da medi volumi di traffico, con una significativa presenza di mezzi pesanti, presenta carreggiata ampia, priva di banchine laterali e con una buona visibilità sul tratto (che però termina, in direzione S. Marcello Pistoiese, in prossimità di una strettoia dopo la quale c'è una serie di curve). Il tratto strumentato è in piano (direzione S. Marcello). Lateralmente, sul bordo esterno della corsia direzione Pistoia, è presente la scarpata della collina con terreno con sensibile pendenza, mentre dall'altro lato, esternamente alla corsia direzione S. Marcello, per la presenza di un torrente, il terreno è abbastanza aperto e pianeggiante. Nei pressi del sito, in prossimità della strumentazione vi è un distributore con servizio di autolavaggio, molto spesso in funzione durante i rilievi effettuati. La velocità limite è 90 km/h. Dal punto di vista acustico la pavimentazione, essendo di tipo chiuso, non mostra nel tempo alcun assorbimento degno di rilievo, con un modesto assorbimento iniziale a 630 Hz subito scomparso, ma con una variabilità evidente dei livelli di assorbimento nel tempo che fa sì che vi sia una forte deviazione standard temporale. Per quanto riguarda l'emissione da interazione di contatto pneumatico/pavimentazione si osserva un andamento non perfettamente costante nel tempo, comunque con differenze rispetto al riferimento comprese fra 4.4 e 5.2 dB(A), e dopo due anni tale riduzione si è attestata su circa 4.6 dB(A). Per quanto riguarda la rumorosità a bordo strada, i risultati confermano in pieno quanto visto con le misure CPX, ovvero una sostanziale variabilità nel tempo delle differenze ante-post, con una grossa fluttuazione statistica dei risultati. La differenza dei livelli misurati ante-post dell'indice SPB L_1 varia da 3.9 (maggio 2011) a 5.3 dB(A) (luglio 2012). Per quanto riguarda lo spettro di frequenza del rumore generato dalla pavimentazione nel caso delle misure CPX si osserva la sostanziale eguaglianza fra lo spettro *ante* e *post operam*, con una preponderanza delle alte frequenze, mentre per quanto concerne le misure bordo strada, si evidenzia una sostanziale eguaglianza fra gli spettri *ante* e *post operam*.

Ringraziamenti e collaboratori

Il progetto Leopoldo costituisce un percorso durato più di quattro anni suddiviso in varie fasi intermedie, che vanno dalla redazione dei protocolli di misura, allo studio delle pavimentazioni ante-operam da utilizzare come confronto per le pavimentazioni speciali, alla progettazione e messa in opera delle pavimentazioni sperimentali, fino al monitoraggio delle loro caratteristiche nel tempo. A questo percorso, per la parte di attività pertinente ARPAT, hanno partecipato a vario titolo e in vario modo molte persone che desideriamo qui ringraziare per il loro apporto, e il loro entusiasmo e interesse e per la loro partecipazione attiva e fattiva alle varie fasi del progetto stesso.

Per prima cosa si desidera qui ricordare e ringraziare, quanti hanno in passato collaborato alla redazione dei protocolli di analisi, alla raccolta della gran mole di dati di cui questo documento costituisce una sintesi ed alla loro prima elaborazione, soprattutto per la parte della raccolta dei dati *ante-operam* e per le prime misure *post-operam*.

In particolar modo si desidera ricordare: il Dott. Luca Alfinito, che per primo ha collaborato attivamente a tutte le fasi iniziali del progetto e a parte delle misure che sono state effettuate nei primi tre anni per la redazione dei protocolli di misura; i Dott. Luca Nencini, Sara Carpinello, Beatrice Siervo, Lorenzo Magni, Esther Ciarrocchi, Francesco Bianco per la loro partecipazione alle misure effettuate in tutti questi anni.

Occorre invece dare una menzione particolare a quanti hanno attivamente collaborato alla redazione del presente documento, all'analisi finale di tutti i dati, alla raccolta di tutti i dati relativi alle varie sessioni di misura, ovvero le seguenti persone: Dott. Michelangelo Coca, Dott. Elena Ascari, Dott. Riccardo Zei e soprattutto il Dott. Luca Teti, che ha contribuito alla realizzazione del sistema di misura CPX, ha collaborato a tutte le sessioni di misura riguardanti le pavimentazioni speciali effettuate nell'ambito del progetto ed alla revisione del presente documento.

Un ringraziamento particolare va infine a tutti i dipendenti ARPAT che a vario titolo hanno fornito supporto e aiuto nella riuscita delle varie sessioni di misura e nella realizzazione dei sistemi di misura necessari.

Ai sensi dell'allegato D del DM 16.3.1998, si attesta che hanno presenziato in qualità di osservatori: il dott. Francesco Bianco alle misure condotte nell'anno 2012 e il dott. Riccardo Zei alle misure effettuate nell'anno 2011.