

LA CARATTERIZZAZIONE ACUSTICA DELLE PAVIMENTAZIONI ANTIRUMORE: STATO DELL'ARTE

Patrizia Bellucci (1), Paola Calicchia (2), Mauro Cerchiai (3), Annalisa Giovannetti (1), Raffaella Grecco (1)

- 1) ANAS S.p.A. - Centro Ricerche di Cesano, Cesano di Roma (RM)
- 2) Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto di Acustica e Sensoristica "Orso Mario Corbino", Roma
- 3) Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale della Toscana, Dipartimento di Pisa, Pisa

1. Introduzione

La normativa italiana [1] prescrive che siano accertate le prestazioni acustiche degli interventi di risanamento per garantire il conseguimento degli obiettivi di mitigazione prefissati. Prescrive altresì che gli interventi di mitigazione debbano essere prioritariamente eseguiti alla sorgente, quindi sulle vie di propagazione e per ultimo al ricettore. Nel primo caso, nell'ambito del rumore stradale occorre intervenire sia sulla rumorosità dei mezzi circolanti che sull'emissione associata alle pavimentazioni stradali. Per quest'ultima tipologia di interventi è indispensabile disporre di adeguati metodi di misura per la verifica delle relative prestazioni in opera.

In questa memoria sono esaminati i principali metodi di misura (alcuni ancora in fase sperimentale) alla luce delle loro principali criticità. In tale riesame si sottintende che la pavimentazione stradale in sé è solo uno degli elementi che concorrono ad un dato livello sonoro e che le proprietà dei materiali impiegati, la messa in opera e lo stato della struttura stessa a distanza di tempo dalla sua realizzazione contribuiscono a determinare le caratteristiche acustiche finali.

2. Metodi di prova per la misura delle prestazioni acustiche

Basati su protocolli sviluppati in ambito di progetti Europei, tali metodi offrono un quadro dettagliato dello stato dell'arte con un'ampia statistica derivata da indagini svolte su innumerevoli siti, sia urbani che extraurbani, a livello nazionale e internazionale.

Alcuni dei metodi di misura descritti si applicano in situ, mentre altri in laboratorio. I vantaggi associati alle misure eseguite in situ rispetto a quelle effettuate in laboratorio sono molteplici: il campione non deve essere sottratto alla sua sede naturale; le proprietà acustiche sono rilevate nelle reali condizioni di installazione o esercizio, senza essere affette da contaminazioni derivanti da condizioni al contorno differenti. La misura in situ, però, è esposta all'influenza di fattori esterni non facilmente controllabili e introduce il problema delle condizioni di sicurezza per l'operatore.

I metodi di laboratorio, invece, valutano le proprietà acustiche in condizioni controllate in assenza di tutti quei fenomeni che si manifestano nelle reali condizioni di esercizio quali riflessioni spurie, assorbimenti di superfici presenti nell'area di analisi, o altre condizioni al contorno che possono influire sui risultati finali.

Di seguito sono elencati i metodi di prova analizzati nei successivi paragrafi:

- la tecnica Pass-By Statistico (SPB) UNI EN ISO 11819-1:2004 [2];

- il metodo “ADRIENNE” UNI ISO 13472–1:2004 [3];
- la tecnica Close Proximity (CPX) ISO/CD 11819-2:2011 [4];
- il metodo per la determinazione del coefficiente di assorbimento acustico con il Tubo ad Impedenza UNI EN ISO 10534-1:2001 e 10534-2:2001 [5];
- Il metodo per la determinazione del coefficiente di assorbimento acustico in situ per superfici riflettenti ISO 13472-2:2010 [6].

2.1 Pass-By Statistico (UNI EN ISO 11819-1:2004)

Il Metodo Pass-By Statistico (SPB) consente di determinare il contributo alla rumorosità della pavimentazione stradale prodotto dal transito dei veicoli in prossimità dell’infrastruttura. La misura è effettuata a bordo strada, a 7.5 m dall’asse della corsia di marcia (Figura 1).

Il metodo si applica al traffico passante, su un campione statisticamente significativo per numero di transiti e tipologia di veicoli. Di ogni passaggio sono rilevati il livello di pressione sonora massimo e lo spettro per bande di terzi di ottava. I dati acquisiti sono poi opportunamente elaborati, mediante un’operazione di regressione lineare, per fornire una caratterizzazione delle prestazioni acustiche della pavimentazione indagata.



Fig.1 - Set-up sperimentale per la misura in situ della rumorosità delle pavimentazioni con il metodo SPB.

Criticità del metodo

La principale criticità consiste nel fatto che il metodo caratterizza un sito nel suo complesso e non la pavimentazione nello specifico. Affinché il metodo fornisca delle indicazioni significative, occorre che siano soddisfatti numerosi requisiti che ne complicano l’applicazione e ne aumentano i tempi di esecuzione. Condizioni meteorologiche, rumore di fondo, presenza di elementi riflettenti possono condizionare l’esito della misura.

Il metodo SPB presenta, tuttavia, delle caratteristiche di robustezza derivanti dal fatto che i livelli di pressione elaborati sono normalizzati rispetto a condizioni ambientali e di traffico standard, corretti rispetto a valori di riferimento della temperatura ambiente (20°C) e della velocità per ciascuna categoria veicolare. Spesso i risultati sono rilevati rispetto a una superficie di riferimento.

Qualora non sia possibile avere un campione statisticamente significativo dei veicoli transitanti, situazione ricorrente spesso nella realtà, occorre adottare un approccio più complesso nel trattamento dei dati acquisiti, rispetto al caso prescritto dalla norma. Relativamente alla ripetibilità e alla riproducibilità del metodo, si deve considerare che il campione di veicoli può variare sensibilmente a seconda della posizione o del periodo

dell'anno in cui è eseguita la misura. Il problema si ridimensiona aumentando il campione statistico, a spese della durata; ciononostante rimane critica la differente composizione veicolare sulle varie tipologie di strade.

2.2 Metodo ADRIENNE (UNI ISO 13472-1:2004)

Il metodo ADRIENNE consente la misura in situ del coefficiente di assorbimento acustico di superfici estese (Figura 2). La determinazione del coefficiente è per incidenza normale, ma la valutazione può essere eseguita anche per incidenza obliqua con le limitazioni previste dalla norma. Esso si applica sia alle pavimentazioni stradali sia alla verifica in opera dell'efficienza delle barriere acustiche, per la rapidità di esecuzione dei rilievi e per la relativa facilità con cui il sistema di misura può essere spostato, consentendo l'acquisizione di numerosi dati in tempi contenuti.

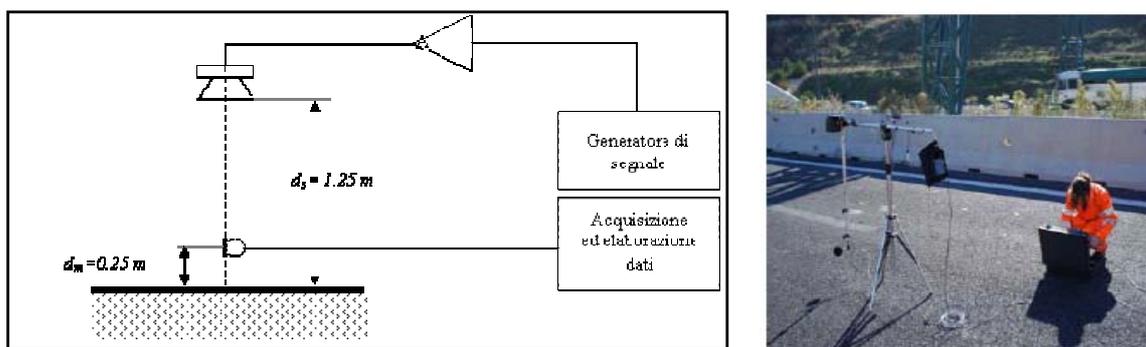


Fig.2 - Set-up sperimentale per la misura in situ del coefficiente di assorbimento acustico delle pavimentazioni con il metodo Adrienne.

Criticità del metodo

Il metodo ADRIENNE, come il metodo SPB, è statico e puntuale. Il metodo prevede che l'unità sorgente-ricevitore sia coassiale e posizionata normalmente alla superficie da analizzare. Nel caso di pavimentazioni stradali, ciò richiede la limitazione del flusso di traffico sul segmento in esame e impone importanti requisiti per la sicurezza degli operatori durante le misure. La norma non riporta indicazioni chiare sulla ripetibilità e sulla riproducibilità del metodo ed elenca alcune delle componenti all'incertezza di misura e delle grandezze di influenza. Indica un valore dell'incertezza estesa $U=0,10$ per un livello di confidenza del 95%, come richiesto dalla G.U.M. ma non produce alcun dettaglio sulla sua valutazione, né riferimenti.

Come per il metodo SPB la misura è influenzata dalle condizioni ambientali: velocità del vento, temperatura ambiente e della pavimentazione devono rispondere ai requisiti specificati dalla norma. La superficie di misura deve, inoltre, essere asciutta e priva di umidità residua, anche all'interno dei pori, nel caso di usure drenanti.

La presenza di elementi riflettenti in prossimità del punto di indagine può generare riflessioni spurie, che sovrapponendosi al segnale di misura impediscono l'estrazione delle componenti utili alla determinazione dell'energia assorbita: segnale diretto e riflessione generata dal manto stradale. Il soddisfacimento dell'insieme di tali requisiti risulta non realizzabile su qualsiasi tratto di strada e la misura è rappresentativa esclusivamente della porzione di superficie sottoposta a prova. Per caratterizzare un tratto di strada è necessario fare misure in più posizioni e su più corsie.

Al di là delle specifiche problematiche descritte, occorre sottolineare che il metodo è non distruttivo e praticamente insensibile al rumore di fondo. L'utilizzo di segnali MLS (consigliato nella norma) permette, per l'elevato livello di correlazione tra i segnali generato e rilevato, una consistente discriminazione dal rumore per valori del rapporto segnale/rumore (S/N) > 10dB. Il rapporto S/N può essere migliorato aumentando la durata del segnale MLS ed il numero delle ripetizioni, a discapito, però del tempo di misura.

2.3 Close Proximity (CPX) (ISO/CD 11819-2:2000)

Il metodo di indagine Close Proximity (CPX) caratterizza la componente di rumorosità della strada dovuta al rotolamento del pneumatico sulla pavimentazione. La tecnica CPX è complementare al metodo SPB [9.10] ed è utilizzata in particolari applicazioni per motivi di praticità, velocità ed economicità per eseguire la caratterizzazione acustica delle pavimentazioni in situ, controllare lo stato di conservazione e di invecchiamento della pavimentazione, verificare l'omogeneità longitudinale, e ove possibile laterale, della sezione di strada in esame.



Fig.3 - Trailer per la misura in alto rendimento delle prestazioni acustiche delle pavimentazioni stradali con il metodo CPX.

Criticità del metodo

Il metodo CPX consente di misurare in maniera dinamica il rumore generato dal contatto del pneumatico con la pavimentazione, attraverso un set-up di misura solidale con il veicolo [11], che lo rende particolarmente adatto alla caratterizzazione di lunghi tratti stradali (Figura 3). Anche il CPX presenta delle limitazioni applicative dovute ai requisiti richiesti sulle condizioni climatiche e le caratteristiche del sito specifico, nonché sull'influenza di sorgenti di rumore casuali esterne non controllabili. In particolare la misura prevede che siano rispettate le seguenti condizioni ambientali: superficie stradale asciutta e priva di materiale grossolano; limitate variazioni termiche. Quest'ultima condizione può essere critica nel caso di misure di lunga durata su tratte stradali estese.

Occorre notare che l'iter normativo, sebbene in fase avanzata, non è ancora concluso e prevede l'emissione di una terza parte della norma (ISO/TS 11819:3), nella quale sono definite le caratteristiche dei pneumatici di riferimento. Le problematiche relative alla scelta dei pneumatici di riferimento, alla varietà di trailer e auto impiegate sono affrontate in numerosi lavori [12,13].

Nell'ultimo decennio sono state implementate diverse versioni del sistema di misura per ovviare alle problematiche descritte. Sebbene la maggior parte delle criticità siano

state risolte, rimangono ancora da stabilire i criteri di classificazione acustica delle varie tipologie di usura e le modalità di verifica di conformità del prodotto, a cui il metodo CPX sembra destinato ad essere legato.

2.4 Tubo ad Impedenza (UNI EN ISO 10534-2:2001)

Il tubo ad impedenza (Figura 4) è il più comune metodo di laboratorio utilizzato per misurare il coefficiente di assorbimento acustico per incidenza normale delle pavimentazioni stradali. La norma di riferimento prevede due possibili set-up di misura che consentono di determinare il coefficiente di assorbimento con la modalità *standing wave ratio* o con il metodo della *funzione di trasferimento*.

La prova è di carattere invasivo implicando il prelevamento in situ di provini della pavimentazione mediante carotaggio. Il particolare set-up sperimentale assicura l'assenza di perturbazioni al di là di quelle strettamente connesse con l'inserimento del provino all'interno del tubo stesso. Inoltre, essendo una prova di laboratorio, è sempre eseguita in condizioni ambientali controllate.

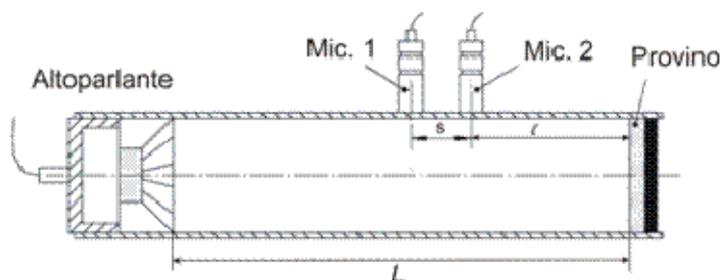


Fig.4 – Tubo ad impedenza

Criticità del metodo

Le caratteristiche costruttive del tubo ad impedenza e le modalità di montaggio del campione devono soddisfare numerosi requisiti. Il livello di ingegnerizzazione del sistema è, tuttavia, ormai molto avanzato, per cui le criticità connesse con le caratteristiche costruttive possono considerarsi ad oggi superate.

Per quanto concerne, invece, il montaggio del campione, occorre porre particolare attenzione; un montaggio non accurato può portare alla comparsa di componenti dovute a vibrazioni del campione nel suo alloggiamento e invalidare la misura.

La necessità di eseguire un carotaggio su strada per prelevare il campione da analizzare definisce il carattere invasivo di questo tipo di misura; viceversa, il metodo non crea particolare disagio se si vogliono studiare le caratteristiche acustiche di campioni di conglomerato bituminoso realizzati in laboratorio.

Occorre sottolineare che l'esito della prova si riferisce a campioni di dimensioni ridotte che non possono, in generale, considerarsi rappresentativi dell'intera estesa stradale.

2.5 Tubo di Kundt portatile: misura in situ secondo ISO 13472-2:2010

Quest'ultimo metodo [14] è stato introdotto solo recentemente e rappresenta il tentativo di fare una misura non distruttiva del coefficiente di assorbimento. Tale metodo risulta, tuttavia, applicabile solo su pavimentazioni a basso assorbimento, come le pavimentazioni chiuse.

La tecnica è non invasiva (non necessita di carote di materiale per poter effettuare la

misura) ed è basata sul metodo del tubo ad impedenza. Utilizza le stesse tecniche di analisi e le procedure previste per il tubo di Kundt da laboratorio. Il sistema di misura non deve essere modificato se si desidera mantenere lo stesso intervallo di frequenze nella descrizione spettrale delle caratteristiche di assorbimento della superficie (Figura 5).

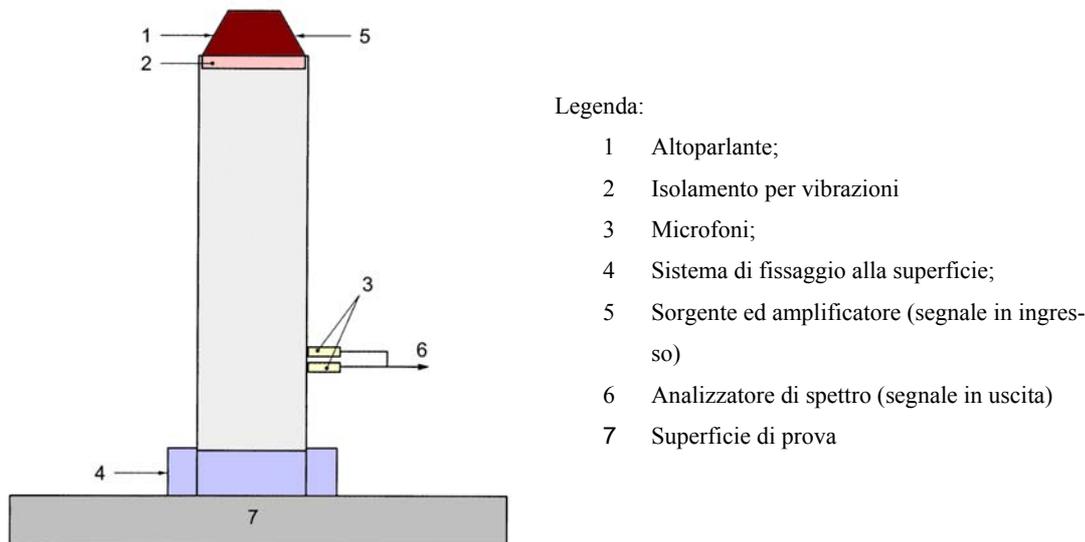


Fig. 5 – Tubo di Kundt portatile: configurazione del sistema di misura.

Criticità del metodo

Come la tecnica ADRIENNE anche quest'ultimo metodo trova applicazione in situ e pertanto dovrebbe fornire risultati confrontabili nelle bande di terzi d'ottava comprese tra 315 e 1600 Hz. In realtà i rispettivi campi di applicazione e la conseguente accuratezza sono molto differenti. Il metodo ADRIENNE ha un'accuratezza limitata a valori molto bassi di assorbimento acustico (di fatto inutilizzabile per pavimentazioni chiuse o comunque non assorbenti, come le pavimentazioni ISO 10844); viceversa, la presente metodica è inaccurata se applicata a pavimentazioni caratterizzate da un alto coefficiente di assorbimento. Essa è anche applicabile su superfici diverse dalle pavimentazioni stradali. L'unico grosso limite è che fornisce informazioni su porzioni molto ridotte di superficie (qualche dm^2), per cui occorrono numerose misure per avere informazioni spazialmente significative di lunghe estese stradali.

Infine, occorre evidenziare che il sistema di misura necessita di un accurato montaggio a terra per mantenere la tenuta dell'aria ed impedire perdite laterali di energia, che il sistema assimila alle componenti assorbite dallo strato di pavimentazione intercettato, dando luogo ad un incremento del coefficiente di assorbimento misurato rispetto a quello effettivo.

3. Altri metodi sperimentali

Sono riportati un insieme di metodi in fase di sperimentazione che rappresentano l'attuale orientamento della ricerca scientifica in questo settore. Alcuni di essi costituiscono un'evoluzione dei metodi sopra descritti nel tentativo di ridimensionare quelle criticità che ne limitano l'applicazione.

3.1 Pass-by - backing board method (SPB - BB)

In particolari siti, come per esempio nelle aree urbane, la vicinanza di edifici al tratto

di strada da caratterizzare può indurre a ritenere il sito non idoneo all'applicazione del metodo SPB.

Per aggirare tale problema è stata introdotta nel progetto europeo SILENCE la sperimentazione di una variante al metodo che prevede l'uso di uno schermo (*backing board*) per controllare le riflessioni generate dalle superfici retrostanti il microfono (SPB-BB).

La *backing board* [15,16] (Figura 6) è un pannello che emula l'effetto di una superficie infinitamente rigida e perfettamente riflettente, sul quale è apposto, in posizione opportuna, il microfono. La riflessione su tale superficie dovrebbe raddoppiare la pressione sonora misurata, comportando una variazione di livello (ΔL) di circa +6 dB rispetto a quello rilevabile in campo libero. Tuttavia il pannello, avendo dimensioni finite introduce effetti di diffrazione ai bordi, che inducono delle variazioni sul valore effettivo dell'incremento atteso. Per questo motivo la posizione del microfono sul pannello è determinante, come specificato nel lavoro di Fegeant [15].



Fig.6 - Applicazione del metodo SPB con Backing Board..

Le criticità caratteristiche di questo metodo sono rappresentate dalla posizione del microfono sulla piastra (che non deve discostarsi da quanto previsto in [15]), dalla sua distanza dalla sorgente stradale (che deve essere mantenuta pari a 7.5 m) e dall'intervallo di velocità valido dei veicoli (i maggiori scostamenti sono stati osservati per transiti a bassa velocità). Nell'ambito delle condizioni di validità del metodo è possibile riprodurre l'incremento teorico dei livelli entro valori di incertezza compresi tra ± 1 dB.

Per quanto concerne invece l'analisi spettrale è stato notato che il metodo SPB-BB non presenta un ΔL costante in tutte le bande di frequenza e la non chiara concordanza con il metodo SPB evidenzia la necessità di ulteriori verifiche per definirne meglio i limiti di applicabilità.

In conclusione, il metodo descritto sembra essere promettente per risolvere almeno in parte il problema delle riflessioni e ampliare la gamma di strade che possono essere classificate, ma richiede ulteriori approfondimenti sul fronte dell'analisi spettrale.

3.2 Sonde PU

Le sonde PU sono dispositivi costituiti da una coppia di sensori (pressione-velocità)

che rilevano la velocità di flusso dell'aria, consentendo in questo modo di determinare il coefficiente di assorbimento di materiali e strutture con elevata risoluzione spaziale. Dalla misura della pressione acustica e della velocità dell'aria si determina l'impedenza superficiale del materiale, da cui possono essere derivati il coefficiente di riflessione e di assorbimento acustico [17].

Nel caso delle pavimentazioni stradali sono in corso sperimentazioni per verificare la possibilità di eseguire la misura del fono-assorbimento in maniera dinamica, installando su un veicolo la sonda PU, opportunamente schermata e ammortizzata per ridurre l'influenza del vento e l'effetto delle vibrazioni (Figura 7). In [18] è riportato il confronto dei risultati conseguiti con i due sistemi, statico e dinamico, a diverse velocità di prova (da 30 km/h a 80 km/h).



Fig.7 - Sistema impiegato per la misura dinamica del coefficiente di assorbimento delle pavimentazioni mediante sonda combinata PU.

Occorre sottolineare che su superfici altamente riflettenti, dove la velocità dell'aria è prossima a 0, il metodo non è applicabile a causa delle limitazioni insite nella sensibilità del sensore di velocità (≥ 10 nm/s).

4. Conclusioni

Il concetto di non distruttività e non invasività alla base di molti metodi di prova, ampiamente utilizzati in diversi settori applicativi, assume delle connotazioni specifiche quando si parla di caratterizzazione delle pavimentazioni stradali.

In relazione a questo aspetto, i metodi di laboratorio prevedono il prelievo di campioni, mentre i metodi di misura *in situ*, pur non essendo distruttivi, sono da considerarsi comunque invasivi, poiché richiedono che siano verificate una serie di condizioni al contorno che ne limitano l'applicabilità.

Emergono evidentemente diverse esigenze da soddisfare: la garanzia di ottenere risultati attendibili può richiedere che sia contenuta la presenza di sorgenti sonore spurie e di elementi riflettenti che possono inficiare le misure; allo stesso modo, la misura può esigere la chiusura parziale o totale del tratto esaminato al traffico, e/o la riduzione della durata della prova per assicurare agli operatori i necessari requisiti di sicurezza durante le fasi di misura.

Il soddisfacimento di tali esigenze costituisce lo stimolo per giungere a soluzioni innovative, sviluppare nuovi metodi e dispositivi più flessibili. Nell'ambito della panoramica dei metodi presentati è importante sottolineare gli indirizzi verso cui l'attività di ricerca e sviluppo si sta muovendo. Indubbiamente un primo dato da osservare è quello

di una maggiore attenzione al contributo dell'elemento *pavimentazione* rispetto al sito nel suo complesso, attenzione che ha permesso lo sviluppo di materiali innovativi, come le usure poroelastiche. In questa ottica si può parimenti inquadrare la tendenza a sviluppare metodi di misura puntuali che offrano risoluzioni spaziali sempre più elevate in tempi rapidi, o il tentativo di implementare sistemi dinamici per la misura *in alto rendimento* delle prestazioni acustiche, evitando le problematiche connesse con la gestione e limitazione del traffico nella tratta di prova durante la misura.

Questa memoria è un breve estratto del quaderno elaborato dal Comitato Tecnico AIPCR D2b [19], dedicato al tema dell'attenuazione del rumore stradale, nel quale sono state raccolte le informazioni e le esperienze maturate negli ultimi anni sulle tipologie di intervento alla sorgente. Nel quaderno è stata posta particolare attenzione alle tecniche di mitigazione sonora basate sull'utilizzo di pavimentazioni antirumore e alla loro caratterizzazione acustica. Il quaderno è accessibile sul web all'indirizzo www.aipcr.it.

5. Bibliografia

- [1] Decreto del Ministero dell'Ambiente del 29 novembre 2000, Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, Serie generale N. 285, 6/12/2000.
- [2] UNI EN ISO 11819-1:2004, *Acustica - Misurazione dell'influenza delle superfici stradali sul rumore da traffico- Metodo statistico applicato al traffico passante.*
- [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 11819-2:2011, *Acoustics - Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise - Part 2: The close-proximity method.*
- [5] UNI EN ISO 10534:2001, *Acustica - Determinazione del coefficiente di assorbimento acustico e dell'impedenza acustica in tubi di impedenza – Parte 1: Metodo con le onde stazionarie; Parte 2: Metodo della funzione di trasferimento.*
- [6] ISO 13472-2:2010 *Acoustics – Measurement of sound absorption properties of road surfaces in situ – Spot method for reflective surfaces.*
- [7] C. Padmos, P.A. Morgan, P. Abbott, G. van Blokland, M. S. Roovers, W. Bartolomaeus, F. Anfosso-Lédée; *Classification Scheme and COP method*; Progetto EU SILVIA; Deliverable Document n. SILVIA-DWW-025-14-WP2-141005; 14 Ottobre 2005.
- [8] H. Jonasson, *Test method for the whole vehicle; Progetto Europeo HARMONOISE*; Technical report HAR11TR-020301-SP10; 17dicembre 2004.
- [9] M.S. Roovers, H.M. Peeters; *CPX-SPB/CPB Relation*; Progetto EU SILVIA; Technical report SILVIA-M+P-008-00-WP2-08/09/04; 08/09/04.
- [10] G. Licitra, M. Losa, L. Alfinito, M. Cerchiai, *Correlation factors between statistical pass-by and close-proximity noise level on italian roads*, in Atti del XIX International Congress on Acoustics (ICA), Madrid, Spagna, 2-7 settembre 2007.
- [11] 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.
- [12] P. Morgan, U. Sandberg, G. van Blokland, *The selection of new reference test tyres for use with the CPX method, to be specified in ISO/TS 11819-3*, in Atti di InterNoise 2009, Ottawa, Canada, 23-26 agosto 2009.
- [13] F. de Roo, J. Telman, G. van Blokland, H. van Leeuwen, J. Reubsæet, W.J. van Vliet, *Uncertainty of Close Proximity (CPX) tyre-road noise measurements – Round Robin test results*, in Atti di NAG/DAGA 2009 International Conference on Acoustics, Rotterdam, Paesi Bassi, 23-26 marzo 2009.

- [14] A. F. Seybert, F. Martinus, *Measurement of pavement absorption of pass-by tracks based on ISO 13472-2*, Atti di Internoise 2009 - Innovations in practical noise control; Ottawa, Canada; 23-26 agosto 2009.
- [15] O. Fégeant; *On the Use of a Vertical Microphone Board to Improve Low Signal-to-Noise Ratios During Outdoor Measurements*; Applied Acoustics; Vol. 53, No. 4, pp. 293-312, 1998.
- [16] L. Goubert; *About the development of the backing board method for the evaluation of the noisiness of road surfaces*; Atti di Internoise 2006; Hawaii, USA; 2006.
- [17] E. Brandao; *PU probe based in situ impedance measurements of a slotted panel absorber*; Atti di ICSV 16; Cracovia, Polonia; 5-9 Luglio 2009.
- [18] E. Tijs, H.E. de Bree; *An in situ method to measure the acoustic absorption of roads whilst driving*; Atti di NAG/DAGA 2009 International Conference on Acoustics; Rotterdam, Paesi Bassi; 23-26 Marzo 2009.
- [19] P. Bellucci, G. Brambilla, P. Calicchia, M. Cerchiali, A. Giovannetti, R. Grecco, G. Licitra, M. Losa, M. Luminari, Comitato Tecnico D2b – Pavimentazioni flessibili e semirigide, *Attenuazione del rumore stradale – Interventi di mitigazione sonora alla sorgente*, Quaderni AIPCR, ISBN 978-88-905397-9-4, Roma, 2010.