

MISURE IN OPERA DELL'INDICE DI RIDUZIONE DEL RUMORE DA TRAFFICO FERROVIARIO: PRIMI RISULTATI SPERIMENTALI

Gino Moncada Lo Giudice¹, Cinzia Buratti², Irene Costarelli², Elisa Moretti²

¹CIRIAF, Università degli Studi di Roma "La Sapienza", Dipartimento di Fisica Tecnica.

²CIRIAF, Università degli Studi di Perugia, Dipartimento di Ingegneria Industriale, Sezione di Fisica Tecnica.

SOMMARIO

Il rumore da traffico ferroviario rappresenta una delle principali cause di superamento dei limiti in prossimità delle infrastrutture di trasporto. Il lavoro rappresenta lo sviluppo di una ricerca volta a determinare l'efficacia acustica di alcuni controsoffitti fonoassorbenti installati in un ambiente confinato con una finestra aperta che si affaccia su una sorgente di rumore da traffico ferroviario. Si sono effettuate misure di riduzione del rumore da traffico ferroviario in opera presso un locale della ex stazione ferroviaria di Ospedalicchio (Perugia), situato in prossimità della sede ferroviaria e dotato di una finestra che affaccia direttamente sui binari. L'abbattimento di livello dovuto alla presenza del controsoffitto è stato misurato per due pannelli, uno in fibra minerale e l'altro in lana di roccia, in corrispondenza del passaggio di 5 differenti treni. Gli abbattimenti globali misurati in opera, pari a 3,8 dB(A) e 1,8 dB(A), si sono rivelati inferiori a quelli ottenuti in precedenza in laboratorio, soprattutto per il secondo pannello. Ai risultati sperimentali si è affiancata una trattazione teorica del problema: i valori teorici ottenuti sono risultati superiori a quelli sperimentali mediamente di 1,5 dB(A), valore prossimo a quello ricavato dalle misure di laboratorio, pari a 1,7 dB(A). I risultati ottenuti non possono essere considerati completamente esaurienti delle proprietà acustiche in opera dei pannelli fonoassorbenti testati, ma hanno permesso di mettere a punto una metodologia da affinare ulteriormente, mediante misure in prossimità di un'infrastruttura stradale.

1. INTRODUZIONE

La protezione dal rumore, specialmente quando si devono adottare soluzioni volte al miglioramento di situazioni già esistenti, come in prossimità di grandi infrastrutture di comunicazione, spesso risulta difficile o addirittura inattuabile mediante interventi diretti sulla sorgente; diventa quindi inevitabile agire in corrispondenza del ricevitore. In questo ambito si inserisce lo studio effettuato, finalizzato alla valutazione sperimentale e teorica dell'efficacia acustica di controsoffitti in materiale fonoassorbente installati in un ambiente confinato, con una finestra aperta, che si affaccia su una sorgente di rumore da traffico stradale o ferroviario. Infatti quando la sorgente (ad es. traffico stradale o ferroviario) si trova in basso rispetto all'apertura, situazione piuttosto frequente, le onde dirette colpiscono principalmente il soffitto del locale; l'impiego di materiali fonoassorbenti applicati ad esso può offrire una significativa attenuazione in primo luogo nel campo diretto, nel percorso tra la sorgente ed il ricevente, poi anche nel campo riverberato.

Il lavoro presenta i risultati di una campagna di misure in opera effettuate presso un'infrastruttura ferroviaria; lo studio rappresenta la prosecuzione di una ricerca nella quale si sono misurate le proprietà di abbattimento del rumore di alcune tipologie di pannelli, effettuata presso il Laboratorio di Acustica della Facoltà di Ingegneria di Perugia, dove si è valutato l'effetto su spettri di rumore da traffico stradale e ferroviario [1, 2]. In laboratorio sono stati sottoposti a sperimentazione otto pannelli fonoassorbenti, aventi caratteristiche acustiche diverse tra loro; i risultati hanno permesso di determinare le prestazioni acustiche, sperimentali e teoriche, dei pannelli, valutate in termini di abbattimento acustico, attraverso opportuni indici di riduzione del rumore. Per le misure in opera sono stati impiegate solo due delle

tipologie di pannelli fonoassorbenti trattati in laboratorio, ritenute più significative in termini di abbattimento del rumore ferroviario. Per i rilevamenti in opera si è messa a punto una apposita metodologia di misura per determinare gli abbattimenti dovuti ai pannelli fonoassorbenti. I risultati ottenuti hanno consentito di calcolare i valori dell'indice sperimentale di riduzione del rumore, che sono stati confrontati con quelli ottenuti in laboratorio.

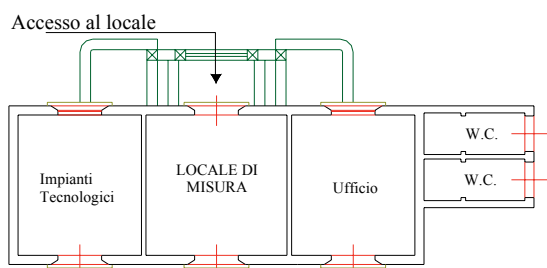
Alla trattazione sperimentale ne è stata affiancata una teorica, basata su un modello elaborato presso il Laboratorio di Acustica della Facoltà di Ingegneria di Perugia, al fine di valutare l'efficacia di un controsoffitto fonoassorbente a prescindere dalle osservazioni sperimentali. Infine, per validare il modello teorico elaborato, i valori dell'indice sperimentale di riduzione del rumore per i diversi controsoffitti sono stati comparati con i risultati del calcolo dell'indice teorico.

2. AMBIENTE DI PROVA E PANNELLI TESTATI

2.1 Messa a punto dell'ambiente di prova

La struttura individuata per la misura in opera dell'abbattimento acustico dei pannelli è la vecchia stazione di Ospedalicchio (comune di Bastia Umbra, provincia di Perugia), non più operativa da alcuni anni. Essa si trova lungo la linea ferroviaria Foligno – Terontola; il tratto ferroviario è rettilineo e, secondo i dati acquisiti presso la sezione del Trasporto Regionale della Stazione Ferroviaria di Foligno, la velocità di percorrenza nel tratto esaminato è fissata per qualsiasi treno a 120 km/h; la rotaia è saldata continua, la sede ferroviaria è leggermente pendente verso Foligno ed è a binario singolo.

La struttura, di proprietà della Rete Ferroviaria Italiana (RFI), è disposta parallelamente alla linea ferroviaria ed è costituita da tre locali principali, a piano terra, separati tra loro da due muri divisorii interni; le misure sono state effettuate nel locale centrale della struttura. La pianta dell'intera stazione, con l'indicazione dell'accesso al locale e la sua posizione rispetto alla ferrovia, è riportata in figura 1. Il locale presenta un volume pari a $60,3 \text{ m}^3$ ed è distante 3 metri dal binario. Le aperture sull'esterno sono due porte - finestre in corrispondenza della parte centrale dei due lati del locale paralleli al binario, dotate solamente di telaio esterno in alluminio (larghezza 1,35 m, altezza 2,40 m).



Terontola

Foligno

Figura 1 - Pianta della stazione di Ospedalichio

Prima di poter procedere alle misure di rumore è stato necessario adeguare il locale: è stato installato un telaio in acciaio zincato per realizzare un controsoffitto su cui disporre i pannelli fonoassorbenti; inoltre, in corrispondenza delle due porte - finestre sono stati sistemati dei pannelli in cartongesso con parti rimovibili: nella porta - finestra che si affaccia sui binari la parte rimovibile è quella superiore, così da poter simulare la presenza di una finestra aperta; il pannello rimovibile è stato installato ad una quota da terra pari a 0,80 m ed ha un'altezza di 1,20 m. In corrispondenza invece della porta - finestra che consente l'accesso al locale, la parte rimovibile del pannello è quella inferiore, in maniera da permettere l'ingresso nel locale. Le parti fisse dei pannelli sono state realizzate con un doppio pannello in cartongesso con lana di roccia nell'intercapedine, di spessore totale pari a circa 10 cm.

Il montaggio dei pannelli in cartongesso è stato indispensabile per potere procedere con le misure: il locale deve essere infatti totalmente chiuso durante le misure del tempo di riverberazione; invece, durante l'acquisizione del rumore prodotto dal passaggio del treno all'interno del locale, dal lato binario è stata rimossa la parte superiore del pannello per simulare la condizione di finestra aperta.

2.2 Descrizione dei pannelli esaminati

Il primo tipo di pannello fonoassorbente è il modello OPTIMA 2000M4/16 della serie ARMSTRONG, di dimensioni $600 \times 600 \times 25 \text{ mm}$, con massa per unità di superficie pari a $2,45 \text{ kg/m}^2$ (fig. 2.a); è in fibra minerale con prestazioni elevate in termini di assorbimento acustico alle medie - alte frequenze.

Il secondo tipo di pannello fonoassorbente è il modello TERVOLFON 40 della serie ARMSTRONG, di dimensioni $600 \times 1200 \times 40 \text{ mm}$ e massa superficiale pari a $3,5 \text{ kg/m}^2$ (fig.

2.b); è un pannello termoacustico in lana di roccia idrorepellente e biosolubile TERVOL, con superficie a vista in tessuto minerale verniciato di colore bianco e con superficie non in vista in tessuto in velo di vetro bianco naturale.

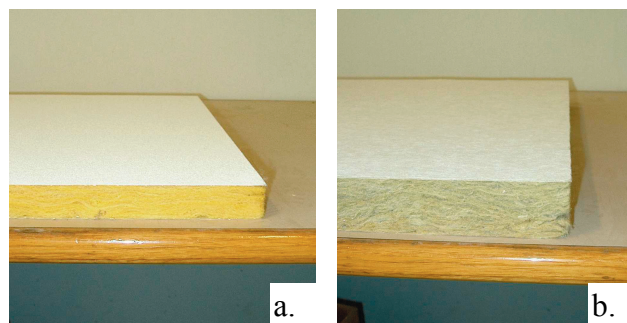


Figura 2- Pannelli testati: Optima (a) e Tervolfon (b)

3. CAMPAGNA SPERIMENTALE

3.1 Generalità

Per determinare gli abbattimenti acustici dei pannelli fonoassorbenti, si sono effettuate misure del livello di rumore prodotto dal passaggio di un treno: per uno stesso treno i rilevamenti sono stati ripetuti, in giorni diversi, per le tre condizioni di locale vuoto, locale con il primo tipo di pannelli e locale con il secondo tipo di pannelli fonoassorbenti installati sul soffitto. Una delle principali difficoltà che si sono presentate è stata quella di individuare un metodo di rilevamento di rumore che, oltre ad essere rispettoso delle normative in materia, potesse permettere di realizzare condizioni di misura riproducibili. Tutte le misure, sia quelle realizzate in laboratorio che quelle in opera, sono caratterizzate da una certa casualità, poiché più fattori non controllabili possono incidere sul risultato finale. Però, le misure eseguite in opera, a finestra aperta e quindi a diretto contatto con l'ambiente esterno, sono presumibilmente caratterizzate da una minore ripetibilità rispetto a quelle di laboratorio. Tuttavia si è cercato di condurre ogni singola fase di misura nelle condizioni più simili a quelle delle fasi precedenti, in modo da limitare le differenze: ad esempio, tutti i rilevamenti sono stati effettuati nel periodo estivo, per poter avere almeno analoghe condizioni climatiche.

3.2 Strumentazione di misura

Per l'effettuazione delle misure sono stati impiegati un fonometro modello Solo e un sistema di acquisizione Symphonie della 01 dB. Per l'acquisizione e la rielaborazione dei dati sono stati impiegati i software dBTRAIT32 per le misure fonometriche, dBFA32 e dBATI32 per il sistema Symphonie [2].

3.3 Metodologia di misura

Durante i rilevamenti, la porta - finestra d'accesso al locale è stata completamente chiusa attraverso l'applicazione del relativo pannello rimovibile; viceversa, è stato tolto il pannello rimovibile in cartongesso della porta - finestra che si affaccia sui binari, così da poter simulare una finestra aperta, che ha dunque costituito l'unica apertura del locale sull'esterno.

Per ogni misura sono stati utilizzati contemporaneamente due microfoni, uno collegato al Symphonie e l'altro collegato al fonometro. Il microfono collegato al Symphonie è stato posizionato al centro del locale (p1, fig. 3.b), a circa due metri da ogni parete e ad una altezza di 1,5 metri da terra, per misurare il livello interno. Al fine di valutare lo spettro incidente, il microfono collegato al fonometro, dotato di cuffia antivento, è stato posizionato esternamente al locale (p2, fig. 3.a), ad una distanza di 1,5 metri dalla finestra, centralmente rispetto ad essa e ad una altezza da terra di circa 1,70 m. Entrambi i microfoni sono stati sempre rivolti verso la sorgente di rumore.

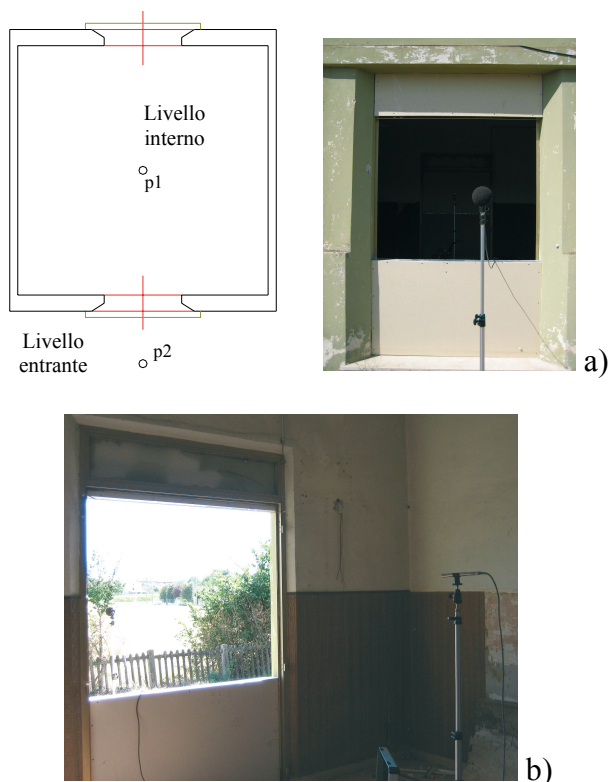


Figura 3 - Posizioni dei microfoni all'esterno (p2, a) ed all'interno (p1, b) del locale

3.4 Misure effettuate

Per differenziare le condizioni di misura e per ottenere più risultati da poter confrontare tra loro, sono stati scelti 5 treni differenti, riportati in Tabella 1, caratterizzati da un diverso numero di carrozze e da una diversa tipologia di trazione.

Tabella 1 - Caratteristiche dei treni selezionati per i rilievi

Num.	Tipo	Num. e caratteristiche carrozze	Ora di transito	Direzione
1	Regionale 3153	8 vetture + Locomotore E-464	10.35	Foligno
2	Interregionale 2480	8 vetture + Locomotore E-464	10.45	Terontola
3	Eurostar 9340	9 vetture ETR 450	15.45	Terontola
4	FCU 21633	2 Automotrici diesel	16.05	Foligno
5	Regionale 12114	2 Automotrici elettriche 601 + 1 Automotrice 780	16.15	Terontola

4. RISULTATI E CALCOLO DEGLI ABBATTIMENTI

4.1 Definizione delle emissioni sonore dei diversi treni

Per ognuno dei treni è stato rilevato l'andamento del livello di pressione sonora nel tempo: ogni grafico presenta un andamento differente, in funzione della tipologia e del numero di motrici e carrozze; in generale si osserva un aumento del livello sonoro in corrispondenza dell'avvicinamento del treno, il picco o i picchi durante il suo passaggio davanti alla finestra ed infine la classica coda sonora, con il livello di pressione che tende a tornare al valore del rumore di fondo.

Al fine di valutare l'abbattimento dovuto all'installazione dei pannelli fonoassorbenti occorre definire, per ogni treno e per ogni configurazione (assenza di pannelli, primo pannello e secondo pannello), uno spettro incidente nel locale, sulla base dei rilievi fonometrici esterni, e un livello medio interno. In laboratorio lo spettro incidente è stato creato in base alle disposizioni delle normative internazionali in materia, modificando uno spettro reale: successivamente esso è stato riprodotto in maniera stazionaria, per un intervallo temporale definito, attraverso una sorgente sonora omnidirezionale, simulando così la sorgente di rumore reale [1, 2]. Gli spettri riprodotti sono di due tipi: uno a bassa velocità (90 km/h) e l'altro ad alta velocità (140 km/h). Per le misure in opera, invece, lo spettro incidente all'interno del locale è quello relativo al passaggio del treno: non potendo definire esattamente un istante di inizio e uno di fine del passaggio stesso del treno, esso varia secondo l'intervallo temporale considerato al momento della rielaborazione del segnale e ovviamente dipende dal tipo di treno esaminato. Per ricavare uno spettro rappresentativo del treno in esame è stato necessario stabilire un criterio di elaborazione del segnale, differente per ogni tipologia di treno.

Treni 1 (R3153) e 2 (IR2480)

I risultati delle misure mostrano una certa irregolarità dell'andamento dei livelli sonori, non solo nei valori di picco per ogni singola misura, ma anche nell'andamento globale tra le varie misure. Si è quindi preferito non concentrare l'attenzione sul valore del livello medio globale tra due istanti temporali, ma piuttosto ricavare un valore del livello medio scegliendo un certo numero di istanti temporali; il criterio adottato è stato il seguente: è stato scelto un numero di valori che consentisse un confronto tra i picchi più alti del livello sonoro, ma che fosse allo stesso tempo rappresentativo dell'evento. Il numero di valori è stato 350 che, all'incirca, corrisponde a considerare valori fino ad un livello più basso del valore massimo di un 10 – 12%. Il valore finale del livello di pressione sonora è stato ottenuto dalla media energetica dei valori relativi ai 350 istanti temporali selezionati.

Treno 3 (Eurostar)

L'andamento del livello per l'Eurostar è piuttosto regolare: per ogni andamento temporale, è stato selezionato un intervallo specifico, tra due valori del livello acustico che, approssimativamente, si trovano poco al di sotto del primo e dell'ultimo picco, parallelamente ai valori di livello più bassi tra un picco e l'altro. A titolo di esempio in figura 4 è riportato l'andamento temporale del livello di pressione tipico per un treno Eurostar e l'intervallo specifico individuato per il calcolo dello spettro incidente.

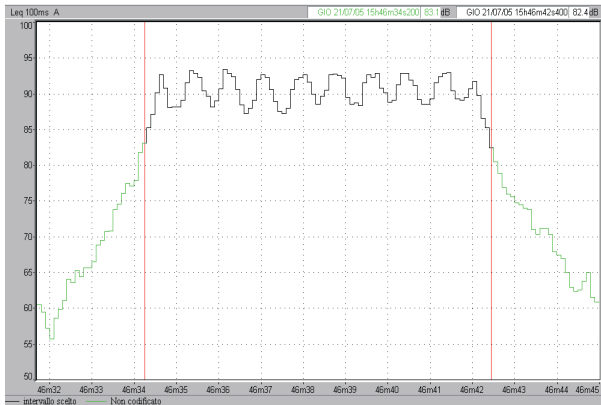


Figura 4 - Tipico andamento del livello esterno per l'Eurostar e intervallo scelto (tra i cursori) per il calcolo dello spettro

Poiché l'andamento del livello è piuttosto regolare, lo spettro incidente medio ricavato per il treno Eurostar è stato confrontato con gli spettri riprodotti in laboratorio (fig. 5). Dal grafico si nota come lo spettro entrante in opera sia molto simile a quello del rumore da traffico ferroviario ad alta velocità; d'altra parte in laboratorio per alta velocità si intendeva un valore di circa 140 km/h, paragonabile a quello in opera, pari a 120 km/h. Inoltre, soprattutto in corrispondenza delle frequenze centrali, i due spettri sono quasi sovrapponibili e questo giustifica ancor più il confronto tra i risultati in opera e quelli relativi alla sperimentazione condotta in laboratorio.

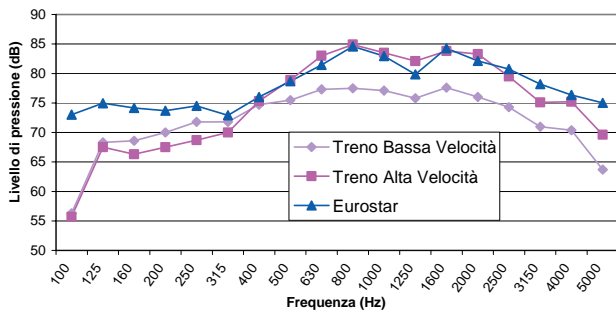


Figura 5 - Confronto tra lo spettro incidente medio per l'Eurostar e gli spettri riprodotti in laboratorio

Treno 4 (FCU)

L'andamento del livello di pressione dei treni FCU è del tutto particolare: data la scarsa lunghezza del treno, il livello sonoro raggiunge un unico valore di picco, presumibilmente in corrispondenza del transito della parte centrale del convoglio di fronte alla finestra. In questo caso si è fatto riferimento ad un unico valore, costituito dal livello di picco raggiunto.

Treno 5 (R12114)

Poiché l'andamento del livello sonoro presenta un duplice picco, si è deciso di adottare un metodo simile a quello dei primi due treni: si è scelto calcolare il livello medio di 100 valori; il numero dei valori è più basso rispetto a quello dei primi due treni per il semplice fatto che la lunghezza del treno è minore, quindi il tempo di transito del treno è più breve.

Infine, un metodo per il calcolo del livello di pressione sonora entrante e del livello di pressione sonora all'interno del locale che è stato adottato indifferentemente per tutti i treni, è quello relativo alla determinazione del SEL, come previsto dalla normativa [3].

4.2 Calcolo degli abbattimenti

Le elaborazioni effettuate secondo i criteri esposti hanno consentito di ricavare, per ogni treno e per ogni condizione del locale, i valori del livello sonoro entrante e del livello sonoro interno. Per il calcolo degli abbattimenti prodotti dai pannelli fonoassorbenti installati sul soffitto sono stati proposti differenti metodi:

- 1) Calcolo dell'abbattimento ΔL come variazione della differenza di livello esterno - interno in assenza e in presenza del controsoffitto, per ogni treno:

$$\Delta L = (L_{est} - L_{int})_i - (L_{est} - L_{int})_o \quad (1)$$

dove:

- o = assenza di controsoffitto;
- i = 1 controsoffitto con pannello 1;
- i = 2 controsoffitto con pannello 2;

- 2) Calcolo dell'abbattimento ΔL come variazione della media della differenza di livello esterno - interno in assenza e in presenza del controsoffitto ottenuta con i diversi treni:

$$\Delta L = \overline{(L_{est} - L_{int})_i} - \overline{(L_{est} - L_{int})_o} \quad (2)$$

— valori mediati su 5 treni;

- 3) Calcolo dell'abbattimento ΔL come nel metodo 2), considerando i SEL anziché i livelli:

$$\Delta L = \overline{(SEL_{est} - SEL_{int})_i} - \overline{(SEL_{est} - SEL_{int})_o} \quad (3)$$

- 4) Calcolo dell'abbattimento ΔL come variazione della differenza di livello esterno - interno in assenza e in presenza del controsoffitto per il solo treno Eurostar, l'unico che presenta una certa regolarità nell'andamento del livello sonoro:

$$\Delta L = (L_{est} - L_{int})_{iE} - (L_{est} - L_{int})_{oE} \quad (4)$$

E= Eurostar.

I risultati ottenuti con il metodo 1) (tab. 2) mostrano la presenza di valori di abbattimento negativo (treno IR, pannello 1), valore teoricamente errato: non è stato quindi possibile procedere alla media dei valori per ottenere un unico valore dell'abbattimento. I risultati ottenuti con i metodi 2) e 3) sono praticamente identici (tab. 2).

Tabella 2 - Abbattimenti (ΔL) in dB(A) calcolati secondo i quattro metodi ipotizzati

Metodo	ΔL	
	Pannello 1	Pannello 2
1)	Treno 1	1,3
	Treno 2	-0,3
	Treno 3	3,8
	Treno 4	7,6
	Treno 5	6,3
2)	3,7	3,1
3)	3,8	3,1
4)	3,8	1,8

Tuttavia, solamente per l'Eurostar si è potuto effettuare il calcolo dei livelli globali considerando un intervallo temporale che fosse rappresentativo dell'evento; per gli altri treni, invece, si è stati costretti a ragionare su un numero di livelli che, per quanto comprensivi dell'evento, non hanno mai dato una totale informazione sull'intero transito del treno. Queste valutazioni hanno portato ad escludere l'adozione del metodo 2), poiché in qualche modo va a mediare dei valori di fenomeni acustici abbastanza differenti tra loro. L'impiego del metodo 3) può essere visto come una conferma dei risultati ottenuti con il metodo 2). I valori degli abbattimenti sono stati quindi ricavati con il metodo 4) e sono relativi al solo Eurostar: essi sono riportati in tabella 3, a confronto con quelli ricavati in laboratorio.

Tabella 3 - Confronto degli abbattimenti, in dB(A), prodotti dai due pannelli in laboratorio e in opera

	Pannello 1	Pannello 2
Laboratorio (bassa velocità)	5,7	5,0
Laboratorio (alta velocità)	6,0	5,2
In opera	3,8	1,8

Gli abbattimenti prodotti dai due pannelli in opera risultano piuttosto inferiori a quelli prodotti in laboratorio: le prestazioni del primo pannello sono ancora accettabili, mentre quelle del secondo subiscono una netta riduzione. La diminuzione dei valori è principalmente dovuta alle differenti condizioni di misura in opera rispetto a quelle di laboratorio:

- l'ambiente ricevente, ovvero la camera riverberante in laboratorio e il locale della stazione in opera: al di là delle caratteristiche geometriche, abbastanza simili, le condizioni ambientali durante il rilievo sono state sicuramente più stazionarie per le camere riverberanti in laboratorio, non soggette a variazioni climatiche;
- le vibrazioni trasmesse durante il transito dei treni dai binari fino all'interno del locale, che hanno costituito una componente di rumore non trascurabile durante le misure in opera;
- l'ambiente da cui il rumore ferroviario proviene, costituito dall'ambiente esterno in opera, dalla camera emittente in laboratorio, caratterizzata dalla presenza di un campo riverberato più accentuato e quindi da un campo sonoro più diffuso.

4.3 Calcolo dell'indice sperimentale di riduzione del rumore $NRI(e)$

Per attribuire ai pannelli esaminati un indice a unico numero, è stato introdotto il parametro $NRI(e)$, *indice sperimentale di riduzione del rumore*, definito come la media aritmetica degli abbattimenti di livello di pressione sonora alle frequenze di 250, 500, 1000 e 2000 Hz, analogamente a quanto fatto per le prove di laboratorio [1, 2]:

$$NRI(e) = (\Delta L(e)_{250} + \Delta L(e)_{500} + \Delta L(e)_{1000} + \Delta L(e)_{2000}) / 4 \quad (5)$$

Sulla base degli spettri determinati per il solo treno Eurostar, secondo le modalità riportate al paragrafo 4.1, sono stati calcolati gli indici sperimentali di riduzione del rumore pari a 3,6 dB per il primo pannello e 2,1 dB per il secondo: i valori ottenuti sono coerenti con i valori globali degli abbattimenti, pari rispettivamente a 3,8 e 1,8 dB(A).

5. APPLICAZIONE DEL MODELLO TEORICO E CONFRONTO CON I RISULTATI SPERIMENTALI

Ai risultati sperimentali è stata affiancata una trattazione teorica del problema: al fine di valutare analiticamente l'efficacia di un controsoffitto in materiale fonoassorbente nella riduzione del rumore prodotto dalle infrastrutture di trasporto, è stato infatti elaborato un modello teorico che permette di esprimere il comportamento di un controsoffitto, noti lo spettro incidente e il coefficiente di assorbimento del materiale fonoassorbente. Il modello è stato già impiegato per la valutazione delle prestazioni dei pannelli testati in Laboratorio [1, 2].

Sulla base del modello elaborato, il livello di pressione teorico L_f del locale dopo l'installazione dei pannelli può essere ottenuto dalla relazione:

$$L_f = L_0 - 10 \log_{10} \left(1 + \frac{A_{fc}}{A_0} - \frac{A_{0c}}{A_0} \right) \quad (6)$$

dove:

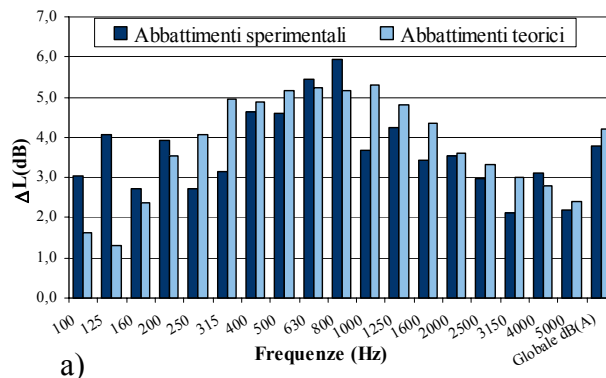
A_0 = assorbimento totale del locale vuoto;

A_{fc} = contributo del campione alle unità assorbenti, pari al prodotto tra la superficie del campione S_{campione} e α_s , il coefficiente di assorbimento dei pannelli;

$A_{0c} = \alpha_s \times S_{\text{campione}}$, contributo del soffitto alle unità assorbenti, dove α_s è il coefficiente di assorbimento del soffitto.

L_0 rappresenta lo spettro di rumore incidente, cioè lo spettro determinato nella condizione di locale senza controsoffitto.

Per la stima di A_0 è stata impiegata la relazione di Sabine, che consente di calcolare l'assorbimento dal tempo di riverberazione dell'ambiente. Il tempo di riverberazione del locale è stato misurato in accordo con la norma UNI EN ISO 3382, impiegando la tecnica ad impulsi. Per la valutazione delle unità assorbenti del controsoffitto con i due pannelli sono stati presi i valori dei coefficienti di assorbimento α_s determinati sperimentalmente in laboratorio all'interno della camera riverberante, in accordo con la normativa ISO 354 [1, 2]. Gli abbattimenti teorici per i due pannelli possono essere così calcolati sottraendo il valore del livello teorico a quello incidente. I risultati sono mostrati, a confronto con quelli sperimentali, nella figura 6.



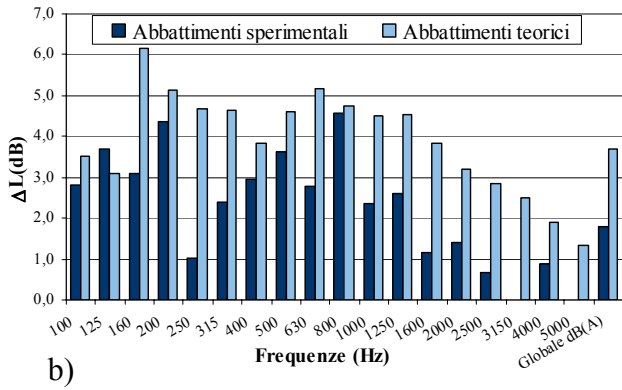


Figura 6 - Abbattimenti globali teorici e sperimentali per il pannello 1 (a) e per il pannello 2 (b)

I valori degli abbattimenti teorici sono superiori a quelli sperimentali: il modello teorico fornisce quindi una sovrastima delle prestazioni acustiche dei pannelli.

Per quantificare in maniera sintetica i risultati teorici e per un confronto più diretto con i risultati sperimentali, è stato calcolato un parametro analogo all'NRI sperimentale, ovvero l'NRI(t) (tab. 4), detto *indice teorico di riduzione del rumore*, così definito [1, 2]:

$$NRI(t) = (\Delta L(t)_{250} + \Delta L(t)_{500} + \Delta L(t)_{1000} + \Delta L(t)_{2000}) / 4 \quad (7)$$

Al fine di fornire una stima dell'accuratezza del modello teorico, è stato infine introdotto il parametro ETD:

$$ETD = NRI(e) - NRI(t) \quad (8)$$

che rappresenta l'errore tra dati sperimentali e dati teorici.

A partire dai valori degli indici di riduzione del rumore, sono stati quindi calcolati i valori di ETD per i due pannelli: l'ETD medio, pari a -1,5 dB(A), nonostante sia limitato a due soli pannelli, è piuttosto simile al valore dell'ETD medio ottenuto dall'applicazione del modello teorico alle misure di laboratorio, pari a -1,7 dB(A) [2].

Tabella 4 - Valori di NRI(t) e ETD per i due pannelli

	Pannello 1	Pannello 2	
NRI(e) dB(A)	3,6	2,1	ETD medio -1,5
NRI(t) dB(A)	4,5	4,2	
ETD dB(A)	-0,9	-2,1	

6. CONCLUSIONI

Il lavoro presenta i primi risultati sperimentali relativi alla valutazione dell'efficacia in opera di pannelli fonoassorbenti installati sul controsoffitto, in termini di riduzione del livello di rumore in un ambiente che si affaccia su un'infrastruttura di trasporto ferroviaria. Le misure sono state effettuate in un locale adiacente ad una linea ferroviaria installando due pannelli fonoassorbenti sul soffitto e considerando il transito di 5 differenti treni. Il problema principale riscontrato durante le misure è stata la loro scarsa ripetibilità, in riferimento alle condizioni di misura, ma soprattutto in relazione alla diversità degli spettri rilevati, per ciascun treno, in giorni diversi:

pertanto le considerazioni tra gli spettri e tra i livelli rilevati all'interno del locale hanno dovuto sempre essere relazionate a quelli rilevati contemporaneamente all'esterno. Per ciascun treno esaminato è stato adottato un metodo specifico per il calcolo del livello sonoro relativo al transito davanti alla finestra: solamente per il treno Eurostar, tuttavia, si è potuto scegliere un metodo in grado di fornire un valore del livello sonoro che fosse pienamente rappresentativo del transito del treno stesso. Per il calcolo degli abbattimenti prodotti da ciascun pannello sono stati proposti più metodi. Sulla base dei risultati si è scelto di considerare attendibili quelli relativi solo ai treni di tipo Eurostar, che presentano caratteristiche di regolarità. Gli abbattimenti globali dei due pannelli in opera così calcolati, pari a 3,8 dB(A) e 1,8 dB(A), si sono rivelati piuttosto inferiori a quelli ottenuti in precedenza da misure di laboratorio, soprattutto per il secondo pannello; ciò è principalmente dovuto alla trasmissione di vibrazioni dall'esterno all'interno, completamente assente in laboratorio.

Come ulteriore analisi è stato applicato un modello teorico, precedentemente elaborato, per valutare l'abbattimento dei pannelli senza ricorrere alle misure. I valori teorici calcolati sono risultati superiori a quelli sperimentali: mediamente l'errore che si commette impiegando i risultati del modello teorico in luogo di osservazioni sperimentali è una sovrastima dell'abbattimento di livello sonoro dell'ordine di 1,5 dB(A), valore prossimo a quello ricavato per le misure di laboratorio, pari a 1,7 dB(A).

I risultati ottenuti hanno confermato la necessità di un'ulteriore verifica, sotto nuove condizioni di misura, delle proprietà acustiche dei pannelli testati, ma hanno permesso di mettere a punto una metodologia di misura da affinare ulteriormente, mediante misure in prossimità di un'infrastruttura stradale.

RINGRAZIAMENTI

Gli autori desiderano ringraziare per la concessione del locale della ex stazione ferroviaria di Ospedalicchio (Perugia) RFI - Rete Ferroviaria Italiana, in particolar modo l'ing. C. Ciarmatori, Direttore Compartimentale Movimento, Ancona, l'ing. T. Salvatori, Direttore Compartimentale Infrastrutture, Ancona, il sig. A. Gentili, Direzione Compartimentale Movimento Ancona - Responsabile Terminali Viaggiatori e Merci, Foligno (PG) e il sig. A. Tacchi, Responsabile Unità Territoriale Infrastruttura, Foligno (PG).

Un doveroso ringraziamento va all'ing. Cristiano Luci per la preziosa collaborazione offerta nell'effettuazione delle misure.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] C. Buratti, *Indoor Noise Reduction Index with open window*, Applied Acoustics, Elsevier, Vol. 63, n. 4, aprile 2002.
- [2] C. Buratti, *Indoor Noise Reduction Index with open window (Part II)*, Applied Acoustics, Elsevier, Vol. 67, n. 5, maggio 2005.
- [3] D.M. Ambiente 16 Marzo 1998, *Tecniche di rilevamento e di misurazione dell'inquinamento acustico*, Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana 1 Aprile 1998, n. 76.
- [4] C. M. Harris, *Handbook of Noise Control*, McGraw - Hill, 1992.