ANALISI SPERIMENTALE DELLE CARATTERISTICHE VIBROACUSTICHE DI ALCUNI PARTICOLARI STRUTTURALI DI UNA LOCOMOTIVA

A. Bracciali, F. Piccioli

Dipartimento di Meccanica e Tecnologie Industriali, Università degli Studi di Firenze
Via Santa Marta, 3 - 50139 Firenze, e-mail: fabio.piccioli@unifi.it

SOMMARIO

Nel presente lavoro viene descritta un'attività sperimentale volta alla determinazione delle caratteristiche vibroacustiche principali di alcuni elementi della cabina di guida della locomotiva E404 del convoglio ETR 500 Politensione, fra i quali il tetto della locomotiva, un pannello laterale ed il pavimento. Il comportamento del pavimento è stato valutato in termini di Transmission Loss, con attenzione particolare alla valutazione del peggioramento delle performance acustiche del pavimento con l'introduzione della botola. Una parte del tetto, costituita da un pannello in acciaio rinforzato con profilati metallici, è stata sottoposta ad una serie di analisi sperimentali piuttosto estensiva alla ricerca dello spessore ottimale di trattamento antirombo. Una serie di prove simile è stata ripetuta anche su una parte della fiancata della locomotiva durante diverse fasi della costruzione.

ABSTRACT

In the paper an experimental activity devoted to the determination of main vibroacoustic properties of some elements of the cockpit of the E404 locomotive (ETR500 multivoltage) is shown, including the roof, a lateral panel and the floor. The Transmission Loss behaviour of the floor has been evaluated with the greatest care as the trapdoor can worsen the acoustical performances of this component. A portion of the roof, made of a steel sheet reinforced with bent steel profiles, has been subjected to a thorough experimental analysis to find out the optimal thickness of damping material. A similar set of tests have been repeated also on a portion of the cockpit flank during different locomotive assembly stages.

1. ANALISI SPERIMENTALE DELLA TL DEL PAVIMENTO DELLA CABINA

1.1 Introduzione

Il presente paragrafo riferisce sulle prove di trasmissione acustica del pavimento della cabina della locomotiva (Figura 1) identificando i range di frequenza nei quali il pavimento è più "permeabile" al rumore. Dato che la botola presente nel pavimento può rappresentare un "ponte acustico" è stato deciso di testare un pavimento cabina in un sol pezzo ed uno con botola il più possibile somigliante al pavimento reale. Le porzioni di pavimento, con dimensioni conformi a quelle della bocca della cabina riverberante presente presso i laboratori del DMTI (1300*730 mm), sono state realizzate dal costruttore secondo le caratteristiche specificate. Sulle varie configurazioni sono state effettuate quindi delle misure volte a determinare la Perdita di Trasmissione (Trasmission Loss - TL).

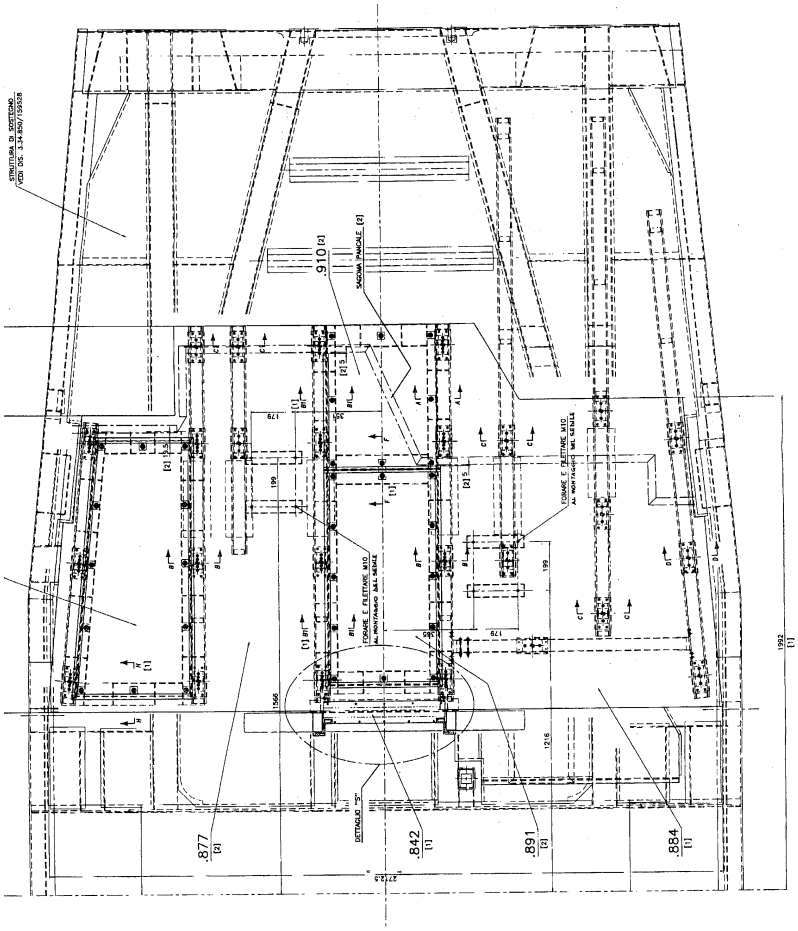

Figura 1. Disegno del pavimento della locomotiva dell'ETR500 Politensione.

1.2. Strumentazione utilizzata

Mediante l'effettuazione di misure in ambienti opportuni (cabina riverberante e camera semianecoica) e con l'uso di strumentazione idonea (sonda intensimetrica) è stata valutata sperimentalmente la trasmissibilità acustica dei pavimenti.

La TL è stata valutata per ogni configurazione misurando la potenza sonora uscente dalla bocca della cabina riverberante situata nei laboratori del DMTI prima e dopo l'applicazione del pannello. La TL è stata in realtà valutata come differenza, in dB, dell'intensità media dato che, avendo i pannelli e la bocca la medesima superficie, è assolutamente identico usare la definizione in termini di potenza od in termini di intensità.

La strumentazione utilizzata comprende una sorgente sonora amplificata, un analizzatore bicanale ed una sonda intensimetrica con relativo alimentatore-amplificatore. La sonda è composta da due microfoni accoppiati frontalmente e separati da un separatore di 12 mm che consente misure valide nel range di frequenza 125 Hz ÷ 4 kHz con buona dinamica. Lo schema della catena di misura è riportato in Figura 2.

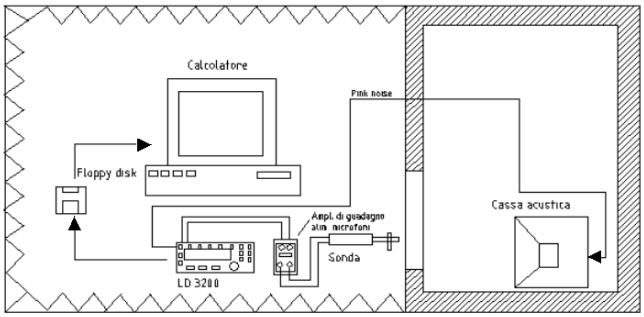

Figura 2. Schema della catena di misura per la valutazione della trasmissione acustica del pavimento della cabina. La camera semianecoica ha un volume di circa 50 m^3; la cabina riverberante di circa 25 m^3.

1.3. Modalità di esecuzione delle prove ed analisi delle misure

Il pavimento è costituito da un telaio (realizzato con una lamiera e rinforzato con due profilati ad omega) sul quale è fissato con viti un pannello di legno multistrato. Il costruttore ha fornito un pavimento completo (telaio più pannello in legno con botola) e un pannello in legno intero (senza botola); quindi, preliminarmente alle misure, è stata effettuata la preparazione del pannello senza botola per essere applicato al telaio. In questa fase sono stati realizzati i fori, opportunamente distanziati, per il fissaggio con viti del pannello al telaio e il taglio dello strato di materiale isolante a dimensioni del telaio sottostante.

La valutazione della TL è stata effettuata posizionando all'interno della cabina riverberante una sorgente di rumore tarata e le varie porzioni di pavimento testate sono state applicate alla bocca della cabina stessa con l'uso di stucco a vetro. Dato che il pavimento completo ha spessore complessivo (220 mm) superiore allo spessore delle pareti della cabina riverberante (85 mm), il pavimento è stato posto "a filo" sulla parete interna mentre la parte fuoriuscente è stata rivestita con lamiere di piombo opportunamente sagomate. Per ogni misura sono state effettuate tre spazzolate complete della superficie del pavimento ad una distanza di circa 5 cm dalla superficie in vista delle omega per un tempo totale di circa 100 s. Questo garantisce una buona stabilità dei risultati ed il fatto che sia stata considerata in ugual modo il contributo alla trasmissione acustica delle varie parti dei pavimenti. L'intensità acustica è stata misurata in bande di 1/3 di ottava nel range 125÷6300 Hz anche se, per quanto sopra detto, l'attendibilità dei risultati è ottimale solo fino a 4 kHz.

Per primo è stato esaminato il pavimento completo con il pannello di legno intero che ha evidenziato, pur al massimo della potenza sonora emessa dalla cassa acustica, una bassissima emissione esterna alla cabina, dello stesso ordine di grandezza di quella che, assai ridotta, attraversa le pareti della cabina stessa. Questo test dimostra quindi che il pavimento completo ha TL elevatissima, non quantificabile con la cabina riverberante a disposizione del DMTI, e comunque superiore a 45÷50 dB anche nelle bande a più bassa frequenza.

L'analisi si è perciò spostata sul solo pannello in legno che, prevedendo una botola, può avere comportamenti anomali o comunque migliorabili. Il pannello è stato quindi provato senza il telaio in acciaio, intero e con botola, e l'inevitabile gioco richiesto per il montaggio della botola è stato riempito con stucco a vetro per cercare di limitare ulteriormente la trasmissione

di rumore. Per verificare l'efficienza acustica dello strato di materiale isolante che riveste inferiormente il pannello in legno sono state realizzate delle misure togliendo tale strato dal solo pannello intero. L'elenco dettagliato delle misure e delle modalità di esecuzione è riportato in tab. 1.

Tab. 1. Lista delle misure per i pavimenti.

bocca aperta	Pan. Legno intero	Pan. legno intero senza isolante	Pan. Legno con botola	Pan. Legno con botola più stucco	Pavimento completo con botola	Pareti cabina riverb.	Rumore di fondo
P46	P47	P53	P49	P51	P63	P65	P62
P55	P48	P54	P50	P52	P64		
P56	P58	P60			P66		
P57	P59	P61			P67		
P70					P68		
					P69		

Non è chiaramente possibile in questa sede mostrare i risultati incrociati delle numerose prove effettuate; per quanto riguarda la presenza della botola sul pavimento e la criticità dell'isolamento del suo contorno si riportano in Figura 3 i diagrammi della TL relativi.

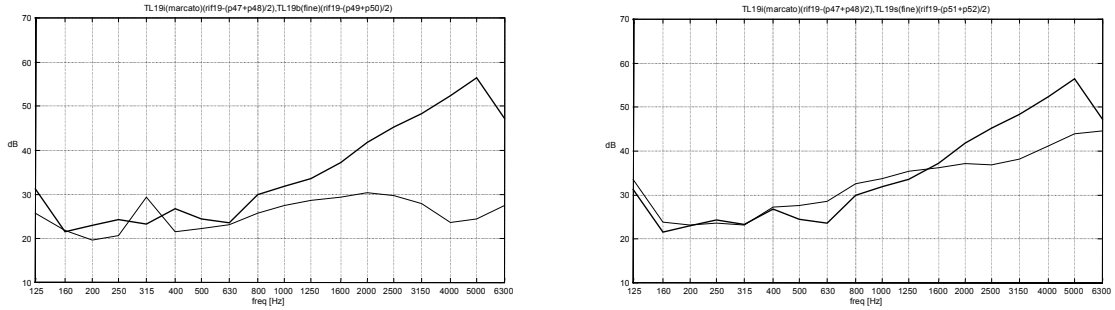

Figura 3. TL del pannello di legno intero con materiale isolante (tratto marcato) e del pannello di legno con botola senza stucco (tratto fine) (a sinistra) e del pannello di legno con botola con stucco (tratto fine) (a destra). La presenza dello stucco fa migliorare nettamente il comportamento del pannello con botola.

1.4. Conclusioni

Le misure ottenute sul pavimento completo non sono molto attendibili in quanto sono stati raggiunti i limiti di misura della cabina riverberante, cioè la TL che si viene a calcolare è quella delle pareti della cabina e non quella del pavimento da testare; perciò l'analisi è stata imperniata sulle misure effettuate sui pannelli in legno con e senza botola (con e senza materiale isolante) potendo tuttavia riscontrare utili indicazioni sul comportamento acustico del pavimento.

Appare evidente dall'osservazione dei risultati ottenuti che la botola presente nel pavimento si comporta da "ponte acustico" riducendo notevolmente la perdita di trasmissione rispetto ad un pannello delle stesse caratteristiche senza botola. Infatti per tutto lo spettro di frequenze, ed in particolare per frequenze superiori a 630 Hz, la botola ha un effetto assai negativo comportando valori di emissione superiori anche di 30 dB rispetto al pannello intero.

Applicando dello stucco a vetro sulla chiusura della botola le cose migliorano notevolmente avvicinandosi al comportamento del pannello intero e anzi, migliorandolo alle basse

frequenze (inferiori a circa 1400 Hz) attestandosi su livelli di TL dell'ordine di 25÷30 dB; alle alte frequenze invece, il pannello intero ha sempre una perdita di trasmissione più elevata.
Per ciò che riguarda il materiale isolante, fissato con arpioni al pannello in legno, la sua presenza dal punto di vista acustico è quasi ininfluente; infatti comporta dei miglioramenti alle alte frequenze (superiori a 1600 Hz) ma ha effetto negativo alle basse frequenze. Sia i miglioramenti che i peggioramenti sono però di modesta entità, dell'ordine di pochissimi dB.

2. ANALISI SPERIMENTALE DELLA TL E DELLA GENERAZIONE DI RUMORE DI UNA PARTE DEL TETTO

2.1. Introduzione

Il presente paragrafo illustra le prove di trasmissibilità acustica della lamiera principale del tetto della locomotiva ("cielino") e le prove per la determinazione della sue caratteristiche vibrazionali al variare dello spessore di materiale antirombo applicato. Questo tipo di indagine è giustificata dal fatto che il cielino è rinforzato ed ha quindi un comportamento acustico e strutturale non riconducibile a quello di una lamiera piana; scopo della presente fase è quindi quello di identificare, mediante una serie limitata di prove, lo spessore ottimale di trattamento smorzante da applicare ai cielini.
Inizialmente vengono illustrati i risultati riguardanti l'analisi vibrazionale di cinque cielini non trattati formalmente identici ("nudi", cioè privi di trattamento) mediante prove comparative effettuate per controllare la ripetibilità tecnologica di produzione; successivamente quattro dei cinque cielini sono stati trattati con spessori di antirombo di 1.5, 3, 4.5 e 6 mm e le prove di mobilità meccanica sono state ripetute al fine di determinare l'influenza del materiale smorzante e, soprattutto, del suo spessore. Infine tutti i cielini sono stati testati per determinare il comportamento di trasmissibilità acustica in maniera analoga a quanto illustrato nel paragrafo precedente.

2.2. Mobilità dei cielini nudi

La mobilità meccanica dei cielini è stata misurata impartendo una forza impulsiva e, contemporaneamente, misurando la risposta in termini di accelerazione in diversi punti della superficie liscia del cielino, ovvero quella opposta alle omega di rinforzo. Questo ha consentito una più facile applicabilità dell'accelerometro e, soprattutto, ha consentito di mantenere tali punti anche dopo l'applicazione dell'antirombo.
L'eccitazione è stata fornita in maniera *roving*, mantenendo l'accelerometro fissato con cianacrilato. Le funzioni di risposta in frequenza (FRF) sono state acquisite, con le debite finestrature, con 1024 linee nel range 0÷1024 Hz (Δf=1Hz), anche se la presenza del filtro anti-aliasing rende i valori affidabili solo fino ad 800 Hz.
Sono stati esaminati cinque cielini privi di trattamento delle dimensioni della bocca delle cabina riverberante; la posizione dei punti misurati e l'origine degli assi sono mostrate in Figura 4.

L'elevata densità modale riscontrata nel range considerato ha reso necessario effettuare analisi più raffinate di un semplice confronto fra le ampiezze e le frequenze dei modi principali. Si è pertanto deciso di estrarre i parametri modali (frequenze proprie, modi propri, coefficienti di smorzamento) di tutti i cielini, con l'ovvia precisazione che, essendo i pannelli non trattati, le maggiori differenze saranno imputabili prevalentemente a diversità nella saldatura dei profilati ("omega") di rinforzo.

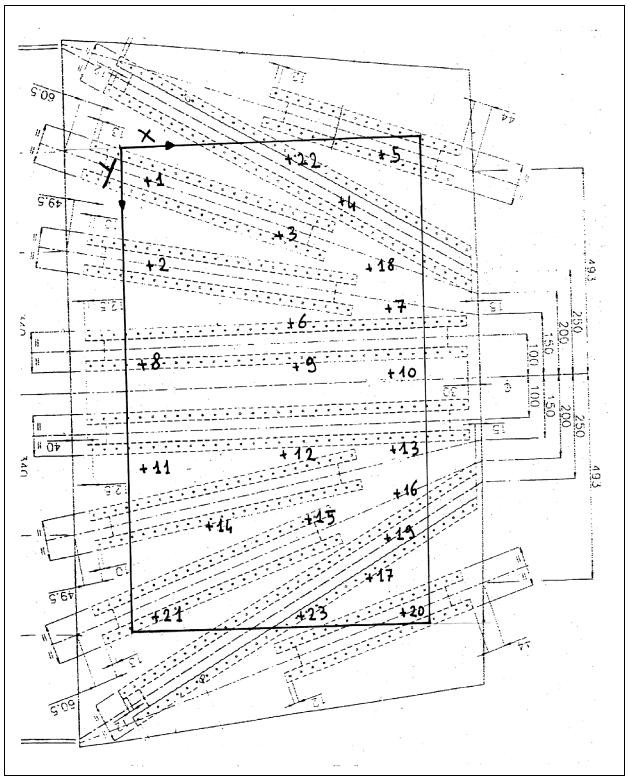

Figura 4. Disegno del cielino con indicazione della porzione utilizzata per le prove di trasmissibilità acustica e di mobilità meccanica. Sono indicati i punti utilizzati per le misure di mobilità meccanica.

L'analisi dei dati ottenuti ha permesso la determinazione del pannello con caratteristiche dinamiche medie; questo pannello è stato tenuto come riferimento e quindi non trattato con antirombo. Per confrontare i cinque cielini è stata usata la funzione MAC (Modal Assurance Criterion) che, se la massa modale attribuibile a ciascuna misura è la stessa, fornisce, una misura della relazione lineare esistente fra due modi di vibrare. Avendo distribuito equamente i punti sulla superficie di misura si può ritenere che questa ipotesi sia sufficiente verificata.

Ciascun cielino è stato comparato con gli altri quattro mediante un programma in linguaggio MATLAB che calcola i MAC con gli altri quattro cielini, fornendo per ogni modo quale degli altri quattro cielini ha il MAC più alto. Per motivi di spazio non si riportano le tabelle con le frequenze proprie e le tabelle dei MAC incrociati; si osserva comunque come i cinque pannelli abbiano un comportamento dinamico sostanzialmente simile per i modi propri con frequenze dell'ordine di 250÷300 Hz ma si differenzino notevolmente all'aumentare della frequenza. Il cielino n° 5, in particolare, mostra già a bassissime frequenze caratteristiche dinamiche non riscontrabili negli altri pannelli.
Il cielino n° 4 ha mostrato valori di MAC molto alti (superiori all'80%) con tutti gli altri pannelli per un ampio range di frequenze; tale pannello non è stato trattato con antirombo ed è quindi stato usato come riferimento nell'attività successiva.

2.3. Mobilità meccanica dei cielini trattati

Per una corretta valutazione dell'efficacia reale del trattamento con antirombo sono state ripetute le prove, illustrate al paragrafo precedente, di mobilità meccanica con pannelli trattati con vari spessori di materiale smorzante. La strumentazione utilizzata e le modalità di misura sono formalmente identiche a quelle indicate al paragrafo precedente. Gli spessori finali

nominali del trattamento dei cielini sono i seguenti: n° 4= 0 mm, n° 1=1.5 mm, n° 2=3.0 mm, n° 3= 4.5 mm, n° 5= 6.0 mm.
Visto che l'analisi modale di strutture così smorzate non è possibile, si è limitato il confronto all'analisi visiva delle ampiezze delle FRF misurate in un numero di punti ridotto ma ugualmente significativo rispetto a quelli analizzati per lo studio della ripetibilità tecnologica di produzione.

Per evidenti motivi di spazio, si riporta in Figura 5 la sola FRF puntuale; essa è rappresentata in termini di mobilità meccanica (velocità/forza) in quanto questa rappresentazione consente una migliore correlazione con il possibile rumore emesso. Dall'analisi dell'intera serie delle mobilità si osserva che lo smorzamento dinamico introdotto dall'antirombo è rilevante passando dal pannello n° 4 (privo di trattamento) ai pannelli n° 1 e n° 2 di spessori rispettivamente 1.5 e 3.0 mm, ma rimane sostanzialmente identico aumentando ancora lo spessore. In particolare, passando dal pannello non trattato al pannello con 1.5 mm di antirombo il guadagno è in media dell'ordine di 10 dB; per il pannello con 3 mm di antirombo l'ulteriore guadagno è dell'ordine di 3÷4 dB; gli ulteriori guadagni sono difficilmente quantificabili per i pannelli con 4.5 mm e 6 mm di antirombo.

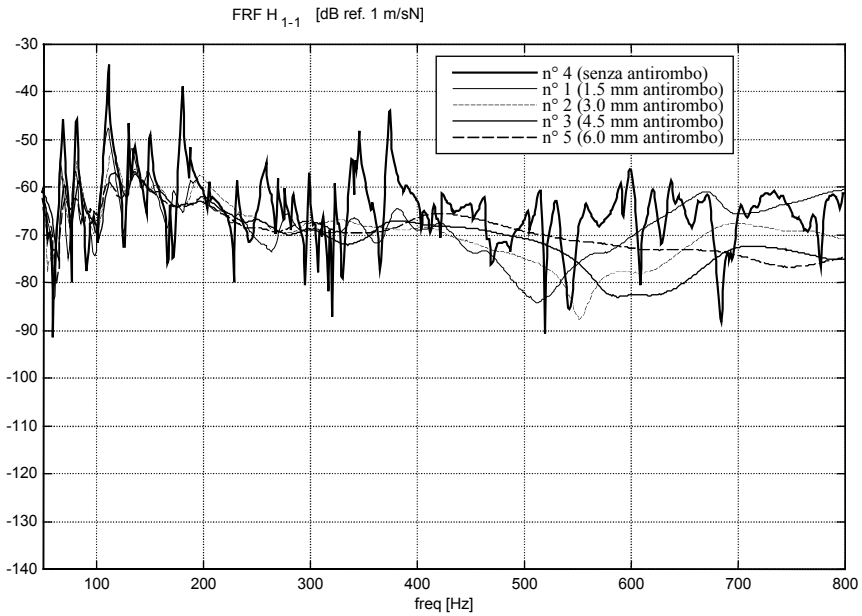

Figura 5. Mobilità in dB ref. 1 m/sN del punto 1.

2.4. Misura della perdita di trasmissione acustica dei cielini

Mediante prove di TL formalmente identiche a quelle illustrate nel paragrafo 1 si è valutato l'effetto dell'uso di antirombo sulle lamiere della cabina, importante ai fini dell'ingresso in cabina del rumore esterno, particolarmente importante durante la marcia in galleria (Figura 6).

Si è osservato come i profilati a forma di omega utilizzati come rinforzo strutturale si comportano, eccitati dalla vibrazione del pannello indotta dal rumore interno alla camera riverberante, come "canne d'organo", provocando livelli di rumore decisamente superiori a quelli dell'equivalente lamiera piana. Una serie di prove è stata quindi condotta chiudendo le estremità dei profilati con un sottile velo di stucco da vetrai, ottenendo così un deciso miglioramento. In Figura 7 sono mostrate le intensità sonore misurate per tutte le configurazioni analizzate, ovviamente a parità di potenza sonora della sorgente di rumore.

Figura 6. Misura di Transmission Loss in cabina riverberante (sinistra); la struttura interna della locomotiva con le lamiere rinforzate prima dell'applicazione del trattamento antirombo (a destra)

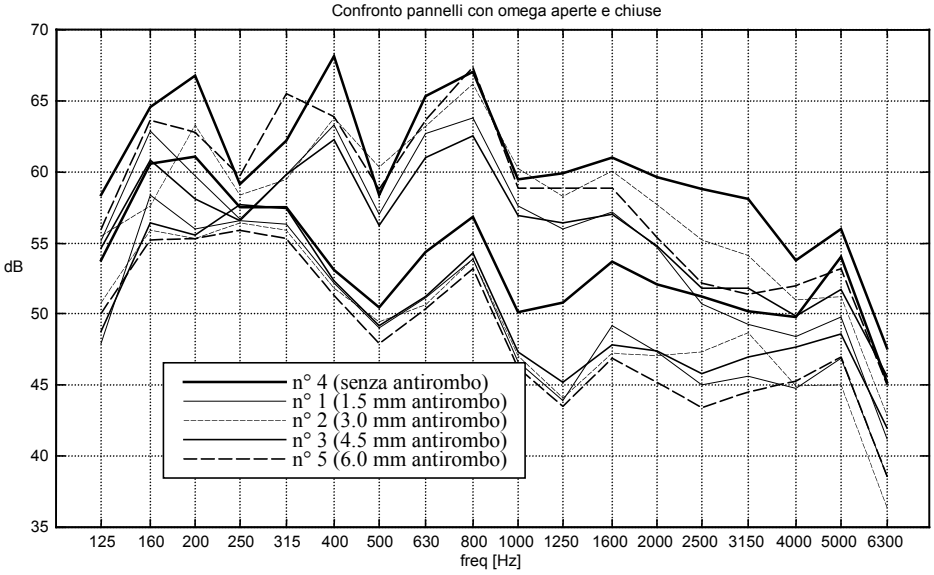

Figura 7. Intensità acustica media (dB(A) ref. 1 pW/m^2) per tutti i pannelli con omega chiuse e con omega aperte. I pannelli con omega aperte (curve superiori) hanno una trasmissibilità acustica globalmente maggiore rispetto a quelli con omega chiuse indipendentemente dallo spessore di antirombo.

Il confronto fra i vari pannelli può essere più utilmente definito come "guadagno" nei confronti del cielino non trattato, e cioè come diminuzione del livello misurato a valle del cielino stesso al variare dello spessore del trattamento con antirombo. In Figura 8 vengono mostrati e confrontati fra loro i guadagni dei singoli pannelli rispettivamente per cielini con profilati chiusi e con profilati aperti.

Il confronto va infine effettuato in termini di TL per tutti i pannelli esaminati. Questi risultati, che riassumono tutte le caratteristiche acustiche dei cielini, sono mostrati in Figura 9.

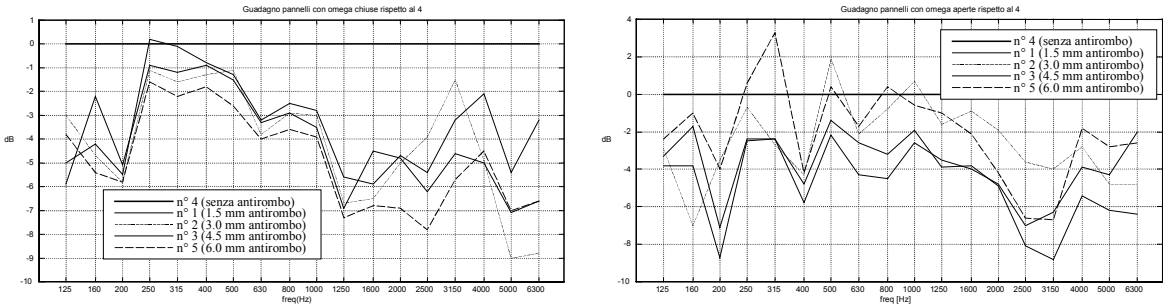

Figura 8. Guadagni medi (dB(A) ref. 1 pW/m^2) per i tutti i cielini con omega chiuse (a sinistra) ed omega aperte (a destra) rispetto al cielino n° 4 corrispondente.

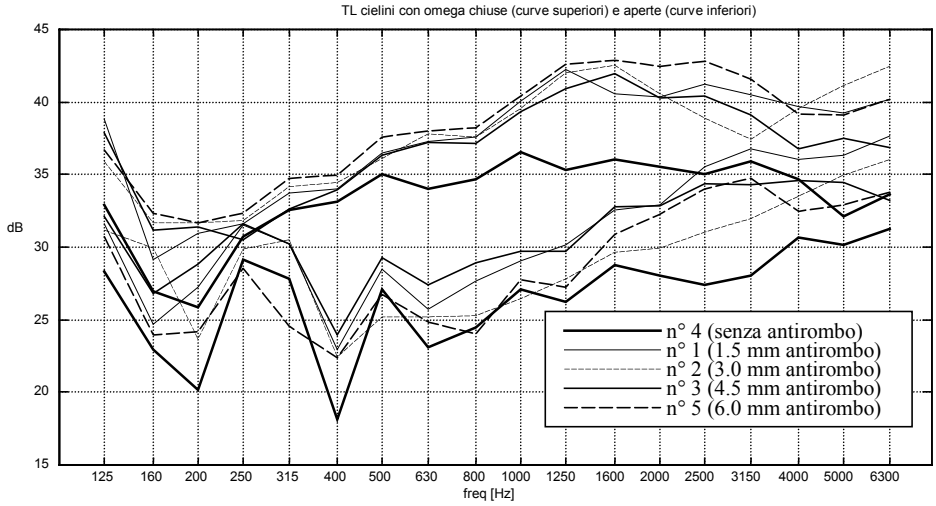

Figura 9. TL per i cielini con omega aperte e chiuse.

2.5 Conclusioni

L'analisi vibrazionale ed acustica sui cielini ha permesso di evidenziare comportamenti inattesi, riconducibili alla presenza dei profilati ad omega di rinforzo saldati a punti. La prima analisi condotta, quella di mobilità meccanica di cinque cielini nudi, ha dimostrato che la ripetibilità tecnologica di produzione è assai buona. Un solo cielino su cinque ha mostrato un comportamento leggermente diverso dalla media, intorno alla quale stanno gli altri quattro cielini.

Le misure di mobilità meccanica dei cielini trattati hanno consentito di evidenziare come lo smorzamento dinamico introdotto dall'antirombo è rilevante passando dal pannello n° 4 (privo di trattamento) ai pannelli n° 1 e n° 2 di spessori rispettivamente 1.5 e 3.0 mm, ma rimane sostanzialmente identico aumentando ancora lo spessore. In particolare, passando dal pannello non trattato al pannello con 1.5 mm di antirombo il guadagno è in media dell'ordine di 10 dB; per il pannello con 3 mm di antirombo l'ulteriore guadagno è dell'ordine di 3÷4 dB; gli ulteriori guadagni sono difficilmente quantificabili per i pannelli con 4.5 mm e 6 mm di antirombo.

Il comportamento acustico del cielino in termini di TL risente in maniera determinante del contributo alla trasmissibilità dato dalla presenza dei profilati ad omega posti sul lato interno con funzione di irrigidimento strutturale. L'effetto "canna d'organo" che si viene a formare

vanifica in massima parte il probabile miglioramento nelle caratteristiche acustiche derivante dalla maggior rigidezza. Il comportamento acustico ha mostrato notevoli miglioramenti una volta che si siano chiusi i profilati ad omega.
L'altra via per migliorare il comportamento del cielino nudo è quello di utilizzare il trattamento con antirombo. L'utilizzo di questo materiale, sebbene utile nella grande maggioranza dei casi, ha efficienza diversa a seconda che i profilati siano stati chiusi o meno. Ambedue le possibilità sono state ampiamente testate dimostrando che l'efficacia del trattamento con antirombo è decisamente superiore per i pannelli con profilati chiusi, mentre meno efficiente, ed addirittura a volte peggiorativa, risulta per pannelli con profilati aperti. In ogni caso i guadagni tendono ad aumentare con l'incremento dello spessore di antirombo ma tale incremento è molto modesto.
Assai diverso è anche il trend dei valori di TL all'incrementare delle spessore di antirombo: per i cielini con profilati aperti l'aumento di materiale continua a favorire, sia pure marginalmente, il comportamento acustico, mentre per i cielini con profilati chiusi i risultati migliori in termini di costi/prestazioni si hanno per gli spessori di 1.5 mm (guadagno medio di 5 dB e punte dell'ordine di 7 dB per alte frequenze) ed, in minor misura, 3 mm (guadagno medio di 5 dB ma punte di ben 9 dB). Al di sopra di questi spessori non vi è in pratica ulteriore miglioramento.
Visto che il cielino con i profilati chiusi ha TL superiore a quella del cielino con profilati aperti qualunque sia lo spessore di antirombo, in ogni caso appare prioritario ed ineludibile il trattamento di chiusura dei profilati. Una volta realizzato questo ottimi incrementi si ottengono con minimi trattamenti (1.5 mm); solo se il costo di produzione fosse assai ridotto è pensabile utilizzare spessori di 3 mm, ma mai superiori. L'uso di qualunque spessore di antirombo su cielini con profilati aperti porterebbe a risultati non del tutto soddisfacenti con costi di produzione ed incrementi di peso inaccettabili.

3. ANALISI STRUTTURALE SPERIMENTALE DELLE LAMIERE CHE CHIUDONO LA CABINA

3.1 Introduzione

Il presente paragrafo illustra le prove di mobilità meccanica delle lamiere delle locomotive Politensione E404 n° 3 (lamiere non trattate) e n° 2 (lamiere trattate con antirombo) effettuate al fine di determinare le frequenze proprie delle lamiere che chiudono la struttura di profilati della cabina nonché una prima valutazione dell'efficacia dei trattamenti smorzanti loro applicati durante la produzione della locomotiva. Durante l'esercizio le varie lamiere che compongono la cabina saranno indotte a vibrare dalla struttura della locomotiva, e risponderanno in maniera direttamente proporzionale alla loro mobilità dinamica. Ciascuna lamiera quindi è potenziale fonte di rumore in cabina durante l'esercizio.

3.2. Modalità di esecuzione delle prove ed analisi delle misure

Per i rilievi di mobilità meccanica l'eccitazione è stata fornita in maniera impulsiva mediante un martello strumentato mentre le accelerazioni normali alla superficie dei pannelli sono state misurate con gruppi di accelerometri piezoelettrici. Le modalità di raccolta ed analisi dei segnali sono formalmente identiche a quelle illustrate al precedente paragrafo 2.2. Una frequenza di fondo scala di 800 Hz è stato ritenuta sufficiente vista la composizione spettrale del rumore misurato su locomotive analoghe in precedenti campagne prova [1].
Sono stati esaminati solo alcuni pannelli che compongono la cabina di guida (un esempio è mostrato in Figura 10), mentre si è deciso di non analizzare il comportamento di altri pannelli

per le ridotte dimensioni e/o per le particolari condizioni di vincolo per le quali l'emissione acustica di tali pannelli è senz'altro ridotta.

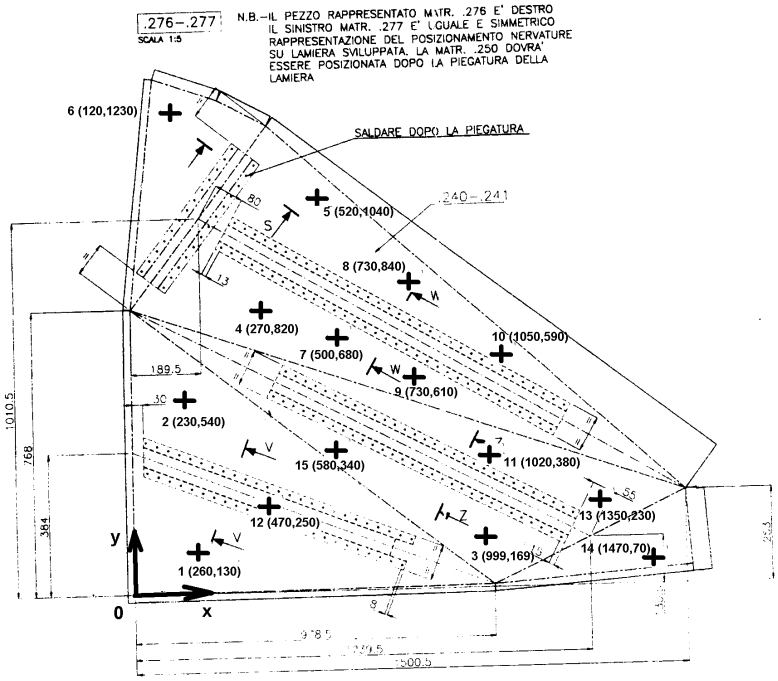

Figura 10. Esempio di pannello laterale e posizione dei punti di misura.

3.3. Confronto loco n° 3 (lamiere non trattate) e loco n° 2 (lamiere trattate)

Le risposte in frequenza effettuate sulla loco n° 3, analizzate mediante programmi in linguaggio MATLAB, hanno permesso di evidenziare il comportamento vibratorio dei pannelli. In particolare, per ogni pannello è stata calcolata una tabella in cui è riportato per ogni banda di frequenza di 1/3 di ottava normalizzata il livello di vibrazione e le frequenze di risonanza più pericolose e per tali frequenze il modulo e lo smorzamento, mentre le FRF medie sono state trasformate in bande di 1/3 di ottava e plottate sia in scala lineare che in dB ref. 10^{-6} m/sN.

Sono state calcolate le risposte in frequenza in termini di mobilità (velocità/forza) mediando le misure di ogni pannello; inoltre si sono redatte delle tabelle che indicano per ogni banda di 1/3 di ottava il livello di vibrazione, le frequenze potenzialmente più pericolose per il rumore in cabina e, per tali frequenze, il modulo e la percentuale di smorzamento rispetto allo smorzamento critico.

Analogamente sono state effettuate analisi simili sulla locomotiva n° 2 (lamiere trattate).

Il confronto fra i due tipi di locomotive misurate consente di valutare, ancorché approssimativamente, l'effetto del trattamento con antirombo sulle superfici delle lamiere che chiudono la cabina di guida della E404.

Le misure effettuate sulla locomotiva n° 3 (non trattata) sono state limitate in termini di numerosità dato che la loco stessa non opererà senza trattamenti sulle lamiere. Nondimeno l'analisi ha consentito di evidenziare le frequenze più pericolose ed i relativi coefficienti di smorzamento che peraltro sono, ovviamente, piuttosto bassi. A causa di questo i picchi molto elevati fanno sì che i diagrammi in banda percentuale costante spesso non rendano conto della elevatissima mobilità ad alcune frequenze.

Le misure effettuate sulla locomotiva n° 2 (trattata) hanno mostrato una notevole riduzione dell'ampiezza massima dei picchi, con FRF medie piuttosto dolci per cui i diagrammi in banda percentuale costante somigliano notevolmente ai corrispondenti in banda fine.
A puro titolo di esempio viene riportato in Figura 11 un diagramma di riduzione di livello di risposta in frequenza in 1/3 di ottava.

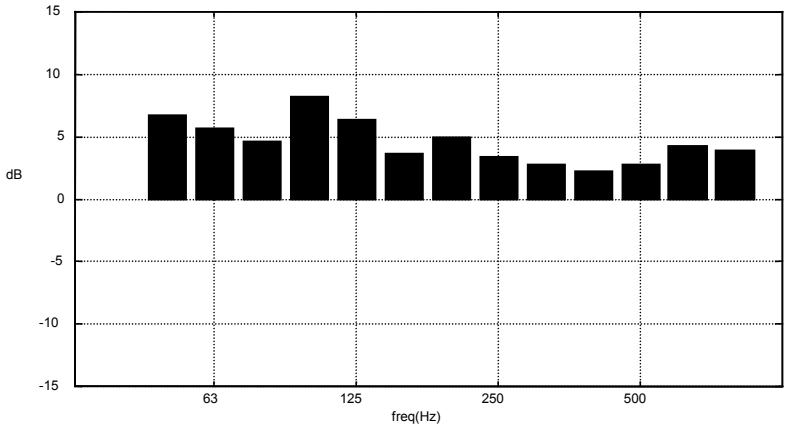

Figura 11. Riduzione del livello energetico di risposta in frequenza per il pannello 276.

4. CONCLUSIONI

L'attività sperimentale descritta ha consentito di rilevare il buon effetto del trattamento con antirombo delle lamiere della locomotiva E404 politensione dell'ETR500 ai fini della risposta vibrazionale in termini di mobilità meccanica.
Il trattamento delle lamiere consente riduzioni dell'ordine di 5 dB di livello di vibrazioni rispetto alle lamiere non trattate quando la mobilità sia espressa in bande di 1/3 di ottava. Ovviamente il guadagno è assai maggiore quando si confrontino i diagrammi in banda fine, dato che l'effetto preponderante di materiali come l'antirombo è quello di smorzare le frequenze di risonanza. L'influenza della massa del materiale, illustrata nel paragrafo 2, ha consentito, analizzando il comportamento di un "cielino" con diversi spessori di antirombo, di identificare la soluzione migliore in termini di rapporto costo di trattamento/miglioramento delle prestazioni acustiche.

Dal punto di vista acustico, alcuni comportamenti inattesi dovuti ai profilati di rinforzo del tetto della locomotiva sono stati analizzati ed è stata determinata una soluzione di primo tentativo.

Le conclusioni determinate durante il presente lavoro sono state integralmente implementate dal costruttore durante la costruzione dei veicoli di serie.

BIBLIOGRAFIA

[1] A. Bracciali, "Misure di Rumorosità Interna del Convoglio ETR500", Dipartimento di Meccanica e Tecnologie Industriali, Università degli Studi di Firenze, 22.7.1996.
[2] A. Bracciali, "Studi sul comportamento acustico della locomotiva E404 Politensione", Dipartimento di Meccanica e Tecnologie Industriali, Università degli Studi di Firenze, 1.4.1998.