

VALUTAZIONI NUMERICHE E SPERIMENTALI DELL'ACUSTICA DI UN TRENO AD ALTA VELOCITÀ

A. Bracciali, R. Ciuffi

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

SOMMARIO

Gli autori hanno compiuto, negli anni, un'attività particolarmente intensa sulla modellazione dell'acustica di veicoli ferroviari, unitamente all'effettuazione di numerose campagne prova in linea riguardanti sia il rumore a terra che il rumore a bordo, in vettura ed in cabina di locomotive.

L'attività ha riguardato veicoli per ferrovie convenzionali e metropolitane; qui vengono presentati esclusivamente i risultati riguardanti materiale rotabile per alta velocità. La presente memoria costituisce una sintesi di questi risultati, solo parzialmente pubblicati, e si propone come un sommario sull'approccio metodologico da tenere per la valutazione corretta di tali caratteristiche.

ABSTRACT

During several years, the authors have done a particularly intense activity on the acoustic modelling of railway vehicles together with numerous test campaigns on both the external and the interior noise, in coaches and in locomotives.

The activity concerned both conventional and mass transit vehicles; in this paper only the results regarding high-speed rolling stock are presented. This paper is therefore a synthesis of the results obtained, only partially published, and can be seen as a guideline on the methodological approach for the correct evaluation of noise characteristics.

1. INTRODUZIONE

Il rumore e le vibrazioni sono l'unica inquinazione direttamente emessa da un treno a trazione elettrica. La sensibilità al rumore si è, negli ultimi anni, drammaticamente accresciuta sia per quanto riguarda il rumore immesso nell'ambiente da sorgenti di rumore fisse o mobili sia per quanto riguarda il comfort dei mezzi di trasporto. Il treno non è certamente esente da questo processo ed, anzi, le normative nazionali ed europee stanno diventando sempre più stringenti.

E' indubbio che il materiale ad alta velocità rivesta un'importanza particolare nei riguardi di questo problema in quanto:

- il rumore ferroviario cresce con la velocità con la relazione approssimata $L_p = a + b \log_{10}(v/v_0)$ dove $b=20 \div 30$, per cui ad elevata velocità il livello di rumore massimo emesso può raggiungere valori non compatibili con le normative relative all'esposizione massima al rumore (da 200 a 300 km/h si ha un incremento di oltre 5 dB, senza considerare il rumore aerodinamico);
- per quanto riguarda il rumore interno, pur non potendo parlare di concorrenza vera e propria, vi è comunque una maggiore attenzione da parte delle amministrazioni ferroviarie nell'acquistare materiale rotabile con livello di comfort acustico piuttosto elevato;
- numerose sono le caratteristiche richieste ad un treno ad alta velocità, fra le quali la leggerezza, che influenzano notevolmente il comportamento acustico, obbligando fra l'altro ad optare per la configurazione a salone ed a non considerare materiali fonoassorbenti o fonoisolanti ad elevata densità.

Gli autori hanno, da oltre 10 anni, affrontato numerosi problemi legati all'acustica interna ed esterna di materiale rotabile di vario tipo, effettuando studi numerici, campagne prova sperimentali ed analisi di vario genere. Solo nel 1997 [5] è stata pubblicata una breve rassegna peraltro non focalizzata sull'oggetto della presente memoria.

Nella presente memoria si espone brevemente una sintesi delle attività svolte con particolare riferimento ai problemi risolti e, quindi, alle ricadute positive sul viaggiatore che, in ultima analisi, beneficia degli studi e dei miglioramenti proposti. Si precisa che la bibliografia indicata copre tutti gli argomenti ferroviari affrontati dagli autori e non è limitata all'argomento della presente memoria.

2. ACUSTICA INTERNA DEL VEICOLO (MISURE DA FERMO).

Nonostante la modularità estremamente spinta, la modellazione numerica dell'acustica di un veicolo viaggiatori per alta velocità è complicata dalle notevoli dimensioni del volume da modellare, unitamente alla presenza di elementi fonoassorbenti (tipicamente i sedili, parti del pavimento, alcuni pannelli di rivestimento) e di elementi estremamente riflettenti (finestrini, bagagliere). La possibilità di modellare quindi efficacemente il comparto viaggiatori nell'intervallo di frequenze di interesse, orientativamente fino a 5 kHz, è quindi inesistente.

Nel presente convegno viene presentata un'altra memoria [17] che illustra un modello semplificato per la stima del rumore interno ad un veicolo di *mass transit*; tale procedura sarebbe peraltro applicabile, con minime modifiche, anche ad un convoglio AV.

Gli autori hanno effettuato nel 1995 una serie di prove di tempo di riverbero all'interno di una vettura dell'ETR500 durante diverse fasi della sua costruzione per stimare l'efficacia dei materiali utilizzati (Figura 1). Questi test, i cui risultati non sono stati pubblicati, mostrano come la presenza degli elementi tipici costituenti il comparto viaggiatori (sedili, bagagliere, tavoli) aumentino notevolmente il coefficiente di assorbimento, a notevole vantaggio dei viaggiatori che siedono nella parte del veicolo più lontana dalle sorgenti di rumore, che sono chiaramente i carrelli (Figura 2).

I risultati ottenuti, più che rappresentare dei valori assoluti per la bontà o meno della soluzione sotto test, hanno rappresentato i primi dati utili per la costituzione di un data base contenente le caratteristiche acustiche interne di questo tipo di veicoli.



Figura 1 Viste della vettura dell'ETR500 durante le fasi di assemblaggio. Da sinistra verso destra: configurazione 1 (carrozza nuda, struttura in alluminio di lunghi estrusi saldati), configurazione 2 (pavimento ed elementi termoisolanti in vista), configurazione 3 (rivestimenti completi), configurazione 4 (vetture completa).

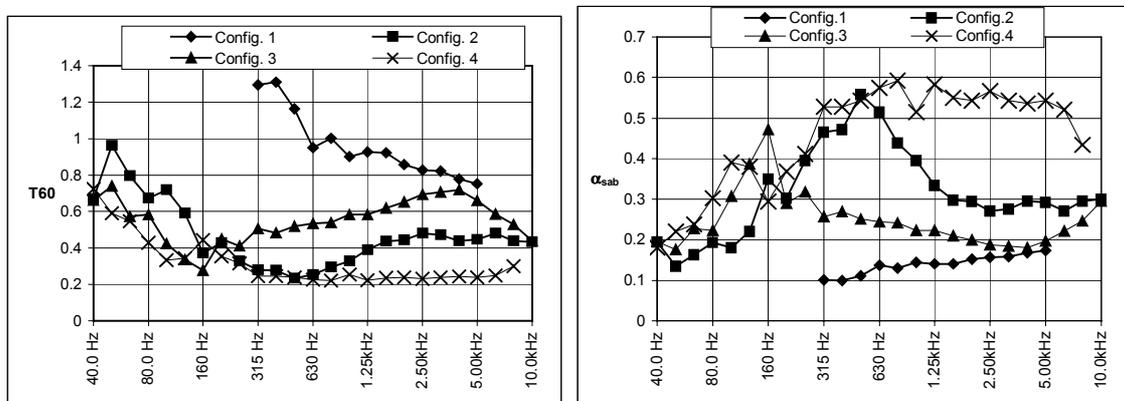


Figura 2. Confronto fra i tempi di riverbero T_{60} (a sinistra) e fra i coefficienti di assorbimento α_{sab} per le quattro configurazioni.

3. ACUSTICA INTERNA PER LE PROVE DI TIPO (MISURE A BORDO)

Nel corso degli anni 1994-1996 sono state effettuate numerose campagne prova sull'ETR500 misurando la distribuzione di pressione sonora nel comparto viaggiatori, per velocità fino a 300 km/h, all'aperto ed in galleria, su binario con ballast e su piastra, con impianto di condizionamento in diverse condizioni di funzionamento (Figura 3). La mappatura ottenuta ha consentito di validare le caratteristiche degli ambienti ottenute al punto precedente e di valutare l'influenza delle condizioni della linea e del regime di funzionamento delle apparecchiature ausiliarie.

Sebbene lo scopo principale di queste campagne prova fosse quello di determinare la rispondenza del convoglio ai valori di capitolato di fornitura, i dati ottenuti in linea hanno costituito la base per una serie di attività di ricerca illustrate al paragrafo 6.

Analisi simili hanno riguardato le misure effettuate in cabina di guida della locomotiva E404 dell'ETR500 3kV. Questi risultati, solo parzialmente pubblicati in [12], mostrano come la rumorosità sia estremamente variabile pur in condizioni di velocità costante (Figura 4). Risulta pertanto piuttosto difficile indicare quale sia "il" rumore in cabina, probabilmente converrebbe indicare un livello medio (Livello equivalente) o compiere un'analisi statistica. Si rimanda al paragrafo 7 per ulteriori considerazioni sull'argomento.



Figura 3. Rilevazione del campo di rumore interno all'ETR500. Microfono omnidirezionale con relativa sospensione (a sinistra), posizionamento nella zona passeggeri (al centro) e nella zona vestibolo (a destra).

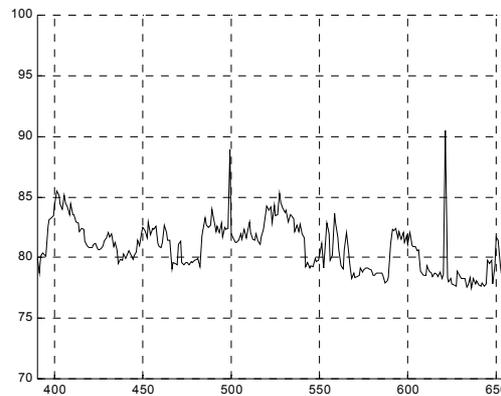


Figura 4. Livello di pressione sonora L_{pA} misurato in loco E404 3kV in un tratto in direttissima a 250 km/h (ascisse: tempo in [s]). Si noti l'estrema variabilità dei valori.

Al fine di individuare il motivo per alcuni comportamenti anomali rilevati a 190 km/h per il convoglio ETRY500, si è effettuata inoltre un'analisi modale sperimentale della sala completa di tale convoglio [3].

4. MISURE IN BOCCOLA E SOTTO CASSA

A partire dal 1993 è stata sviluppata un'attrezzatura per la misura del rumore emesso da un convoglio da fissare al di sotto del corpo boccola di un qualunque rotabile ferroviario [1,2]. Uno dei maggiori vantaggi derivanti dall'utilizzo dell'attrezzatura consiste nel poter misurare per lungo tempo aumentando il prodotto BT a tutto vantaggio della precisione di misura specialmente alle basse frequenze, ove le misure a terra danno risultati largamente imprecisi. I risultati ottenuti sono di elevato livello qualitativo e quantitativo, consentendo numerose elaborazioni. Ovviamente i valori misurati in boccola sono stati correlati con le equivalenti misure a terra durante una campagna prove comparativa [4]. I valori di taratura dell'attrezzatura così ottenuti hanno consentito di determinare le costanti da applicare che stimano il valore a terra misurando il valore a bordo.

L'attrezzatura è stata utilizzata:

- nel 1993 per la messa a punto dell'attrezzatura, con velocità fino a 300 km/h, sia sulla locomotiva che sulle vetture dell'ETR500 (Figura 5);
- nel 1994 per la valutazione immediata di diversi tipi di ruote per l'ETR500 (Figura 5),
- nel 2000 tale attrezzatura è stata replicata in 4 esemplari su richiesta di Trenitalia UTMR al fine di valutare il comportamento di ruote a bassa emissione acustica (Figura 6) nell'ambito di una collaborazione trilaterale fra le direzioni tecniche di DB, FS ed SNCF [14].

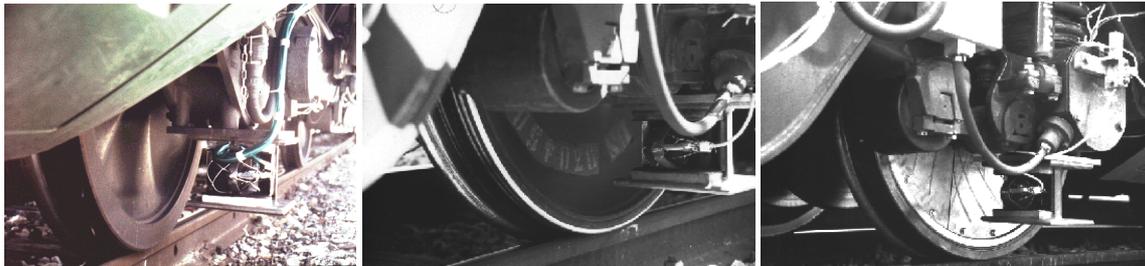


Figura 5. Applicazione dell'attrezzatura per la misura di rumore in boccola a tre diverse ruote dell'ETR500: motrice E404 (a sinistra), ruota standard (al centro), ruota con lamine smorzanti (a destra)

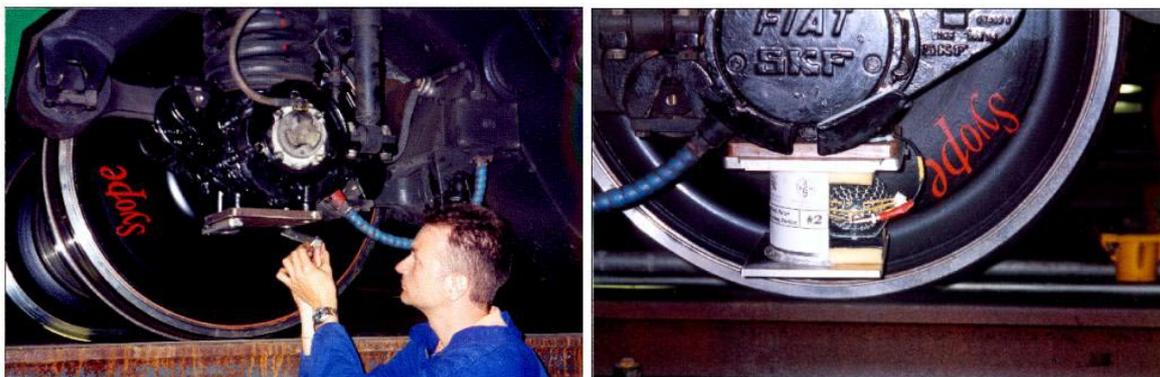


Figura 6. Montaggio (a sinistra) e vista dell'attrezzatura per la misura di rumore in boccola alle ruote a bassa emissione acustica Syope[®] per il materiale AV (ETR500, Pendolini) prodotte da Lucchini Sidermeccanica (si veda anche [7]).

Un esempio tipico di output ottenibile con l'attrezzatura è mostrato in Figura 7. Si osserva immediatamente come la completezza ed il dettaglio delle informazioni sono largamente superiori a quelli ottenibili con qualunque misura a terra.

In particolare, durante la campagna prove del 2000 è stato possibile evidenziare il diverso comportamento acustico del treno in retta ed in curva (Figura 8). Tali risultati, pubblicati in [15] ed attualmente in corso di pubblicazione su Journal of Sound and Vibration, sono fondamentali per la messa a punto di algoritmi di generazione del rumore in funzione della posizione laterale del punto di contatto ruota-rotaia.

L'utilizzo dell'attrezzatura non è rimasto confinato a tale ambito, costituendo un importante strumento per validare la costruzione di una vettura. Nel corso del 1996 sono state effettuate misure di rumore contemporanee in cassa e sotto cassa, utilizzando ancora l'attrezzatura al

fine di determinare sperimentalmente le capacità reali di isolamento acustico offerte dal pavimento in condizioni di esercizio (Figura 9). Tali dati sono stati estensivamente utilizzati per le attività illustrate al paragrafo 6.

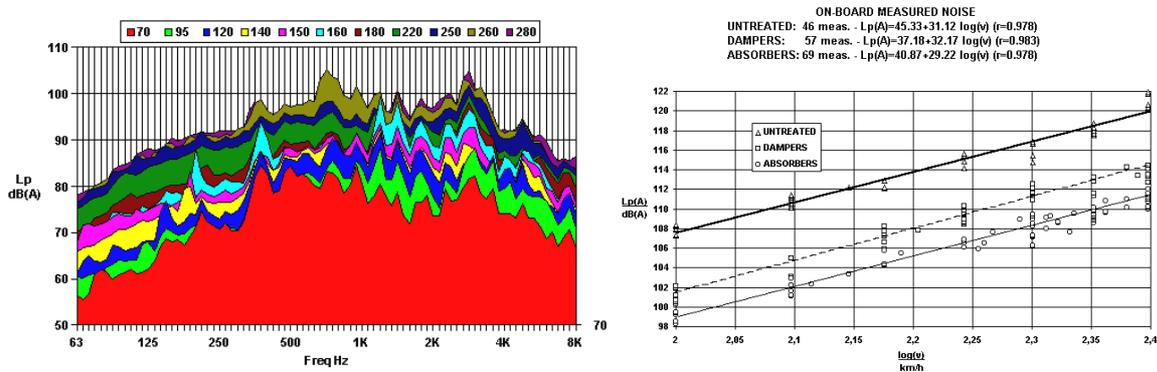
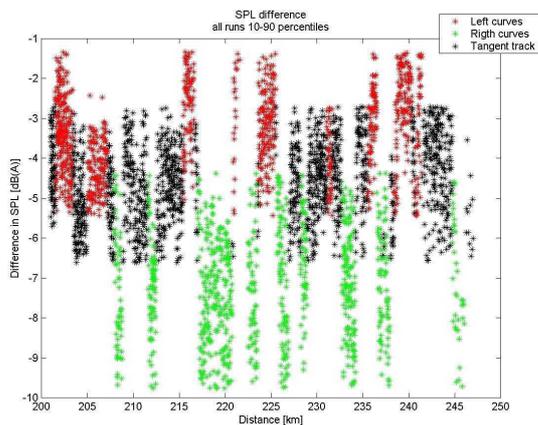


Figura 7. Spettri di emissione in 1/12 di ottava misurati in boccia per la ruota standard dell'ETR500 (a sinistra); livelli di rumore misurati in boccia per diverse soluzioni di ruote per l'ETR500 (a destra). Si noti l'elevato numero di misure.



	Tangent track	Right curves	Left curves
% of track	48	26	26
% of samples	43	26	31
Average <i>Syope</i> [®] gain	-4.6±2.3 dB(A)		
Single stretch	-4.5±1.6 dB(A)	-6.8±2.1 dB(A)	-3.3±1.6 dB(A)
Single stretch (samples considered)	-4.5±1.0 dB(A) (10%-90%)	-7.0±1.4 dB(A) (10%-90%)	-3.3±1.1 dB(A) (10%-90%)

Figura 8. Guadagno offerto dalle ruote *Syope*[®] in rettilineo ed in curva misurato durante la campagna prove del 2000.

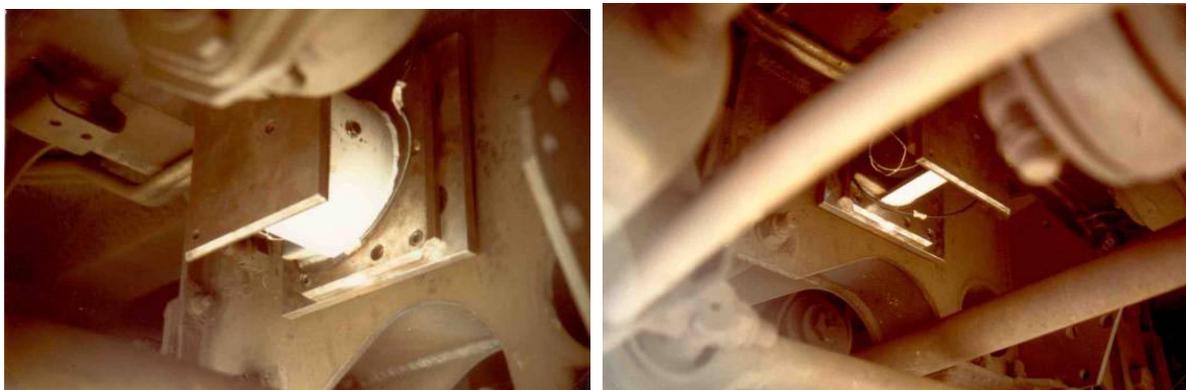


Figura 9. Effettuazione delle misure di campo sonoro sotto vettura (zona carrello) del convoglio ETR500 3kV nel 1996.

5. ACUSTICA ESTERNA PER LE PROVE DI TIPO (MISURE A TERRA)

Le misure a terra vengono effettuate, come da normativa, con fonometri in classe 1. La limitazione fondamentale di tale metodologia è che non consente ulteriori analisi in quanto il fonometro, normalmente, registra il rumore applicando la rete di pesatura (normalmente la pesatura A) e la costante di tempo (normalmente FAST) desiderate e calcola immediatamente i valori più usuali (L_{pAFmax} , L_{eq}) dai quali è possibile calcolare facilmente i nuovi indicatori specifici del trasporto ferroviario (TEL, Transit Exposure Level).

Nel corso della campagna prove del 2000 si sono effettuate numerose misure a terra di tutti i convogli AV italiani nel sito di Renacci. Tali misure, effettuate a 7.5 m dall'asse del binario e ad un'altezza di 1.2 m dal piano del ferro, sono state effettuate mediante registrazione digitale con microfoni di misura collegati a schede A/D inserite in PC (strumentazione virtuale, programmata in LabVIEW). Tale soluzione ha l'indubbio vantaggio di consentire a posteriori *qualsiasi* tipo di elaborazione, da quelle richieste dalle normative ad analisi diverse. Si ritiene che questa metodologia consenta la massima flessibilità senza, al contempo, avere gravi svantaggi; anche il costo delle apparecchiature è decisamente gestibile.

In Figura 10 sono mostrati i tipici risultati ottenuti per il convoglio utilizzato nella citata campagna prove; in Figura 11 sono mostrati i risultati ottenuti dall'analisi di 20 treni (oltre 400 carrelli) transitati a Renacci [16].

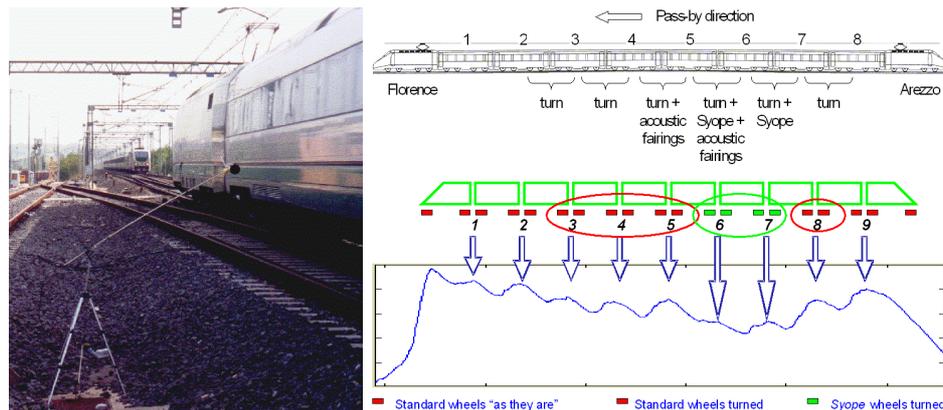


Figura 10. Montaggio del microfono (a sinistra) e tipici risultati ottenuti nella campagna prove del 2000 a Renacci (a destra).

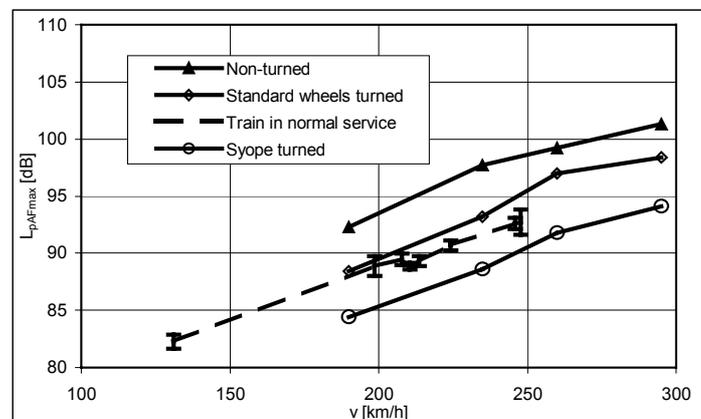


Figura 11. Confronto fra il comportamento globale dei treni AV in servizio regolare ed il convoglio di prova durante la sessione di prove del 2000.

L'utilizzo di acquisizione in DC ha consentito di rilevare i potenziali fenomeni di saturazione del microfono dovuti alle sovra pressioni aerodinamiche indotte dalla testata del treno (Figura 12); i risultati ottenuti, non pubblicati, indicano come il Pendolino abbia, a parità di velocità, un impatto inferiore rispetto all'ETR500 in merito a tale aspetto.

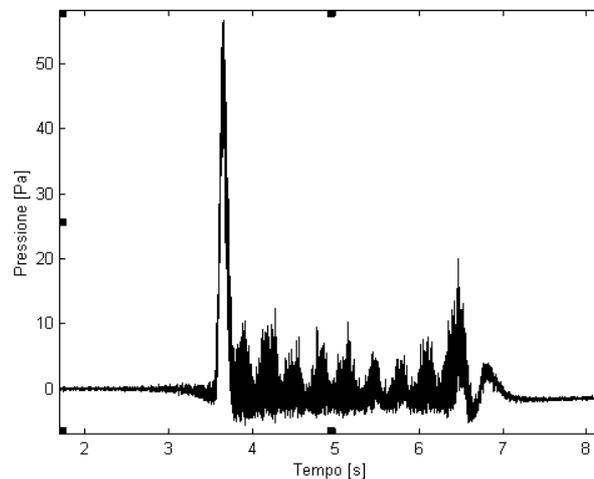


Figura 12. Segnale del microfono registrato a 7.5 m dall'asse del binario al passaggio dell'ETR500 Politensione di prova marciante a 297 km/h.

6. PROGETTAZIONE ACUSTICA INTERNA

Nel corso degli anni 1995-1998 sono state compiute numerose analisi acustiche numeriche utilizzando codici FEM e BEM. Tali analisi hanno utilizzato largamente i risultati ottenuti durante le campagne prova descritte ai paragrafi 3 e 4, e vengono qui solo brevemente descritte.

Nel corso del 1996 e del 1997 è stato messo a punto e tarato un modello numerico FEM con accoppiamento fluido-struttura della sezione longitudinale dell'ETR500 [8]. Mediante tale modello è stato possibile valutare, con un'analisi di sensitività, l'effetto di eventuali modifiche strutturali applicate alla vettura dell'ETR500 (Figura 13). La procedura, pur con limiti evidenti (simulazione 2D per due sole frequenze di centro banda), ha portato a risultati interessanti per quanto riguarda l'influenza dei trattamenti applicabili ai vari elementi della struttura.

Nel corso del 1998 sono state compiute numerose analisi BEM/FEM per l'analisi del rumore in varie condizioni (risultati non pubblicati), al fine di valutare esplicitamente il comportamento in galleria riscontrato durante le campagne prova precedentemente illustrate (Figura 14).

Qui si accenna solamente, essendo oggetto di un'altra memoria presentata a questo convegno [18], l'attività sperimentale svolta nel 1996-97 in ordine alla caratterizzazione vibroacustica di diversi componenti per la locomotiva dell'ETR500 Politensione. Da tale attività sono scaturite proposte di modifica a tali particolari che sono state poi implementate nei convogli di serie.

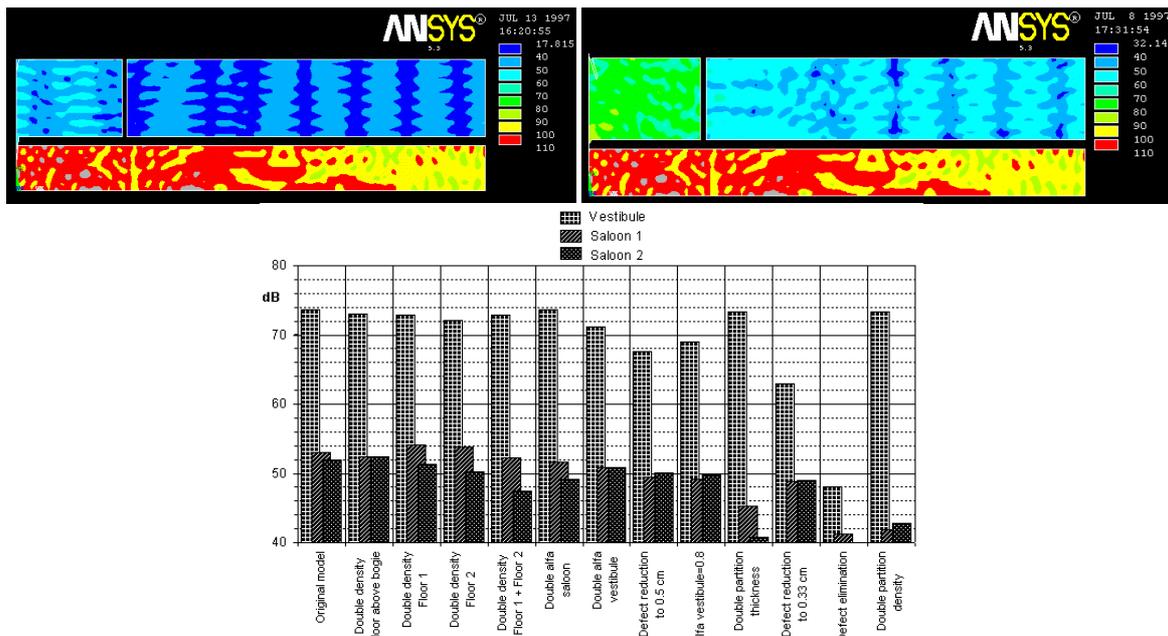


Figura 13. Alcuni risultati ottenuti con la simulazione delle modifiche acustiche e strutturali in una vettura dell'ETR500 con sintesi dell'analisi di sensitività FEM strutturale/acustica.

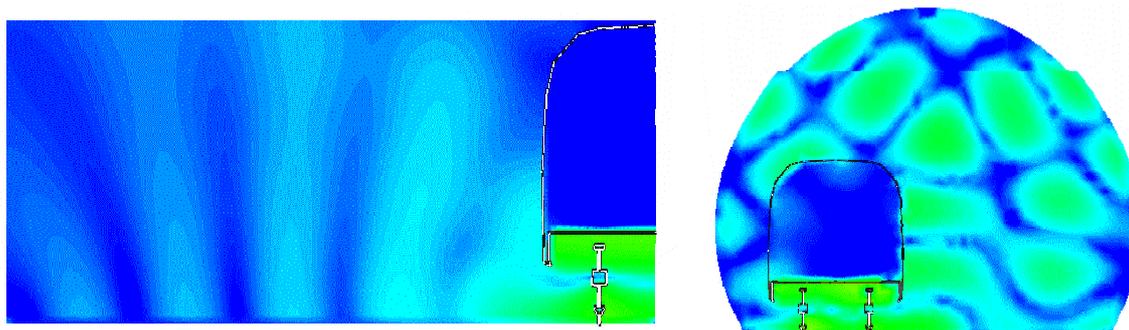


Figura 14. Simulazione BEM del rumore in campo libero e galleria di un ETR500 a 500 Hz.

7. ATTIVITÀ NORMATIVA

Il Comitato Europeo di Normazione (CEN) ha un Comitato Tecnico (TC256) per le applicazioni ferroviarie. Nell'ambito di tale TC operano oltre 30 gruppi di lavoro (WG) che redigono le norme EN su qualunque argomento ferroviario.

Negli anni 2002-03 è stata finalizzata la stesura delle normative EN ISO 3095 e 3381 [19, 20] redatte dal WG03 "Railway Noise" che riguardano, rispettivamente, la misura della rumorosità esterna ed interna durante le prove di tipo di nuovi rotabili. È importante osservare come le normative non fissino limiti ma forniscano esclusivamente la procedura da seguire per l'effettuazione delle norme; i limiti sono fissati da Direttive comunitarie (si veda, ad esempio, la Specifica Tecnica di Interoperabilità per il Materiale Rotabile ad Alta Velocità) o da leggi nazionali.

Il primo degli autori è subentrato alla *convenorship* del gruppo di lavoro nel settembre 2002 ed ha fornito un contributo fondamentale alla finalizzazione dei progetti di norma, raggiungendo un consenso quasi totale fra i partecipanti allo WG e coadiuvando il segretariato del WG (DIN) nella stesura delle Table Of Decisions. Le norme sono state pertanto chiuse, ed il WG03 è stato dichiarato *dormant*.

Nei giorni 28 e 29 ottobre 2003 si terrà a Berlino la riunione generale del TC256 che lancerà i nuovi Work Items ed i nuovi Working Groups; il primo autore ha confermato la sua disponibilità, richiesta dal coordinatore generale del CEN, a fungere da *convenor* per il gruppo che svilupperà le nuove norme sul rumore ferroviario, iniziando da quella che definirà il binario di riferimento per tali attività.

8. CONCLUSIONI

Il presente lavoro ha solo brevemente riassunto la moltitudine di attività svolte dagli autori nel settore del rumore, limitatamente ai treni ad alta velocità, dagli autori.

In generale ci si è sempre posti l'obiettivo della risoluzione di casi pratici, privilegiando quelle soluzioni che avessero immediata applicabilità a livello industriale.

I recenti incarichi internazionali nell'ambito di enti di normazione costituiscono indubbiamente un riconoscimento a livello europeo della competenza maturata attraverso un lungo lavoro che si è snodato per oltre un decennio.

BIBLIOGRAFIA

- [1] A. Bracciali, L. Ciuffi, R. Ciuffi, P. Rissone: "Continuous External Train Noise Measurements through an On-board Device", *Journal of Rail and Rapid Transit* 208, 1994, 23-31.
- [2] A. Bracciali, L. Ciuffi, R. Ciuffi: "Metodo Innovativo per la Misura della Rumorosità Esterna dei Convogli Ferroviari", *Ingegneria Ferroviaria* 6, 1994, 317-332.
- [3] A. Bracciali, P. Rissone: "Analisi Modale Sperimentale di una Sala Portante del Convoglio ETR500", *Ingegneria Ferroviaria* 7/8, 1994, 394-407.
- [4] A. Bracciali, L. Ciuffi, R. Ciuffi: "Calibration of an On-Board Noise Measuring Device by Simultaneous Measurement of Trackside Noise of Three Different Wheelsets for the ETR500 F.S. Train", *Journal of Rail and Rapid Transit* 211, 1997, 41-49.
- [5] A. Bracciali, R. Ciuffi: "Interazione ruota-rotaia, dinamica dei veicoli ferroviari e rumore emesso", 3° Convegno Nazionale CNR-PFT2, Taormina, Italy, 1997.
- [6] A. Bracciali, G. Cascini, R. Ciuffi, P. Rissone: "Structural Design And Acoustic Optimization Of A Railway Bogie Noise Screen", *Proceedings of WCRR '97*, vol. E, 149-156, Firenze, Italy, 1997.
- [7] S. Cervello, A. Bracciali: "Development of a Vibro-Acoustical Methodology for the Design of Low Noise Railway Wheels", *Proceedings of the World Congress on Railway Research, WCRR '97*, vol. E, 157-163, Firenze, Italy, 1997.
- [8] A. Bracciali, C. Pellegrini: "FEM Analysis Of The Acoustics Of A Railway Vehicle And Its Improvements", *Proceedings of the World Congress on Railway Research, WCRR '97*, vol. E, 221-229, Firenze, Italy, 1997.
- [9] A. Bracciali, G. Cascini: "Measurement of Lateral Noise Emission of a Rail with a Custom Device", 6th IWRN, Île des Embiez, France, 1998, 174-183.
- [10] A. Bracciali, G. Cascini: "Sviluppo di un'attrezzatura per la misura del rumore laterale emesso da una rotaia UIC60", *Ingegneria Ferroviaria* 8, 1999, 565-578.
- [11] A. Bracciali, G. Cascini: "Measurement of the Lateral Noise Emission of an UIC 60 Rail with a Custom Device", *Journal of Sound and Vibration* 231(3), 2000, 653-665.
- [12] A. Bracciali, "Meccanismi di generazione e di controllo del rumore ferroviario", *Traffico ed Ambiente*, Trento Convegno Nazionale, 21-25.2.2000, 355-368.

- [13] A. Bracciali, G. Cascini: "Rolling Contact Force Energy Reconstruction", *Journal of Sound and Vibration* 236(3), 2000, 185-192.
- [14] A. Bracciali, M. Bianchi: "Lucchini CRS Syope® damped wheels noise qualification", 13th International Wheelset Congress, Roma, Italy, 17-21.9.2001 (on CD).
- [15] A. Bracciali, F. Piccioli: "Experimental analysis of wheel noise emission as a function of the contact point location", 7th IWRN (International Workshop on Railway Noise), Portland, Maine, USA, 2001 (on CD).
- [16] A. Bracciali: "Damped Wheels as an Efficient Measure to Reduce Railway Noise", *Euronoise 2003*, Napoli (on CD).
- [17] A. Bracciali, F. Piccioli: "Una procedura semplificata per la stima della rumorosità interna ed esterna di un rotabile ferroviario", XXXII Convegno AIAS, Salerno 2003.
- [18] A. Bracciali, F. Piccioli: "Analisi sperimentale delle caratteristiche vibroacustiche di alcuni particolari strutturali di una locomotiva", XXXII Convegno AIAS, Salerno 2003.
- [19] prEN ISO 3095:2001: "Railway applications - Acoustics - Measurement of noise emitted by railbound vehicles".
- [20] prEN ISO 3381:2001: "Railway applications - Acoustics - Measurement of noise inside railbound vehicles".