

## **COLLAUDO ACUSTICO DELLE BARRIERE ANTIRUMORE DELLA LINEA FERROVIARIA ALTA VELOCITÀ MILANO-BOLOGNA**

Francesco Pacini (1), Marco Falossi (1), Giampiero Truglio (2)

1) Studio Progetto Ambiente srl, Torino (TO)

2) Saipem SpA, S. Donato Milanese (MI)

### **1. Premessa**

Il collaudo acustico delle barriere antirumore sulla tratta Alta Velocità (AV) Milano-Bologna è stato normato dal Disciplinare Tecnico FS, edizione 1998, integrato con richieste specifiche formulate da RFI con documento del 19.12.2005.

La metodologia generale per l'esecuzione del collaudo acustico delle barriere antirumore rispondente alla suddetta normativa è stata approvata da Italferr il 24.04.2008.

La procedura di collaudo si compone di una campagna sperimentale di raccolta dei dati fonometrici e di una fase di elaborazione dei risultati per determinare i parametri oggettivi che consentano di rispondere ai seguenti quesiti:

- Conformità delle prestazioni delle barriere acustiche secondo il metodo di accettabilità definitiva ai sensi del Disciplinare Tecnico F.S. – edizione 1998, punto 3.1.b;
- Conformità dei livelli di impatto in corrispondenza dei ricettori esposti alla linea AV rispetto ai limiti di legge assunti a riferimento del PE (DPR 459/98).

La campagna sperimentale per il collaudo delle barriere antirumore è stata effettuata nel periodo compreso tra il 06/07/09 e il 30/10/09 lungo la tratta Milano-Bologna della linea AV Milano-Napoli, a copertura di 11 settimane di rilievi.

L'indagine è stata finalizzata innanzitutto alla caratterizzazione sperimentale delle emissioni acustiche dei convogli ETR500 in transito sulla linea AV. I rilievi di rumore, meteorologici, delle velocità e delle caratteristiche dei convogli in transito sono stati effettuati in corrispondenza di 47 sezioni di misura dietro le barriere oggetto di collaudo e, contemporaneamente, su altrettanti "siti analoghi" prossimi alle barriere antirumore.

La configurazione sperimentale per l'effettuazione delle misure è stata impostata in conformità alle prescrizioni normative attuali, in particolare alla norma internazionale ISO 3095 "Measurement of noise emitted by railbound vehicles" e, per quanto riguarda la legislazione nazionale, al DPR 459/1998 relativo al rumore ferroviario e al DM 16/03/1998 "Tecniche di rilevamento e misurazione dell'inquinamento acustico".

Contemporaneamente alle misure di caratterizzazione della sorgente sono stati effettuati rilievi di rumore in corrispondenza di 87 ricettori esposti ad impatto acustico ad opera dei convogli ferroviari in transito sulla linea AV, presso le barriere oggetto di collaudo. La maggior parte dei ricettori è caratterizzata da destinazione d'uso residenziale, ad eccezione di due edifici industriali, di un laboratorio artigianale e di un esercizio commerciale.

Le misure effettuate in queste condizioni hanno permesso di verificare le prestazioni effettive delle opere di mitigazione.

## **2. Misure di rumore per la caratterizzazione della sorgente e dei ricettori**

Le misure in corrispondenza delle barriere antirumore sono state svolte per stimare la perdita di inserimento del sistema di mitigazioni, quelle sul sito analogo hanno avuto l'obiettivo di caratterizzare le emissioni dei convogli ETR500 in transito sulla linea AV Milano-Bologna.

Sia presso la barriera che sul sito analogo sono stati posizionati 3 punti microfoniche a distanze ed altezze note, come previsto dal disciplinare tecnico FS 1998, ossia:

- P1: distanza 25 m dall'asse del binario esterno, altezza +6.5 m dal p.f.
- P2: distanza 25 m dall'asse del binario esterno, altezza +3.5 m dal p.f.
- P3: distanza 10 m dall'asse del binario esterno, altezza +1.5 m dal p.f.

La disposizione dei microfoni ha preso spunto da quella utilizzata nel campo prove di Figline Valdarno dell'Istituto Sperimentale delle FS, in specifico per il microfono posizionato a 25 metri di distanza dall'interasse del binario esterno e a 3.5 metri di altezza dal piano del ferro (P2), da cui derivano i dati di emissione acustica assunti nelle specifiche di progetto Italferr.

Laddove non è stato possibile rispettare tali posizioni, sia per eccessive altezze dell'infrastruttura, sia per impedimenti a localizzare la postazione per sovrapposizione con opere antropiche o naturali inaccessibili, sono state modificate le posizioni dei microfoni secondo quanto previsto da Italferr.

Talvolta non è stato possibile rispettare le distanze poiché la misura dei 10 m o dei 25 metri cadeva in corrispondenza di altre infrastrutture presenti (autostrada, strada statale...) o elementi naturali inaccessibili (corsi d'acqua, avvallamenti...). In questi casi, anche le distanze sono state adeguate alla fattibilità della misura.

I microfoni, come prescritto dalle tecniche di misura di "pass-by" (ISO 3095 "Measurement of noise emitted by railbound vehicles") e come indicato dal Decreto 16 marzo 1998 "Tecniche di rilevamento e di misurazione dell'inquinamento acustico" sono stati disposti con asse di massima sensibilità rivolto verso la sorgente. Nelle misure sono stati utilizzati microfoni da campo libero secondo la IEC 651, adatti per gamma di frequenza estesa e che presentano una sensibilità costante su tutto il campo di frequenze solo se puntati nella direzione di provenienza dell'energia acustica (incidenza normale).

Le misure relative ai transiti sul binario più vicino alle postazioni microfoniche, in particolare al punto di misura P2, sono le uniche utilizzabili per la caratterizzazione della sorgente poiché si riferiscono ad uno scenario confrontabile direttamente con quello realizzato dall'Istituto Sperimentale delle FS presso il campo prove di Figline Valdarno.

I transiti sul binario più lontano invece, sebbene documentati, non sono conformi ai protocolli di misura indicati dalla ISO 3095 e, quindi, non sono stati considerati per la caratterizzazione della sorgente; sono stati viceversa considerati nella valutazione dei livelli di impatto presso i ricettori, come previsto dalla metodologia utilizzata.

Nelle sezioni di misura sono stati svolti rilievi di rumore al passaggio degli ETR500 rilevando almeno 5 transiti considerati validi per ciascuna direzione di marcia. Per ogni transito è stata determinata la traccia acustica in dB(A) Fast del passaggio del convoglio, comprensiva del transitorio di salita e di discesa e la relativa composizione spettrale in bande di ottava.

In corrispondenza del sito analogo, sono state effettuate misure finalizzate alla valutazione della velocità di transito, mediante rilevazione a doppia telecamera con sistema elettronico di acquisizione cambio immagine e trasmissione dei dati all'unità centrale di registrazione, che consente di ottenere errori di misura inferiori al 2% per velocità di transito prossime a 300 km/h.

Presso la barriera oggetto di collaudo, sono stati rilevati anche i principali parametri meteorologici (velocità e direzione vento, umidità relativa, temperatura) mediante centralina a sensori esterni montati su palo telescopico.

Contemporaneamente alle misure di caratterizzazione delle sorgenti, sono stati effettuati i rilievi di rumore in corrispondenza di 87 ricettori, esposti ad impatto acustico ad opera dei convogli in transito.

Le postazioni di misura sono state localizzate presso i ricettori in conformità alle richieste dell'allegato C del DM 16/03/1998, generalmente ad una distanza di 1 metro dalla facciata più esposta al rumore ferroviario e ad una quota da terra pari a 4 m.

Le misure di rumore sono state effettuate al fine di rilevare il decorso temporale del transito e gli indicatori di rumore utili alle successive verifiche analitiche: SEL,  $L_{eq}$  di transito,  $L_{max}$ .

### 3. Elaborazione dei dati

I dati rilevati in corrispondenza delle sezioni di caratterizzazione delle emissioni sono stati elaborati al fine di caratterizzarne acusticamente ciascun transito utile alle successive valutazioni. Il criterio di analisi è stato impostato sulla base dei contenuti del Decreto 459/1998. L'indicatore di riferimento considerato, ai sensi del suddetto Decreto, è il livello massimo di transito da correlare con i valori di progetto comunicati da Italferr in sede di Progetto Esecutivo.

Oltre alla valutazione dei livelli massimi di transito, è stata effettuata un'analisi dei livelli di esposizione (SEL) e dei livelli equivalenti di transito, nonché l'analisi spettrale in bande d'ottava.

L'evento è stato generalmente definito e visualizzato considerando due minuti di misura centrati sul transito.

Gli elementi acustici medi di valutazione (livello equivalente di transito e SEL) sono stati ricavati considerando il classico taglio a -10 dB(A) dal livello massimo.

I dati rilevati in corrispondenza dei ricettori sono stati elaborati al fine di ricavare i parametri acustici di ciascun transito utili alle successive stime previsionali, sulla base dei contenuti del Decreto 16/03/1998. In particolare è stata eseguita un'analisi dei singoli transiti tale da comprendere l'intero evento. Per ogni transito, inoltre, è stato eseguito il confronto tra il livello  $L_{max}$  rilevato ed il livello di fondo, per verificare che quest'ultimo fosse di almeno 10 dB(A) inferiore rispetto al primo.

Infine sono stati estratti tutti i transiti dell'ETR500 e sono stati mascherati gli eventi anomali presenti all'interno dell'intervallo di interesse.

### 4. Stima delle emissioni acustiche determinate dai convogli ETR-500

I dati acquisiti nel corso delle misure sui convogli ferroviari ETR500 attualmente in esercizio sulla linea AV Milano-Bologna hanno permesso di formulare una serie di va-

lutazioni utili al confronto con i dati prestazionali posti a base della progettazione acustica delle barriere antirumore, riportati in Tabella 1.

Tabella 1 – Caratteristiche dei convogli previsti dal progetto acustico

Caratteristiche convogli			Livelli $L_{max}$ [dB]								
Tipo	L [m]	V [km/h]	dB(A)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
ETR500	328	300	91.0	91.0	81.3	80.9	79.5	82.2	87.9	81.9	69.6
TNP	439	180	90.0	81.0	74.4	77.6	82.3	84.8	85.6	79.9	71.7
Merci	450	160	89.0	81.0	79.0	79.9	78.3	80.2	85.6	81.2	70.5

In questa fase sono state selezionate solo le postazioni microfoniche posizionate a 25 m di distanza dal binario più vicino e + 3.5 m di altezza sul piano del ferro, per confrontare il dato progettuale  $L_{max}$ , pari a 91.0 dB(A) per i convogli ETR500, con i valori rilevati. Si è ritenuto opportuno scartare, dall'insieme delle misure, i valori esterni alle curve a  $\pm 2$  deviazioni standard dalla curva di migliore interpolazione. La valutazione finale dei parametri di caratterizzazione si basa su 142 transiti ferroviari.

In Figura 1 sono riportati in forma grafica i valori di  $L_{max}$  in funzione della velocità.

Nella stessa figura sono inoltre riportati la curva logaritmica di migliore approssimazione (linea nera) e le curve limite che si collocano a  $\pm 2$  deviazioni standard dalla stessa (linee azzurre). Con linea rossa è stata riportata la curva relativa alla legge cubica di variazione del livello massimo in funzione della velocità, a partire dal dato di input progettuale (91.0 dB(A)). Le stesse valutazioni sono state effettuate per il SEL.

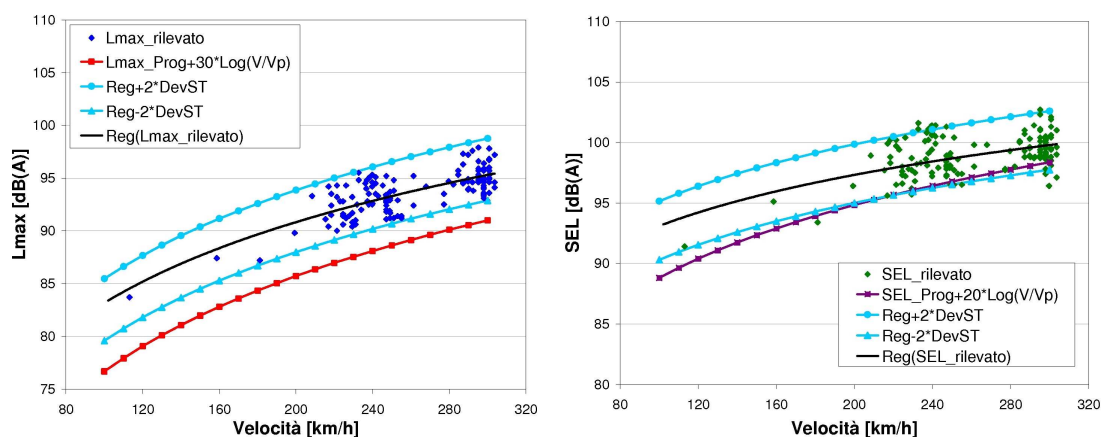


Figura 1 – Livelli rilevati in funzione della velocità (sinistra  $L_{max}$ , destra SEL)

Utilizzando la legge cubica di variazione del livello  $L_{max}$  in funzione della velocità si è proceduto a normalizzare i 142 transiti così individuati alla velocità di 300 km/h, corrispondente al dato della specifica progettuale. La media dei valori calcolati risulta pari a 95.6 dB(A), da confrontarsi con il valore di 91.0 dB(A) assunto alla base del progetto acustico.

Pertanto, in fase di esercizio della linea AV, è stata riscontrata un'emissione acustica superiore di 4.6 dB(A) rispetto ai dati di progetto.

Seguendo la stessa procedura con il parametro SEL, è stato calcolato un valore medio alla velocità di 300 km/h, che è risultato essere pari a 100.2 dB(A).

## 5. Stima dei Livelli Equivalenti normalizzati alle emissioni di progetto

I dati rilevati in corrispondenza dei ricettori sono stati utilizzati per stimare i livelli equivalenti diurni e notturni che si verificheranno nelle condizioni di esercizio effettivo della linea AV Milano-Bologna, con riferimento allo scenario di traffico posto a base della progettazione acustica delle barriere antirumore.

La normalizzazione al modello di esercizio dei livelli di rumore rilevati sui ricettori durante il passaggio dei convogli è stata svolta con una matrice di calcolo che si basa sui dati di emissione che vengono utilizzati per effettuare la trasposizione sui dati di esercizio progettuale.

La complessità di questa fase è riconducibile alle molteplici condizioni che si riscontrano nell'ambito del modello di esercizio della linea. Esso prevede, infatti, la presenza di quattro itinerari diurni per convogli di tipo ETR500, due itinerari notturni per i treni notturni a lunga percorrenza e un itinerario notturno per i treni merci AV differenziati in funzione della progressiva chilometrica (l'intera linea risulta suddivisa in 45 segmenti aventi ciascuno un modello di traffico differente) e del binario.

Dai dati ottenuti in fase di monitoraggio si ottengono, quindi, i livelli di rumore in fase di esercizio come valori medi sui transiti lato binario vicino, ( $L_{\max}^*$ ,  $v^*$ ,  $SEL_{ETR500}$ ).

La normalizzazione del livello massimo rispetto alla velocità di esercizio, variabile in funzione della tratta, viene eseguita utilizzando la legge cubica.

Il primo passaggio per la valutazione dei SEL diurni e notturni sui ricettori è il calcolo del SEL di esercizio,  $SEL_e$ , in funzione del tempo di esposizione  $T_e$  valutato alla distanza  $d$ , pari a 25 m in base alla velocità di esercizio.

$$(1) \quad T_e = \frac{L}{V_e} + \frac{6 \cdot d}{100} \quad [s]$$

$$(2) \quad SEL_{e,ETR500} = L_{\max e} + 10 \log(T_e) \quad [dB]$$

Si procede quindi con il calcolo dei SEL di transito, alla distanza di riferimento di 25 m dal binario vicino della AV, per tutte le combinazioni treno/velocità presenti nel modello di esercizio a partire dai dati di velocità, lunghezza del convoglio e dai livelli massimi indicati nella specifica progettuale Italferr.

Per ciascuna combinazione treno/velocità presente nel modello di esercizio è necessario, inoltre, determinare degli "acoustical exchange ratio",  $k$ , o "equivalenti acustici", mediante espressioni del tipo:

$$(3) \quad 1/k_i = 10^{(SEL_{e,i}/10)} / 10^{(SEL_i/10)} \quad [-]$$

dove:

$i$  è l' $i$ -esimo tipo di convoglio che transita sulla linea.

In sostanza si riconduce tutto l'esercizio ferroviario a un numero fittizio diurno " $N_d$ " e notturno " $N_n$ " di transiti ETR500 alla velocità di esercizio.

L'analisi delle tracce acustiche degli ETR500, ricavate dai rilievi sui ricettori, permette di calcolare il SEL medio,  $SEL_R$ , alla velocità di transito,  $v^*$ . In questo modo è quindi possibile calcolare il SEL alla velocità di esercizio,  $SEL_{R,ETR500}$ .

Infine, in corrispondenza del ricettore, possono essere stimati il  $SEL_R(6-22)$  e il  $SEL_R(22-6)$  in base al  $SEL_{R,ETR500}$  e al numero di transiti equivalenti  $N_d$  e  $N_n$  di ETR500, evinti dalla (3), mediante la formula:

$$(4) \quad SEL_R(TR) = SEL_{R,ETR500} + 10 \log\left(\sum_i k_i \cdot n_i\right) = SEL_{R,ETR500} + 10 \log(N(TR)) \quad [\text{dB}]$$

dove:

$TR$  è il periodo di riferimento diurno (6-22), notturno (22-6);

$i$  è l' $i$ -esimo tipo di convoglio che transita sulla linea nel tempo di riferimento  $TR$ .

Partendo da questi valori, si possono calcolare i valori di  $L_{eq}(6-22)$  e  $L_{eq}(22-6)$ , considerando la durata dei periodi di riferimento diurno e notturno. L'ultimo passo consiste nel confronto dei valori ottenuti con gli obiettivi di mitigazione individuati in sede progettuale.

I risultati della procedura di calcolo applicata agli 87 ricettori indagati lungo la tratta AV evidenziano che, in corrispondenza di tre ricettori, si riscontrano lievi esuberanti rispetto agli obiettivi considerati in sede progettuale, limitatamente al solo periodo notturno. Tali esuberanti sono peraltro coerenti con le valutazioni svolte in sede di PE.

## 6. Stima della perdita di inserzione delle barriere antirumore

I dati rilevati presso le sezioni di misura localizzate in corrispondenza della barriera e del sito analogo sono stati utilizzati per stimare la perdita di inserzione delle barriere antirumore indagate, in coerenza con quanto previsto dal punto 3.1b del Disciplinare Tecnico FS, edizione 1998.

Per i convogli rilevati ETR500 si è effettuata la differenza, per ciascuna barriera indagata, tra quanto misurato nelle due sezioni: gli scostamenti delle emissioni rispetto al dato progettuale si elidono, infatti, nell'esecuzione della differenza tra misure in corrispondenza della barriera e del sito analogo. Per i convogli non rilevati (TNP e merci) è stato invece necessario considerare una correzione spettrale: in sostanza quanto rilevato per l'ETR500 è stato corretto in base alle differenze tra gli spettri di progetto ETR500-TNP e ETR500-merci rispettivamente.

I risultati dei calcoli consentono di stimare, per ciascun tipo di convoglio previsto in esercizio e per ciascun binario, una perdita per inserzione da attribuire alla barriera indagata. Moltiplicando ciascuno di questi valori per il rispettivo numero di transiti previsti e dividendo per il totale dei transiti si ottiene la prestazione complessiva della barriera. Come già detto non in tutti i casi è stato possibile posizionare i punti di misura come da indicazioni del Disciplinare Tecnico di riferimento. Ai fini di questo studio vengono, pertanto, presi in considerazione solo i punti posti a 25 m dal binario vicino e a 3.5 m di altezza sul piano del ferro. I risultati ottenuti dalle attività di monitoraggio in termini di prestazione assoluta della barriera evidenziano una chiara dipendenza delle prestazioni rispetto all'altezza dell'intervento, come peraltro auspicabile. Come mostrato in Figura 2, per due casi si può sottolineare una prestazione decisamente elevata: i punti corrispondono alla barriera 46 - legno e alla barriera 41 - RB06.

Il Disciplinare Tecnico FS (punto 3.1b) prevede la determinazione dei valori di attenuazione globale, partendo da quanto rilevato nelle indagini di campo, e il successivo confronto di tali valori con quanto risultante dagli elaborati di progetto.

In Figura 2 è riportato il confronto tra le perdite di inserzione calcolate in base ai dati rilevati e i risultati di specifiche simulazioni eseguite con le stesse modalità utilizzate in sede di PE con il modello previsionale Semibel.

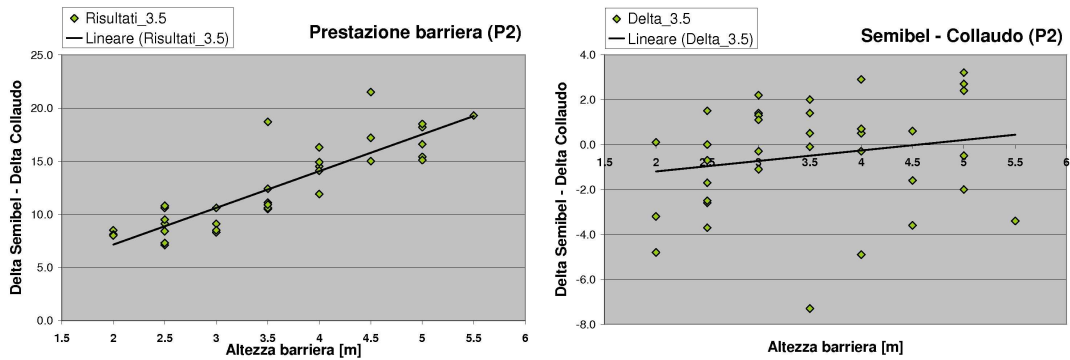


Figura 2 – Prestazioni barriere (sinistra) e confronto prestazioni (destra)

È necessario sottolineare che si giungono a confrontare i risultati di due metodi di stima (uno basato su misure e uno su calcoli), ciascuno affetto dal proprio errore. Considerando la condizione più sfavorevole nella quale i due errori si sommano, pare ragionevole considerare un margine di accettabilità, intesa come massimo scostamento tra dato previsto e dato misurato pari a 4 dB(A). In nessuna situazione la differenza tra valori previsionali e di collaudo supera questo limite (Fig. 2). Si può invece notare come, in termini di differenze negative che indicano una migliore prestazione risultante dalle indagini di campo rispetto a quanto previsto dal modello di calcolo, si registrano valori che, in almeno tre casi, superano 4 dB(A). Il valore di maggior scostamento si riferisce alla barriera 46 (legno).

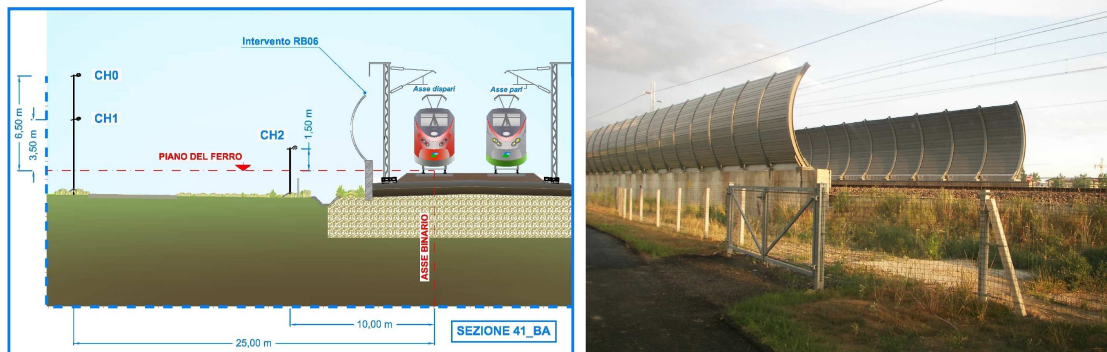


Figura 3 – Barriera RB06

A commento dei risultati per queste due barriere è opportuno considerare le tipologie e modalità di installazione. La prima è infatti posta alla sommità di una duna, portando quindi ad un aumento dell'altezza effettiva della mitigazione rispetto al piano ferro. Nel secondo caso, invece, la barriera presenta un profilo curvilineo a semiguscio, come mostrato in Figura 3.

Questo tipo di configurazione annulla la riduzione di prestazioni che si determina tipicamente nelle installazioni su entrambi i lati e consente invece di ottenere un significativo incremento prestazionale rispetto alla soluzione classica.

## 7. Conclusioni

Nel corso del collaudo della linea AV Milano-Bologna è stata definita una metodologia per l'indagine sperimentale e la successiva elaborazione ed interpretazione dei ri-

sultati coerente con quanto previsto dal Disciplinare Tecnico FS e dalla normativa nazionale vigente.

Le indagini sperimentali sono state innanzitutto finalizzate alla caratterizzazione delle emissioni acustiche dei convogli ETR500 in transito. Contemporaneamente sono stati effettuati rilievi di rumore presso i ricettori difesi dalle mitigazioni oggetto di collaudo.

L'analisi dei dati misurati e la successiva normalizzazione hanno permesso di riportare il dato sperimentale alle condizioni di progetto, in relazione al programma di esercizio, alla velocità ed alla lunghezza del treno previste.

Le emissioni rilevate in termini di livello massimo  $L_{max}$  superano di circa 4.5 dB(A) i valori di progetto a pari velocità.

A valle della normalizzazione dei risultati, la procedura di calcolo applicata a 87 ricettori ha evidenziato, in corrispondenza di tre ricettori, lievi esuberi rispetto agli obiettivi considerati in sede progettuale limitatamente al solo periodo notturno, coerenti con le previsioni di PE.

Il confronto tra le perdite di inserzione calcolate sulla base dei rilievi strumentali e quelle ottenute mediante simulazioni numeriche effettuate con la stessa metodologia del PE ha evidenziato scostamenti massimi inferiori ai 4 dB(A) assunti come margine di errore complessivo nel confronto dei due metodi di stima utilizzati. Le barriere risultano, quindi, conformi rispetto alle previsioni progettuali.

Nel complesso, dunque, tutte le 47 barriere acustiche oggetto di studio hanno dato esito di collaudo positivo, sia in merito alle prestazioni di perdita di inserzione che di conseguimento degli obiettivi di mitigazione previsti in corrispondenza dei ricettori.

## 8. Bibliografia

- [1] Ferrovie dello Stato, Disciplinare Tecnico, *Barriere antirumore per impieghi ferroviari*, dicembre 1998
- [2] ISO 3095:2005, *Railway applications - Acoustics - Measurement of noise emitted by railbound vehicles*
- [3] IEC n. 651 del 1979 e n. 804 del 1985, *International Electrotechnical Commission*
- [4] Decreto del Presidente della Repubblica 18 novembre 1998, n. 459, *Regolamento recante norme di esecuzione dell'articolo 11 della legge 26 ottobre 1995, n. 447, in materia di inquinamento acustico derivante da traffico ferroviario*, Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, Serie generale n. 2, 4/01/1999
- [5] Decreto Ministeriale 16 marzo 1998, *Tecniche di rilevamento e di misurazione dell'inquinamento acustico*, Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, n. 76, 1/04/1998
- [6] Decreto del Ministero dell'Ambiente 29 novembre 2000, *Criteri per la predisposizione, da parte delle società e degli enti gestori dei servizi pubblici di trasporto o delle relative infrastrutture, dei piani degli interventi di contenimento e abbattimento del rumore*, Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, n. 285, 6/12/2000