Metodo innovativo per la misura della rumorosità esterna dei convogli ferroviari

Dott. Ing. Andrea Bracciali (*) – Dott. Ing. Laura Ciuffi (**) – Prof. Ing. Renzo Ciuffi (*)

SOMMARIO – Nel presente lavoro vengono analizzate le caratteristiche nel dominio del tempo e della frequenza del rumore prodotto a diverse velocità da un convoglio ferroviario. Si sono compiute indagini su tre tipi di rotabili con velocità fino a 300 km/h utilizzando, per la rilevazione del rumore esterno, una attrezzatura solidale alla boccola opportunamente tarata in laboratorio. I risultati ottenuti sono in completo accordo con le rilevazioni effettuate a terra e consentono una loro drastica limitazione con evidenti vantaggi sul costo della sperimentazione. Si mostrano anche alcuni risultati preliminari riguardanti la simulazione del rumore a terra a distanza arbitraria dal binario una volta noto il rumore misurato in corrispondenza della boccola.

1. Introduzione

Il rumore emesso da un convoglio ferroviario aumenta con la velocità con legge ancor oggi non perfettamente definita ed in ogni caso dipendente da molti fattori. La genesi di questo rumore è dovuta, secondo parere unanime dei vari ricercatori, principalmente alle interazioni ruota-rotaia-ballast per le alte velocità fino a circa 300 km/h, mentre al di sopra sembra assumere maggiore importanza la componente aerodinamica. Il rumore prodotto dal pantografo, trattandosi ovviamente di treni a trazione elettrica, pare avere un'importanza minore, sia per il campo di frequenze sia per la limitata potenza sonora emessa derivante da una superficie che si vuole mantenere piccola per motivi di resistenza aerodinamica e di dinamica della captazione; secondo recenti studi compiuti in Giappone, esso assume una certa importanza solo ove siano già state attuate opportune misure per la schermatura del rumore di rotolamento, quali l'impiego di barriere basse.

Il problema del rumore emesso dai convogli ferroviari è divenuto di fondamentale importanza da quando, in concomitanza con l'introduzione di trasporti di massa ad alta velocità, è aumentata la sensibilità della collettività per i vari problemi di inquinamento, non ultimo quello acustico. I limiti massimi di esposizione al rumore generato da sorgenti fisse, particolarmente restrittivi, sono stabiliti in Italia dal D.P.C.M. del 1° Marzo 1991 [1], mentre per il momento non sono state emanate direttive per il rumore emesso da sorgenti mobili (tipicamente i veicoli di vario genere). Una esauriente trattazione riguardante l'eventuale estensione al settore ferroviario e le relative problematiche è effettuata in [2].

I rilievi condotti dalle principali amministrazioni ferroviarie (si veda ad es. [5]) in postazioni fisse a distanze prestabilite dal binario hanno evidenziato un rumore assai elevato alle alte velocità, sicuramente al di sopra dei limiti del citato D.P.C.M. Rilievi di questo genere forniscono un andamento temporale del rumore che usualmente evidenzia la maggiore emissività delle locomotive rispetto alle vetture mentre le successive analisi spettrali mostrano componenti in frequenza predominanti nell'intervallo 500 Hz÷4 kHz.

Sebbene le misure di cui sopra soddisfino completamente quando esse debbano essere effettuate per controllare l'esposizione al rumore di un sito abitativo, esse non esauriscono la problematica relativa al rumore in quanto:

- ogni corsa prova risulta fornire misure valide per la sola velocità di passaggio; volendo tracciare un andamento dell'emissione acustica in funzione della velocità occorre effettuare numerose corse prova con costi evidentemente molto elevati;
- lo studio dell'influenza di varie tipologie di armamento (ballast, piastre in c.a.p.) o di diverse condizioni di linea (rilevato, trincea, viadotto, ...) ha costi proibitivi;
- l'attendibilità della misura alle basse frequenze è ridotta dato che il tempo necessario per l'acquisizione dei dati aumenta al diminuire delle frequenze e che un convoglio ETR500 di prova completo, composto da 2 locomotive e 6 vetture, transita di fronte a una postazione fissa in circa 2.5 s a 300 km/h. All'interno di questo pur breve lasso di tempo il rumore non è costante ma, specialmente a piccole distanze dal binario, contiene picchi e valli con differenze di oltre 10 dB, riducendo ulteriormente l'affidabilità delle misure fonometriche;
- non si possono avere informazioni a livello di monitoraggio in quanto è praticamente impossibile, per evidenti motivi di costo, osservare nel lungo periodo l'influenza, che pure è notevole, del progredire dell'usura delle superfici di contatto sul rumore emesso;
- la verifica di eventuali modifiche del comportamento acustico-vibrazionale del binario e della ruota è fortemente condizionata dagli elevati costi di misura; inoltre non è semplice, con i sistemi tradizionali, evidenziare l'influenza di certi parametri meccanici fondamentali (rugosità e/o forma della superficie di rotolamento, forma del centro ruota, numero e posizione dei dischi freno, ecc.) su un singolo asse, dato che un carrello transita davanti ad una postazione fissa in circa 30 ms.

(*) Università degli Studi di Firenze – Dipartimento di Meccanica e Tecnologie Industriali.

(**) Libero professionista.

Le *FS*, particolarmente sensibili al problema del rumore, hanno pertanto avviato un programma di collaborazione con l'Università degli Studi di Firenze al fine di studiare metodologie innovative per l'ottenimento di dati più numerosi ed affidabili e procedere quindi a studi successivi sui mezzi ottimali per la riduzione dell'impatto ambientale da rumore.

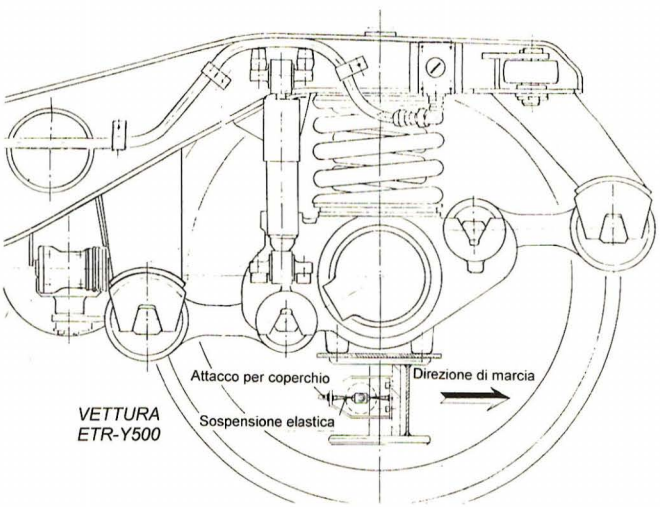
Il presente lavoro, frutto di questa collaborazione, illustra una nuova metodologia, basata su un approccio diverso da quello sopra illustrato, che consiste nel misurare il rumore emesso da una singola ruota in modo continuo, ossia in ogni punto della linea e ad ogni velocità, permettendo di valutare con minima spesa l'effetto di eventuali modifiche apportate alla sala e delle diverse condizioni di usura delle superfici a contatto. Studi e valutazioni preliminari hanno portato alla definizione di specifiche di progetto per la realizzazione di una nuova attrezzatura destinata ad alloggiare al suo interno un microfono di misura da collocare il più possibile vicino al punto di genesi del rumore, cioè sulla boccola di una sala di un qualsiasi rotabile. Questa nuova attrezzatura è stata progettata ed ottimizzata, quindi realizzata, verificata e tarata in laboratorio; i risultati qui esposti, ottenuti dall'elaborazione dei dati raccolti durante numerose campagne prova in linea, sono particolarmente confortanti e inducono ad intensificare gli studi in questa direzione.

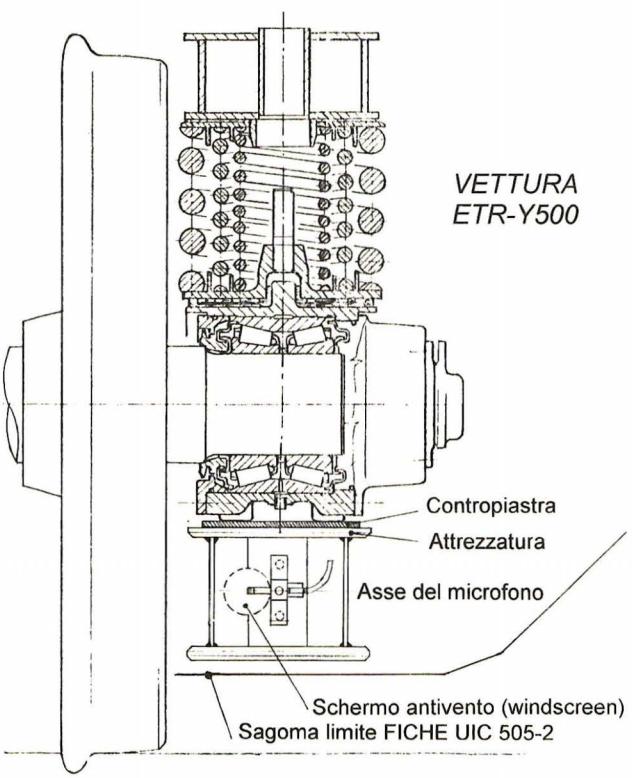
Ci preme sottolineare che questa attrezzatura non pretende di sostituire la metodologia attuale di misura del rumore ma si propone di integrarla per fornire maggiori informazioni ingegneristiche al progettista di materiale rotabile ed all'Ente committente; essa consentirà valutazioni veloci ed accurate delle soluzioni proposte ma l'ultima parola, trattandosi di rumore emesso verso l'ambiente, spetterà sempre alla misura classica a terra cui competerà comunque la valutazione dell'efficacia di strutture fisse, quali le barriere antirumore.

2. L'attrezzatura per la misura del rumore

Poiché le specifiche, la procedura di progettazione e le verifiche di laboratorio ed in linea della nuova attrezzatura sono descritte estensivamente in [3], si riportano qui solo alcune considerazioni fondamentali per la comprensione del presente lavoro.

L'attrezzatura sviluppata (fig. 2.1) ha forma semplice, è di facile spostabilità ed orientabilità, influenza poco il campo aerodinamico, alloggia ampiamente un microfono di misura pur risultando poco ingombrante, è assai resistente per cui protegge il trasduttore da urti con piccoli corpi esterni, può essere protetta





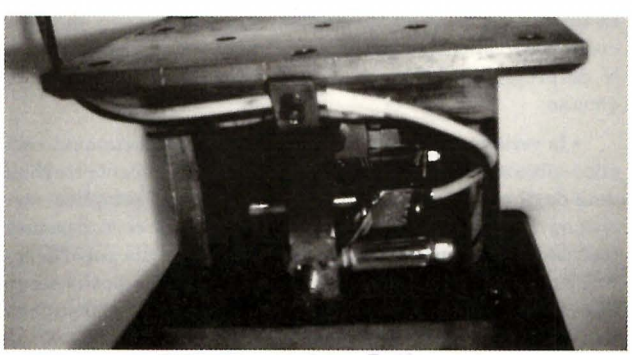


Fig. 2.1 – Schema del montaggio (in alto) e foto dell'attrezzatura pronta pe ril montaggio sotto la boccola (in basso). I cavi del microfono e degli accelerometri sono interamente alloggiati all'interno della scia prodotta dalla parte semicilindrica.

per la marcia a senso inverso, è smontabile e montabile assai rapidamente ed ha un costo ridottissimo. Essa è costituita da un semicilindro in acciaio saldato fra due piastre, destinate a creare un flusso virtualmente bidimensionale attorno alla intera struttura, di buona penetrazione aerodinamica; la piastra superiore ha una doppia serie di fori che consentono il suo fissaggio, in diverse posizioni, ad una contropiastra specifica per ogni boccola. All'interno dell'attrezzatura è sospeso elasticamente ed ortogonalmente al centro ruota un microfono di misura con relativa protezione sferica antivento in poliuretano a celle aperte. La sospensione elastica, opportunamente tarata, consente di filtrare le vibrazioni della boccola, di avere frequenze proprie al di fuori del campo acustico e cedevolezza sufficientemente bassa. Il supporto del microfono è orientabile, è disegnato per consentire un facile smontaggio del solo trasduttore ed è equipaggiabile con accelerometri per tenere sotto controllo la trasmissibilità delle vibrazioni. È possibile applicare con facilità una protezione per la marcia in direzione opposta a quella di misura.

L'attrezzatura è stata tarata in laboratorio e con l'ausilio di prove in linea, per tener conto delle quattro possibili fonti di disturbo:

- influenza del vento, derivante da turbolenze e/o da rumore autogenerato dalla struttura;
- influenza acustica dell'attrezzatura sul rumore proveniente dall'esterno (formazione di onde stazionarie all'interno dell'attrezzatura con picchi e valli pronunciati nello spettro in frequenza);
- influenza del rumore generato dalle superfici dell'attrezzatura che vibrano durante la marcia del treno;
- influenza diretta delle vibrazioni sul microfono.

Non si ritiene opportuno, e si rimanda il lettore al già citato lavoro [3], descrivere come queste influenze sono state considerate e minimizzate; si tenga comunque presente che prove di trasmissibilità, in galleria del vento, di rumore generato dalle superfici vibranti con opportune eccitazioni e di vibrazione pura del microfono hanno evidenziato un errore globale di circa -0,7 dB(A) con errori nelle singole bande di frequenza limitati a ±1 dB(A). Queste tarature sono state effettuate in 1/24 di ottava, quindi con risoluzione in frequenza assai superiore a quella normalmente utilizzata.

3. Conduzione delle prove in linea ed elaborazione dei segnali registrati

Le corse prova sono state effettuate nel periodo maggio-luglio 1993 nella tratta di Direttissima Firenze-Chiusi; il tratto 1° Bivio Arezzo Nord-1° Bivio Valdarno Nord è percorribile a 300 km/h; l'armamento è di tipo tradizionale, posato su ballast, con traverse in c.l.s., lunghe rotaie saldate UNI 60, ad eccezione del viadotto e della galleria Terranova-Le Ville in cui si hanno piattaforme in c.a.p. continue. I mezzi su cui la sperimentazione è stata condotta sono stati in ordine cronologico:

- la vettura misure elettriche dell'ETR 500, con ruote cerchiate (diametro di rotolamento 890 mm, peso per asse 11t, fig. 3.6 (a)), centri ruota a doppia ondulazione (sei lobi) e frenatura su tre dischi, in composizione standard con due motrici E404 ed altre 5 vetture (figg. 3.1 e 3.2);
- la vettura Misure Elettriche del Centro di Dinamica Sperimentale di Firenze, con carrelli F85 equipaggiati con ruote monoblocco (diametro di rotolamento 940 mm, peso per asse 13.5t), centri ruota a semplice ondulazione e frenatura su due dischi, in composizione ad un convoglio di prova di 6 vetture inquadrate fra la E402.002 e la E402.005 (fig. 3.3 e 3.4);
- la locomotiva E404.001 dell'ETR 500, con ruote monoblocco (diametro di rotolamento 1100 mm, peso per asse 18.5t, fig. 3.6 (b)), centri ruota a semplice ondulazione e frenatura a ceppi sul cerchione (fig. 3.5).

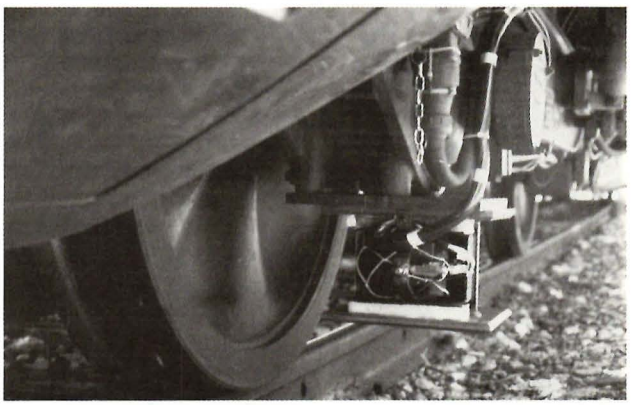


Fig. 3.1 – Applicazione dell'attrezzatura alla boccola della vettura dell'ETR500: è visibile la contropiastra di adattamento fissata alle appendici del corpo boccola. I cavi cono stati inguainati in un tubo in plastica per evitare i fenomeni di triboelettricità dannosi per le misure con accelerometri piezoelettrici. La posizione del microfono fa sì che il suono proveniente dalla ruota adiacente sia schermato dalla protezione semicilindrica.

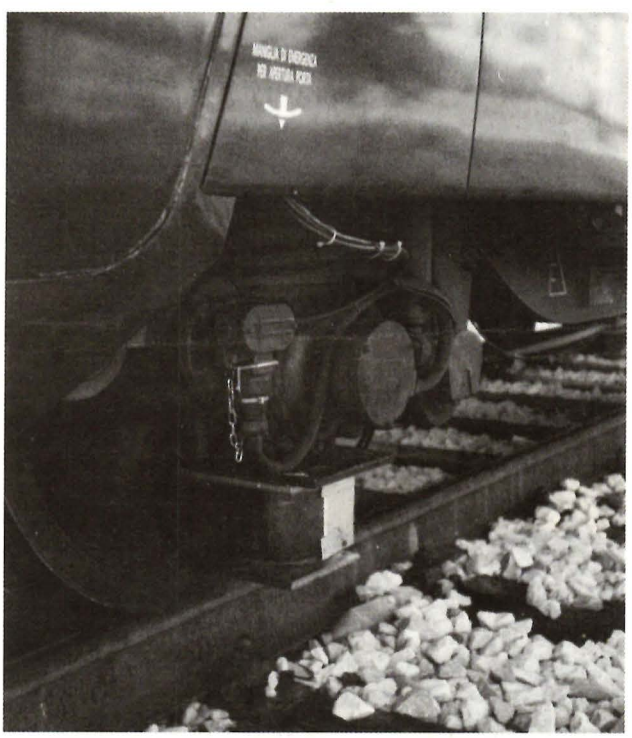


Fig. 3.2 – Vista dell'attrezzatura applicata alla boccola della vettura dell'ETR500 dal lato direzione di misura: è visibile il coperchio di protezione

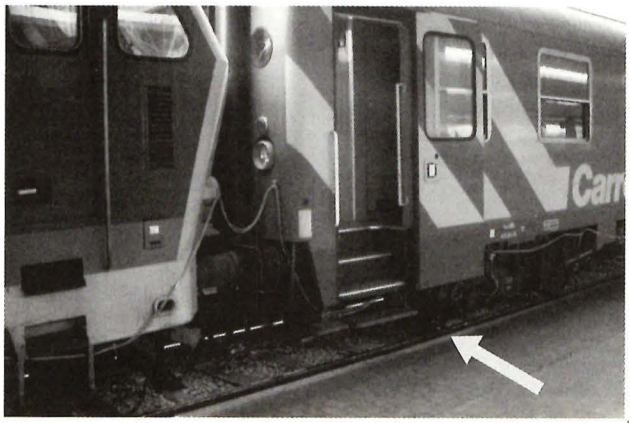


Fig. 3.3 – Convoglio di prova ed indicazione del punto di montaggio dell'attrezzatura (F85). Si noti la grande distanza dal primo asse della locomotiva E402.

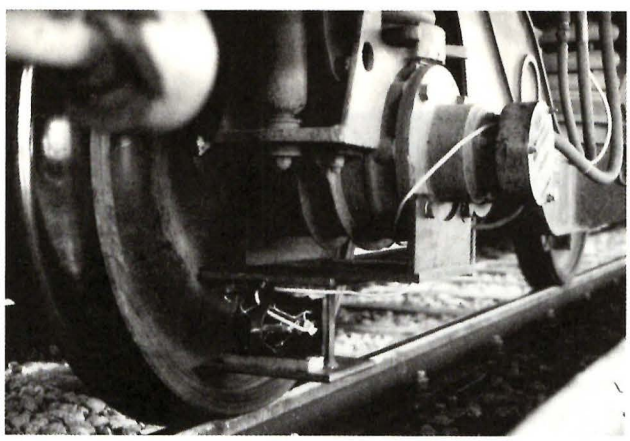


Fig. 3.4 – Montaggio dell'attrezzatura sotto il carrello F85: è visibile la struttura di adattamento, fissata ai coperchi della boccola, necessaria in quanto questo carrello è sprovvisto di appendici utilizzabili per il fissaggio di una semplice piastra.

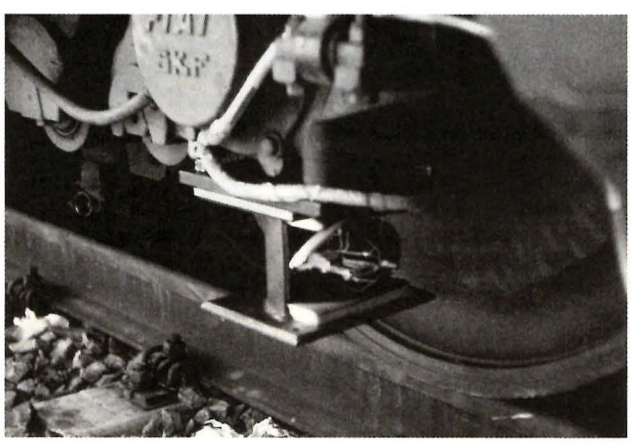


Fig. 3.5 – Montaggio dell'attrezzatura sotto la boccola della locomotiva E404.001. La struttura del corpo boccola è analoga a quella della vettura dell'ETR500. In questo caso non si sono potute compiere misure accelerometriche causa elevati disturbi elettromagnetici dovuti all'elettronica di trazione.

Ovviamente il montaggio su ogni rotabile è risultato diverso dagli altri anche se, data la modularità della struttura, esso è risultato sempre assai semplice. L'altezza del microfono dal piano del ferro è risultata sempre intorno a 140 mm mentre la distanza dalla vela della ruota era di circa 140 mm per vettura e motrice dell'ETR 500 e di 70 mm per il carrello F85.

Le misure sono state compiute con velocità fino a 300 km/h misurando la pressione sonora e, per la sola vettura dell'ETR 500, anche le accelerazioni verticali (Z) e trasversali (Y) della boccola, ritenendo superflue quelle longitudinali (X).

La catena di misura per l'acquisizione dei dati in linea è consistita in (fig. 3.7):

- accelerometri piezoelettrici con relativi condizionatori/amplificatori di carica;
- microfono di misura direzionale a condensatore a bassa sensibilità con relativo alimentatore microfonico;
- registratore analogico a 16 canali.

Il microfono è stato scelto in modo da dare dei segnali tali da poter essere inviati direttamente al registratore analogico, che è in grado di accettare fino a 20 V in ingresso. Il microfono scelto, a bassa sensibilità, consente di registrare direttamente su nastro pressioni sonore di circa 160 dB, valore che non è stato raggiunto durante le prove in linea. Microfoni di tipo generale avrebbero viceversa richiesto attenuatori montati sul microfono stesso di ingombro non compatibile con le dimensioni finali dell'attrezzatura.

I segnali registrati sono stati analizzati con un analizzatore bicanale in banda fine e con un analizzatore bicanale in bande d'ottava (fig. 3.8) effettuando con quest'ultimo 30 medie per ogni misura usando una pesatura esponenziale con intervallo di confidenza di 1 dB; come compromesso fra velocità e accuratezza si sono usati normalmente i 1/12 di ottava.

I valori ottenuti per misure in condizioni simili sono stati mediati. Purtroppo per motivi di esercizio i vari convogli si portavano rapidamente alle velocità "canoniche" di prova comprese fra 200 e 300 km/h; i valori alle velocità più basse sono spesso stati misurati durante gli avviamenti dopo soste in piena linea, pertanto con permanenza assai ridotta in termini di tempo.

I segnali di pressione sonora sono stati elaborati analizzando:

- la ripetibilità della singola misura, essendo l'inizio di essa non sincronizzato con il nastro ma manualmente con la traccia audio (quindi relativamente dipendente dall'operatore); l'errore commesso è risultato dell'ordine di 0.5 dB;
- la dispersione dei valori misurati in condizioni simili (uguali velocità, tipo di ballast, all'aperto, ...);
- la bontà del segnale acustico mediante ascolto diretto riproducendo il rumore con un altoparlante.

L'ascolto diretto del rumore misurato è assai regolare evidenziando con precisione fenomeni puntuali (ingresso in galleria, incroci, giunti nel binario, deviatoi) a tutte le velocità, escludendo quindi ogni forma di saturazione del microfono. Misure di tentativo effettuate dopo che il treno aveva invertito la direzione di marcia senza aver ruotato l'attrezzatura hanno evidenziato invece, nonostante la presenza di un coperchio di protezione, fenomeni di saturazione tali da invalidare la misura stessa.

Per quanto riguarda l'influenza delle altre ruote adiacenti si ritiene che il loro effetto sia trascurabile. Infatti l'altra ruota della sala sulla cui boccola è applicata l'attrezzatura è completamente

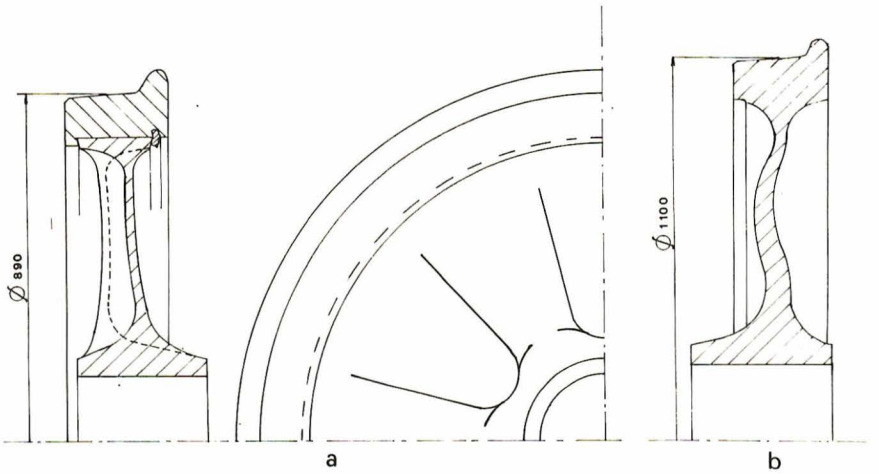


Fig. 3.6 – Vista e sezione della ruota della vettura (a) e sezione della ruota della motrice dell'ETR500 (b).

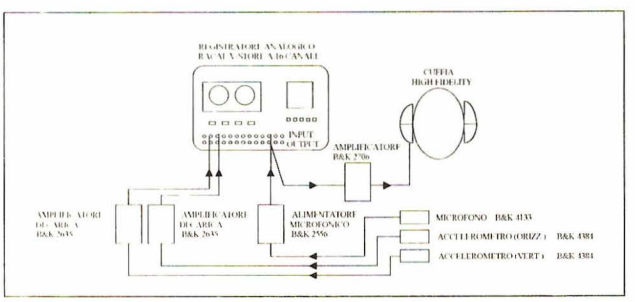


Fig. 3.7 – Catena di misura per l'acquisizione dei dati a bordo dei treni.

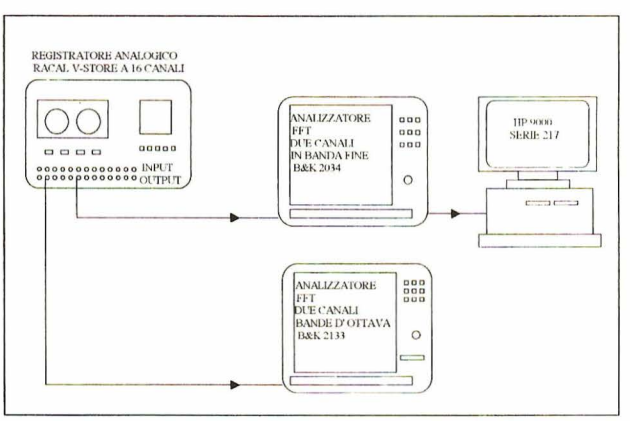


Fig. 3.8 – Catena di misura per l'elaborazione dei segnali registrati in linea.

mascherata dalla ruota di fronte al microfono; per quanto concerne poi le ruote adiacenti esse dovrebbero contribuire in maniera estremamente ridotta al rumore misurato in quanto:

- la distanza del microfono dalla ruota (<20 cm) è assai inferiore alla minima distanza dalla ruota adiacente (≈ 2.5 m), per cui il suono proveniente da quest'ultima dovrebbe essere ridotto dalla divergenza geometrica;
- il microfono è direzionale (quindi preferenzialmente misura il suono che proviene dal suo asse che è normale alla ruota);
- l'emissione della ruota è direzionale (emissione di dipolo) per cui il microfono, che "vede" la ruota adiacente sotto un angolo prossimo a $\pi/2$, non dovrebbe in pratica percepire alcun suono da questa ruota;
- il microfono resta comunque schermato dalla protezione semicilindrica dal rumore prodotto dalle ruote precedenti nel senso di marcia.

A conforto di queste ipotesi preliminari, misure nelle due direzioni di marcia sono risultate praticamente equivalenti (a meno degli inevitabili errori di misura) e questo nonostante la distanza dall'asse adiacente non schermato dalla protezione sia assai diversa nei due casi (v. ad es. fig. 3.3, nella quale la distanza fra la boccola strumentata e la sala più vicina della locomotiva E402 è di oltre 5 m).

4. Risultati delle misure di rumore

L'approccio consentito dall'utilizzo della nuova attrezzatura ha permesso di estrarre dai rilievi effettuati in linea informazioni assai interessanti, numerose e statisticamente corrette. Nel seguito vengono dettagliate separatamente le informazioni sul livello di pressione sonora misurato (Lp) e sulla composizione spettrale dei segnali, elaborati in dodicesimi d'ottava e quindi con ottima risoluzione in frequenza.

4.1. Misure fonometriche

La prima serie di elaborazioni è stata effettuata utilizzando l'analizzatore in bande d'ottava come un normale fonometro, misurando cioè i livelli pesati A ed in lineare della pressione sonora, indicati rispettivamente con Lp(A) ed Lp(Lin). Nelle tabelle e nei grafici successivi vengono riportati i valori di Lp in funzione della velocità e del suo logaritmo in base 10; in neretto sono indicati i valori ottenuti come media di più misure. Per ovvi motivi è stata calcolata la media solo dove esistono almeno tre campioni; i valori di scarto riportati in tabella indicano la deviazione standard σ. Le medie sono state effettuate riportando i valori di Lp in lineare, mediandoli e calcolando la σ dopodiché son stati riportati in dB i valori medi $\pm\,\sigma$. Ovviamente, essendo la scala logaritmica, i limiti non sono uguali se non per motivi di arrotondamento. Tutti i valori si riferiscono a condizioni di prova omogenee, cioè in Direttissima su tratte all'aperto su ballast. I valori relativi ai tre rotabili considerati non sono direttamente confrontabili essendo diversa, seppure di poco, la distanza del microfono dalla superficie della ruota; questi risultati, tuttavia, consentono di evidenziare l'andamento della rumorosità al variare della velocità.

Nel dettaglio i risultati relativi ai tre rotabili possono essere riassunti come segue:

- i valori relativi alla vettura dell'ETR 500 sono assai regolari e confermano l'assenza di fenomeni di saturazione acustica o aerodinamica (tab. 4.1). Il diagramma logaritmico appare meno

v km/h	N° campioni	Lp dB(A)	σ_A dB	Lp dB(Lin)	σ_{Lin} dB
70		97.2		103.0	
95		99.2		104.4	
120		102.7		108.9	
140	3	**104.0**	+0.3;-0.3	**111.5**	+0.5 ;-0.5
150		105.7		112.5	
160		107.7		114.7	
180	3	**108.4**	+0.4;-0.4	**115.9**	+0.9;-1.0
220	5	**111.9**	+0.7;-0.8	**122.5**	+1.3;-1.5
250	5	**113.3**	+0.3;-0.4	**123.0**	+0.4;-0.4
260	3	**115.5**	+0.2;-0.2	**124.6**	+1.0;-1.1
280	4	**115.6**	+0.2;-0.3	**125.1**	+0.5;-0.5
298		116.7		126.2	

Tab. 4.1 – Lp misurati in DD, all'aperto, su ballast (vettura ETR500).

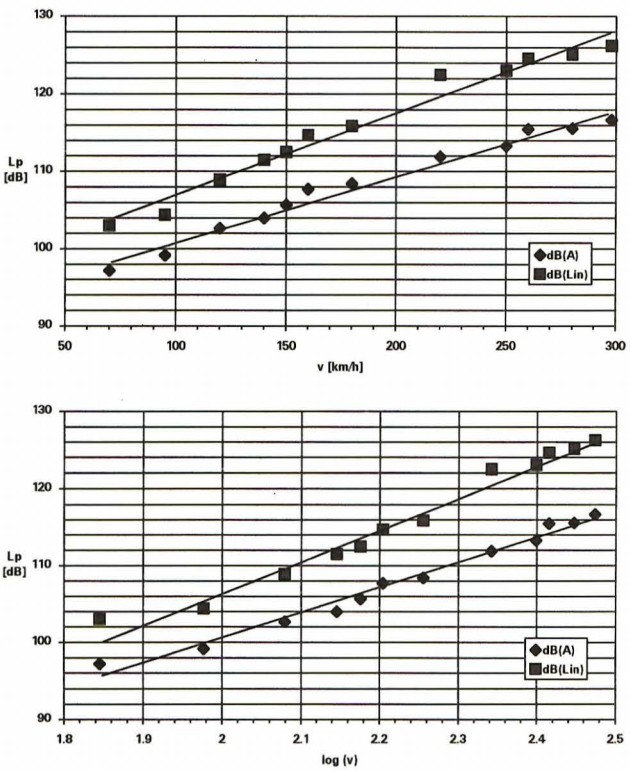


Fig. 4.1 – Valori di Lp in Direttissima, all'aperto, su ballast e rette di regressione con scala lineare della velocità (in alto) e logaritmica (in basso) (vettura ETR500).

regolare del corrispondente lineare (fig. 4.1). La distanza del microfono dalla ruota era di 140 mm dalla ondulazione più vicina;

• i valori relativi alla vettura misure elettriche con carrello F85 sono abbastanza regolari ad eccezione di due punti singolari a 130 km/h (misura singola) e 180 km/h (4 medie con $\sigma = \pm 0.4$ dB(A)) (tab. 4.2, fig. 4.2). La distanza del microfono era di 140 mm dal p.d.f. e di 70 mm dalla superficie della ruota;

• i valori relativi alla motrice dell'ETR 500 mostrano tra 110 e 170 km/h un gradiente piuttosto elevato se confrontato con quello tra 170 e 240 km/h. Si nota, inoltre, che ad alcune velocità ci sono elevate differenze fra i valori in lineare e pesati A (tab. 4.3, fig. 4.3). Poiché questo fenomeno si manifesta quando il contributo al rumore dovuto alle frequenze più basse è maggiore, si può ipotizzare che questo sia dovuto a rumore generato da modi propri vibrazionali del complesso carrello-ruote-binario o ad influenze del sistema di trazione.

Per valutare l'andamento dei valori misurati si è effettuata una regressione lineare ai minimi quadrati i cui risultati sono

v km/h	N° campioni	Lp dB(A)	σ_A dB	Lp dB(Lin)	σ_{Lin} dB
50		103.1		107.7	
80		106.3		109.2	
110		109.4		112.0	
130		111.6		114.4	
143		110.8		113.3	
165	2	**111.6**	+0.8;-0.9	**115.7**	+0.1;-0.1
180	4	**111.6**	+0.4;-0.4	**117.5**	+0.4;-0.4
190		113.7		119.4	
200	6	**115.6**	+0.1;-0.2	**120.8**	+0.3;-0.3
204	3	**115.2**	+0.4;-0.5	**120.6**	+0.3;+0.3
205		114.9		120.0	
210		115.3		121.5	
220	3	**115.5**	+0.2;-0.2	**123.1**	+0.9;-1.0

Tab. 4.2 – Lp misurati in DD, all'aperto, su ballast (F85).

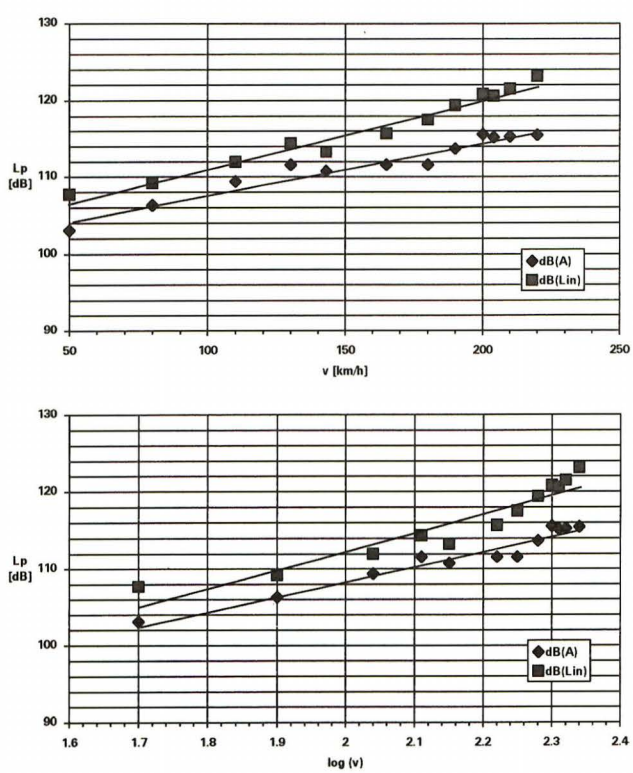


Fig. 4.2 – Valori di Lp in Direttissima, all'aperto, su ballast e rette di regressione con scala lineare della velocità (in alto) e logaritmica (in basso) (F85).

v km/h	N° campioni	Lp dB(A)	σ_A dB	Lp dB(Lin)	σ_{Lin} dB
97	3	**105.2**	+0.4;-0.4	**108.8**	+0.3;-0.4
110		106.0		109.5	
115	4	**106.8**	+0.2;-0.2	**110.3**	+0.2;-0.3
125		107.8		110.9	
165	4	**112.1**	+0.1;-0.1	**116.6**	+0.3;-0.3
170		112.0		117.7	
185		111.6		118.0	
200		111.9		121.4	
220	4	**114.1**	+0.2;-0.2	**121.6**	+0.7;-0.7
225	3	**113.7**	+0.4;-0.4	**121.1**	+0.9;-0.9
235		115.1		123.2	
240		116.9		124.8	
250	3	**116.2**	+0.1;-0.1	**124.8**	+0.3;-0.4
255		115.3		124.1	

Tab. 4.3 – Lp misurati in DD, all'aperto, su ballast (motrice ETR500).

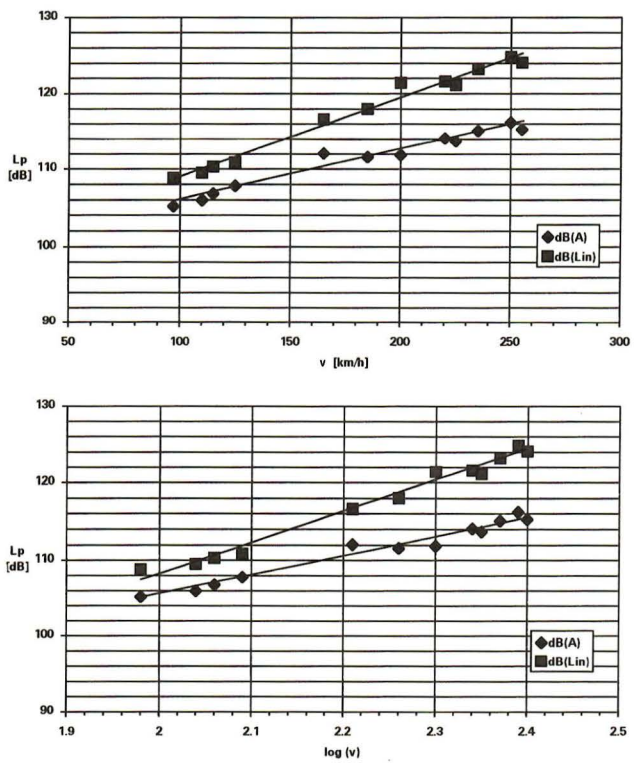


Fig. 4.3 – Valori di Lp in Direttissima, all'aperto, su ballast e rette di regressione con scala lineare della velocità (in alto) e logaritmica (in basso) (motrice ETR500).

mostrati nella tab. 4.4. I coefficienti angolari delle rette di regressione (sia in scala logaritmica, sia in lineare) sono differenti per i valori di Lp(A) e di Lp(Lin); ciò è imputabile al contributo al rumore dovuto alle basse frequenze la cui entità varia con la velocità in modo diverso rispetto a quello delle frequenze maggiori.

Si sono inoltre evidenziati, con risultati piuttosto interessanti anche se ottenuti da dati limitati, quei punti singolari che possono innalzare momentaneamente il valore dell'Lp. Nella tab. 4.5 vengono riportati gli incrementi di Lp(A) registrati alle varie velocità sui punti singolari riferiti ai valori misurati in linea, all'aperto, su ballast. I valori ottenuti sul viadotto Terranova-Le Ville, pavimentato in c.a.p., sono medie di 10 campioni a causa della limitata lunghezza del tratto.

Scala lineare Lp = a + bv			
	Vettura ETR500	Carrello F85	Motrice ETR500
dB(A)	92.30 + 0.0859 v (r = 0.989)	100.78 + 0.0693 v (r = 0.970)	99.44 + 0.0672 v (r = 0.966)
dB(Lin)	96.10 + 0.108 v (r = 0.987)	102.08 + 0.0904 v (r = 0.984)	98.50 + 0.1046 v (r = 0.991)
Scala logaritmica Lp = a + b log(v)			
	Vettura ETR500	Carrello F85	Motrice ETR500
dB(A)	34.46 + 33.05 log(v) (r = 0.991)	68.67 + 19.95 log(v) (r = 0.974)	54.91 + 25.27 log(v) (r = 0.985)
dB(Lin)	24.51 + 41.04 log(v) (r = 0.987)	64.02 + 24.19 log(v) (r = 0.941)	28.52 + 39.87 log(v) (r = 0.991)

Tab. 4.4 – Equazioni delle rette di regressione lineare ai minimi quadrati e coefficienti di correlazione r.

	Vettura ETR500	Carrello F85	Motrice ETR500
Deviatoi uscita DD	+9 dB(A) 95 km/h	+8 dB(A) 90 km/h	
Galleria S. Donato	+3 dB(A) varie		+3 dB(A) 225 km/h
Galleria Terranova	+9 dB(A) 220 km/h		+9 dB(A) 225 km/h
Viadotto Terranova	+5 dB(A) 220 km/h	+5 dB(A) 180 km/h	+6 dB(A) 190 km/h
Ponte in ferro Arno		+4 dB(A) varie	+5 dB(A) 90 km/h

Tab. 4.5 – Incrementi dell'Lp(A) nei punti singolari rispetto ai valori alle stesse velocità misurati in condizioni standard (in Direttissima, all'aperto, su ballast).

4.2. Misure di distribuzione in frequenza

Una ulteriore analisi ha riguardato gli spettri di rumore relativi ai vari tipi di rotabili misurati, evidenziando quindi il contenuto in frequenza dei segnali misurati. Nella fig. 4.4 sono mostrati alcuni spettri di rumore in dB(A) in 1/12 d'ottava registrati a diverse velocità. Da questi si osserva che il contributo maggiore al rumore si ha all'incirca nel campo di frequenza 365 Hz ÷ 3.65 kHz; analisi estensive hanno mostrato che tale contributo è sempre superiore al 90%, arrivando spesso al 95%. La forma di questi diagrammi coincide notevolmente con quanto riscontrato in letteratura, confermando ancora una volta la bontà delle misure.

L'analisi dettagliata relativa ai tre veicoli misurati porta ai seguenti risultati:

• Vettura ETR 500 con ruote a doppia ondulazione: nel campo 250 Hz ÷ 16 kHz i valori di Lp(A) aumentano con la velocità fino a 260 km/h mentre a 280 km/h si registra una diminuzione del rumore tra 270 e 1500 Hz (fig. 4.5.a); nel campo 63 ÷ 250 Hz si nota un picco a frequenze crescenti con la velocità (fig. 4.5.b). Tale andamento è marcato fino alla velocità di 160 km/h, minore fino a 250 km/h e non visibile a velocità superiori. Si noti che i valori registrati a 180, 250, 260 e 280 km/h sono la media di più acquisizioni con $|\sigma|<0.4$;

• Vettura Misure Elettriche con carrello F85 con ruote a semplice ondulazione: alle frequenze comprese tra 500 e 16 kHz si ha un aumento piuttosto regolare dei valori di Lp all'aumentare della velocità, anche se il picco intorno ai 500 Hz rimane con

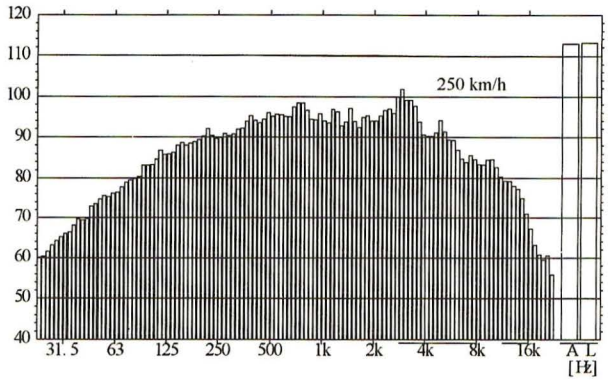


Fig. 4.4.a – Spettro registrato a 250 km/h (vettura ETR500).

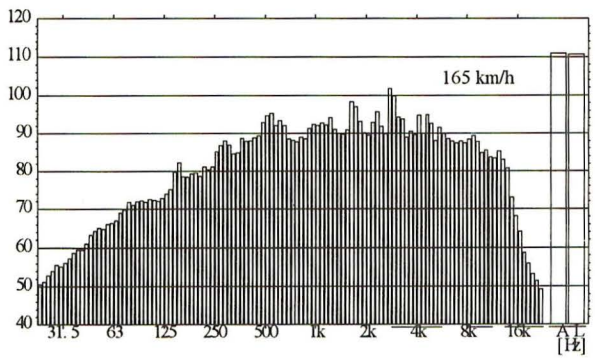


Fig. 4.4.b – Spettro registrato a 165 km/h (F85).

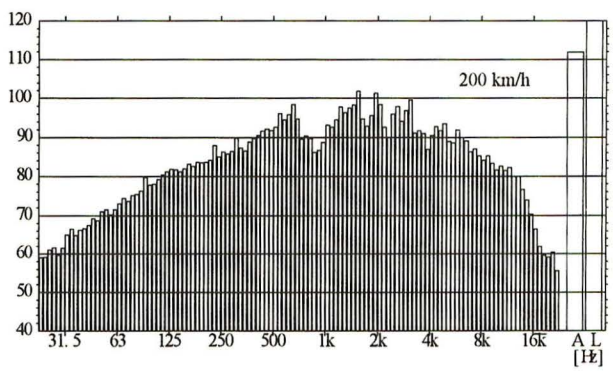


Fig. 4.4.c – Spettro registrato a 200 km/h (motrice ETR500).

ampiezza pressoché invariata (fig. 4.6.a); il fenomeno del picco la cui frequenza cresce con la velocità è il più marcato (fig. 4.6.b).

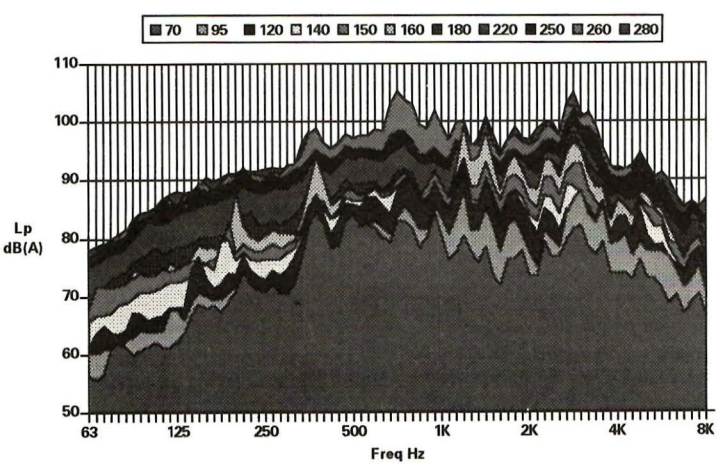
• Motrice ETR 500 con ruote a semplice ondulazione: l'andamento generale conferma quanto già detto per gli altri due veicoli (fig. 4.7.a); nel campo 31.5 ÷ 250 Hz (fig. 4.7.b) il picco la cui frequenza cresce con la velocità è meno marcato e visibile solo a partire da velocità intorno ai 110 km/h.

Nella fig. 4.8 si mostrano le frequenze del picco mobile a bassa frequenza per i tre veicoli analizzati. Le rette individuano, in ordine di pendenza crescente, la frequenza di passaggio delle traverse (passo = 0.6 m), indipendente dalle caratteristiche geometriche della sala e dodici volte la frequenza di rotazione delle ruote della vettura dell'ETR 500.

Come si nota c'è un'ottima corrispondenza del picco con la frequenza di passaggio delle traverse per la vettura Misure Elettriche equipaggiata con il carrello F85 e la motrice dell'ETR 500, mentre la corrispondenza per la vettura dell'ETR 500 è con la frequenza dovuta a dodici volte la frequenza di rotazione della sala e non si ha un corrispondente andamento derivante dalla frequenza delle traverse. Questi fenomeni, non totalmente chiariti, possono essere forse spiegati con il fatto che le periodicità della via e/o della ruota eccitano il complesso ruota/binario. Nel caso della vettura dell'ETR 500 compare l'effetto, preponderante, in qualche modo legato alle 6 ondulazioni circonferenziali delle ruote. Le due ruote di questo assile sono infatti calettate con le ondulazioni circa in controfase, risultando così una frequenza di eccitazione della sala, derivante dalle diverse rigidezze, pari a 12 volte la frequenza di rotazione. Il fatto che il picco alle frequenze di traversa scompaia può indicare che esso deriva non da fenomeni acustici sul suono già prodotto (riflessioni e rifrazioni sul terreno e sui bordi dell'attrezzatura) ma che esso è dovuto alla risposta vibrazione del complesso ruota-rotaia, risposta che in questo caso può essere dominata dalle periodicità della ruota.

Nella fig. 4.9 sono mostrati gli spettri medi dell'Lp(A), ottenuti semplicemente sommando i singoli spettri. Ovviamente il confronto è qualitativo; per dare un'idea della dinamica di ciascuna curva si tenga presente che ogni divisione corrisponde a 10 dB. In questo tipo di diagrammi i picchi a frequenze costanti tendono ad evidenziarsi mentre quelli a frequenze diverse tendono a scomparire: è interessante quindi osservare come i picchi siano ben marcati in tutto il campo di frequenze e come essi si presentino a frequenze diverse per i tre veicoli considerati, permettendo quindi di affermare che l'emissione acustica è caratteristica di ogni tipo di sala.

Sembra quindi che il rumore prodotto dal solo binario sia, in questi rilievi, non apprezzabile o trascurabile, dato che il tratto di



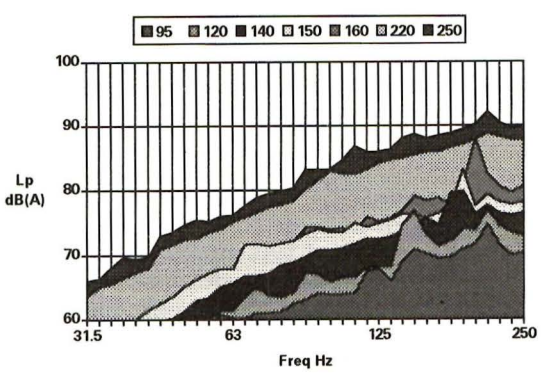
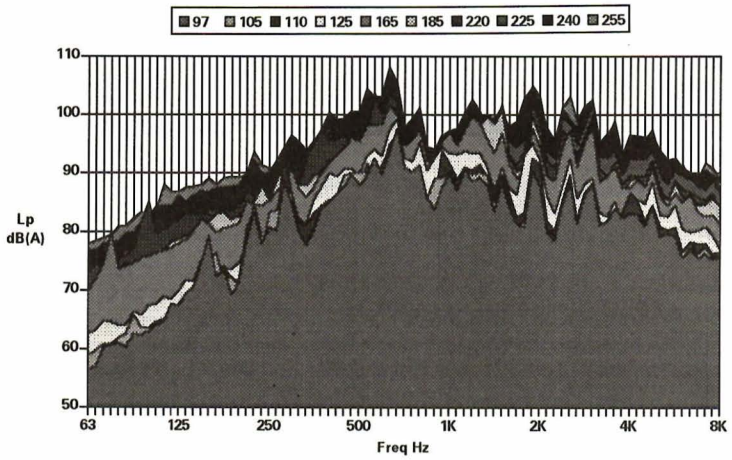


Fig. 4.5 – Spettri dell'Lp alle varie velocità (a sinistra) e particolare della zona a bassa frequenza (a destra) (vettura ETR500).



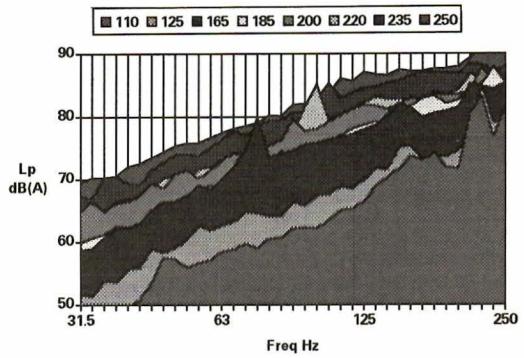
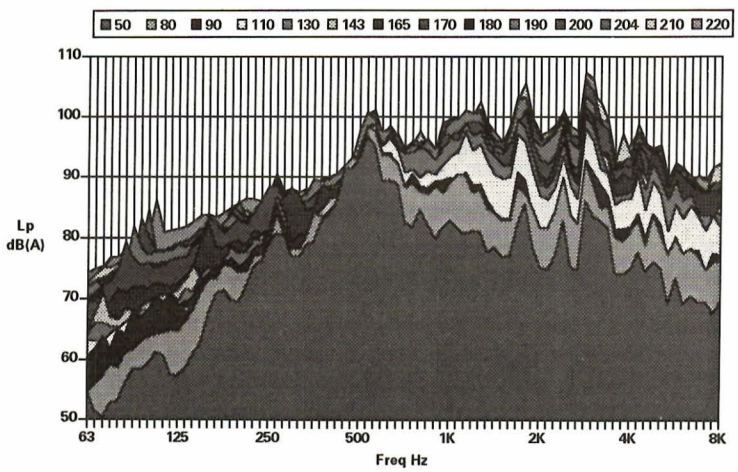


Fig. 4.6 – Spettri dell'Lp alle varie velocità (a sinistra) e particolare della zona a bassa frequenza (a destra) (motrice ETR500).



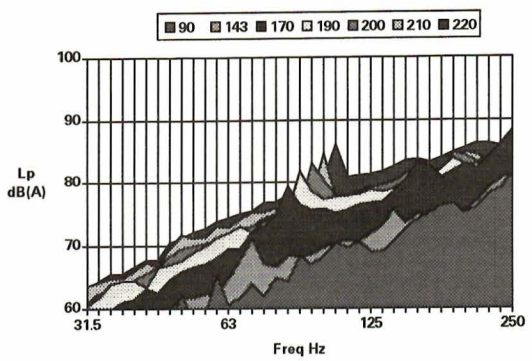


Fig. 4.7 – Spettri dell'Lp alle varie velocità (a sinistra) e particolare della zona a bassa frequenza (a destra) (vettura Misure Elettriche con F85).

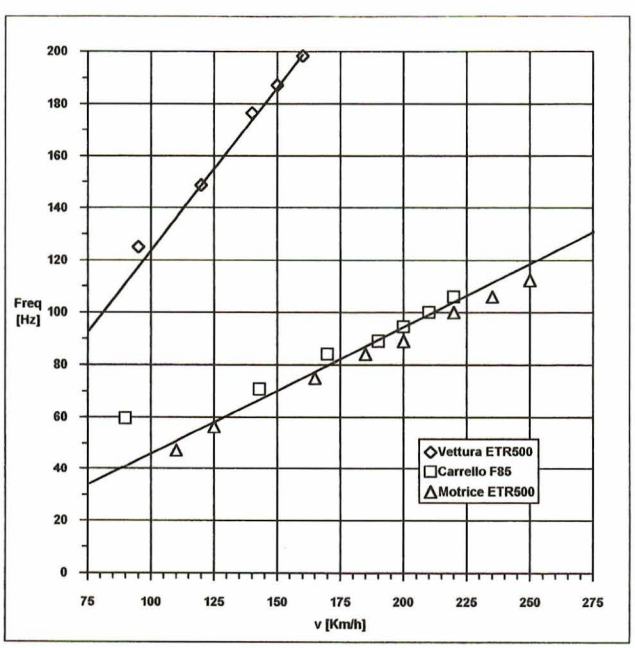


Fig. 4.8 – Frequenze del picco mobile per i tre veicoli misurati. Le rette rappresentano, in ordine di pendenza crescente, la frequenza di passaggio delle traverse e dodici volte la frequenza di rotazione della sala.

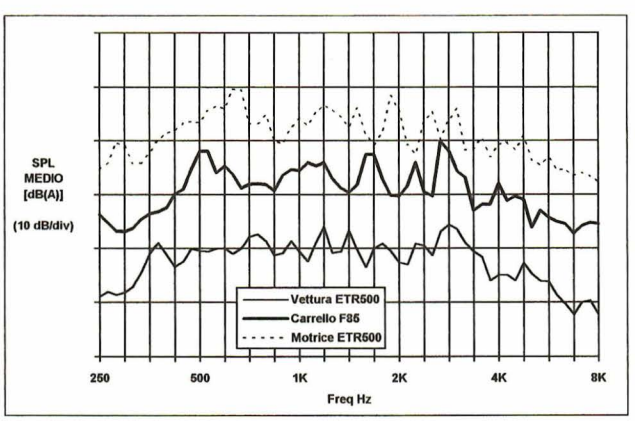


Fig. 4.9 – Somma degli spettri Lp(A) per i tre veicoli misurati.

linea percorsa è uguale per tutti i veicoli provati e che non vi sono picchi comuni che sarebbero viceversa dovuti comparire.

5. Misure accelerometriche sulla vettura ETR 500

Le misure accelerometriche compiute sulla boccola della vettura dell'ETR 500 hanno avuto lo scopo primario di verificare

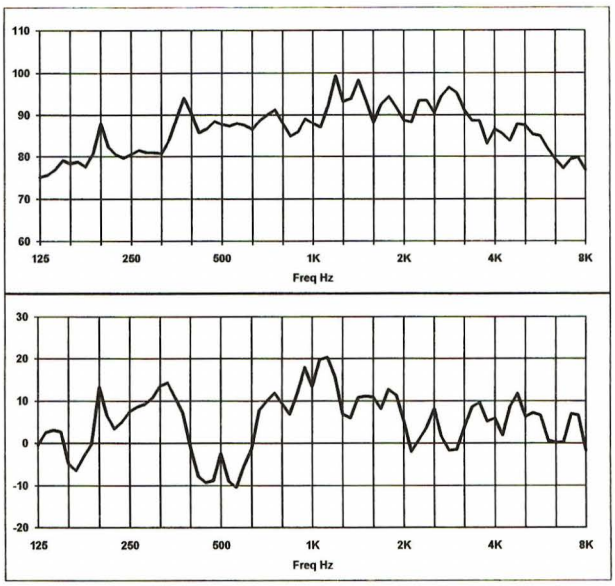


Fig. 5.1 – Spettri dell'Lp(A) (in alto, dB rif. 20μPa) e dell'accelerazione trasversale (in basso, dB rif. 1 m/s²) per la vettura ETR500 a 160 km/h.

la trasmissibilità delle vibrazioni dalla boccola al microfono di misura e quindi l'errore eventualmente indotto sulle misure di rumore. Sebbene i risultati siano stati soddisfacenti, non ci si è limitati a questo ma si è tentato di osservare l'esistenza o meno di un legame fra il rumore misurato in boccola e le corrispondenti accelerazioni.

È evidente infatti che essendo il rumore un'effetto diretto delle vibrazioni meccaniche ci si aspetta una qualche correlazione fra queste grandezze, anche se, presumibilmente, non tutte le componenti in frequenza delle vibrazioni che generano rumore riusciranno ad attraversare il cuscinetto a rulli che equipaggia la sala.

I risultati ottenuti sono incoraggianti: i segnali di rumore e di accelerazione della boccola, trasformati nel dominio della frequenza in banda fine, mostrano valori della funzione di coerenza, che quantifica la dipendenza lineare fra due segnali, normalmente abbastanza bassi, cioè inferiori a 0.2, ma che a certe frequenze superano anche 0.8. Ovviamente affermare che esiste una relazione definita fra queste grandezze appare avventato, anche perché la modellazione di un campo acustico generato da superfici vibranti è a tutt'oggi ancora assai difficile; l'approfondimento di questa problematica potrebbe portare a notevoli vantaggi, ad esempio rendendo possibile monitorare lo stato di contatto ruota-rotaia, ed il conseguente rumore emesso, con misure fonometriche o accelerometriche indifferentemente, oppure fornire indicazioni importanti per l'individuazione delle sorgenti e delle frequenze più importanti collegandole al comportamento modale della sala. Analisi più raffinate potrebbero essere condotte ad esempio con l'analisi delle vibrazioni della sala in condizioni di funzionamento, utilizzando quindi accelerometri solidali alla ruota e con l'utilizzo di tecniche di telemetria o di contatti striscianti.

In fig. 5.1 sono mostrati gli spettri di rumore e di accelerazione misurati contemporaneamente sulla vettura dell'ETR 500 a 160 km/h. Come si nota alcuni picchi sono coincidenti, per cui sembra che esista una correlazione fra i valori di Lp ed i corrispondenti valori dell'accelerazione. Nelle figure 5.2 e 5.3 si mostrano gli spettri di alcuni segnali e la relativa coerenza per diverse velocità.

6. Il programma di simulazione del rumore a terra

Le misure fin qui illustrate aggiungono informazioni ingegneristiche preziose per la comprensione del fenomeno di generazione del rumore ferroviario, ma sono utilizzabili anche per uno scopo diverso, altrettanto importante ai fini della valutazione di impatto ambientale. È di grande interesse, infatti, la possibilità di compiere una simulazione numerica al fine di stimare il rumore percepito da un osservatore a terra posto a distanza arbitraria dalla linea una volta noti i valori di Lp registrati in boccola. Nel presente lavoro si è messo a punto un semplice programma di simulazione sulla base di dati reperiti in letteratura, dei valori di Lp misurati in boccola e della modellazione delle sorgenti ruota-rotaia più usuali in acustica, riconducibili alle ipotesi di sorgenti puntiforme con emissione sferica (monopolo) e direzionale (dipolo) [2]. Chiaramente questo programma non vuole sostituirsi ad altri ben più sviluppati nei riguardi della propagazione nell'atmosfera; esso è semplicemente uno strumento per la taratura sul campo dell'attrezzatura di misura. Nel programma di calcolo messo a punto si compie la simulazione con quattro tipi di sorgenti:

- ruota vista come monopolo;
- ruota vista come dipolo;
- carrello visto come monopolo;
- carrello visto come dipolo.

Si è supposto che la pressione sonora misurata a terra sia direttamente stimabile a partire da quella misurata in boccola usando la legge della divergenza geometrica in campo libero (inversamente proporzionale al quadrato della distanza) a meno di un coefficiente di correzione costante ed utilizzando i modelli sopra elencati. In effetti non è detto che la legge debba essere quadratica, che il coefficiente di correzione non debba essere anche funzione della distanza e che la direzionalità sia esprimibile semplicemente con una funzione trigonometrica (nel nostro caso il coseno) dell'angolo tra la normale alla ruota e la congiungente la ruota con l'osservatore. Sotto queste ipotesi il solo dato da determinare è il valore del suddetto coefficiente di correzione, che sarà in generale diverso nei vari casi possibili poiché le condizioni di fissaggio e con esse la percentuale di area della ruota "vista" variano. Chiaramente non è possibile tener conto, anche se il contributo relativo appare trascurabile, dell'influenza delle ruote sulla rotaia più lontana (per le quali il campo non è libero). Si è supposta l'emissione in campo libero (condizione usualmente ricercata anche per le prove a terra) poiché, oltre ad essere la più semplice, ci consente di confrontare il modello con i dati reperibili in letteratura.

Per le simulazioni qui riportate il convoglio ETR 500 è stato simulato con 2 locomotive con uguali caratteristiche di emissività e 7 vetture identiche, anche se ovviamente è possibile effettuare simulazioni con veicoli anche tutti diversi fra loro.

Il programma richiede le seguenti quantità:

- caratteristiche geometriche del convoglio (interassi, interperni, lunghezze veicoli, ...);
- valori di Lp per locomotiva(e) e vetture misurati con la nuova attrezzatura;
- valore del coefficiente di correzione;

• valore del rumore di fondo registrato all'atto delle misure a terra;

• distanza dall'asse del binario di transito del treno;

• lunghezza del tratto di simulazione, ottenuta sommando alla lunghezza del treno, calcolata a partire dalle caratteristiche geometriche, una distanza a piacere;

• numero di divisioni di discretizzazione del tratto di simulazione.

Le tarature effettuate in questa sede risentono in maniera drastica della assoluta scarsità di dati disponibili in letteratura. È evidente che l'unico modo per effettuare una taratura efficace del programma sarebbe quello di disporre dei risultati delle misure fonometriche effettuate a terra ed a bordo treno contemporaneamente in quanto l'usura delle superfici di rotolamento porta a variazioni notevoli di rumore molto rapidamente.

Le fonti utilizzabili si riducono ad alcuni dei risultati riportati in [4]. Sono state analizzate le quattro possibili simulazioni per tre diverse condizioni di prova; i risultati, confrontati con quanto pubblicato in [4], sono mostrati nelle figg. 6.1, 6.2 e 6.3. I seguenti parametri quantitativi sono stati utilizzati per decidere la bontà della simulazione:

• valore medio della parte centrale, relativa alle vetture, che dalla simulazione risulta ovviamente priva delle irregolarità sperimentali che dipendono dalla non perfetta uguaglianza dei veicoli in composizione;

• valore dei picchi delle motrici;

• ampiezza delle variazioni di Lp fra i carrelli di estremità delle vetture;

• pendenza dei fronti di salita e di discesa all'avvicinarsi ed all'allontanarsi del convoglio.

I risultati sono riassumibili in quanto segue:

• i modelli con emissione omnidirezionale danno fronti di salita assai più dolci di quelli sperimentali, facendo supporre una certa direzionalità dell'emissione

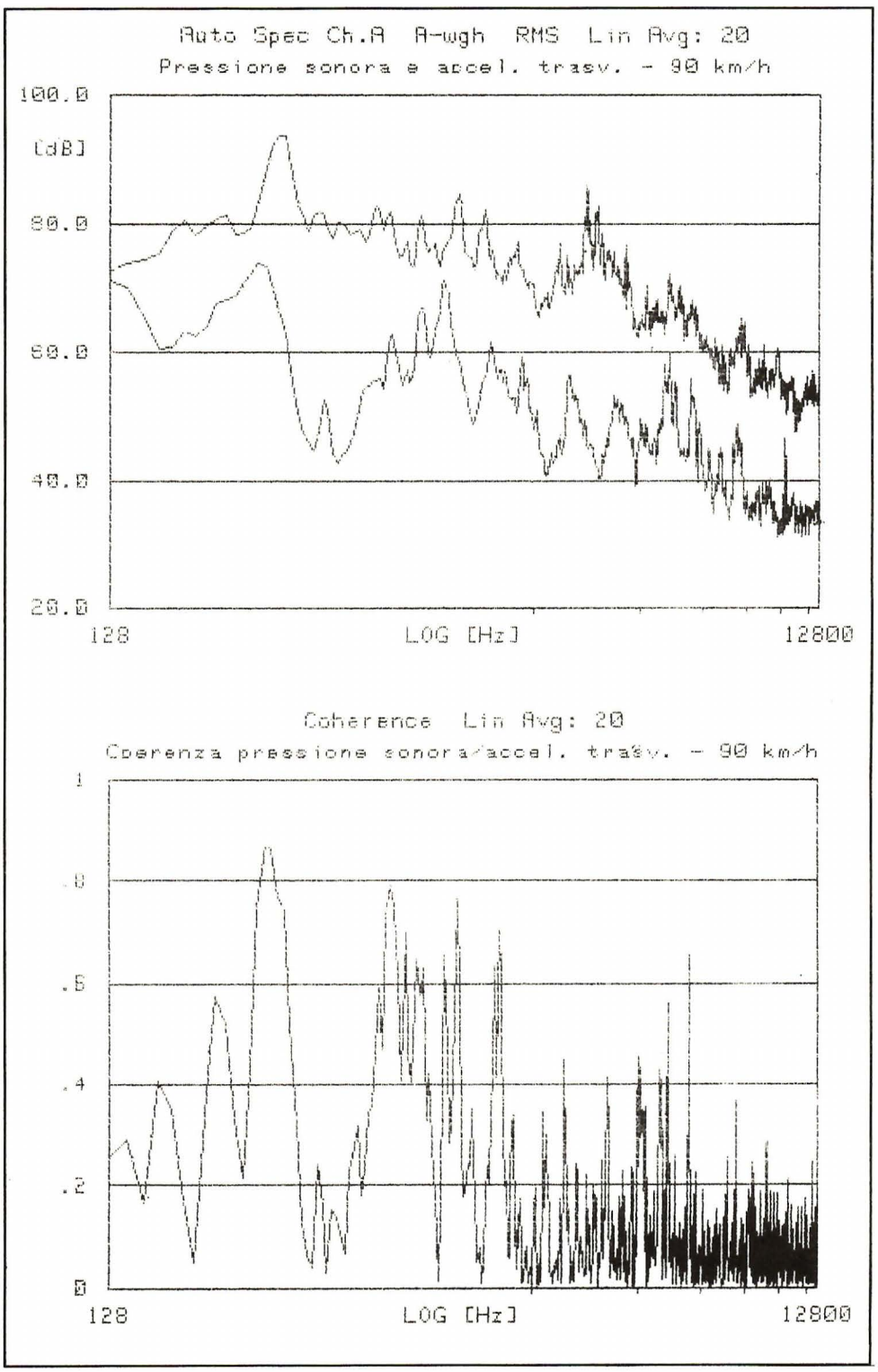


Fig. 5.2 – Spettri della pressione sonora e dell'accelerazione trasversale (in alto) e coerenza (in basso) a 90 km/h. La curva più in alto è relativa alla pressione sonora e l'accelerazione è aumentata di 60 dB per motivi grafici; la scala delle frequenze è logaritmica (1 div = 2 kHz).

delle sorgenti, confermando in questo quanto riscontrato in letteratura;

- la differenza fra i valori massimi e minimi di Lp (in corrispondenza rispettivamente delle ruote e del centro vettura) risulta assai elevata alle basse distanze per i modelli con emissione di dipolo, dimostrando così che non è lecito trascurare, ad esempio, il contributo delle ruote sulla rotaia più lontana;
- il modello con ruota emissione dipolo non converge né come valori massimi né come ampiezze picco-picco delle vetture, ed è quello che ha dato i peggiori risultati;
- il modello carrello emissione dipolo è risultato il migliore in quanto ha dato simulazioni soddisfacenti a 25 ed a 7.5 m. A 2.1 m la simulazione è meno soddisfacente e ciò si spiega con le attuali limitazioni del modello precedentemente sottolineate.

Il modello qui utilizzato non può quindi essere definitivo data la scarsità di dati a disposizione, e quindi la presente trattazione non pretende di essere esaustiva sull'argomento. È evidente però che sarebbe di grande interesse approfondire questa problematica con l'ausilio di campagne prova mirate alla messa a punto di un modello più generale ed affidabile.

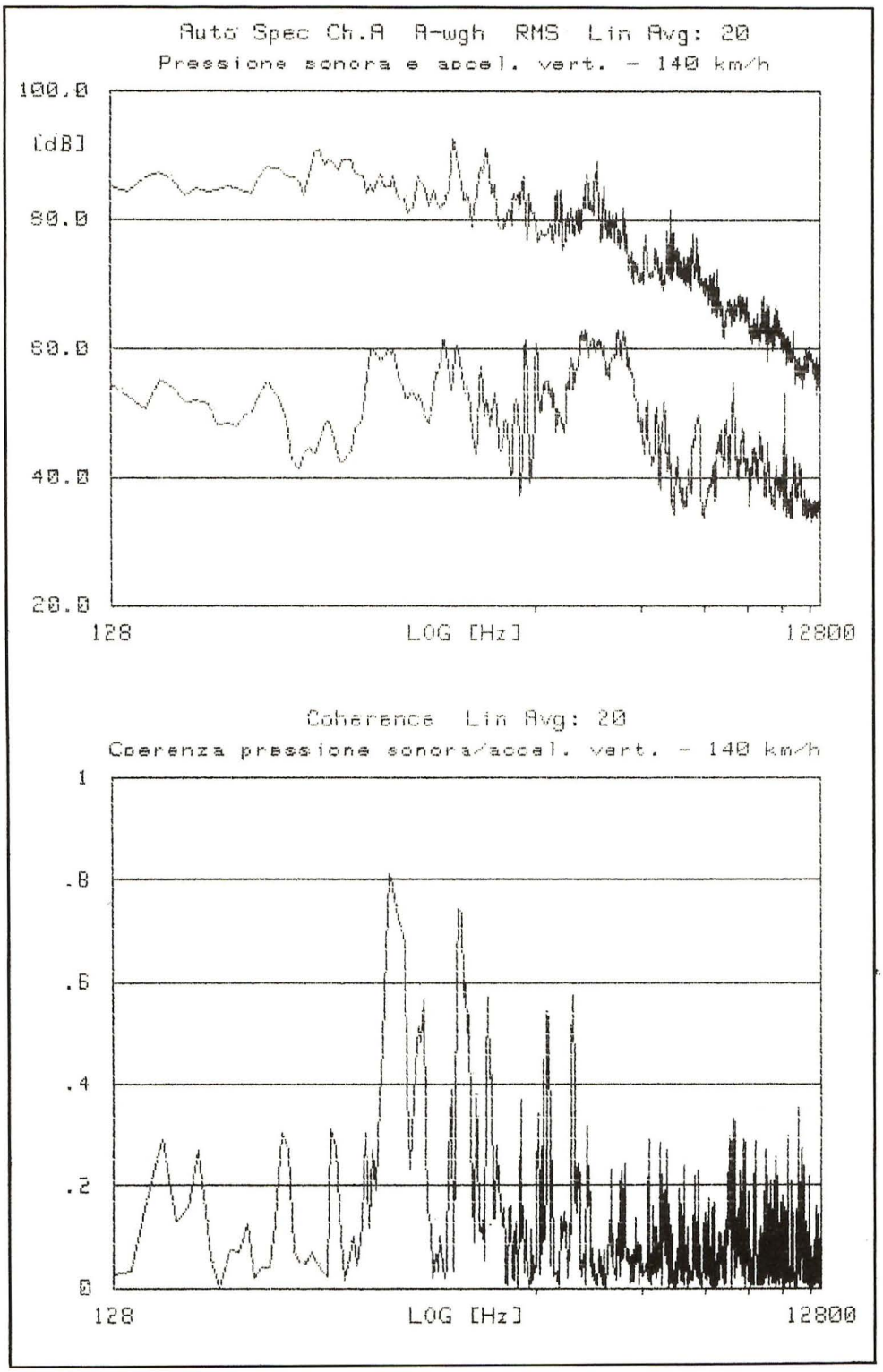
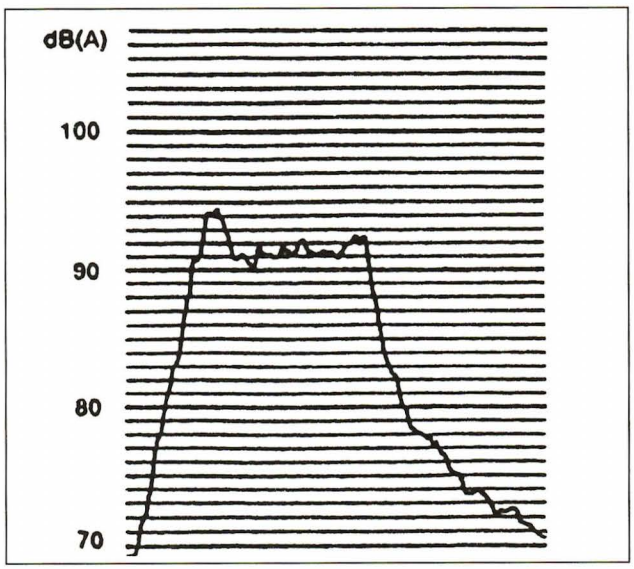
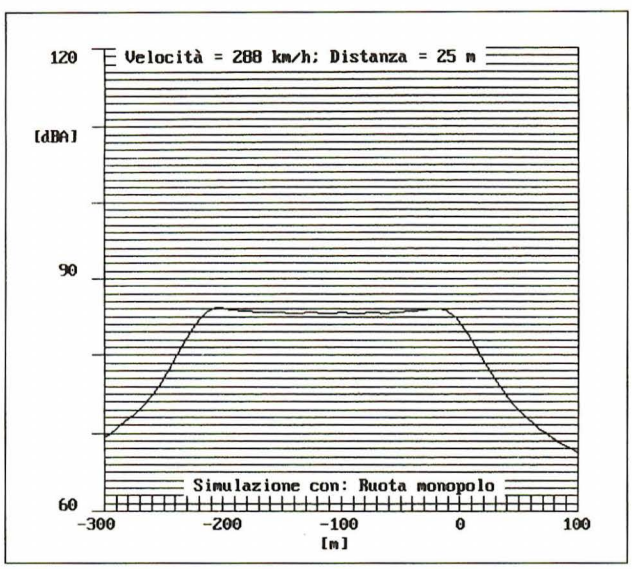


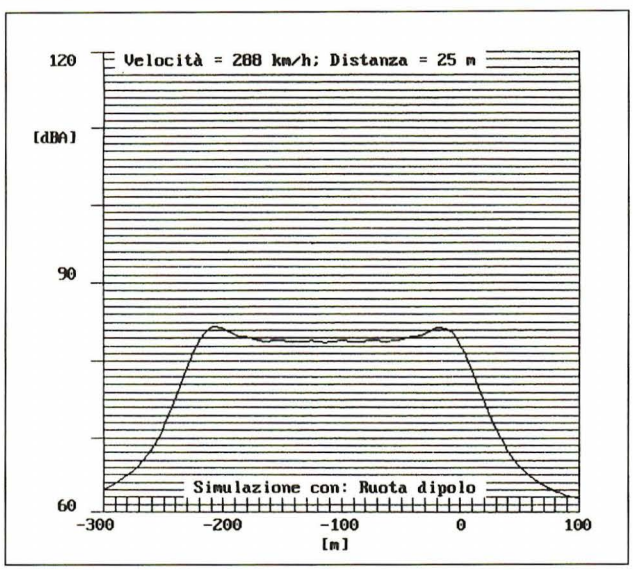
Fig. 5.3 – Spettri della pressione sonora e dell'accelerazione verticale (in alto) e coerenza (in basso) a 140 km/h. La curva più in alto è relativa alla pressione sonora; l'accelerazione è aumentata di 60 dB per motivi grafici; la scala delle frequenze è logaritmica (1 div = 2 kHz).

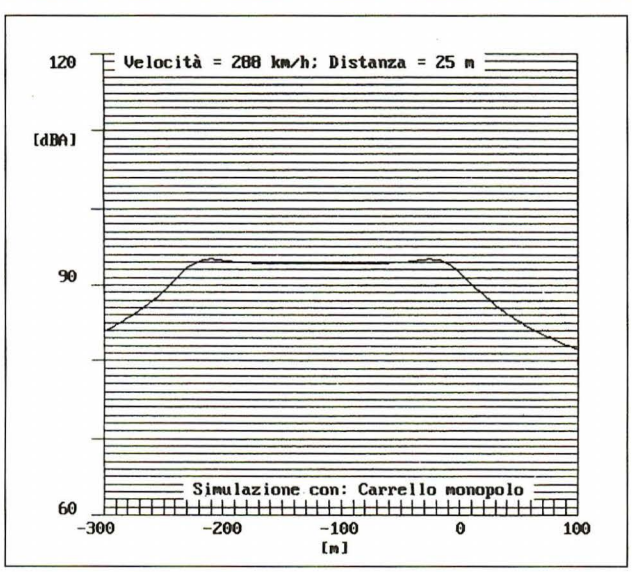
7. Conclusioni

Nel presente lavoro si è mostrato come possa essere vantaggiosamente impiegato per lo studio del rumore generato dai veicoli ferroviari un nuovo e relativamente poco costoso sistema di misura mobile puntuale, in grado cioè di registrare il rumore emesso dalla singola ruota durante la normale marcia del treno. L'attrezzatura impiegata è stata tarata valutando gli effetti di tutte le possibili cause di errore; le misure effettuate in linea hanno dato risultati pienamente soddisfacenti, permettendo, per esempio, di distinguere chiaramente la diversa rumorosità della marcia su ballast rispetto









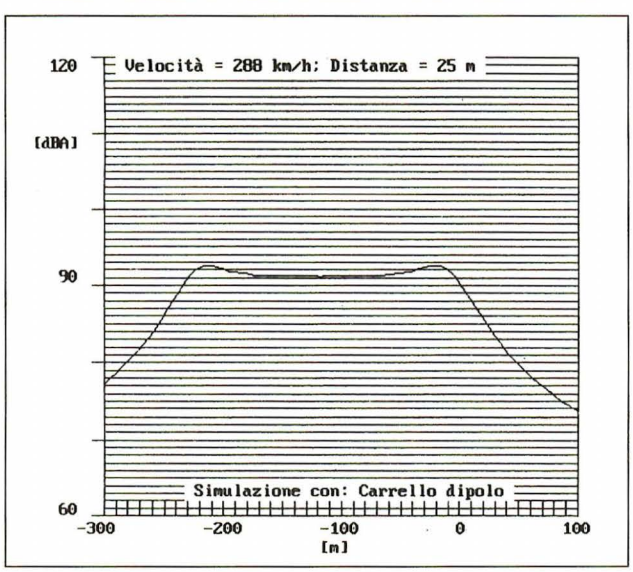
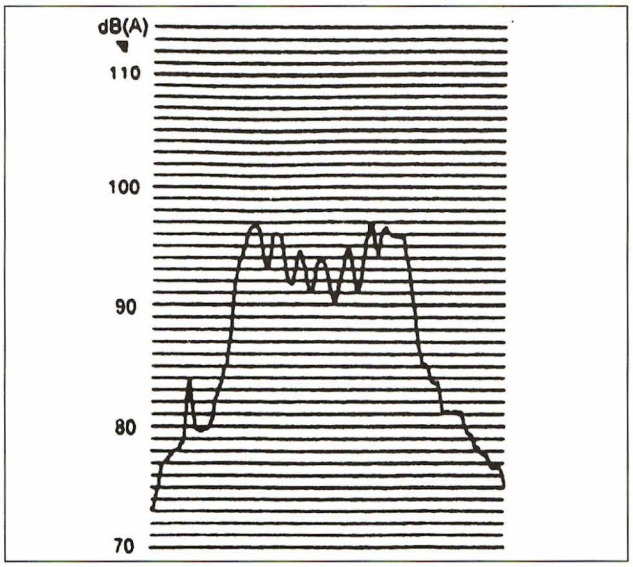
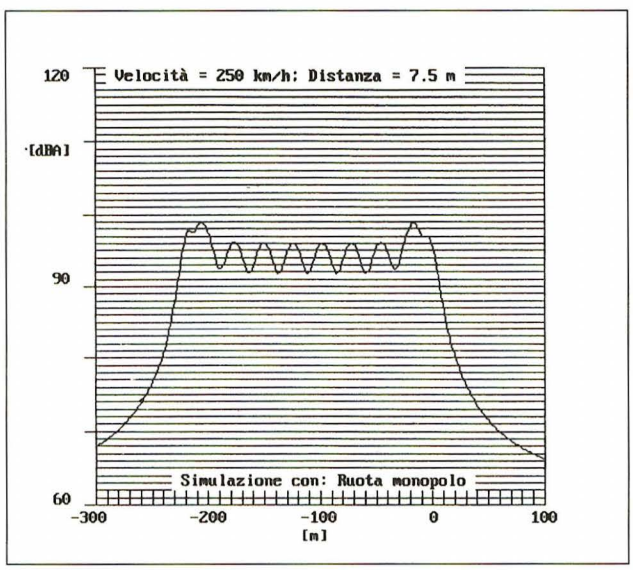
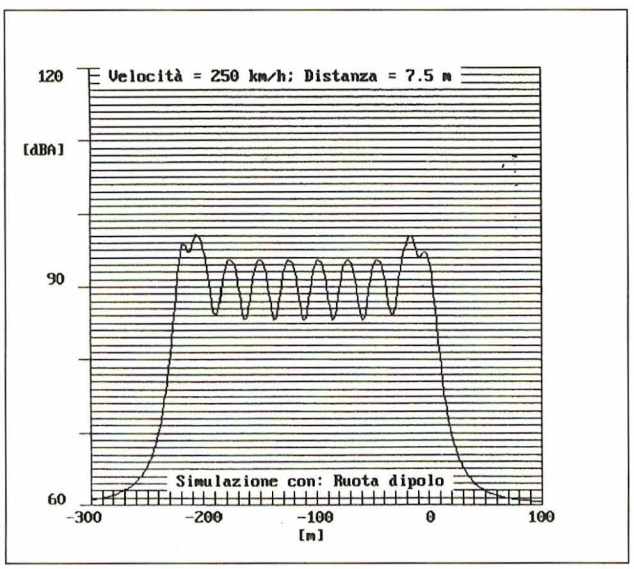
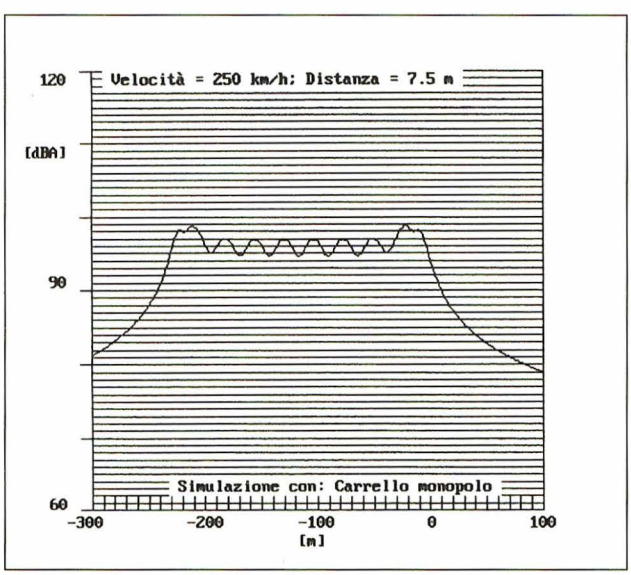


Fig. 6.1 – Misura (figura in alto) e simulazione del rumore a terra a 288 km/h a 25 m (ETR500 – 1.12.92). La misura è relativa a "Transito n° 5 del 1.12.92; v=288 km/h – ETR500 (fase 3). Profilo temporale L(t) alla distanza di 25 m dal binario di transito". [4]









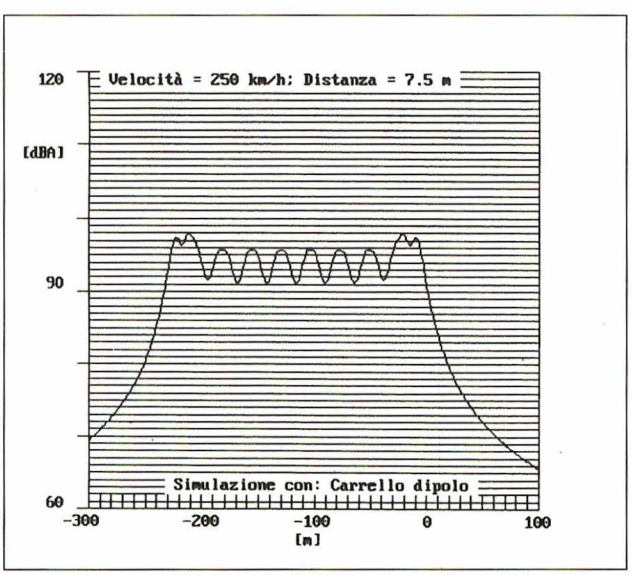
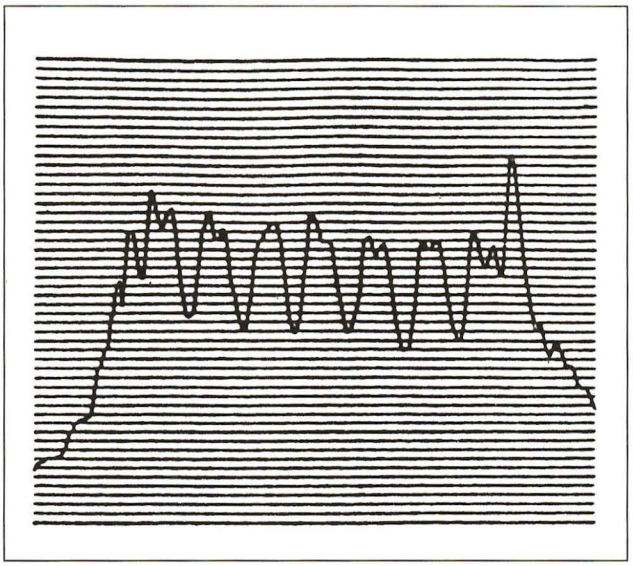
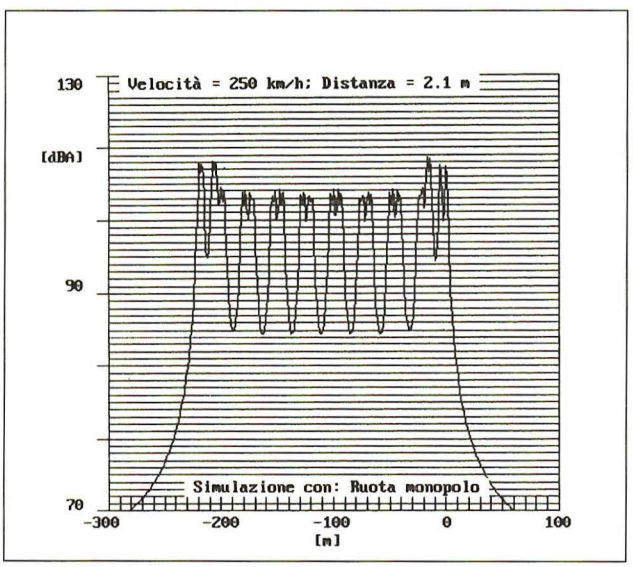
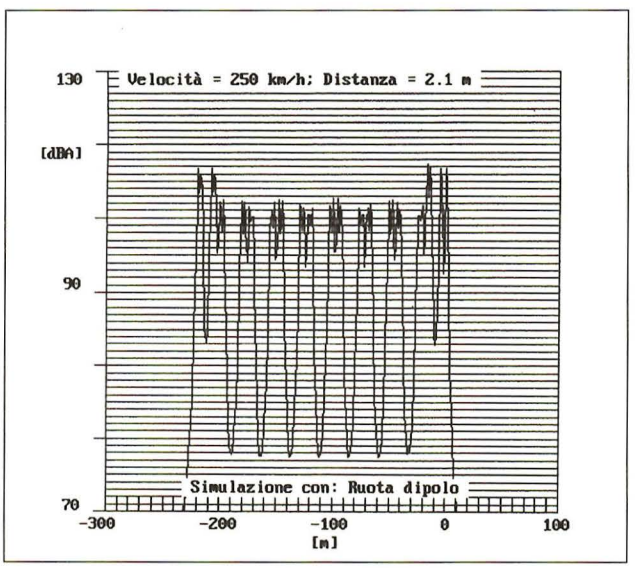
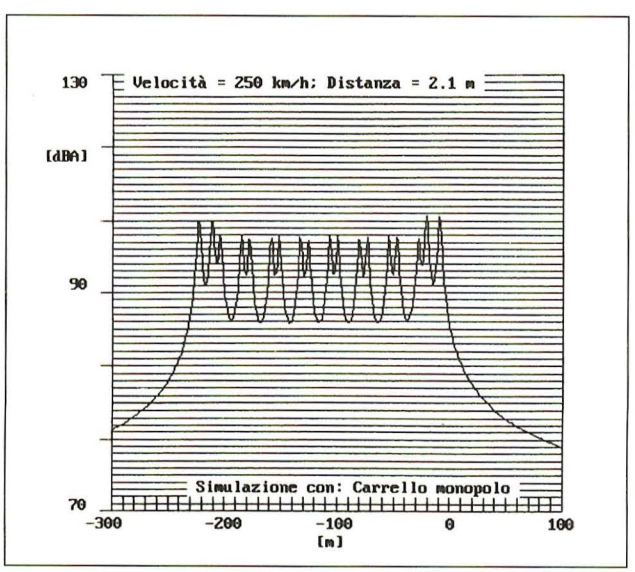


Fig. 6.2 – Misura (figura in alto) e simulazione del rumore a terra a 250 km/h a 7.5 m (ETR500 – 22.10.92). La misura è relativa a "Transito n° 23 del 22.10.92; v=250 km/h – ETR500 (fase 3). Profilo temporale L(t) nel punto M3 alla distanza di 7.5 m dal binario dispari di transito. Altezza 3.5 m sul p.d.f.". [4]









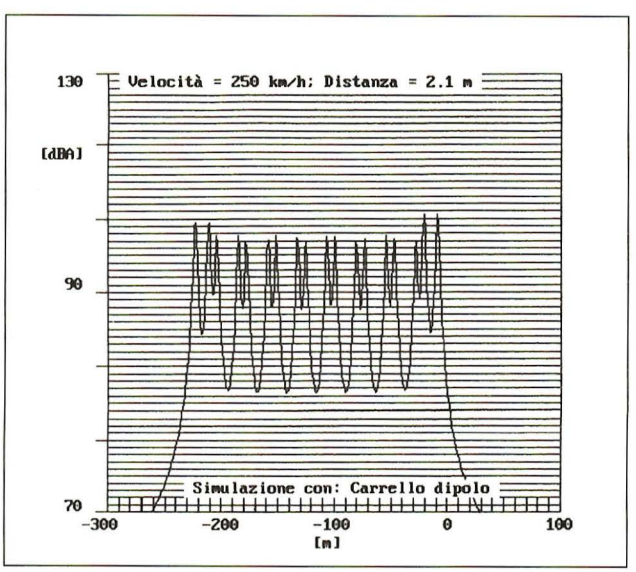


Fig. 6.3 – Misura (figura in alto) e simulazione del rumore a terra a 250 km/h a 2.1 m (ETR500 – 2.12.92). La misura è relativa a "Transito n° 3 del 2.12.92; v=250 km/h – ETR500 (fase 3). Profilo temporale L(t) nel punto M1 alla distanza di 2.1 m dal binario dispari di transito. Altezza 0.40 m dal p.d.f.". [4]

alla piattaforma continua, in linea e in galleria; sono state compiute analisi dettagliate nel dominio della frequenza, cosa prima impossibile, specialmente alle basse frequenze. È evidente come il progettista possa attingere dai risultati ottenibili informazioni fondamentali per la riprogettazione o la modifica acustica dei veicoli ferroviari.

È stato implementato un semplice programma di simulazione che, se opportunamente esteso e verificato, renderà il sistema proposto assai più flessibile e meno costoso di quello tradizionale per la valutazione dell'impatto ambientale.

Si ritiene pertanto di aver messo a punto con il presente lavoro una procedura di misura e di elaborazione altamente affidabile dalle possibilità e dalle applicazioni pratiche ancora parzialmente inesplorate, che potrebbero riguardare ad esempio il monitoraggio del rumore in continuo, e quindi il controllo del deterioramento nel tempo dell'armamento e/o del rodiggio, e l'effettuazione di prove comparative di sale diverse a basso costo ed in poco tempo.

Ringraziamenti

Si ringraziano sentitamente i dirigenti ed il personale della Divisione Tecnologie e Sviluppo di Sistema del Servizio Materiale Rotabile (Area Ingegneria) delle *Ferrovie dello Stato S.p.A.* senza la cui collaborazione il presente lavoro sarebbe stato semplicemente impossibile. Si ringrazia il prof. Paolo Rissone del Dipartimento di Meccanica e Tecnologie Industriali per l'aiuto fornito nello sviluppo del programma di simulazione. Il presente lavoro è stato svolto con il contributo dei finanziamenti MURST 40% 0902118 e 0902119 e CNR PFT2 contratto n. 92. 01879 PF74.

BIBLIOGRAFIA

[1] Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri 1.3.1991: *"Limiti massimi di esposizione al rumore negli ambienti abitativi e nell'ambiente esterno"* – Gazzetta Ufficiale n. 57, 8.3.91.

[2] P. Scarano: *"Rumore ferroviario e sistemi di attenuazione"* – Ingegneria Ferroviaria 11.1991, 668-685.

[3] A. Bracciali, L. Ciuffi, R. Ciuffi, P. Rissone: – *"Continuous external train noise measurements through on-board device"* – Accettato per la pubblicazione su Journal Of Rail and Rapid Transit-Mechanical Engineering Publications – England.

[4] P. Scarano, R. Mele: – *"Emissione sonora del treno in funzione della velocità ed efficacia delle diverse tipologie di barriere antirumore"* – Ingegneria Ferroviaria 6.1993, 443-453.

[5] B. Barsikow, W.F. King III, E. Pfizenmaier: – *"Wheelrail noise generated by a hight-speed train investigated with a line array of microphones"* – Journal of Sound and Vibration 1987, vol. 118(1), 190-196.

Sommaire

METHODE INNOVATRICE POUR LE MESURAGE DU BRUIT EXTERIEUR DES CONVOIS FERROVIAIRES

Dans cet article on analyse les caractéristiques, dans le domaine du temps et de la fréquence, du bruit produit à de différentes vitesses par un convoi ferroviaire. On a accompli des recherches sur trois types de véhicules avec une vitesse jusqu'à 300 km/h en utilisant, pour le relèvement du bruit extérieur, un équipement solidaire à la boîte opportunément tarée dans le laboratoire. Les résultats obtenus sont en accord complet avec les relèvements effectués à terre et permettent leur draconienne limitation avec des avantages évidents sur le coût de l'essai. On montre également quelques résultats préliminaires concernant la simulation du bruit à terre à une distance arbitraire de la voie une fois que l'on connaît le bruit mesuré en correspondance de la boîte.

Summary

AN INNOVATING METHOD FOR THE MEASUREMENT OF EXTERIOR NOISE PRODUCED BY TRAINS

The characteristics of the control of time and frequency of noise produced at different speeds by a train are analysed in this article. Researches have been carried out on three types of rolling stock with speeds up to 300 km/h using, for the measurement of exterior noise, an appropriately laboratory calibrated equipment attached to the axle-box. The results obtained are in complete accordance with ground surveys and allow a drastic reduction of the latter with obvious benefits as regards the costs of experimentation. Some preliminary results are presented regarding ground simulation of noise at an arbitrary distance from the track, once the noise measured in connection with the axle-box is known.

Zusammenfassung

EINE NEUE METHODE ZUR MESSUNG DES AUSSENGERÄUSCHES VON ZUGSGARNITUREN

Vorliegende Arbeit befasst sich mit der Analyse der zeit- und frequenzbedingten Eigenschaften des bei verschiedenen Geschwindigkeiten von einer Zugsgarnitur hervorgerufenen Lärms. Es wurden Untersuchungen mit drei Arten von Fahrzeugen und Geschwindigkeiten bis zu 300 km/h durchgeführt, wobei zur Messung des Aussengeräusches eine direkt am Achslager angebrachte und im Labor entsprechend geeichte Einrichtung verwendet wurde. Die damit erhaltenen Ergebnisse stimmen sehr gut mit den Bodenmessungen überein, so dass deren Umfang drastisch reduziert werden kann, mit klaren Vorteilen auf der Kostenseite. Es werden auch einige erste Ergebnisse aus einer Simulation von Lärm am Boden in willkürlichem Abstand vom Gleis gebracht, die möglich wird, sobald das am Achslager gemessene Geräusch bekannt ist.