

Interazione ruota-rotai, dinamica dei veicoli ferroviari e rumore emesso

Andrea Bracciali, Renzo Ciuffi

Dipartimento di Meccanica e Tecnologie Industriali dell'Università di Firenze

Atti del 3° Convegno Nazionale del Consiglio Nazionale delle Ricerche
Progetto Finalizzato Trasporti 2
Taormina (Ct), 10÷12 Novembre 1997

SpTP 2.12.1

Sottoprogetto 2. - Veicoli

Tema 2.12. - Metodologie e tecniche per il governo dei fenomeni tipici dell'alta velocita' in campo ferroviario.

Progetto 2.12.1. - Metodologie e tecniche per il governo dei fenomeni tipici dell'alta velocita' in campo ferroviario.



Questo CDROM contiene la **Guida per gli utenti della ricerca** e gli **Atti del III Convegno Nazionale del Progetto Finalizzato Trasporti 2** del Consiglio Nazionale delle Ricerche.

La **Guida per gli Utenti della Ricerca** e' un documento a cura della Direzione e raccoglie un elenco dei risultati prodotti attraverso le ricerche sviluppate nell'ambito del Progetto Finalizzato Trasporti 2. Quanto qui registrato costituisce la seconda edizione della **Guida per gli utenti della ricerca** - Marzo 1997.

Gli **Atti** raccolgono gli articoli presentati dalle diverse Unità Operative al **III Convegno Nazionale del Progetto Finalizzato Trasporti 2** del 10-12 Novembre 1997.

Requisiti minimi di sistema

Per visualizzare la **Guida** e gli **Atti** occorre disporre di un browser HTML che supporti la visualizzazione di *frames* (per es. Netscape 2.x o Internet Explorer 3.x o superiori) ed aprire il file **pf12.htm**.

Per i soli utenti Windows 95/NT è disponibile il programma **Ricerca.exe** nella cartella **Win_pgm**.

Per utenti Windows
Windows 3.1, Windows 95, Windows NT 3.51 o superiori
Pentium 486 o superiore
8MB di RAM
Unità CD-Rom
Monitor VGA, 640x480, 256 più colori

Per utenti Macintosh
System 7.0.1 o superiore
68040, 68030 o PowerPC
8MB di RAM
Monitor di almeno 13", 256 colori
Unità CD-Rom

Interazione ruota-rotaia,dinamica dei veicoli ferroviari e rumore emesso

Andrea Bracciali, Renzo Ciuffi

Dipartimento di Meccanica e Tecnologie Industriali dell'Università di Firenze

SpTP 2.12.1

Parole chiave: Ferrovie-dinamica-rumore

Abstract: The results of the researches carried on within the PFT2 are reported. The aim of the research was to get a sound mathematical model of the elements which make up the railway system with reliable numerical data to fit in the models and the techniques to get them in order to be able to elaborate a program which could be able to perform reliable simulation of the behaviour of a given vehicle on a given track. During this work the importance of the problem of railway noise became evident and a lot of work has been performed on noise and track dynamics which is strictly related with sound emission and vehicle dynamics. As a result, while some of the tasks are obviously incomplete, important results have been attained in noise measurement and analysis, in vehicle diagnostics and a reliable competitive railway dynamics simulation program became operative.

Introduzione Lo scopo ultimo della ricerca intrapresa era di acquisire modelli matematici attendibili del comportamento degli elementi che costituiscono il sistema ferroviario (via, ruote, sale, veicolo ecc.), coefficienti attendibili da inserire nei modelli e le tecniche per ottenerli, per arrivare infine ad un programma di calcolo che, mettendo insieme gli elementi necessari, permetta previsioni attendibili della dinamica di un dato veicolo su un dato binario. Buona parte dei risultati attesi sono stati conseguiti, come verrà esposto nel seguito, ma durante il lavoro è emersa l'importanza fondamentale dal punto di vista scientifico, economico e sociale di un fenomeno strettissimamente connesso con la dinamica del sistema e cioè del rumore emesso dai veicoli ferroviari in moto, specialmente ad alta velocità, rumore che costituisce un sottoprodotto assolutamente negativo e in qualche caso addirittura limitante del sistema. Buona parte delle ricerche sono state quindi orientate anche su questo argomento. A questo e alla dinamica dei veicoli risulta infine connesso il problema della dinamica del binario al passaggio dei convogli e quindi anche a questo argomento sono state dedicate risorse. La ricerca quindi si è sviluppata secondo diversi filoni che saranno sviluppati nei corrispondenti paragrafi.

1-Rumore ferroviario

1-1. Generalità.

Come è stato accennato nella introduzione, il problema del rumore emesso dai veicoli ferroviari è diventato di importanza fondamentale da quando, col diffondersi dei trasporti di massa ad alta velocità, è aumentata la sensibilità della collettività per tutti i tipi di inquinamento, compreso quello acustico. Ciò ha portato, anche su tratti di linea costruiti da molto tempo e con traffico standard, a installare costose ed antiestetiche barriere antirumore che per di più limitano la visibilità dei passeggeri e dei residenti. Poiché il rumore emesso da un convoglio ferroviario aumenta con la velocità con legge ancor oggi non perfettamente conosciuta, il timore di livelli sonori insostenibili ha contribuito ad ostacolare la presenza sul territorio di linee allo scoperto, specialmente se ad alta velocità, contribuendo così a orientare i progetti di nuove linee verso costruzioni in galleria o in trincea con un aumento dei costi tale da mettere in pericolo lo sviluppo di un sistema di trasporto che tutti dicono di voler favorire.

Di fronte a questa situazione è stato naturale orientare le nostre ricerche innanzitutto sull'analisi del rumore emesso, in particolare da quell'elemento, la ruota, che tutta la letteratura sull'argomento indica, con la rotaia, come la principale sorgente di rumore, essendo chiaro che riuscire ad intervenire alla sorgente è molto meglio che cercare di limitarne la diffusione.

1-2. Misura ed analisi del rumore, nuovi strumenti, calibrazioni e collaudi

L'analisi del rumore ferroviario viene effettuata normalmente con l'uso di trasduttori (microfoni di misura) situati a lato della linea. Al passaggio dei treni viene rilevato l'andamento della pressione sonora, che viene poi scomposta nelle varie componenti in frequenza. Questa analisi presenta limiti notevoli nella qualità della

misura (il tempo di osservazione è troppo limitato, i dati sono poco ripetibili) e nella quantità (le misure si effettuano solo al passaggio dei treni e, perlopiù, per ragioni di ripetibilità del segnale, in una sola direzione). Analisi ingegneristiche diverse, quali la determinazione dell'emissione della ruota alle varie velocità e l'analisi spettrale precisa, sono possibili solo con attrezzature molto costose e di impiego ancora limitato alla ricerca (array di microfoni). È stata quindi sviluppata una nuova attrezzatura per la misura del rumore esterno direttamente di fronte alla ruota, sotto la boccola (fig. 1) utilizzabile quindi a veicolo in movimento, che ha consentito di ottenere dati omogenei e ripetibili per ogni tipo di treno e per tutte le velocità che è stato possibile raggiungere. [1,3].

Le fasi di progettazione e taratura sono state complesse e per esse si rimanda ai lavori citati. La posizione scelta presenta decisivi vantaggi rispetto ad altre possibili. Essa può essere molto vicina (in qualche caso solo pochi cm) alla parte inferiore della vela della ruota, quella cioè che in base a recenti esperienze è stata indicata come quella dalla quale irradia la maggior parte del rumore emesso e allo stesso tempo è schermata dalla ruota stessa da tutto quello che verrebbe dalla parte interna del binario. Questa vicinanza alla vela fa in modo che qualunque altra importante sorgente, ad es. la rotaia, sia a distanza talmente maggiore che il relativo contributo al rumore rilevato arriva al microfono significativamente attenuato permettendo così di misurare in pratica senza interferenze, almeno in campo libero o quasi, solo il rumore emesso dalla ruota, come le misure effettuate hanno dimostrato. Naturalmente per ottenere questo risultato è stato necessario disegnare una attrezzatura capace di far funzionare il microfono al riparo da interferenze causate dal vento della corsa e dalle turbolenze che inevitabilmente si generano in quella zona del veicolo e al riparo inoltre dalle accelerazioni della boccola alla quale l'attrezzatura era connessa, accelerazioni che, come è noto, possono raggiungere diverse decine di g. Un esempio di elaborazione delle misure effettuate su una vettura dell'ETRY500 e sulla Carrozza Misure Elettriche delle FS è riportato in fig. 2.

Più recentemente è stato affrontato il problema della misura puntuale e senza interferenze del rumore emesso dalla rotaia. Anche in questo caso ci si è preoccupati di progettare una attrezzatura semplice e robusta in grado di funzionare in condizioni di lavoro relativamente onerose.

È chiaro che in questo caso non era realistico pensare a qualche cosa che, come nel caso precedente, si muovesse col veicolo di fronte alla sorgente, tantopiù che questa emette rumore su una grande estensione sotto e ai lati del punto di contatto della ruota. Si è dunque pensato ad un convogliatore di suoni che potesse raccogliere l'energia sonora emessa da una determinata sezione laterale della rotaia e la convogliasse, senza distorsioni o interferenze, ad uno o più microfoni. Dopo un lungo lavoro di simulazione e sperimentale [7,9] si è arrivati alla configurazione attuale (fig.3 a) costituita da un convogliatore tubolare con variazione lineare della sezione al fondo del quale, almeno fino a frequenze dell'ordine di 4000Hz, si genera una onda piana, e da un tratto a sezione costante all'inizio del quale è l'attacco per il microfono di misura seguito da una terminazione anecoica ad altissima efficienza necessaria per eliminare interferenze da parte della fine del tubo del convogliatore. Il convogliatore, costruito in "acciaio silenzioso" (sandwich di lamiera di acciaio fortemente smorzato) per renderlo impermeabile ai rumori provenienti dall'esterno, ha il profilo della parte più larga sagomato per adattarsi perfettamente al profilo di una rotaia UNI 60 ed è diviso in tre sezioni corrispondenti a tre zone della rotaia il cui comportamento potrebbe essere significativamente diverso dal punto di vista acustico, sezioni alle quali corrispondono ovviamente tre diversi microfoni di misura. Durante le prove la continuità acustica (ma non meccanica) fra rotaia e strumento viene assicurata da semplice stucco da vetrai. Nella fig. 3 b è riportato il risultato di una simulazione FEM in campo bidimensionale del funzionamento del convogliatore alla frequenza di 4000 Hz.

1-3. Prove sul campo, prove comparative.

L'attrezzatura per la misura del rumore emesso dalla ruota di cui al paragrafo precedente è stata oggetto di numerosissime prove, sia in laboratorio che su diversi tipi di treno e sempre con ottimi risultati. In particolare si è potuto constatare che nemmeno alla più alta velocità sperimentata (circa 298 km/h) i fenomeni aerodinamici hanno mai affetto significativamente le misure che anzi hanno dato risultati sempre ripetibili. È stato quindi possibile, per vari tipi di veicoli, vetture e locomotive, elaborare le curve di regressione del livello di pressione sonora emesso L_p al variare della velocità con grande attendibilità. È stata inoltre confermata la possibilità di analisi del rumore emesso rapide e precise poichè ad ogni velocità sono sufficienti pochi chilometri per accumulare un numero di prove valide più che sufficiente per una analisi statisticamente accurata e, naturalmente, senza essere obbligati a passare e ripassare davanti a un punto fisso della linea.

Per avere un'idea delle potenzialità del metodo si è riportato, in fig. 2 l'andamento degli spettri dei livelli pesati L_p della pressione sonora per le varie velocità di prova indicate per una vettura del convoglio ETR500Y e per la vettura Misure Elettriche delle FS. Questi diagrammi sono costruiti sovrapponendo gli spettri del rumore emesso alle varie velocità e caratterizzati da colori diversi. Si nota innanzitutto che in generale, ma non sempre, il rumore emesso in una determinata banda di frequenze aumenta con la velocità e che, per ciascuna ruota, esistono particolari frequenze in cui l'emissione è particolarmente alta. Tali frequenze rimangono costanti al variare della velocità e ciò dimostra che esse sono collegate a particolari modi di vibrare della struttura della ruota e non da fenomeni esterni ad essa (vento). Analoghi diagrammi sono stati elaborati per diversi tipi di ruote e ciò ha permesso di verificare che ciascun tipo di ruota ha la sua caratteristica "impronta sonora", ciò che è importante per dimostrare che quanto si misura con questa tecnica è effettivamente qualcosa che deriva solo dalla ruota e non da altri tipi di sorgente. Ciò è stato ulteriormente dimostrato sommando in opportuna scala gli spettri relativi alle varie velocità per ogni singola ruota e confrontando i diagrammi così ottenuti per i diversi tipi di ruote, diagrammi che sono risultati completamente diversi fra loro. È stato dimostrato anche che, sempre con questa tecnica, si possono apprezzare rapidamente ed economicamente le conseguenze di qualunque variazione del disegno della ruota stessa, mirato o no alla riduzione del rumore emesso.

Particolarmente significativa a questo riguardo è stata una serie di prove effettuate nel 1994 per la misura comparativa del rumore emesso da tre tipi di sale per l'ETR500 di serie [6], sale caratterizzate appunto dalla presenza o meno di dispositivi antirumore. Durante queste prove è stata sufficiente una mattinata di prove per accumulare più dati validi e per un maggior numero di velocità col nostro sistema che in tre giorni coi microfoni a punto fisso. In occasione di questa campagna di prove ci è stato concesso, dalla cortesia e spirito di collaborazione delle FFSS oltre che, ovviamente, di effettuare le nostre prove, di poter confrontare i nostri risultati con quelli ottenuti a punto fisso. Il risultato di questo confronto è stato che i risultati dei due tipi di sperimentazione conducono agli stessi parametri di attenuazione e, ciò che è molto importante, la differenza fra i valori di L_p misurati a bordo e lungo la linea è una costante che dipende solo dalla distanza dei microfoni fissi dall'asse della linea e questo dimostra che basta una semplice taratura con microfoni fissi per permettere di prevedere il campo sonoro lungo la linea a partire dalle misure prese a bordo.

Un ulteriore notevole vantaggio dell'uso della attrezzatura in questione è che, a partire da analisi del tipo di quella illustrata in fig.2, è possibile individuare, per le velocità che interessano, le frequenze di maggior intensità di emissione e quindi di progettare eventuali schermi antirumore sintonizzati su tali frequenze, come si dirà nel successivo paragrafo.

Per quanto riguarda la misura del rumore emesso dalla rotaia con lo strumento a convogliatore non si hanno per il momento, per mancanza di microfoni di adatta sensibilità, conferme ai risultati delle misure di laboratorio, anche se sono previste entro l'estate campagne di prove a riguardo.

1-4. Progettazione di schermi mirati

Abbiamo visto nella parte generale che il rumore diffuso da un convoglio ferroviario è qualcosa che è e sempre di più sarà necessario ridurre, almeno in ambiti per il momento ristretti. Esso può essere ridotto con l'uso delle barriere antirumore, il cui effetto è però discutibile nei centri abitati ed il cui costo economico ed ambientale è sicuramente molto elevato. Le barriere antirumore inoltre, essendo destinate essenzialmente a limitare la propagazione ai lati della linea del rumore di tutti i treni che su quella linea transitano, non possono essere sintonizzate su specifiche frequenze e quindi possono avere efficienze alquanto limitate.

Una valida alternativa alle barriere antirumore può essere la schermatura dei carrelli con pannelli appositamente progettati in base alle caratteristiche di emissione di ciascun tipo di carrello (in base ad es. a diagrammi del tipo di quello riportato in fig.2) e che possono essere applicati, come retrofit, anche a moltissimi dei veicoli già in esercizio che possono essere quindi opportunamente scelti sia per la loro rumorosità che per la loro diffusione..

Un sistema del genere accompagna il veicolo e assorbe energia sonora ovunque il veicolo si trovi a viaggiare e può essere estremamente utile per limitare il livello sonoro anche all'interno delle vetture in quelle parti del percorso, come le gallerie o le trincee, dove il rumore emesso dalle ruote viene riflesso dalle pareti e rientra dentro il veicolo da tutte le direzioni rendendo assai ardua una schermatura efficiente e leggera dell'interno delle vetture o delle stesse locomotive.

Proprio per confermare con una applicazione pratica la validità delle ricerche e delle considerazioni precedentemente svolte è stato progettato e realizzato un pannello di basso spessore con elevato coefficiente di assorbimento che sfrutta il principio dei risuonatori di Helmholtz tarati su particolari valori delle frequenze

emesse da sorgenti di estensione limitata. Come frequenze da tagliare sono state scelte le due più importanti fra quelle emesse da uno dei carrelli in precedenza sperimentati con l'attrezzatura di cui al punto 1-2 [4]. Il comportamento di tale schermo è stato analizzato dal punto di vista acustico mediante prove di laboratorio simulando con un opportuno altoparlante la ruota in corsa e verificando l'attenuazione del rumore per effetto del pannello stesso. I risultati sperimentali hanno pienamente confermato quelli delle simulazioni indicando attenuazioni possibili del rumore percepito di diversi dB. Dal punto di vista strutturale si è verificato con una simulazione FEM che il pannello opportunamente vincolato potesse sopportare, senza eccessive sollecitazioni o deformazioni, i livelli di accelerazione che misure apposite avevano mostrato poter essere presenti durante la marcia.

È prevista nel prossimo futuro l'effettuazione di tests in linea con la collaborazione delle FS.

2-Dinamica del binario

2-1. Misura ed analisi delle accelerazioni del binario sotto carichi impulsivi e al passaggio dei convogli.

Come è stato detto nella introduzione, obiettivo ultimo della ricerca intrapresa è quello di integrare in un programma di simulazione della dinamica del veicolo i vari fattori che incidono su tale dinamica e in particolare quella del binario. Questa parte della ricerca, su cui esiste una bibliografia ampia e complessa, è stata affrontata, come è stato anche per altri aspetti della ricerca, sia dal punto di vista teorico che sperimentale. Per quello che riguarda quest'ultimo si sono percorse le due vie della misura della risposta del binario a carichi impulsivi noti e della misura delle accelerazioni di opportune sezioni della rotaia al passaggio dei treni. Dal confronto di questi due tipi di segnali si pensa di trarre le informazioni necessarie per la elaborazione di un modello del binario sufficientemente accurato per le successive utilizzazioni che si pensa di eseguire.

In due campagne di prova, svoltesi nel 1995 e nel 1996, è stato strumentato con accelerometri un tratto della linea Firenze-Roma e con essi si è raccolta una notevole mole di dati relativi sia, come già detto, a carichi impulsivi noti impartiti con martello strumentato, sia al passaggio di treni di ogni tipo e in un discreto campo di velocità. I risultati ottenuti, sinteticamente esposti in [5], hanno permesso di evidenziare la differente risposta del binario al passaggio dei vari tipi di convogli e di indirizzare ulteriori ricerche sia verso l'utilizzazione delle registrazioni per la diagnostica degli organi di rotolamento, sia per l'esplicitazione dei modi propri di vibrare della rotaia alle varie frequenze, sia per le modalità di propagazione delle vibrazioni nella rotaia. Il risultato che ci si attende è infine la modellazione di un binario equivalente finalizzato alla utilizzazione in un programma avanzato di dinamica dei veicoli e anche alla ricostruzione indiretta delle forze di binario utilizzando allo scopo particolari elaborazioni delle serie temporali costituite dalle sequenze dei segnali di ingresso impartiti (forza) e dei segnali di uscita (accelerazioni).

Il problema non è dei più semplici poichè per la sua soluzione è innanzitutto necessario arrivare a una modellazione della risposta del binario a carichi mobili e il cui valore istantaneo dipende appunto dalla dinamica dei due sistemi in contatto e da quanto è avvenuto in precedenza oltretutto da fattori quali la reale geometria del binario e delle ruote che mal si prestano ad essere quantizzati e introdotti in un sistema più ampio. Della difficoltà del problema fanno fede il valore e la quantità dei ricercatori che ci si sono cimentati.

2-2. Diagnostica dei veicoli in transito a partire dalle accelerazioni di binario.

L'analisi delle vibrazioni di cui al punto precedente può essere utilizzata vantaggiosamente per scopi diagnostici. Già l'esame visivo delle serie temporali delle accelerazioni registrate permette di apprezzare quanto diverse possano essere le conseguenze del passaggio di veicoli apparentemente identici e di individuare immediatamente quei carrelli che mostrino un comportamento che si discosta in maniera sensibile dalla norma. L'utilizzazione poi dei diversi programmi disponibili di elaborazione dei dati permette di quantificare con pochi indicatori significativi certi livelli di interazione ruota-binario. L'uso di criteri di soglia per i valori di accelerazione massima o di composizione spettrale non è però sempre sufficiente per garantire l'esatta classificazione ed il riconoscimento della difettosità delle superficie di rotolamento delle ruote ferroviarie e/o dei relativi cuscinetti. Esistono infatti dei difetti, come ad esempio gli spiattellamenti delle ruote (wheeflats) dovuti al bloccaggio delle stesse durante la frenatura, che non necessariamente sono associati a ruote con superficie di rotolamento molto rovinate e che pertanto possono fornire globalmente un livello modesto di energia alla rotaia pur potendone gli effetti, in termini di danneggiamento della stessa, essere deleteri oltre a costituire un notevole motivo di disagio per eventuali passeggeri.

Per poter individuare chiaramente questi difetti, anche quando gli stessi sono associati a un elevato livello globale di accelerazione, è stata sviluppata una metodologia combinata mediante l'uso di tecniche energetiche e della funzione *cepstrum* che consente la individuazione delle ruote globalmente difettate con minimi errori e l'individuazione corretta dei picchi dovuti agli spiattellamenti delle ruote. I risultati saranno oggetto di prossime pubblicazioni.

2-3. Determinazione delle forze di contatto ruota-rotaia.

La forza di contatto ruota-rotaia non è evidentemente misurabile direttamente se non staticamente. L'uso di sale strumentate con estensimetri consente la ricostruzione indiretta di tali forze ma la dinamica del sistema meccanico e di quello di misura limitano in frequenza il campo di attendibilità delle misure. Nel campo del rumore, con frequenze importanti fino a circa 5 kHz, non si ha notizia a tutt'oggi di sistemi completamente attendibili per la misura della forza di contatto anche perché i sistemi ruota e rotaia hanno risposte dinamiche assai complesse. Poiché tuttavia la determinazione di tali forze è di fondamentale importanza in molti campi della tecnica ferroviaria, si è pensato di arrivarvi per via indiretta ossia analizzando la dinamica della rotaia. Il lavoro relativo è ancora in corso (vedi i punti precedenti). Già ora però, utilizzando la tecnica descritta al punto 2-1, è stato messo a punto un algoritmo di ricostruzione della forza mutua che è stato collaudato in laboratorio con buoni risultati su una trave molto smorzata appositamente costruita, mostrando una un'ottima ripetibilità fino a 5 kHz [5] (vedi fig. 3).

3-Dinamica dei veicoli ferroviari

3-1. Il sistema veicolo-binario come sistema ad n gradi di libertà ed individuazione delle equazioni corrispondenti.

Questo è il problema dal quale si è partiti con la nostra ricerca anche se in realtà lo si dovrebbe considerare come il punto di arrivo. Naturalmente durante gli anni trascorsi sono stati prodotti programmi di simulazione sempre più perfezionati di tipo tradizionale in attesa che sia possibile implementarli con i risultati della dinamica dei sistemi continui

La modellazione della dinamica dei veicoli è tradizionalmente effettuata mediante la scrittura manuale e la soluzione numerica di sistemi di equazioni differenziali fortemente non lineari a causa del contatto ruota-rotaia e delle caratteristiche dei veicoli (sospensioni non lineari, tamponi di fine corsa,...).

Recentemente si va diffondendo l'uso dei cosiddetti codici *multibody* che sono però piuttosto complessi nel loro uso e relativamente costosi. Per parte nostra abbiamo preferito sviluppare metodologie semplificate per la costruzione del modello di veicoli ferroviari mediante l'uso di codici agli elementi finiti di uso commerciale che consentono di modellare velocemente e con costi limitati la quasi totalità dei veicoli ferroviari. La scrittura delle equazioni corrispondenti si limita quindi ai soli termini non lineari che sono relativamente pochi e semplici da individuare. Con questo sistema è stato scritto un programma per la dinamica di marcia di un veicolo a carrelli con assili tradizionali o con ruote indipendenti con complessivi 23 gradi di libertà

3-2. Il contatto ruota-rotaia e la determinazione delle forze relative.

Tutte le simulazioni che sono state effettuate della dinamica dei veicoli ferroviari dimostrano l'assoluta importanza di una corretta analisi della geometria di contatto (punto di contatto nominale, inclinazione della normale, area di contatto ecc.). Ad essa quindi sono stati dedicati molti studi e verifiche che hanno permesso di dimostrare quanto variazioni anche minime dello scartamento e dell'angolo di calettamento abbiano grandi conseguenze sulla dinamica di marcia.

3-3. La linearizzazione del sistema ed i relativi autovalori.

Naturalmente il programma elaborato consente anche la soluzione del sistema opportunamente linearizzato, sia per una ricerca rapida degli autovalori del sistema sia per la ottimizzazione dei parametri di funzionamento.

3-4. La soluzione del sistema non lineare e confronto con le soluzioni del sistema linearizzato.

Tradizionalmente i codici di calcolo per la simulazione della dinamica di marcia non lineare sono scritti in FORTRAN e così è stato anche per i primi nostri programmi. Gli ultimi programmi di calcolo sono stati sviluppati utilizzando il linguaggio simbolico SIMULINK, il cui vantaggio è la grande semplicità di scrittura delle equazioni e l'estrema chiarezza della schematizzazione effettuata. In fig. 4 è mostrato il pannello di

controllo che compare sul monitor del PC per il programma SIMULINK di simulazione della dinamica di un veicolo a carrelli. Lo svantaggio principale di questo metodo è costituito dall'allungamento dei tempi macchina per il calcolo, anche se le risorse sempre più potenti dei PC odierni riducono notevolmente tali limitazioni. I risultati della grande mole di calcoli finora eseguiti sono molto interessanti poichè sia in curva che in rettilineo, con assili tradizionali o a ruote indipendenti si possono calcolare tutte le grandezze che interessano istante per istante (forze secondo i tre assi, spostamenti, soglie di comparsa di fenomeni di instabilità ecc.).

In mancanza di una verifica sperimentale diretta dei risultati delle simulazioni eseguibili con questo programma si è seguita la strada di una verifica indiretta[10] confrontando i risultati ottenuti col nostro programma con quelli,relativi ovviamente allo stesso veicolo, ottenuti con un programma commerciale molto diffuso. I risultati di questo confronto hanno mostrato una sostanziale equivalenza dei due programmi e perfino una migliore aderenza del nostro alla realtà sperimentale in certi casi (binari con posa 1/20).

Il confronto fra i risultati delle soluzioni numeriche (intrinsecamente molto più completi) e linearizzate ha evidenziato differenze che rendono problematica la confidenza in queste ultime, anche se si è cercato di ottimizzare i parametri della linearizzazione.

3-5. Applicazione della dinamica dei sistemi continui.

Nell'analisi tradizionale della dinamica dei rotabili i vari corpi sono considerati come semplici elementi a parametri concentrati (masse, rigidità, smorzatori). Volendo investigare le frequenze più elevate, i modi propri di vibrare dominano la risposta dinamica del sistema, che può essere di vari ordini di grandezza superiore a quella statica per i limitati valori di smorzamento presenti. Ciò è quello che si è cominciato a fare con gli studi sulla dinamica delle rotaie, come è stato spiegato nei paragrafi precedenti. Oltre a questo è stata effettuata l'analisi modale sperimentale della sala di un ETR500Y [2], analisi che ha rivelato comportamenti assai peculiari e caratteristici, evidenziando frequenze proprie relativamente basse e la grande influenza della presenza dei dischi mentre analisi fino a frequenze molto più elevate saranno necessarie per poter valutare le stesse dal punto di vista della emissione acustica

4- Conclusioni

Nel presente lavoro sono stati esposti i risultati di un lavoro ormai pluriennale nel campo della dinamica, a bassa ed alta frequenza, dei veicoli ferroviari. In alcuni campi, come quello dell'analisi del rumore e della sua attenuazione si ritiene che siano stati conseguiti risultati di rilievo che attendono solo di essere valorizzati da una applicazione più estesa. In altri, come nella simulazione tradizionale della dinamica dei veicoli ferroviari, si sono elaborati programmi già ora operativi e che, per essere stati elaborati autonomamente, saranno in futuro ulteriormente ampliati e resi più completi per indagare l'influenza di parametri ancora non presi in considerazione. In altri ancora, malgrado i progressi compiuti, ulteriore lavoro è ancora necessario ma anche in questi campi si sono poste le basi di quella padronanza dei fenomeni dinamici, sia a bassa che ad alta frequenza, che permetteranno di simulare, con la necessaria affidabilità, tutte le situazioni che possono interessare il progettista e l'operatore dei sistemi ferroviari.

5- Riconoscimento

Si desidera ringraziare il personale delle Ferrovie dello Stato che con la sua cortese e liberale collaborazione ha permesso la realizzazione di molte delle ricerche che qui sono state esposte.

Bibliografia.

- [1] A. Bracciali, L. Ciuffi, R. Ciuffi - Metodo innovativo per la misura della rumorosità esterna dei convogli ferroviari - *Ingegneria Ferroviaria* n.6, giugno 1994
- [2] A.Bracciali, P.Rissone "Analisi modale sperimentale della sala di un convoglio ad alta velocità" *Ingegneria Ferroviaria* 7/8/1994 pagg 394-407
- [3] A. Bracciali, L. Ciuffi, R. Ciuffi, P. Rissone - Continuous external train noise measurements through an on board device - *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers part F*, vol 208, 1994
- [4] L. Carobbi, P. Pellegrini "Progettazione di schermo acustico per carrelli ferroviari ad alta velocità" Tesi di Laurea, Fac. di Ing. Università di Firenze, a.a. 1994-95
- [5] G. Cascini "Un modello per la ricostruzione del segnale prodotto da sorgenti mobili ed applicazione alle vibrazioni di binari ferroviari" Tesi di Laurea, Fac. di Ing. dell'Università di Firenze, a.a. 1994-95

- [6] 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 ETR 500 FS train" Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers part F, may 1997
- [7] S. Masoni, "Progetto, realizzazione e caratterizzazione di uno strumento per l'analisi dell'emissione acustica non stazionaria da parte di superficie solide" Tesi di Laurea, Fac. di Ing. dell'Università di Firenze, a.a. 1995-96.
- [8] A. Bracciali, G. Cascini, "Un'attrezzatura per la misura del rumore emesso da una superficie vibrante", Atti del 25° Congresso Nazionale Associazione Italiana di Acustica, Perugia, 21-23 maggio 1997 pagg. 551-558.
- [9] A. Bracciali, G. Cascini, "Ottimizzazione acustica di una terminazione anecoica" Atti del 25° Congresso Nazionale Associazione Italiana di Acustica, Perugia, 21-23 maggio 1997 pagg. 167-174
- [10] M. Capperi, "Approccio FEM alla modellazione dei veicoli ferroviari e simulazione della dinamica di marcia" Tesi di Laurea. Fac. di Ingegneria dell'Università di Firenze. a.a. 1995-96
- [11] P. Acciai, "Soluzione numerica del modello PDE della dinamica verticale di un binario" Tesi di Laurea Fac. di Ingegneria dell'Università di Firenze, a.a. 1996-97

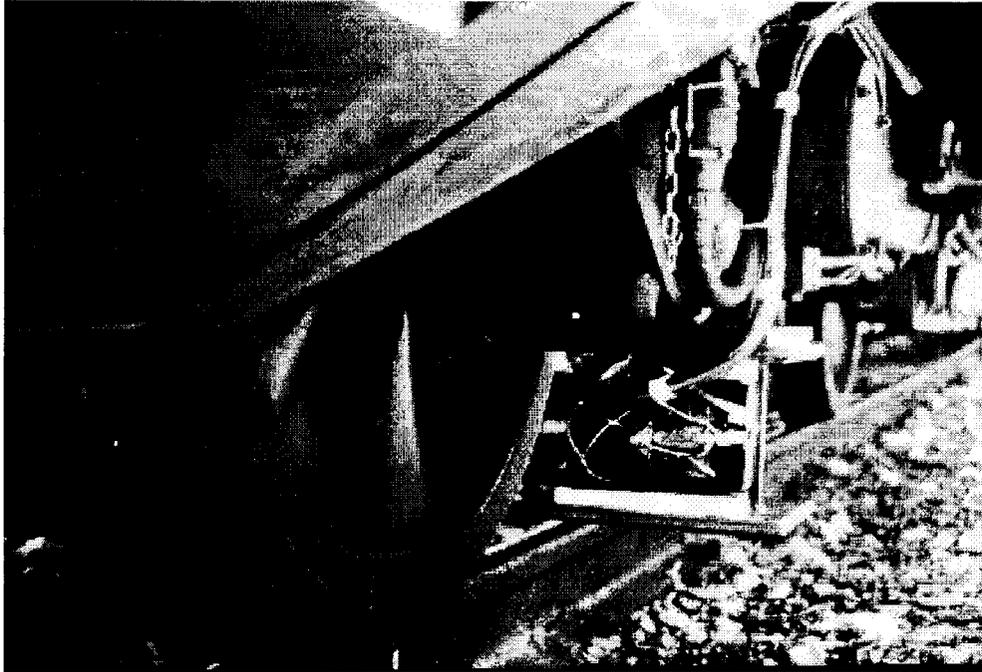


Fig. 1. Attrezzatura per la misura del rumore in boccola applicata ad una vettura del convoglio ETRY500.

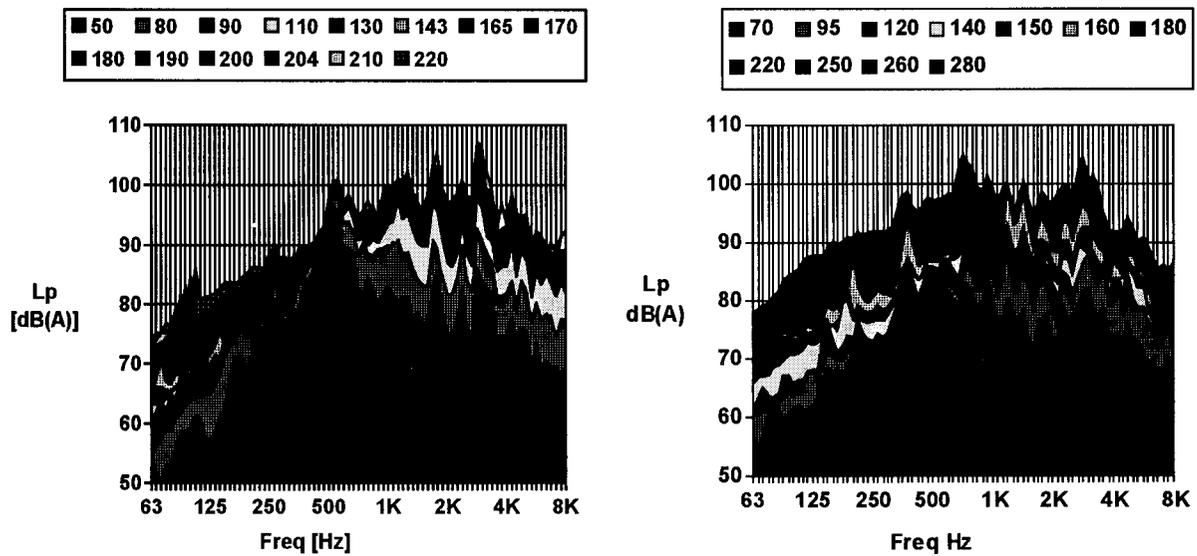


Fig. 2. Spettri in 1/12 d'ottava misurati con l'attrezzatura per la rilevazione del rumore in boccola per il carrello F85 (a sinistra, da 50 a 220 km/h) e per la vettura dell'ETRY500 (a destra, da 70 a 280 km/h).

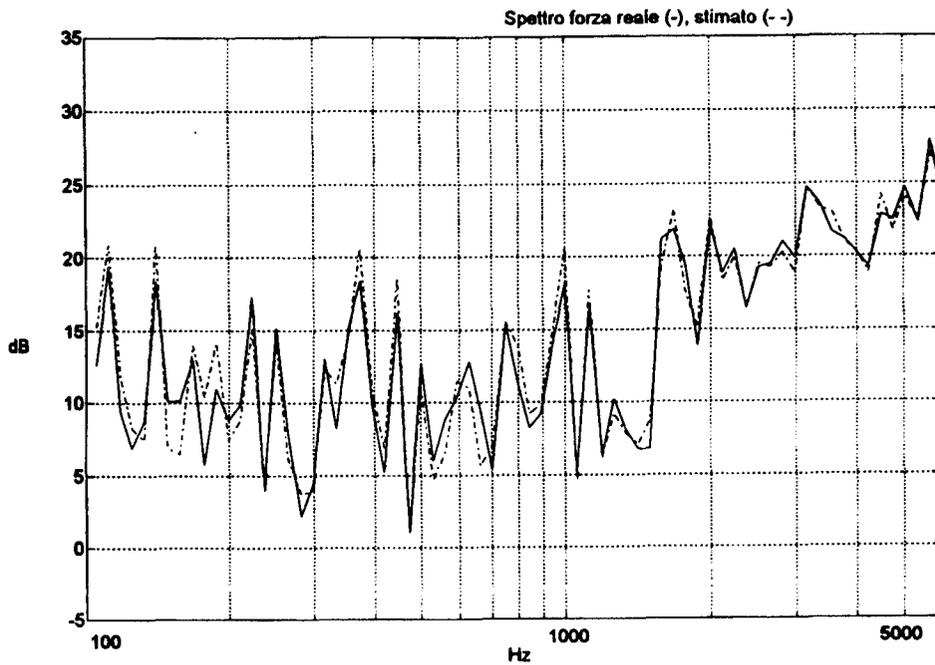


Fig. 3. Distribuzione spettrale misurata e ricostruita di una forzante mobile impartita ad un sistema fortemente smorzato.

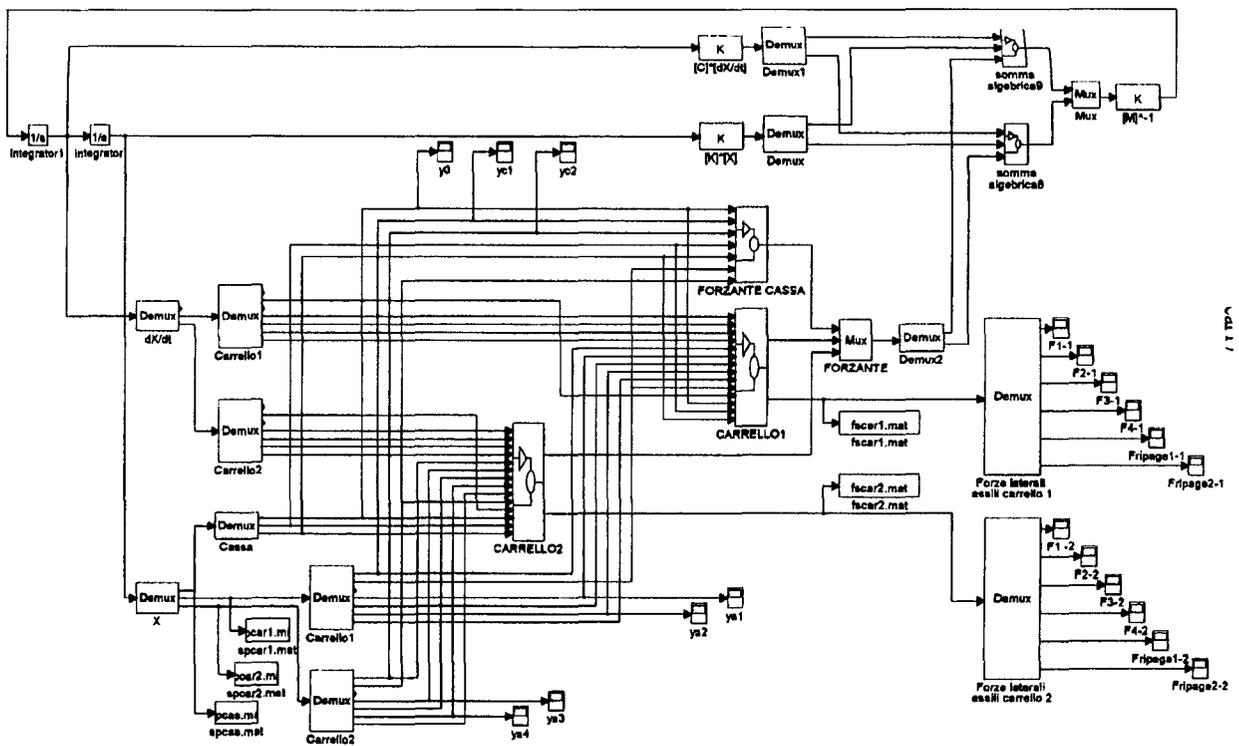


Fig. 4. Diagramma a blocchi in ambiente Simulink per la modellazione della dinamica di marcia di un veicolo ferroviario a 17 gradi di libertà.

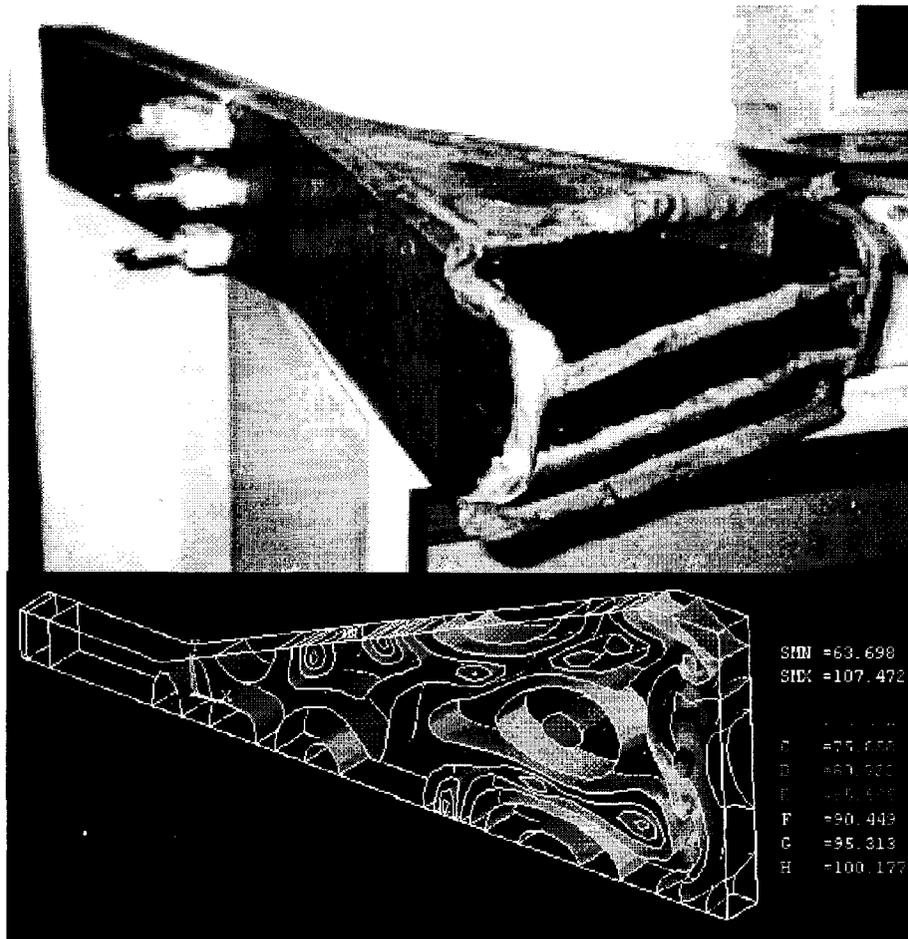


Fig. 5. Prototipo di attrezzatura per la misura del rumore emesso dalla sola rotaia (in alto). Si noti il sigillante per limitare l'effetto del rumore proveniente dalla ruota in transito. Simulazione FEM a 3 kHz del campo acustico nel condotto convergente e nella terminazione anecoica dell'attrezzatura (in basso). Si noti la formazione dell'onda piana nella zona in cui viene montato il microfono.