

**NUOVI STRUMENTI PER LA DIAGNOSTICA INDIRECTA DEGLI ORGANI
DI ROTOLAMENTO DEI VEICOLI FERROVIARI**

R. Ciuffi, A Bracciali, F. Piccioli

*Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Tecnologie Industriali, Università di Firenze,
Via di S. Marta 3 – 50139 Firenze, e-mail: ciuffi@dmf.unifi.it*

Sommario – Nell'ambito di una ricerca finanziata dal MURST sulla diagnostica vibroacustica dei sistemi meccanici, il Gruppo di Lavoro dell'Università di Firenze studia, tra l'altro, la diagnostica degli organi di rotolamento dei veicoli ferroviari mediante il rilievo e l'analisi delle accelerazioni del fungo delle rotaie al passaggio dei convogli. Per quanto riguarda l'analisi delle accelerazioni e del rumore emesse dalla rotaia il lavoro è già estremamente avanzato. Il passo successivo che si intende compiere è quello di correlare questi tipi di segnale con lo stato della superficie di rotolamento delle ruote al fine di una manutenzione razionale delle stesse. Per questo si è resa necessaria la disponibilità di una strumentazione in grado di rilevare, con la necessaria accuratezza, la superficie tridimensionale della ruota. Viene qui illustrato il progetto e la realizzazione del prototipo di una attrezzatura di questo tipo e si dà notizia dei risultati ottenuti con l'attrezzatura stessa e di come si pensi, anche alla luce dei primi risultati di una campagna di prove mirata che si svolge con la collaborazione di Trenitalia S. p. A., di mettere in relazione i dati geometrici raccolti con quelli accelerometrici ottenuti da un binario attrezzato ai fini diagnostici.

La campagna di prove mirata di cui sopra permetterà di rilevare, a diverse velocità, le sigle vibroacustiche di veicoli che stanno per essere avviati alle officine di revisione dove potranno essere raccolti, nelle migliori condizioni, i dati geometrici necessari.

1. INTRODUZIONE

- I sistemi di trasporto attuali sono particolarmente sensibili a due fattori fondamentali: la sicurezza e l'economia di esercizio. Ciò vale in particolare per i trasporti ferroviari sia perché essi hanno sempre avuto come punto di forza la sicurezza sia perché il venir meno di questa coinvolge di solito un gran numero di persone ed è ampiamente enfatizzato dai media. D'altra parte i costi di un sistema di trasporto ferroviario moderno sono talmente alti che ogni voce di essi deve essere vagliata e limata. Uno dei costi maggiori in questo campo è rappresentato dalla manutenzione dei veicoli e delle linee poiché le alte prestazioni che si richiedono sono possibili solo con linee e veicoli in ottime condizioni mentre veicoli in cattive condizioni (rodiggi usurati o deformati) non solo sono capaci di danneggiare anche gravemente il binario ma anche di mettere a rischio la sicurezza. Oggigiorno poi, con la separazione della gestione delle linee da quella dei trasporti, l'ammissione al transito o a tariffe differenziate dei singoli veicoli possono venire subordinati a una valutazione quantitativa della loro aggressività nei riguardi del binario. Per questo in tutto il mondo fioriscono gli studi e le iniziative per migliorare la manutenzione di veicoli e linee rendendole soggette a diagnostica continua o semicontinua in modo da intervenire non a scadenze fisse di tempo o di chilometraggio ma al raggiungimento di uno stato di degrado prefissato e quindi con la massima economia e senza correre i rischi che una ruota molto danneggiata comporta sia per la linea che per il veicolo su cui è montata.

Nell'ambito di una ricerca portata avanti da molti anni ci siamo posti l'obiettivo di ricavare, dalla misura e dall'analisi delle accelerazioni del binario al passaggio di un convoglio, una valutazione qualitativa e quantitativa dello stato degli organi di rotolamento dei singoli veicoli e in particolare della superficie di rotolamento delle ruote, superficie sulla quale si manifestano i danneggiamenti e le irregolarità geometriche dovute al servizio e alle imperfezioni del materiale e della sua gestione.

Per quanto riguarda il rilievo e l'elaborazione delle accelerazioni l'attività del nostro Gruppo di Lavoro ha già dato frutti (1),(2),(3),(4). L'attività di cui qui si riferisce è rivolta alla creazione e messa a punto di strumenti hardware e software per collegare i segnali di accelerazione delle rotaie con la macro e microgeometria delle ruote che vi transitano sopra

2. L' ATTREZZATURA PROTOTIPO PER IL RILIEVO DELLE SUPERFICIE

. Per il rilievo topografico delle superficie (ruote e rotaie) esistono sistemi ottici digitali che tuttavia hanno attualmente costi che il nostro Gruppo non è assolutamente in grado di sostenere. Per questo è stata ideata, progettata, costruita e collaudata una attrezzatura per ottenere gli stessi risultati che, pur essendo assai più economica, si è rivelata di sufficiente precisione e capace di fornire risultati ripetibili.

Tale attrezzatura è costituita da una serie di 8 laminette di acciaio per molle incastrate (figg. 1 e 2) l'una accanto all'altra fra una piastra di supporto e una piastrina di incastro. L'estremo libero di ciascuna lamina è piegato di un certo angolo rispetto alla lamina stessa e acuminato. Una coppia di estensimetri è incollata sui due lati di ciascuna lamella in prossimità dell'incastro in modo tale che sia possibile misurare, in campo lineare, attraverso le tensioni rilevate alla radice della lamina, lo spostamento dell'estremità della lamina stessa rispetto alla sua posizione iniziale.. Due estensimetri incollati sui due lati di ciascuna lamella in prossimità dell'incastro costituiscono un semiponte col quale è possibile misurare, in campo lineare, attraverso le tensioni rilevate alla radice della lamina, lo spostamento dell'estremità della lamina stessa

rispetto alla sua posizione iniziale. La piastra di supporto è articolata attorno a un asse normale a quello delle lamine rispetto a una struttura di sostegno e fissaggio.



Fig.1-Attrezzatura per la mappatura della superficie di rotolamento delle ruote ferroviarie.

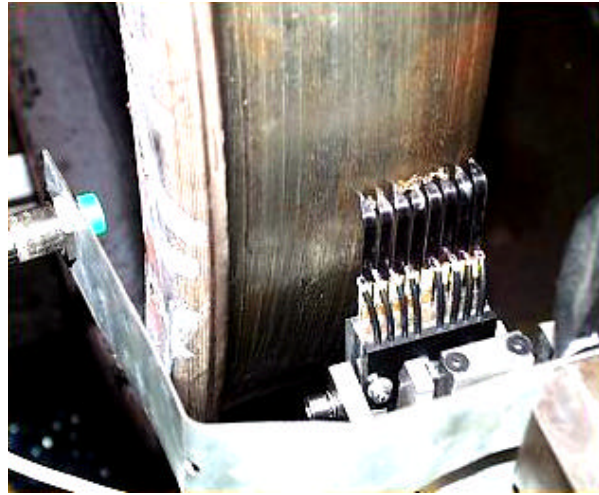


Fig.2-L'attrezzatura di fig. 1 montata su un tornio mentre misura una ruota.

Questa attrezzatura è stata collaudata prima nel laboratorio del Dipartimento e quindi presso l'Officina Grandi Riparazioni di Firenze Porta al Prato delle FFSS su una sala fortemente usurata in attesa di revisione montata su un tornio per la ritornitura delle ruote. Il campo di misura lineare è risultato dell'ordine di 15 mm con una sensibilità effettiva di circa 0.1 mm.

3. Misure relative alle ruote di una sala usurata

Disponendo l'articolazione dell'attrezzatura parallela all'asse di rotazione della (è montata su un tornio per la ritornitura delle ruote) finché tutte le lamine non sono premute opportunamente con la punta contro la ruota, è possibile avere, facendo ruotare la ruota a velocità costante, un segnale in ordinate proporzionale agli spostamenti radiali delle punte di ciascuna lamella dalla posizione iniziale e in ruota e accostando il tutto alla ruota da mappare (fig.2) (la ruota con tutto l'assile ascisse gli angoli percorsi lungo la periferia della ruota (vedi ad es. la fig. 3). Lo stesso risultato è possibile anche a velocità variabile portando in ascissa il segnale di uscita di un encoder che misuri gli angoli di rotazione della ruota

Per il riferimento angolare si può utilizzare un encoder assoluto oppure, disponendo alla periferia della ruota un blocchetto ferromagnetico e sulla stessa circonferenza, ma fisso, un pick-up magnetico, è possibile avere, oltre alle otto tracce delle otto coppie di estensimetri, anche il segnale corrispondente all'inizio di un nuovo giro. Si possono così rilevare le intersezioni reali della ruota con otto piani normali all'asse. Spostando lateralmente l'attrezzatura, con una seconda passata si possono raccogliere altre intersezioni, usualmente sette (una lamina di estremità viene fatta ripassare di solito sulla traccia della lamina corrispondente all'altra estremità come riferimento. Essendo la fascia esplorata con una passata di $8 \times 7 = 56$ mm sono sufficienti due passate per coprire tutta la parte rilevante della tavola di rotolamento, escluso il bordino. Naturalmente si

possono effettuare quante passate si vogliono spostando l'attrezzatura di quantità frazioni del passo (7 mm) delle lamelle in modo da avere la superficie della ruota definita con maggiore dettaglio. Riportando in coordinate polari i dati delle figure come la 3 con gli spostamenti rispetto alla posizione di riferimento riportati in scala amplificata rispetto ai raggi, si possono avere altre rappresentazioni dei segnali raccolti, rappresentazioni che qui non si riportano per brevità

Una volta realizzate le intersezioni volute un programma di interpolazione appositamente elaborato permette di definire e visualizzare tutta quanta la superficie di rotolamento di interesse (fig. 4).

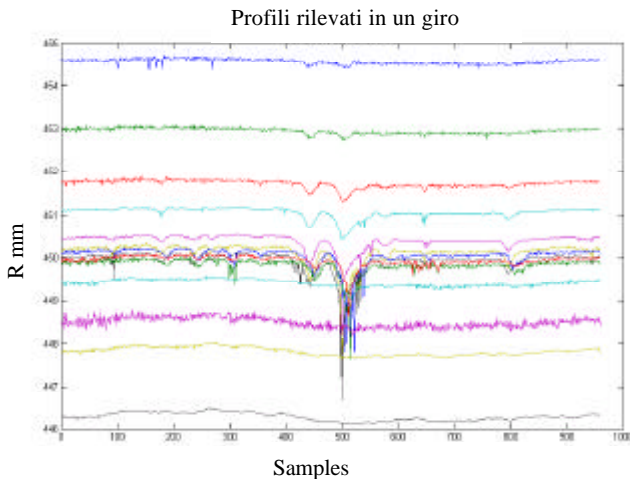


Fig.3-Spostamenti delle diverse lamelle in funzione dell'angolo di rotazione

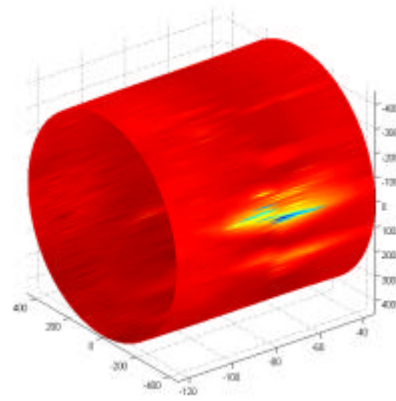


Fig.4-Superficie di rotolamento .

4. Elaborazione dei risultati in vista dei futuri sviluppi della ricerca

Il passo successivo è quello di ricavare, dalla mappa della superficie, una o più possibili sequenze di discontinuità rispetto al contatto della rotaia con una superficie di rivoluzione e quindi una o più possibili sequenze di urti di intensità corrispondente alle discontinuità della ruota reale contro una rotaia ideale. A questo fine è spesso irrilevante

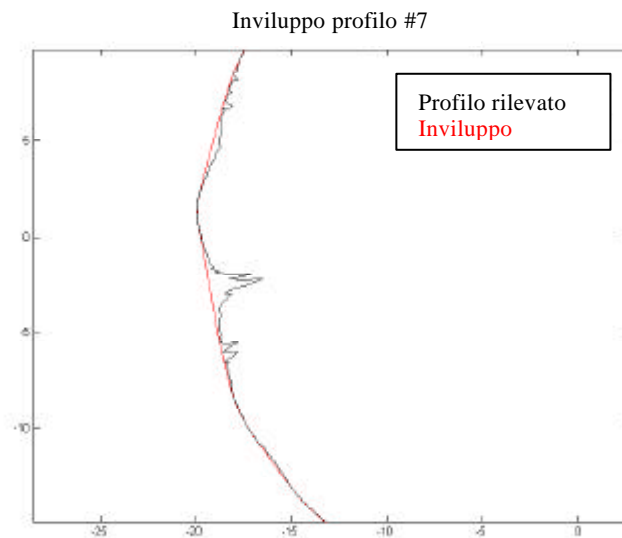


Fig.5-Esempio d'involuppo di un profilo. Profilo n. 7

la profondità radiale di un cratere o comunque di un danneggiamento profondo della ruota in quanto, rispetto ad esso la rotaia non si adatta al profilo ma rappresenta solo una superficie di contrasto sulla quale entrano in contatto solo i bordi del cratere stesso ma non il fondo. Il primo passo è stato quindi quello di elaborare, per i tratti di profilo danneggiato, la spezzata circoscritta al profilo stesso (fig. 5) e, successivamente, l'area compresa entro la linea chiusa così ottenuta e la differenza fra questa e quella della circonferenza non danneggiata. Quest'ultimo parametro, sezione per sezione, è riportato in fig. 6. e può essere mediato per avere un unico parametro di confronto. Nella stessa figura sono anche riportati, sezione per sezione, i valori delle massime differenze di area locali fra il profilo circolare e la corde e i valori massimi della corda.

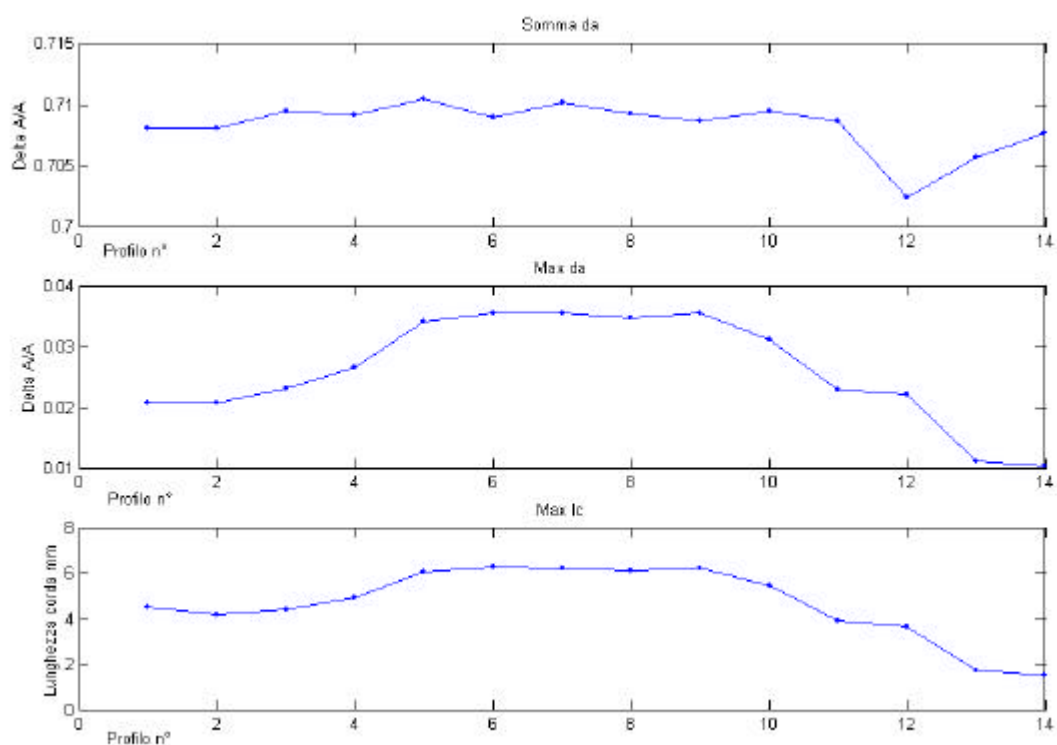


Fig.6-Dall'alto in basso:

- 1) Differenza totale aree
- 2) Massimo differenza area corda/cerchio
- 3) Massimo lunghezza della corda

E' anche possibile distinguere, in un parametro di questo tipo, il contributo di molti piccoli danneggiamenti in confronto di quello un'unica grande sfaccettatura come quelle che spesso si verificano come conseguenza del bloccaggio della sala in sede di frenatura di arresto. Questa distinzione è stata effettuata per i risultati di misure accelerometriche recentemente effettuate nell'ambito della campagna di prove a cui abbiamo precedentemente accennato.

5. Risultati preliminari di misure accelerometriche su binario

Attrezzando il binario di prova con una serie di cinque accelerometri disposti su una rotaia ad uguale distanza l'uno dall'altro ed in egual posizione rispetto alle traversine in modo da coprire la distanza percorsa da una ruota in un giro, è stato possibile isolare il segnale di accelerazione relativo alle singole ruote e per un intero giro e ricavarne, ad

esempio, l'energia complessiva. E' anche possibile, ad esempio, valutare, per ciascuna ruota, l'energia dei campioni che superano il 95 percentile dell'energia totale. Per ruote con danneggiamenti fortemente localizzati questa parte dell'energia è vistosamente superiore alla stessa in ruote uniformemente usurate. Dal confronto delle due è quindi possibile individuare le ruote con forti danneggiamenti localizzati, ruote che dovrebbero pertanto essere ritirate dal servizio e ritornite.

Nella fig. 7 in alto sono riportati, a titolo di esempio, i valori RMS totali delle accelerazioni corrispondenti alle ruote di un convoglio speciale organizzato dalle FFSS per la nostra ricerca. In ascissa è riportato il numero progressivo delle ruote del convoglio in ordine di passaggio di fronte alla postazione di misura e in ordinate i valori RMS del segnale relativo. Il convoglio era costituito da una locomotiva a 6 assi (assi 1-6), n. 3 bagagliai a carrelli equipaggiati con freni a dischi (assi 7-18), n. 2 vetture cuccette equipaggiate con freni a dischi (assi 19-26) e n. 4 carri a due assi con freni a ceppi (assi 27-34). Nella stessa figura in basso sono riportate nello stesso modo le parti di RMS relative alle varie ruote che superano il 95 percentile.

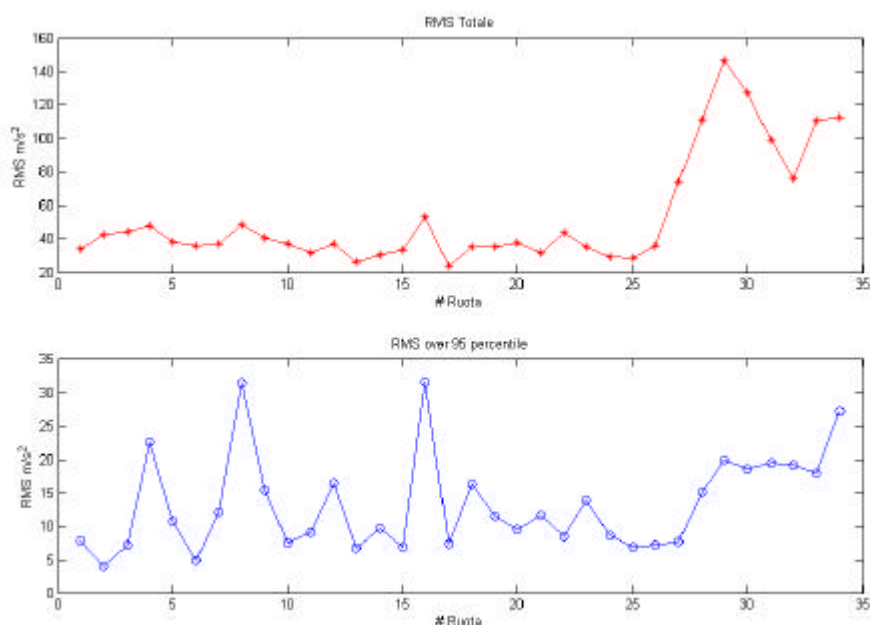


Fig. 7- In alto: valori totali RMS delle accelerazioni relative alle singole ruote del treno speciale sul tratto di binario strumentato. Passaggio a 75 km/h. In basso la parte di RMS che eccede il 95 percentile.

Dalla fig. 7 si può avere la conferma di un fatto già noto in letteratura e confermato anche da nostre personali esperienze, che cioè i veicoli frenati a ceppi liberano al loro passaggio una quantità di energia (vibrazioni, rumore) molto superiore a quella liberata dai veicoli muniti di freni a dischi. Infatti i valori di RMS totale associati agli ultimi 8 assi (da 27 a 34) sono molto maggiori di quelli degli altri assi. La locomotiva è frenata a ceppi ma con intensità di frenatura bassa rispetto ai carri e soprattutto alle vetture. Tuttavia, proprio per la maggior intensità di frenatura dei convogli passeggeri, più veloci dei treni merci, è più facile che le ruote delle vetture si blocchino durante la frenata, malgrado la presenza di dispositivi antislittamento, dando luogo a spiattellamenti (wheelflats) delle superficie di rotolamento, causa di sovrasollecitazioni e rumore talvolta assai elevati. Anche nel convoglio di cui alla fig. 7. probabilmente non mancano danneggiamenti del genere, come testimoniano gli alti valori del grafico della parte inferiore della citata figura relativi alle ruote 4, 8, 16 e probabilmente, anche se in

misura minore, per le ruote 12 e 18.. Avendo in futuro a disposizione, secondo accordi già presi con Trenitalia S. p. A., la possibilità di mappare un numero sufficiente di ruote di cui si sia precedentemente rilevata la sigla vibroacustica della rotaia al passaggio delle ruote in questione, si ritiene di poter definire, mediante opportuna elaborazione dei segnali ottenuti, una sorta di funzione di trasferimento fra geometria della ruota e vibrazioni imposte alla rotaia in modo da potere, estendendo tale doppia indagine a un numero sufficiente di campioni significativi di ruote, prevedere quantitativamente lo stato delle superficie e quindi la necessità o meno di revisione dei profili semplicemente in base ai segnali di accelerazione raccolti.

6. Conclusioni e possibili ulteriori sviluppi della ricerca

La ricerca che è stata presentata verte essenzialmente sul rilievo della superficie di rotolamento delle ruote ferroviarie e per questo è stata progettata e messa a punto una attrezzatura che si è dimostrata perfettamente atta allo scopo malgrado la sua semplicità e il suo basso costo. Tuttavia, allo scopo di semplificare e migliorare il lavoro è già stata disegnata una attrezzatura di seconda generazione capace di analizzare un numero maggiore di punti contemporaneamente, con una sensibilità circa doppia rispetto a quella attuale, con campo di misura della singola postazione indipendente dalla posizione rispetto alla ruota e con minore tendenza ad impuntarsi e a vibrare. Per quanto riguarda poi l'analisi e la elaborazione dei risultati i progressi relativi verranno dettati dalla necessità di correlare i dati relativi alla superficie di rotolamento con quelli ottenuti dagli accelerometri di misura del binario strumentato. Quanto è stato qui riportato in merito è stato riferito a titolo informativo, non essendo al momento disponibili dati dei due tipi relativi alle stesse ruote ma sembra estremamente probabile che, dati i risultati del lavoro preliminare, gli strumenti per correlare qualitativamente e quantitativamente le sigle vibroacustiche del binario con lo stato della superficie di rotolamento delle ruote saranno, in tempi non troppo lunghi, disponibili.

Il presente lavoro è stato realizzato coi fondi MURST per il finanziamento di programmi di ricerca scientifica di rilevante interesse nazionale con la preziosa e necessaria collaborazione di Trenitalia S. p. A..

Si desidera ringraziare vivamente il Tecnico del Dipartimento Sig. Andrea Meini per il fondamentale contributo alla realizzazione dell'attrezzatura descritta in questo lavoro..

Bibliografia.

- (1) - A. Bracciali, R. Ciuffi - Interazione ruota-rotaia, dinamica dei veicoli ferroviari e rumore emesso - Atti del 3° Convegno Nazionale del Consiglio delle Ricerche, Progetto Finalizzato Trasporti 2, Taormina 10-12 nov 1997, SpTP 2.121
- (2) - A.Bracciali, G. Cascini, R. Ciuffi - Time domain model of the vertical dynamic of a railway track up to 5 kHz - Vehicle System Dynamics, 30 (1) 1998.
- (3) - Bracciali, A., Ciuffi, R., Piccioli F. - Progetto e validazione di un sensore estensimetrico multifunzione per il binario ferroviario - XXX Conv. Nazionale AIAS, Alghero 12-15 sett. 2001, pp. 901-912.
- (4) - Bracciali, A., Ciuffi R., Piccioli F. - Soluzione numerica del modello PDE della dinamica verticale di un binario - XXX Conv. Nazionale AIAS, Alghero, 12-15 sett. 2001, pp. 1671-1682.
- (5)- Bracciali A., Ciuffi R., Piccioli F. - Vibrazioni nelle traverse al passaggio di ruote ferroviarie danneggiate - XXX Conv. Nazionale AIAS, Alghero 12-15 sett. 2001, pp. 1693-1704.