



XIII CONVEGNO NAZIONALE S.I.I.V.



INDAGINE SPERIMENTALE SUI SEGNALI SONORI ALL'INTERNO DEI ROTABILI PER LA DIAGNOSI DELLO STATO DELL'ARMAMENTO FERROVIARIO

Gaetano Di Mino

Dipartimento di Ing. delle Infrastrutture Viarie - Università degli Studi di Palermo
Viale delle Scienze, Edificio 8, 90128 Palermo
Tel: +39 091 488062 - Fax: +39 091 487068
E-mail: dimino@ing.unipa.it

Jennie Nigrelli

Dipartimento di Ing. delle Infrastrutture Viarie - Università degli Studi di Palermo
Viale delle Scienze, Edificio 8, 90128 Palermo
Tel: +39 091 488062 - Fax: +39 091 487068
E-mail: jennienigrelli@yahoo.it

INDAGINE SPERIMENTALE SUI SEGNALI SONORI ALL'INTERNO DEI ROTABILI PER LA DIAGNOSI DELLO STATO DELL'ARMAMENTO FERROVIARIO

GAETANO DI MINO - Dipart. di Ing. delle Infrastr. Viarie - Università degli Studi di Palermo
JENNIE NIGRELLI - Dipart. di Ing. delle Infrastr. Viarie - Università degli Studi di Palermo

SOMMARIO

La sovrastruttura ferroviaria è soggetta a sollecitazioni tali da innescare processi di degrado che rendono necessario effettuare delle operazioni manutentorie relativamente frequenti.

Assume allora particolare interesse la possibilità di pianificare tali operazioni, soprattutto se ciò è realizzabile attraverso metodi spediti, ponendosi l'obiettivo di ridurre l'interferenza tra le azioni manutentive ed il regime di circolazione ferroviaria.

In tale contesto si colloca la presente ricerca, nella quale si evidenzia la possibilità di correlare particolari condizioni della sovrastruttura a tipiche composizioni spettrali dei segnali sonori rilevati all'interno delle carrozze ferroviarie.

La tecnica prospettata consente di effettuare un monitoraggio indiretto dello stato della sovrastruttura, in modo da ottenere un utile indirizzo per la pianificazione degli atti di controllo diretto sul binario ed un notevole ausilio all'organizzazione delle operazioni di manutenzione, a fronte di un ridotto onere economico, grazie a controlli *in situ* mirati alle emergenze sovrastrutturali.

Tale tecnica è stata sperimentata attraverso una campagna di osservazioni e misurazioni i cui primi risultati sono esposti nel presente articolo.

ABSTRACT

The maintenance of track provides an relatively frequent operations.

A good maintenance-planning allows to reduce the interference between rail traffic and maintenance operations. It is necessary so to use a monitoring system of track conditions.

In this paper is showed an indirect monitoring system that correlates track conditions and typical spectrum of in-cab noise.

The first results of experimental survey are reported.

1. INTRODUZIONE

La pianificazione delle operazioni di manutenzione dell'armamento ferroviario rappresenta un momento fondamentale del processo di gestione dell'infrastruttura.

Il succedersi dei passaggi degli assi dei veicoli provoca, infatti, diversi effetti, quali, ad esempio, fenomeni di assestamento e di usura della massicciata a causa dei carichi dinamici trasmessi dalle ruote al binario.

Le rotaie sono interessate da fenomeni di usura provocati dall'attrito con i bordini delle ruote, da moti oscillatori indotti sui convogli da difetti della linea, da particolari condizioni di marcia dettate dallo sviluppo del tracciato.

L'usura, che in pratica tende a modificare il profilo della rotaia, oltre ad influire sul livello di comfort dei viaggiatori, può compromettere fortemente la sicurezza di marcia.

Non essendo sempre possibile attuare efficaci interventi preventivi per contrastare tale fenomeno, è necessario rettificare il profilo delle rotaie, mediante *molatura*, o procedere, ove lo si ritiene opportuno, alla integrale sostituzione degli elementi ammalorati.

La tecnica di valutazione dello stato di efficienza degli elementi di armamento, che qui si prospetta, è stata concepita con l'intento di indirizzare la programmazione delle operazioni di manutenzione grazie ad un controllo indiretto sulla sovrastruttura ferroviaria, con notevole vantaggio economico e organizzativo per il gestore dell'infrastruttura [1].

Risulta allora assai utile, per non dire necessario, effettuare un esame continuo dello stato di efficienza della rotaia, per poter stabilire in tempi rapidi le priorità di intervento manutentivo e programmarne quindi l'attuazione.

Tale tecnica di verifica si fonda su operazioni di osservazione di dati fonometrici ripresi all'interno di convogli ferroviari in servizio su linee ordinarie, individuando gli eventuali intervalli dello spettro acustico, caratteristici di specifiche condizioni di degrado della rotaia.

L'indagine sperimentale è stata effettuata sulla linea che collega la Stazione Centrale della città di Palermo all'aeroporto *Falcone-Borsellino* di Punta Raisi, adottando opportuni criteri, lungo un arco temporale di circa due mesi, secondo diversi scenari combinati di vettore ferroviario, periodo di osservazione e strumentazione di rilevamento.

I primi risultati emersi sono qui riportati ed analizzati.

2. L'ORIGINE DEL SEGNALE SONORO

2.1 L'usura ondulatoria

L'usura ondulatoria è il risultato di una complessa combinazione di deformazione plastica e di asportazione del materiale della rotaia e si manifesta macroscopicamente secondo una successione di impronte, localizzate su alcuni tratti del binario, reciprocamente distanziate.

Il parametro distintivo principale dell'usura è la sua lunghezza d'onda λ mediante la quale si classificano le onde in *lunghe*, pari a circa due volte l'interasse delle traverse, in *medie*, tipiche dei tratti a bassa curvatura e con distanziamento intorno ai trenta centimetri e in *corte*, con valori ancora inferiori fino a dieci centimetri.

Le cause determinanti sono state identificate nella disomogeneità del parco veicolare circolante, nella ripetitività dei cicli di marcia, nella qualità dei materiali impiegati e diverse ed articolate sono le teorie riguardanti il fenomeno [2].

Il mantenimento nel tempo delle caratteristiche di forma e di regolarità della superficie della rotaia, affinché sia garantito un corretto contatto con le ruote dei veicoli, è un obiettivo tecnico complesso e dispendioso.

I fenomeni di usura abitualmente connessi con l'emissione e trasmissione di rumore e vibrazioni sono inoltre legati alle caratteristiche plano-altimetriche del tracciato e tendono ad accrescersi rapidamente all'aumentare della percentuale di curve di raggio prossimo o inferiore a quello minimo di norma [3]. Tratti ad elevata curvatura provocano, come è noto, l'insorgere di forze dovute alla non idonea iscrizione dei carrelli, che innescano nel binario fenomeni di usura, prevalentemente ondulatoria, delle rotaie e

provocano la generazione di vibrazioni che si traducono, a loro volta, in rumore *acustico* per via aerea e in rumore *strutturale*.

Alle problematiche di gestione della linea e del moto corretto del veicolo si associano quelle ambientali che difficilmente possono essere governate attraverso azioni preventive, in quanto né gli interventi mirati a rimuovere le cause che generano l'usura, né quelli che tendono a ridurre l'entità degli effetti, riescono a fornire risultati completamente soddisfacenti.

Sul fenomeno, che peraltro è ancora oggetto di studio, è lecito affermare che i diversi fattori ritenuti responsabili della sua genesi agiscano in modo concomitante, alcuni innescandolo ed altri esaltandone gli effetti.

Ciò comporta una obiettiva difficoltà nel prevedere la localizzazione dell'evento e la sua evoluzione temporale, cosicché esso si manifesta nel momento stesso in cui si rende necessaria la prima iniziativa di manutenzione.

Nell'ottica di una gestione razionale delle operazioni manutentive, allora, è necessario procedere attraverso controlli diretti relativamente frequenti, che però comportano una interferenza certa con il regime ordinario di circolazione; oppure si può procedere in modo indiretto, deducendo lo stato di salute della sovrastruttura attraverso indagini di altro tipo (diagnostica indiretta).

1.2 Il rumore all'interno del veicolo

Il fenomeno acustico rilevabile all'interno di un qualsivoglia convoglio ferroviario è ascrivibile sostanzialmente a due modalità di propagazione.

Per velocità inferiori a circa 200 km/h la sorgente di rumore considerata dominante è identificabile nel contatto ruota-rotai: è quindi il prodotto dell'interazione tra il veicolo e l'infrastruttura. Il rilascio di energia che si manifesta in corrispondenza di tale interazione innesca vibrazioni meccaniche che si propagano verso i due sistemi costituiti dalla vettura e dal terreno; un'aliquota, il rumore strutturale, si trasmette direttamente, attraverso il carrello, alla struttura metallica di tutta la vettura; la parte rimanente, denominata rumore acustico, è generata dalle fluttuazioni di pressione nell'aria, provocate dal propagarsi delle vibrazioni, che si trasferiscono all'interno del vagone sotto forma di rumore.

Il meccanismo di propagazione delle vibrazioni nella vettura, esaltato da micro e macro difetti presenti sui due sistemi a contatto, interviene anche nel caso del rotolamento di ruote perfettamente lisce su rotaie altrettanto lisce [4].

Poco noto, invece, è il processo attraverso il quale l'energia meccanica di vibrazione viene irraggiata originando onde acustiche e, attualmente, non è possibile distinguere nettamente i ruoli con cui intervengono separatamente ruota e rotaia: esse in genere si considerano accoppiate in un unico sistema vibro-radiante [5].

Tale rumore, dal punto di vista spettrale, presenta solitamente il massimo contenuto energetico a frequenze piuttosto elevate, tipicamente comprese nel campo 1000-4000 Hz, che coincide tra l'altro con l'intervallo di massima sensibilità dell'orecchio umano.

Appare chiaro come le caratteristiche planimetriche del tracciato giochino un ruolo non indifferente sulla caratterizzazione acustica dei veicoli ferroviari: in generale, infatti, il rumore cresce al decrescere del raggio di curvatura e, per valori particolari di attrito e di carico, si può innescare il fenomeno dello *stick-slip*, nel quale si verifica un'alternanza tra aderenza e strisciamento, che può indurre nella ruota frequenze di risonanza e quindi provocare il tipico e fastidioso stridio, che spesso si avverte in corrispondenza delle curve di piccolo raggio [6].

Soprattutto se adottate con una certa ricorrenza, anche pendenze longitudinali di considerevole entità possono costituire sorgenti di rumore significative, oltre a compromettere la qualità dell'accoppiamento ruota-rotaia.

Per quanto riguarda gli altri fattori che intervengono sulla generazione del rumore all'interno del rotabile, un ruolo non indifferente assume certamente la tipologia della via di corsa, cioè la configurazione dell'ambiente esterno inteso come sede del tracciato (a cielo aperto, in galleria, su viadotto), la cui conformazione fisica determina peculiari e diverse modalità di trasmissione.

Contributi più o meno rilevanti, anche a seconda delle condizioni di marcia, sono attribuibili alla tipologia di armamento adottato, al materiale rotabile considerato, alle turbolenze aerodinamiche [7], allo scarso isolamento della cassa, ai carichi dinamici provenienti dal carrello, agli organi di trazione, frenatura e ventilazione [8].

Altra fonte di generazione del rumore è certamente quella riconducibile, in condizioni ordinarie, alle sorgenti sonore interne alla carrozza, quali ad esempio la voce umana o il cigolio delle porte. Gli effetti di questi ultimi, ai fini di una corretta diagnostica, durante le osservazioni sperimentali devono essere ridotti al minimo, in modo da ottenere segnali non affetti da condizionamenti estranei al sistema veicolo-infrastruttura.

2. L'INDAGINE SPERIMENTALE

2.1 Obiettivo

La finalità dell'indagine sperimentale, in questo stadio della ricerca, consiste nell'identificare, se esistono, specifici valori dei parametri acustici indagati, in grado di rivelare, grazie alla loro entità e ricorrenza, l'insorgere o il consolidarsi di alcuni difetti sovrastrutturali, in particolare l'usura della rotaia.

Una diagnosi dello stato dell'armamento di carattere fonometrico non può prescindere, a causa dell'intenso rapporto eziologico, da un'approfondita conoscenza del tracciato nella sua realtà geometrica e fisica.

2.2 La definizione del campione di analisi

L'obiettivo suddetto impone che si definisca una metodologia di analisi del tracciato ferroviario la quale consenta di valutare il ruolo del medesimo nella generazione del segnale sonoro.

A tal fine è opportuno procedere alla discretizzazione della linea per elementi geometricamente omogenei.

Tuttavia questo è soltanto il primo passo: il successivo consiste nel raffinare la suddivisione considerando anche la tipologia del tracciato intesa come configurazione della sede (rilevato, trincea, viadotto, galleria). È evidente che ogni singola configurazione incide in modo diverso non tanto sul meccanismo di generazione del rumore, quanto su quello di propagazione e quindi, in ultima analisi, sui valori dei parametri acustici rilevati.

Sarebbe inoltre opportuno possedere una mole cospicua e dettagliata di informazioni sulla realtà sovrastrutturale indagata, che ne contempli la tipologia, lo stato di efficienza, le condizioni fisico-meccaniche e gli standard di forma degli elementi di armamento. Tuttavia una siffatta banca dati è di ardua implementazione, a causa anche di un monitoraggio non sistematico, o parziale, cosicché sovente l'unica fonte di informazione sono gli addetti alle linee in esame.

Ai fini della sperimentazione è stato scelto un tracciato che presentasse una certa variabilità per quanto riguarda le caratteristiche plano-altimetriche e la configurazione di sede, sul quale fossero in servizio diversi tipi di motrice e per il quale fossero reperibili gli elaborati progettuali con l'indicazione delle progressive chilometriche e le tabelle di marcia dei convogli, oltre alle registrazioni tachigrafiche di bordo effettuate durante ogni corsa.

Sulla base di questi presupposti, si è scelta la linea che collega la Stazione Centrale della città di Palermo all'aeroporto Falcone-Borsellino di Punta Raisi.

La tabella 1 sintetizza i parametri salienti del tracciato.

TIPOLOGIA DI SEDE		
Tratti a cielo aperto [m]	Tratti in galleria [m]	Tratti in viadotto [m]
27.695 (75%)	8.240 (22%)	700 (3%)
PARAMETRI GEOMETRICI		
Lunghezza totale [m]	Lunghezza tot. rettili [m]	Lunghezza tot. curve [m]
35.635	22.450 (63%)	13.185 (37%)
Range di curvatura [m⁻¹]	Range di pendenza [%]	
0,0004÷0,0033	0,01÷16,2	

Tabella 1 - Caratteristiche del tracciato

Le caratteristiche geometriche e tipologiche della linea sono state desunte da elaborati grafici, planimetrie e profili, e da altre informazioni acquisite presso l'Ufficio Tecnico RFI di Palermo (Fig. 1).

Tali dati sono stati quindi disaggregati secondo i seguenti parametri: raggio di curvatura, pendenza longitudinale, sopraelevazione in curva e pendenza trasversale, sede a cielo aperto, in galleria, su viadotto. L'armamento, nella linea in studio, è sempre dello stesso tipo (rotaie tipo FS 46 UNI su traverse in legno su ballast).

Ciascun tronco omogeneo è caratterizzato dal fatto che in esso ognuno degli elementi distintivi si mantiene costante (Fig.2).

Il criterio ha condotto così all'individuazione di 178 tratti omogenei.

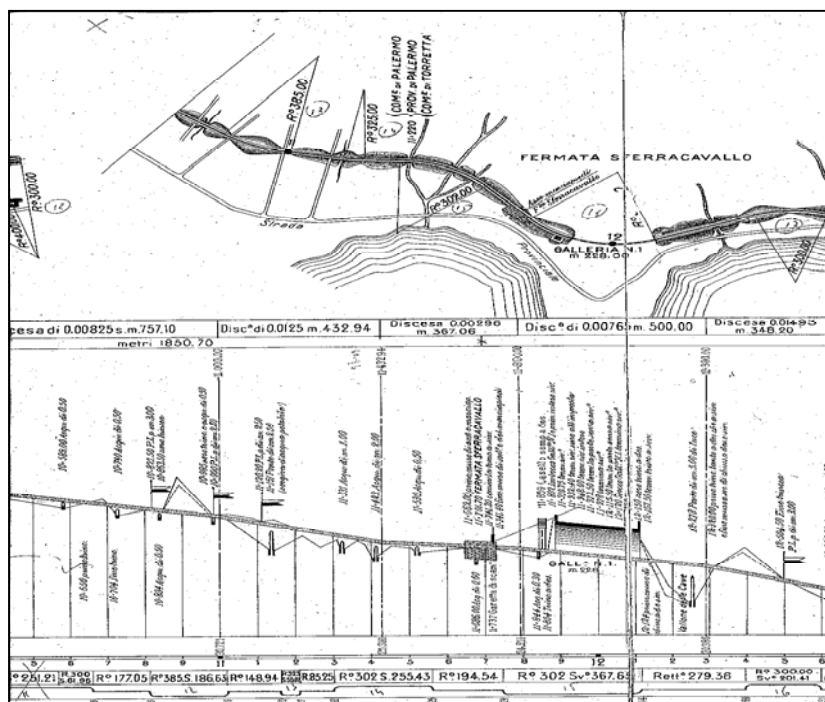


Figura 1 – Stralcio di documentazione progettuale

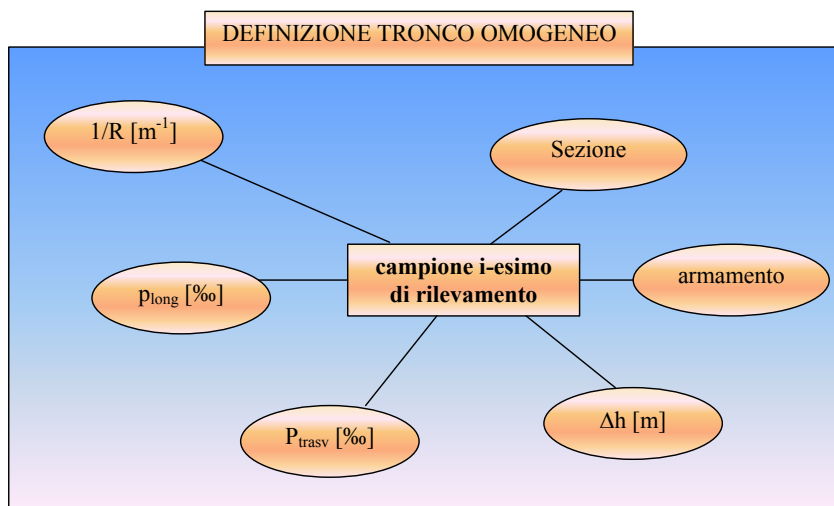


Figura 2 – Parametri caratteristici del tronco omogeneo

2.3 La fase di rilevamento: strumentazione e metodo di misura

L'indagine sperimentale è stata condotta effettuando dieci corse in andata e dieci in ritorno su due convogli a trazione elettrica: il primo formato da una locomotiva E 464 in composizione con 2 carrozze ferroviarie MDVC miste (1^a e 2^a classe) ed una semipilota in coda, necessaria per assicurare la bidirezionalità del treno; il secondo composto da una automotrice elettrica Ale 841 accoppiata con due rimorchi tipo Le e una semipilota.

I rilevamenti sonori sono stati effettuati utilizzando un fonometro e quattro registratori digitali.

In particolare, il fonometro è un *Larson Davis 824* di classe 1 [9] [10], conforme alle norme IEC651 e IEC804. Lo strumento è stato impostato in modalità standard, la quale consente la rilevazione di 48 diversi parametri di misura, con costanti parallele e per tutte le ponderazioni (A, C e Lin) e gamma dinamica maggiore di 85 dB; in parallelo viene effettuata anche l'analisi in frequenza in 1/1 e 1/3 d'ottava.

A questa modalità è stata aggiunta la RTA, cioè la possibilità di acquisire spettri con cadenza veloce fino a 250 millisecondi.

È stata impostata la costante di tempo *fast*, in quanto si tratta di fenomeni acustici di breve durata, e una cadenza di acquisizione dei Leq_{short} di 0,25 secondi.

Oltre al fonometro, per i rilevamenti sono stati utilizzati tre microfoni *Bruel&Kjaer 4.134* da 1/2 pollice collegati a due registratori digitali stereo *DAT TCD-D8 Sony*, in modo da acquisire il segnale acustico anche su dispositivi magnetici ai fini delle successive analisi in laboratorio.

Prima dell'inizio di ogni misura è stata effettuata la calibrazione di tutti i microfoni su di un valore di 94 dB lineari, utilizzando il calibratore acustico *Larson&Davis Cal 200* per il microfono del fonometro e il calibratore *Bruel&Kjaer 4231* per gli altri microfoni.

Lo spazio intorno ai punti di misura è stato assimilato ad un *campo diffuso*, quindi riverberante, visti i numerosi ostacoli presenti nell'ambiente chiuso (poltrone, pareti, porte, ecc.).

L'indagine sperimentale ha richiesto una particolare cura nell'impostazione della metodologia di misura, poiché mancano specifici riferimenti normativi nazionali che pos-

sano fornire delle indicazioni inerenti le misure acustiche da effettuarsi all'interno dei vagoni.

La normativa italiana, infatti, si occupa di inquinamento acustico derivante da traffico ferroviario, con il precipuo scopo di definire le modalità di misurazione ed i valori limite delle emissioni sonore prodotte al passaggio dei convogli e quindi irradiate nelle zone adiacenti alla linea ferrata [11], [12], [13], [14], [15], [16].

Ci si è riferiti, quindi, al quadro normativo europeo, inerente la misura del rumore all'interno dei veicoli ferroviari e specificatamente alla norma ISO 3381 del 1976 (Measurement of noise inside railbound vehicles) [17] e alle più recenti norme francesi della UIC, quali la fiche n. 567 del 01.01.1991, (Dispositions general pour les voitures) [18], le quali hanno fornito delle indicazioni precise sul tipo di strumentazione e sulle tecniche di rilevamento.

L'indagine sperimentale, previa autorizzazione, è stata condotta su carrozze riservate esclusivamente all'equipe di lavoro in modo da facilitare le varie operazioni necessarie

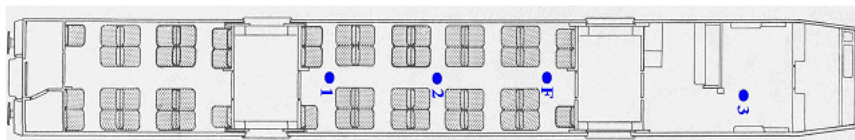


Figura 3 – Dislocazione planimetrica dei punti di misura



Figura 4 – Disposizione degli strumenti all'interno del vagone

all'effettuazione dei rilievi. Gli strumenti, collocati su treppiedi, sono stati fissati ad una altezza di 1,20 m dal pavimento

Il fonometro e due dei tre microfoni sono stati posizionati nella carrozza viaggiatori, in punti ritenuti rappresentativi della distribuzione del suono; il terzo microfono è stato collocato nello scompartimento adibito al trasporto biciclette, adiacente la cabina di guida della semi-pilota e separato dalla parte viaggiatori da un vestibolo. (Figg. 3 e 4).

Le circostanze ottimali per i rilevamenti sono state assicurate dall'assenza di passeggeri in carrozza, in quanto possibili elementi di emissione ed assorbimento delle onde sonore, e dai finestrini bloccati in posizione di chiusura.

Sincronizzato con le registrazioni sonore, è stato realizzato un filmato con una videocamera digitale collocata in cabina di guida, in modo da avere in continuo la visione dello sviluppo del tracciato e l'andamento delle velocità segnate dal tachimetro di bordo, così da evitare errori grossolani durante le successive procedure di elaborazione dei dati: il calcolo dei tempi di percorrenza di ciascun tronco omogeneo e l'attribuzione al medesimo del relativo evento sonoro.

Per il calcolo dei tempi di percorrenza è stato necessario ricorrere ad un documento denominato *zona*, che consiste in una strisciata registrata dal tachigrafo di bordo, sulla quale si possono leggere distanze, velocità e tempi (Fig. 5); in tale diagramma, che si legge da destra (stazione di partenza) verso sinistra (stazione di arrivo), sull'asse orizzontale sono indicati i tempi (4mm corrispondono ad 1 minuto), mentre su quello verticale sono riportate le velocità. Inoltre, dall'esagramma sottostante, è possibile ricavare le distanze percorse dal veicolo poiché, ogni qualvolta il convoglio percorre 100 metri, la spezzata interseca una riga orizzontale.

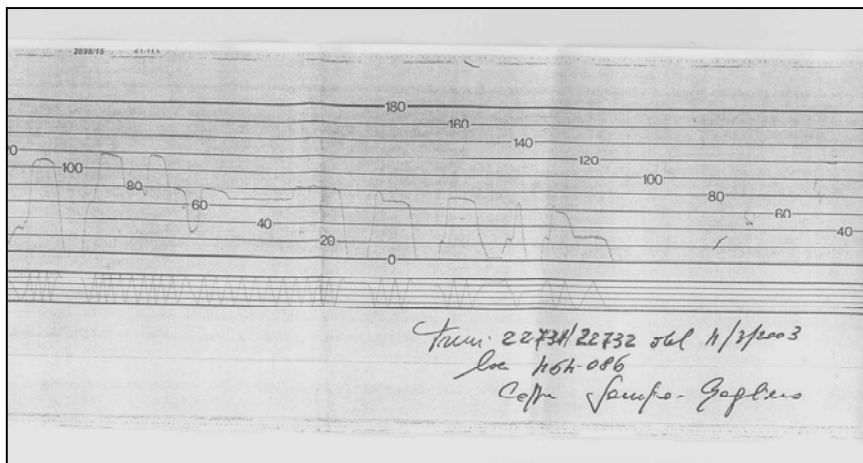


Figura 5 – Documento di *zona*

Dopo aver sincronizzato le registrazioni audio e video con i dati dedotti dalla *zona* è stato possibile attuare le procedure prima citate.

3. L'ANALISI SPETTRALE

3.1 Elaborazione dei dati

Terminata la fase di rilevamento, ai vari tratti omogenei sono stati associati i rispettivi tempi di percorrenza, le velocità e le accelerazioni.

Il calcolo dei suddetti tempi rappresenta una fase essenziale dell'indagine sperimentale: solo attraverso questa informazione, infatti, è possibile ricavare, in laboratorio, i parametri acustici relativi ad ogni elemento di caratteristiche omogenee.

Le registrazioni sono state effettuate in continuo per tutta la durata delle corse (circa 40 minuti ciascuna) e sono state poi suddivise, tenendo conto di tutti i riferimenti presi sul campo.

Per quanto riguarda le registrazioni fonometriche, tali tempi di percorrenza sono stati individuati nel tabulato che, scaricato dal fonometro attraverso l'apposito software, può essere gestito su un foglio elettronico (Fig.6).

Tra i dati registrati dal fonometro sono presenti il livello equivalente complessivo ed i livelli equivalenti in bande d'ottava e di terzi d'ottava (tali valori vengono registrati ogni 250 millisecondi).

A partire da queste informazioni, per ciascun tratto omogeneo, è stato possibile calcolare, oltre al livello equivalente complessivo, il suo spettro: anzitutto, dopo aver individuato nella colonna *time* l'istante di partenza del veicolo, si è provveduto a suddividere in gruppi le righe del tabulato, in modo che ciascun gruppo di informazioni fosse relativo ad un tratto. In secondo luogo, per ciascuno di questi è stata calcolata la media dei valori rilevati: non è superfluo sottolineare che tale operazione è necessaria in quanto in generale i tempi di percorrenza sono diversi tra loro e quindi non è possibile fissare a

priori un intervallo di campionamento tale da evitare la successiva mediazione dei dati raccolti.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	L	N	CC	CD	CF	CF
1	SSA Intervals														
2	Translated: 06-mar-03 18.37.12														
3	File Transl: C:\Documents and Settings\acer\Desktop\Tesil\Laurea\Rilev 4-03 Fonometro\Ritorno 18,40 2°.smlnd														
4	Model Num: 824														
5	Serial Num: A0416														
6	Firmware F: 1,262														
7	Software v: 1														
8	Name: Enter Company Name														
9	Descr1: Enter Address Line 1														
10	Descr2: Enter Address Line 2														
11	Setup: SLM&RTA.ssa														
12	Setup Des: SLM & Real-Time Analyzer														
13															
14	Location: Punta Raisi-Palermo C.le Ritorno 18,40														
15	Note 1: 03/04/2003														
16	Note 2:														
17															
18	Weighting: Flat														
19	Peak Weic: A														
20	Detector: Fast														
21	RTA Detec: Fast														
22															
23															
24	Rec #	Date	Time	Duration	Leq	SEL	LMin	LMax	Peak	dBA	Overloads	Leq 1/1 16Hz	Leq 1/1 31.5Hz	Leq 1/1 63Hz	Leq 1/1 125Hz
25	1	04-mar-03	17.10.38	00.00,3	70,4	64,4	70,2	71,9	80	62,7	0	4,8	4,8	4,8	4
26	2	04-mar-03	17.10.38	00.00,3	73,5	67,4	72,1	72,2	82,3	60,8	0	4,8	4,8	4,8	58
27	3	04-mar-03	17.10.38	00.00,3	69	63	71,3	72,1	77,5	62,1	0	4,8	4,8	4,8	57
28	4	04-mar-03	17.10.39	00.00,3	71,7	65,7	71,4	71,6	79,3	62,1	0	4,8	4,8	56,8	58
29	5	04-mar-03	17.10.39	00.00,3	73,9	67,9	72,9	74,5	83	61,6	0	4,8	4,8	59,7	58
30	6	04-mar-03	17.10.39	00.00,3	68,5	62,5	68,9	72,8	77,2	61,1	0	4,8	66,6	62,3	59
31	7	04-mar-03	17.10.39	00.00,3	72,1	66	72,6	72,9	81,4	62,4	0	4,8	68,3	60,8	57
32	8	04-mar-03	17.10.40	00.00,3	70,4	64,4	70,4	72,8	78,5	62,7	0	4,8	68,7	60,3	58
33	9	04-mar-03	17.10.40	00.00,3	73,7	67,7	73,2	74,1	82,5	63,6	0	4,8	63,7	59,4	58
34	10	04-mar-03	17.10.40	00.00,3	72,4	66,4	71,8	74,6	80,5	60,2	0	4,8	68,4	59,9	58

Figura 6 – Particolare dell’archivio informatizzato dei dati fonometrici

La procedura descritta, considerata la mole dei dati da elaborare, è stata implementata, sullo stesso foglio elettronico, con l’ausilio di una *macro ad hoc*. In tal modo, inserendo come dati di input i soli tempi di percorrenza, è stato possibile eseguire le operazioni descritte in pochi secondi, compreso il calcolo del livello equivalente mediato in termini energetici nel tempo T_i [19].

La procedura attraverso la quale sono stati ottenuti i valori fonometrici, necessari per elaborare lo spettro acustico relativo al singolo segmento omogeneo, è descritta schematicamente nel diagramma di flusso di figura 7.

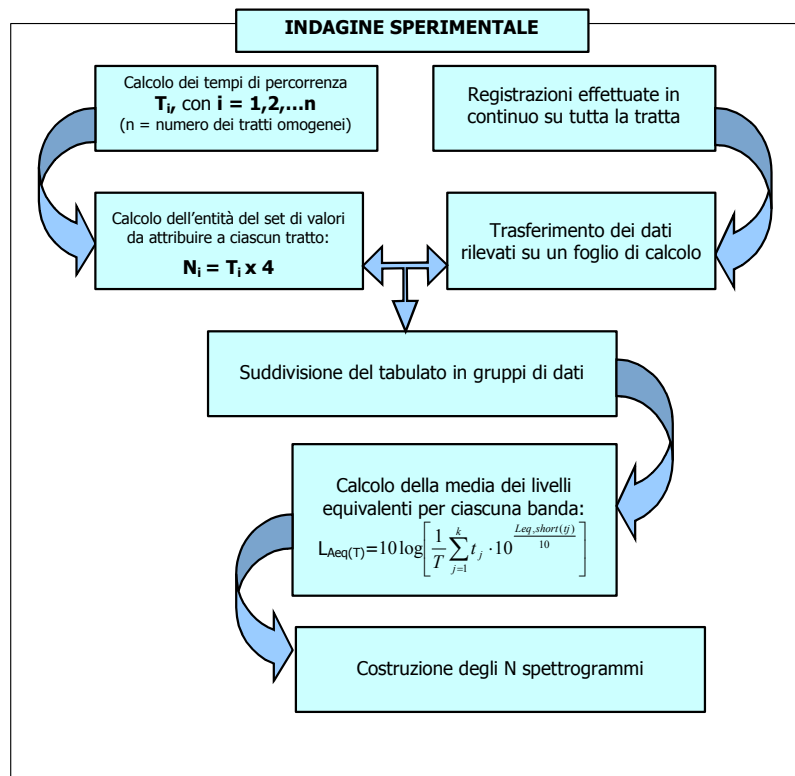
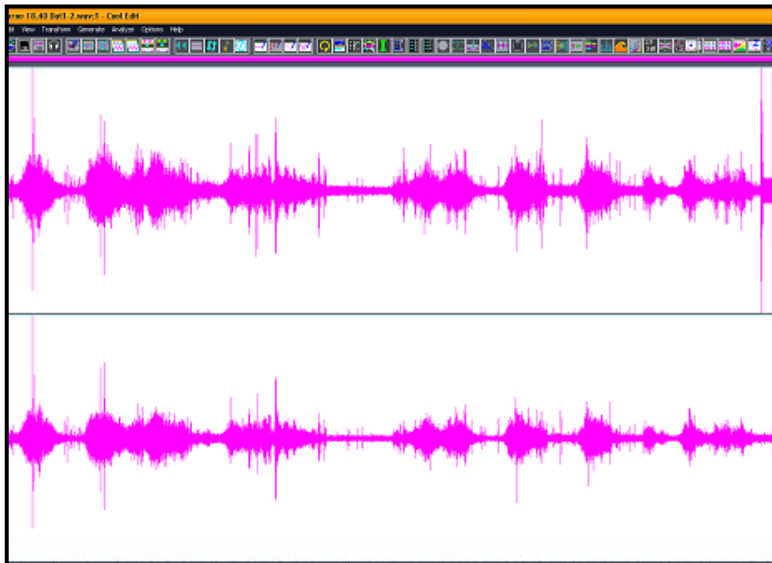


Figura 7 – Metodologia di rilevamento ed elaborazione dati

Le registrazioni su nastro, invece, sono state elaborate con il software *Cool Edit* (Fig.



8), in modo da generare, una volta suddivise in parti corrispondenti ai vari tratti, i relativi segnali sonori poi analizzati singolarmente.

La verifica incrociata dei dati raccolti mediante le due distinte strumentazioni ha ampiamente confermato il successo del rilevamento.

Figura 8 – Segnale sonoro digitale [dB] in funzione del tempo

3.2 Analisi dei risultati

La elaborazione dei dati è consistita nello studio della composizione spettrale dei segnali acustici rilevati, ottenendo, quindi, tanti spettri in banda d'ottava quanti erano i tratti.

L'analisi comparativa ha messo in risalto alcune situazioni significative: a parità di condizioni geometriche, tipologiche, cinematiche, alcuni spettri presentano una caratteristica comune, cioè una componente, quella a 250 Hz, particolarmente elevata (fig. 9).

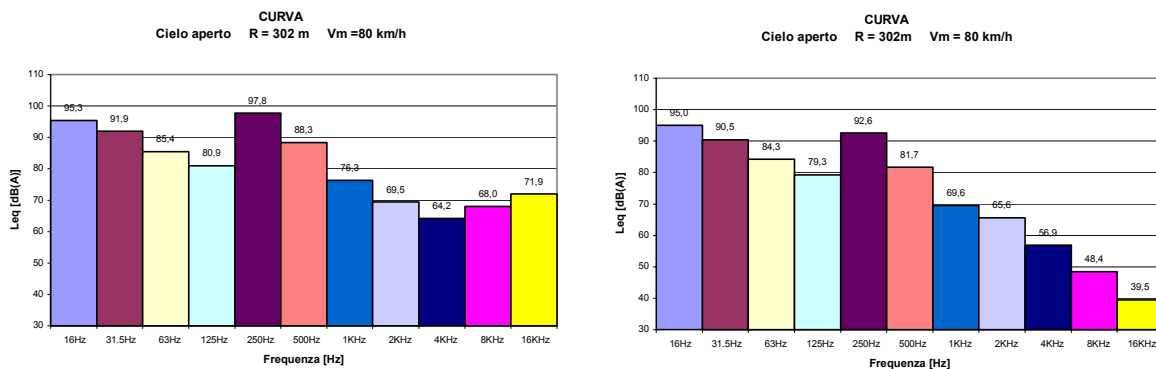


Figura 9 - Spettri del L_{eq} in condizioni di usura segnalata

Ciò si verifica, peraltro, nelle progressive in corrispondenza delle quali sono state segnalate dagli addetti alla manutenzione condizioni di forte usura, mentre ciò non si riscontra in tronchi di caratteristiche consimili, che presentano un buono stato della sovrastruttura.

Nonostante il segnale sonoro sia stato rilevato su distinti tipi di rotabile, le cui caratteristiche costruttive e meccaniche incidono sull'entità del segnale stesso, la frequenza 250 Hz è risultata, senza eccezione, quella caratterizzante i tratti segnalati.

Si fa osservare che è considerato probante non tanto il valore assoluto di tale componente spettrale, elevato ma spesso paragonabile ai valori propri delle bassissime frequenze, quanto il fatto che esso rappresenti una sorta di *componente tonale*, sintomatica di un particolare stato della sovrastruttura ferroviaria e quindi di una situazione suscettibile di controlli diretti in situ.

Nelle figure seguenti sono mostrati gli spettri del livello equivalente in banda d'ottava, con l'individuazione dei tratti in cui sono stati calcolati, relativi ai punti in cui la rotaia è maggiormente usurata, a confronto con spettri riguardanti tratti di analoghe caratteristiche di sede, geometriche e cinematiche nei quali l'usura è praticamente trascurabile.

Si considerino ad esempio il primo diagramma di figura 9 ed il primo di figura 11 rappresentativi di tratti correnti a cielo aperto, con raggi di curvatura uguali, caratterizzati da velocità di percorrenza paragonabili e tuttavia la componente 250 Hz nel primo diagramma è notevolmente più elevata.

Esaminando gli spettri relativi ad altri tratti, si evidenzia una situazione analoga: maggiore è l'usura della rotaia, maggiore è l'incremento in corrispondenza della componente spettrale a 250 Hz.

Si riportano di seguito alcuni spettri del livello equivalente in bande di ottava con l'indicazione dei tratti in cui sono stati calcolati.

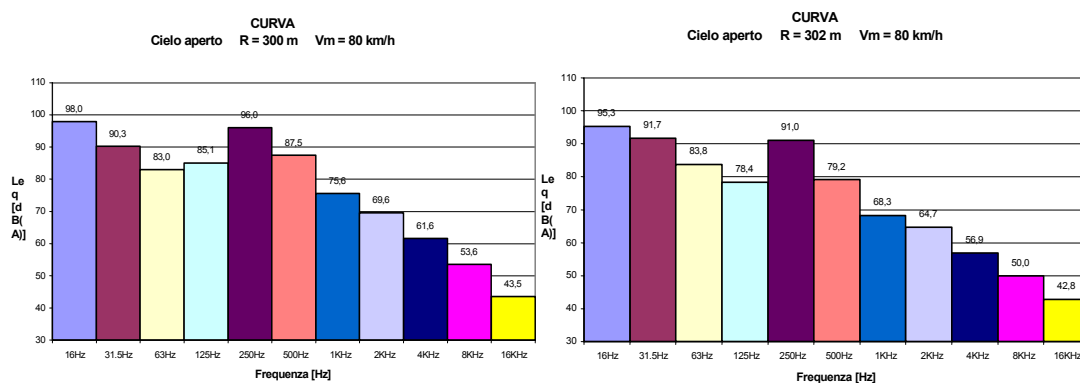


Figura 10 - Spettro del Leq in condizioni di usura segnalata

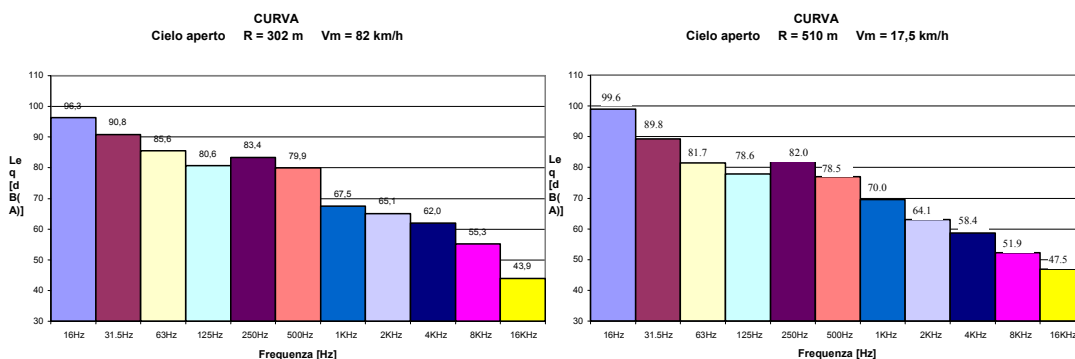


Figura 11- Spettri del Leq in condizioni ordinarie

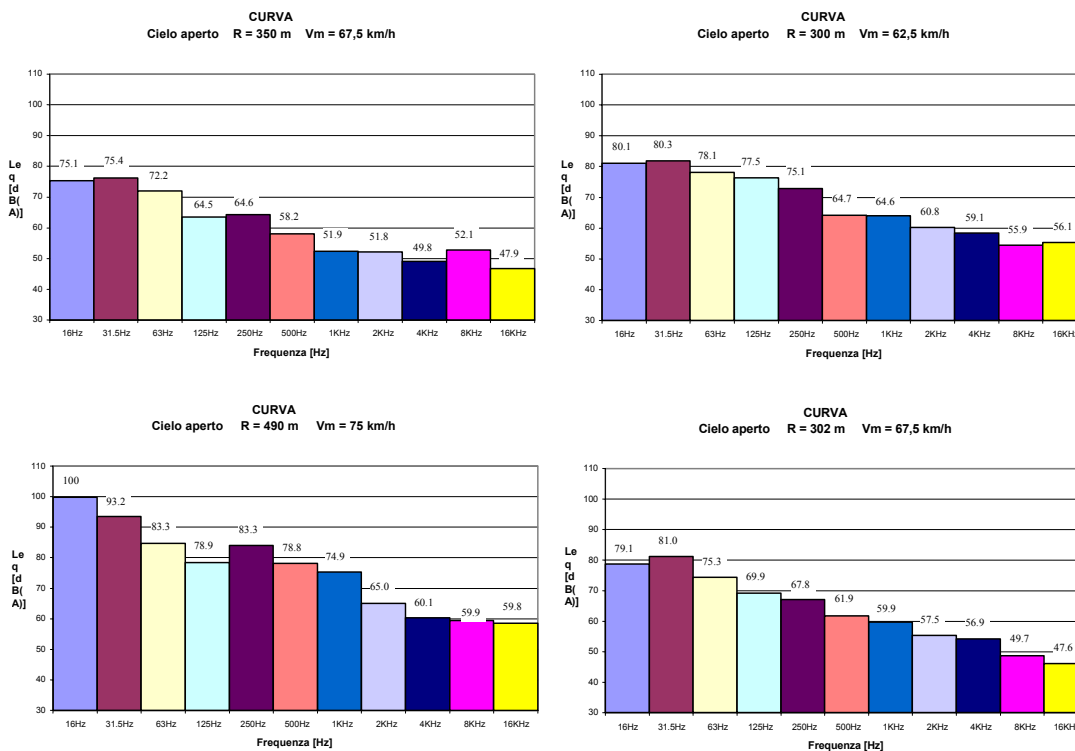


Figura 12- Spettri del Leq in condizioni ordinarie

4. CONCLUSIONI

I risultati ottenuti, relativi alla prima fase della ricerca qui descritta, incoraggiano a perseguire l'obiettivo del metodo diagnostico, rapido ed economico, dello stato della sovrastruttura ferroviaria ed in particolare della rotaia.

È apparso evidente, però, come una conoscenza approfondita, dettagliata ed aggiornata delle condizioni di armamento sia la *condicio sine qua non*, perché sia possibile effettuare le debite correlazioni ed evincere quindi dall'analisi spettrale le frequenze rappresentative dell'insorgenza o del perdurare di fenomeni di degrado.

Il controllo sistematico del patrimonio sovrastrutturale ferroviario e la creazione di un relativo catasto funzionale sono, su vasta scala, gli obiettivi tecnici prioritari affinché qualunque iniziativa manutentoria non abbia il carattere dell'aleatorietà, dell'episodicità o peggio ancora dell'emergenza.

Tuttavia, la tecnica sviluppata ed esposta, a fronte della sua relativa semplicità, si è dimostrata congruente, con l'evidenza del risultato sperimentale, alle informazioni sull'usura delle rotaie.

Ciò conforta perché, pur in uno scenario circoscritto come quello esplorato, è stato possibile individuare e localizzare, grazie anche alla metodologia di definizione del campione di osservazione, quelle parti del tracciato su cui occorre intervenire, informazione, questa, necessaria per pianificare una efficace azione di manutenzione.

5. RINGRAZIAMENTI

Gli autori intendono ringraziare, per la gentile ed essenziale collaborazione RFI e TRENITALIA Spa nelle persone degli Ingg. M. Todaro, G. Trapani, A. Cucinotta e gli

Ingg. E. Di Girolamo e M. Nicastro per il prezioso supporto durante le operazioni sperimentali.

6. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

[1] Jovanovic S., Vaghi E.: *Impostazione innovativa della gestione della manutenzione per infrastrutture ferroviarie*, Ingegneria Ferroviaria, Giugno 2003.

[2] Boscaino G., Di Mino G.: *Il fenomeno dell'usura ondulatoria delle rotaie* Selezione Tecnica, Palermo, n. 5, Maggio 1993.

[3] Norma UNIFER UNI 7836: *Geometria del tracciato delle linee su rotaia: andamento planimetrico e altimetrico e tolleranze di costruzione*, 1978.

[4] Heckl M.A.: *Railway Noise – Can Random Sleeper Spacings Help?*, Acustica Vol. 81 (1995)

[5] Scarano P.: *Indagine sulla rumorosità originata dal transito di rotabili FS*, Ingegneria Ferroviaria, Agosto 1984.

[6] Borrelli A., Cervello S.: *Nuove ruote ferroviarie a ridotta emissione acustica*. La tecnica Professionale, Marzo 2003

[7] Ricci S., Volpe F.: *Emissioni sonore del trasporto ferroviario in ambito urbano: un'analisi sperimentale*. Ingegneria Ferroviaria, 1-2/2002.

[8] Tosi Cambini M., Pugi G., Lenzuni P., Catasta P. F., Verduchi P.: *Analisi dei livelli sonori nelle cabine di guida dei rotabili ferroviari*. Ingegneria Ferroviaria, 6/2000.

[9] Norma CEI 29-1: *Misuratori di livello sonoro* (conforme allo standard IEC 651), 1982

[10] Norma CEI 29-10: *Fonometri integratori mediatori* (conforme allo standard IEC 804), 1988

[11] D.M.A. 16 Marzo 1998: *Tecniche di rilevamento e di misurazione dell'inquinamento acustico*. G.U. n.76, 1 Aprile 1998.

[12] D.P.C.M. 1 Marzo 1991: *Limiti massimi di esposizione al rumore negli ambienti abitativi e nell'ambiente esterno*. G.U. n.57, 8 Marzo 1991.

[13] D.P.R. n. 459 del 18 Novembre 1998: *Regolamento recante norme di esecuzione dell'articolo 11 della legge 26 Ottobre 1995, n. 447, in materia di inquinamento acustico derivante da traffico ferroviario*. G.U. n.2, 4 Gennaio 1999.

[14] Decreto legislativo n. 277 del 15.8.1991: *Attuazione delle direttive n. 80/1107/CEE, 82/605/CEE, 83/477/CEE, 86/188/CEE, 88/642/CEE, in materia di protezione dei lavoratori contro i rischi derivanti da esposizione ad agenti chimici, fisici e biologici durante il lavoro*, a norma dell'art. 7 della legge 30 luglio 1990, n. 212, Supplemento ordinario Gazzetta Ufficiale n. 200, 27.8.1991.

[15] Legge 20 Ottobre 1995 n° 447: *Legge Quadro sull'inquinamento acustico*, G.U. 30 Ottobre 1995, n. 254

[16] Legge n. 447 del 26 Ottobre 1995: *Legge quadro sull'inquinamento acustico*. Supplemento ordinario G.U. n.254, 30 Ottobre 1995.

[17] Norma ISO 3381: *Measurement of noise inside railbound vehicles*, 1976.

[18] Fiche UIC. 567: *Dispositions general pour les voitures*, 01.01.1991

[19] Spagnolo R.: *Manuale di acustica*, UTET libreria, Marzo 2001.