



Fig. 1 - Nuovo ponte sul fiume Po della linea ferroviaria Bologna-Verona. New bridge crossing the river Po along the railway line Bologna-Verona.



Fig. 2 - Ponte storico sul fiume Po della linea ferroviaria Bologna-Verona. Historical bridge crossing the river Po along the railway line Bologna-Verona.



## Analisi sperimentale delle emissioni acustiche relative al transito dei convogli ferroviari su ponti metallici di nuova generazione

*(Dedicato alla memoria dell'Ing. Marco MASSARI)*

## Experimental analysis of the sound emissions generated by railway vehicle passage on new generation metallic bridges

*(Dedicated to the memory of Marco MASSARI engineer)*

Dott. Ing. Luigi EVANGELISTA<sup>(\*)</sup>, Dott. Arch. Antonello MARTINO<sup>(\*\*)</sup>  
Dott. Ing. Angelo VITTOZZI<sup>(\*\*\*)</sup>, Dott. Ing. Valerio MENCACCINI<sup>(\*\*\*\*)</sup>

**SOMMARIO** - Con l'entrata in esercizio del nuovo ponte ferroviario sul fiume Po ad Ostiglia (MN) della linea Bologna-Verona, Italferr, la società di Ingegneria delle Ferrovie dello Stato, ha condotto una serie di studi sperimentali al fine di verificare i vantaggi della nuova tipologia costruttiva nel campo delle emissioni acustiche generate dai transiti ferroviari. Questo ponte, costituito da trave metalliche reticolari per singolo binario semplice-

**SUMMARY** - The start of the operation on the new railway bridge of Ostiglia (MN) crossing the river Po along the railway line Bologna-Verona, allowed Italferr, the engineering company of Ferrovie dello Stato, to carry out some experimental tests aiming to verify the advantages of the new construction typology in the field of the sound emissions generated by the passage of the trains.

This bridge is composed of simply supported single-

<sup>(\*)</sup> Italferr - Direzione Tecnica, Responsabile U.O. Ingegneria delle Infrastrutture.

<sup>(\*\*)</sup> Italferr - Direzione Tecnica, Responsabile U.O. Ambiente e Archeologia.

<sup>(\*\*\*)</sup> Italferr - Direzione Tecnica, Responsabile U.O. Strutture.

<sup>(\*\*\*\*)</sup> Italferr - Direzione Tecnica, U.O. Ambiente e Archeologia.

<sup>(\*)</sup> Italferr - Direzione Tecnica, Responsabile U.O. Ingegneria delle Infrastrutture.

<sup>(\*\*)</sup> Italferr - Direzione Tecnica, Responsabile U.O. Ambiente e Archeologia.

<sup>(\*\*\*)</sup> Italferr - Direzione Tecnica, Responsabile U.O. Strutture.

<sup>(\*\*\*\*)</sup> Italferr - Direzione Tecnica, U.O. Ambiente e Archeologia.

mente appoggiate, a via inferiore, chiuse superiormente, con portate teoriche tra gli assi degli appoggi da 64,4 e 73,6 m, è dotato di armamento con ballast su soletta continua in conglomerato cementizio armato. La soluzione strutturale monitorata presenta diverse caratteristiche innovative nei confronti delle tradizionali travate metalliche reticolari con posa diretta del binario, tra le quali una significativa riduzione della rumorosità.

Il contributo sintetizza gli aspetti salienti della sperimentazione con particolare attenzione alle analisi comparative tra le emissioni acustiche del nuovo ponte sul Po della linea BO-VR e quelle relative ad altri ponti metallici caratterizzati dall'attacco diretto dell'armamento. Inoltre sono state eseguite analisi comparative con altre tipologie di opere civili presenti sulla stessa linea come rilevati ed impalcati in cemento armato precompresso.

### 1. Premessa

Con l'entrata in esercizio del nuovo attraversamento ferroviario del fiume Po sulla linea Bologna-Verona si è presentata l'occasione per la prima volta in Italia di misurare le emissioni acustiche prodotte dal transito dei convogli ferroviari su ponti metallici di nuova generazione che prevedono la posa dell'armamento con ballast.

Il ponte oggetto della sperimentazione è dimensionato per sovraccarichi della categoria A con una velocità massima di transito dei convogli ferroviari pari a 200 km/h. In corrispondenza del fiume Po la linea ferroviaria BO-VR è

track metallic lattice girders (through arch upper-closure girders), with theoretical spacing between supports of 64.4 m and 73.6 m. It is a ballasted-permanent way bridge and its deck is composed of a reinforced mix continuous slab.

The monitored structural solution shows different innovative characteristics if compared with the traditional metallic lattice girders with non ballasted-permanent way; one of these characteristics is a significant noise reduction.

This paper summarizes the most important aspects of the considered test campaign with a particular attention to comparisons between the sound emissions of the new bridge crossing the river Po along the line BO-VR and the corresponding emissions relevant to other non ballasted-permanent way bridges. Further comparisons with other structure typologies along the same line, such as embankments and pre-compressed reinforced concrete decks, were carried out too.

### 1. Foreword

The start of the operation on the new railway bridge crossing the river Po along the line Bologna-Verona made it possible, first in Italy, to measure the acoustic emissions produced by the train passage on new-generation metallic bridges with ballasted-permanent way.

The bridge under test is designed for overloads belonging to the A category that provides a maximum passage speed of the railway vehicles of 200 km/h. The railway line BO-VR in the nearby of the river Po has a double track composition with a distance of 7 m between track centers; the river crossing is composed of 24 simply supported metallic lattice (triangular mesh) spans; they are upper-closure single track spans.

Each single track of the river crossing is in particular composed of 4 spans of 73.6 m theoretical length (each span is divided into 8 section of 9.2 m length and a maximum height of 11.75 m between the average centers of gravity of the harnesses and a distance of 5.55 m between centers of the main girders) and 8 spans of 64.4m theoretical length (each span is divided into 7 section of 9.2 m length).

This bridge is composed of simply supported metallic lattice girders (through arch upper-closure girders), with 64.4 m and 73.6 m spans. It is a ballasted-permanent way single-track bridge and its deck is composed of a reinforced mix continuous slab.

The section of the new bridge typology is composed of a metallic lattice girder and a deck with a reinforced mix continuous slab laid on its lower part. The slab, tied up by Nelson pegs to the auxiliary longitudinal members and to the cross girders, is properly shaped in such a way to form a basin for the ballast containment (figg. 3 and 4).

The new structural solution shows innovative characteristics concerning the:

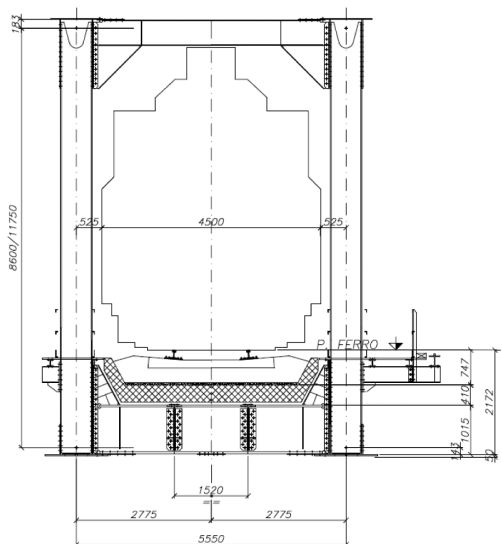


Fig. 3 - Sezione tipo del nuovo ponte sul Po ad Ostiglia (MN) sulla linea Bologna-Verona. Type-section of the new bridge of Ostiglia (MN) crossing the river Po along the railway line Bologna-Verona.

costituita da un doppio binario con interasse di 7.0 m e l'attraversamento è realizzato mediante 24 campate metalliche reticolari, a maglia triangolare, chiuse superiormente, a singolo binario, con schema statico di trave in semplice appoggio. In particolare per ciascun binario l'attraversamento è costituito da 4 campate da 73.6 m di portata teorica, suddivisa in 8 campi di lunghezza 9.2 m con un'altezza massima tra i baricentri medi delle briglie pari a 11.75 m e un interasse tra le travi principali di 5.55 m, e da 8 campate di lunghezza teorica pari a 64.4 m, suddivisa in 7 campi sempre di lunghezza pari a 9.2 m.

Il sistema costruttivo della nuova tipologia di ponte prevede una sezione composta da una trave metallica reticolare ed impalcato realizzato con soletta continua in conglomerato cementizio armato posta nella parte inferiore dell'impalcato. La soletta, vincolata mediante pioli tipo Nelson alle longherine e alle travi trasversali, è opportunamente conformata in modo da realizzare una vasca per il contenimento del ballast (figg. 3 e 4).

La nuova soluzione strutturale presenta caratteristiche innovative relativamente alla:

- a) migliorata rigidità verticale ed orizzontale dell'impalcato sotto l'azione dei carichi di esercizio;
- b) manutenzione dell'armamento (resa più agevole dalla presenza del ballast che consente alla risanatrice di operare anche sulle travate);
- c) riduzione delle problematiche inerenti alla deformabilità del binario in corrispondenza delle testate delle travate a tergo dei paraghiaia sui rilevati di approccio al ponte;
- d) possibilità di conseguire velocità di progetto superiori ai 200 km/h, limite normativo previsto per le travate metalliche ad attacco diretto;
- e) riduzione della rumorosità.

Prima dell'entrata in esercizio del nuovo ponte ferroviario sul Po i treni circolavano sul ponte storico realizzato a travatura reticolare con armamento su traverse in legno direttamente vincolate alle longherine.

La messa in esercizio del nuovo ponte ha consentito di confrontare direttamente le emissioni acustiche generate dal transito dei treni sulle due diverse tipologie costruttive di ponte: quella storica e quella innovativa. L'indagine è stata poi allargata al ponte sul Po presente sulla linea ferroviaria Bologna-Padova in prossimità della località Pontelagoscuro (FE) in quanto opera metallica tradizionale ma di recente realizzazione. Tale opera è costituita da più campate reticolari chiuse superiormente, a singolo binario, con schema statico di trave in semplice appoggio di portata teorica di 59,4 m (5 campate per binario) e 75,6 m (4 campate per binario), con attacco diretto dell'armamento (figg. 5 e 6). Inoltre a fini comparativi sono state eseguite indagini a ridosso di un viadotto in cemento armato precompresso della nuova linea Bologna-Verona ed a ridosso di alcuni rilevati. Il presente contributo riferisce sui risultati di questa prima serie di indagini che sono state ese-



Fig. 4 - Vista dell'armamento su ballast realizzato per il nuovo ponte sul fiume Po ad Ostiglia (MN) sulla linea ferroviaria Bologna-Verona. View of the ballasted-permanent way implemented for the new bridge of Ostiglia (MN) crossing the river Po along the railway line Bologna-Verona.

- a) increased vertical and horizontal stiffness of the deck under the action of the operation loads;
- b) permanent way maintenance (made easier by the presence of the ballast that allows the ballast cleaning machine to work even on the bridge girders);
- c) reduction of problems concerning track deformability in the girder heads behind the gravel guard on the embankment approaching the bridge;
- d) possibility to achieve project speed values higher than 200 km/h, that is the normative limit for metallic girders with non ballasted permanent way;
- e) noise reduction.

Before the start of the operation on the new railway bridge on the river Po trains had to run on the lattice girder historical bridge; the historical bridge permanent way was composed of wooden sleepers directly tied up to the auxiliary longitudinal members.

The start of the railway operation on the new bridge allowed to comparing directly the acoustic emissions generated at the train passage on the two bridges of different

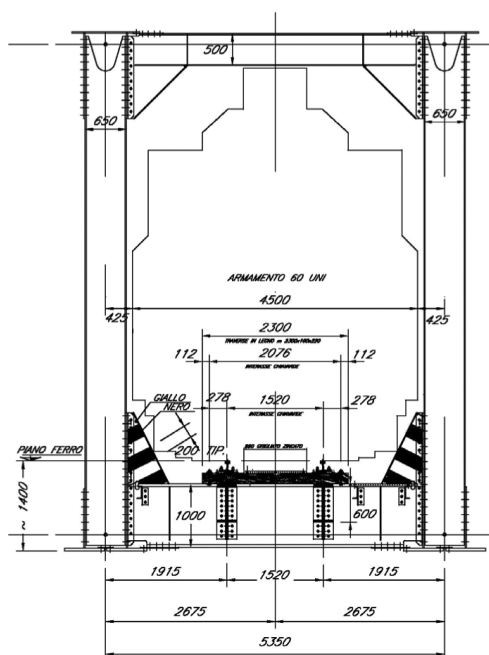


Fig. 5 - Sezione tipo del ponte sul Po a Pontelagoscuro (FE) sulla linea Bologna-Padova. Type-section of the bridge of Pontelagoscuro (FE) crossing the river Po along the railway line Bologna-Padova.

guite dalla U.O. Ambiente e Archeologia di Italferr nel periodo compreso tra novembre 2008 e novembre 2009.

## 2. Introduzione al rumore prodotto da un treno in transito su un ponte

Il rumore generato dal transito di un convoglio ferroviario ha origine da diverse sorgenti ognuna delle quali caratterizzata da posizione, intensità, contenuto in frequenza, direttività e dipendenza dalla velocità di transito del treno.

Queste sorgenti possono essere classificate in tre gruppi:

- rumore dovuto ai meccanismi di propulsione;
- rumore meccanico dovuto all'interazione ruota/rotaia;
- rumore aerodinamico dovuto ai movimenti di masse d'aria al passaggio del treno.

A basse velocità le sorgenti preponderanti sono quelle connesse ai meccanismi di propulsione e alle ventole di raffreddamento e il rumore emesso incrementa in maniera poco marcata con la velocità del treno [3].

All'aumentare della velocità il rumore meccanico dovuto all'interazione ruota-rotaia diventa predominante. La generazione di rumore è legata alla presenza di irregola-

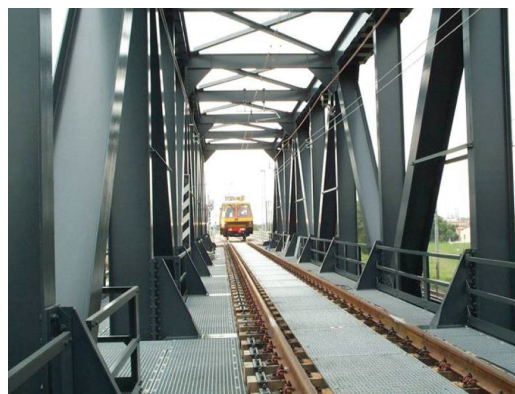


Fig. 6 - Vista dell'armamento ad attacco diretto del ponte sul Po a Pontelagoscuro (FE) sulla linea Bologna-Padova. View of the non ballasted-permanent way of the bridge of Pontelagoscuro (FE) crossing the river Po along the railway line Bologna-Padova.

construction typologies: the historical typology and the innovative one. The test campaign was then extended to the bridge crossing the river Po along the railway line Bologna-Padova nearby Pontelagoscuro (FE) that is a traditional metallic structure of recent construction.

This structure is composed of different simply supported lattice spans; they are upper-closure single track spans of 59.4 m length (5 spans per track) and 75.6 m length (4 spans per track) with non ballasted-permanent way (figg. 5 and 6). Some more tests were moreover carried out near the pre-compressed reinforced concrete viaduct of the new line Bologna-Verona and near some embankments with the aim to compare the relevant measures. The present paper illustrates the results of the first test series carried out by the U.O. Ambiente e Archeologia department of Italferr in the period November 2008- November 2009.

## 2. Noise generated by train passage on a bridge

Noise generated by railway vehicle passage can be considered as the contribution of different sources, each of them characterized by position, intensity, frequency content, directivity and dependence on the train passage speed.

These sources can be classified into three groups:

- noise due to propulsion mechanisms;
- mechanical noise due to wheel/rail interaction;
- aerodynamic noise due to air movements generated by the train passage.

The main noise sources at low speed are those connected to the propulsion mechanisms and to the cooling fans; the relevant noise emission does lightly increase with the train speed.



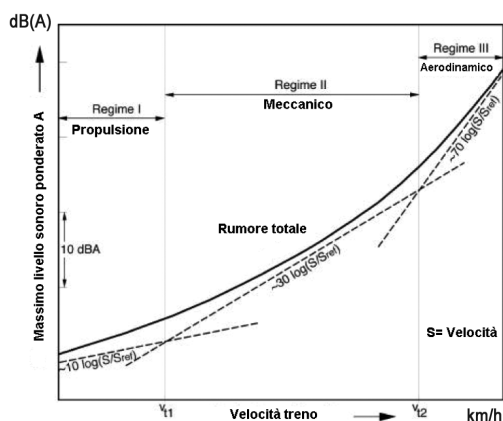


Fig. 7 - Dipendenza dalla velocità di transito del rumore prodotto da un treno ([3] Modificato). *Noise generated by a train ([3] Modified) as a function of its passage speed.*

rità superficiali sulle ruote dei convogli ferroviari e sulle rotaie. In corrispondenza del contatto ruota-rotaia tali irregolarità determinano la generazione di forze dinamiche che mettono in vibrazione treno e binario con conseguente irradiazione di rumore. Il rumore dovuto al contatto ruota-rotaia si incrementa con la velocità di transito in maniera molto più marcata rispetto a quello dovuto ai meccanismi di propulsione, (fig. 7) infatti il rumore meccanico dovuto al contatto ruota-rotaia domina le emissioni acustiche fino ad una velocità di transito del treno di circa 260 km/h. Al di sopra di questa velocità le emissioni complessive di rumore cominciano ad essere interessate anche dal rumore aerodinamico che diventa preponderante a velocità più elevate. Le emissioni acustiche di origine aerodinamica si incrementano notevolmente con la velocità e in maniera più marcata rispetto a quelle dovute ai meccanismi di rotolamento [3].

Durante il transito di un treno su un ponte metallico a questi meccanismi di generazione di rumore si somma quello originato dalla struttura del ponte stesso. Infatti la vibrazione della rotaia dovuta al contatto con la ruota costituisce un fattore di eccitazione della struttura del ponte. Le vibrazioni si propagano per le strutture e di conseguenza tutte le componenti del ponte sono portate ad irradare rumore in particolare gli elementi accessori quali grigliati, parapetti, ecc.

La fig. 8 illustra il meccanismo di generazione del rumore in prossimità di un ponte. Si evidenzia che alle normali sorgenti di rumore presenti durante un transito in rilevato (rotolamento, propulsione, aerodinamica) si somma la componente di origine strutturale. Per quanto detto in precedenza per le normali velocità di transito dei treni sui ponti le emissioni dovute al rumore aerodinamico e quello dovuto ai meccanismi di propulsione risultano di minore importanza.

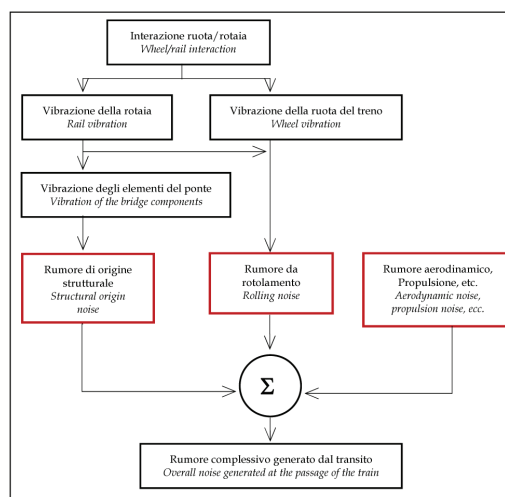


Fig. 8 - Modello di generazione del rumore prodotto da un treno in transito su un ponte. *Noise generation model for a train running on a bridge.*

At the speed increase the mechanical noise due to the wheel-rail interaction becomes predominant. Noise generation is due to the existence of surface irregularities both on the railway vehicle wheels and on the rails. Such surface irregularities in the wheel-rail contact area determine dynamic forces that cause the vibration of the vehicle and the rails and the consequent noise generation. Noise due to the wheel-rail contact increases with the passage speed and its increase is more relevant than the noise increase of the propulsion mechanisms (fig. 7); mechanical noise due to the wheel-rail contact is predominant up to a train passage speed of about 260 km/h. Above this speed value the overall noise emissions begin to be interested by the aerodynamic noise that become predominant at higher speed. The aerodynamic sound emissions increase with the passage speed and their increase is more relevant than the corresponding noise increase due to the rolling mechanisms.

A train passage on a metallic bridge causes noise emissions that depend on both the above-described mechanisms and the structure of the bridge. Rail vibration due to the wheel-rail contact represents an excitation factor for the bridge structure. Vibrations propagate all over the structure and consequently all the bridge components, and in particular accessory elements such as grids, guards etc., are forced to generate noise.

Fig. 8 illustrates the noise generation mechanism in the nearby of a bridge. It can be noted that the noise emission is due, in this case, to both the normal components relevant to a train passage on an embankment section (rolling, propulsion, aerodynamic) and the structural component. As before mentioned the emissions due to

Esperienze olandesi [1] riferiscono che le emissioni acustiche complessive che un treno produce transitando sulla maggior parte dei ponti in acciaio con attacco diretto risultano da 5 a 9 dB superiori a quelle prodotte da linee normali con armamento su ballast e traverse in legno.

Alcune esperienze francesi su ponti ad attacco diretto realizzati con travature reticolari riferiscono incrementi dell'ordine degli 11 dB(A).

Dati di letteratura [1] mettono in evidenza che la componente di rumore da rotolamento generato durante un transito di un treno su un ponte metallico è leggermente superiore (+ 2 dB(A)) rispetto all'analoga componente relativa ad armamenti su ballast. È lecito attribuire l'incremento della componente da rotolamento all'assenza del ballast e alla connessa funzione di assorbimento del rumore.

### 3. Le indagini sperimentali eseguite

Italferr ha condotto una prima serie di indagini sperimentali al fine di confrontare le emissioni generate dai transiti ferroviari su ponti di nuova generazione con quelle relative a ponti ad attacco diretto, ai viadotti in cemento armato precompresso ed ai rilevati. La tabella 1 sintetizza le opere indagate.

Al fine di esaminare il campo acustico generato dal transito ferroviario nel piano ortogonale al tracciato, le indagini in prossimità delle opere in elevazione sono state condotte disponendo 4 microfoni lungo un arco di cerchio di raggio  $R=10$  m avente come centro un punto situato nella mezziera del binario, ad un'altezza di un metro sul piano del ferro. I microfoni sono stati disposti lungo tale circonferenza ad una distanza angolare di 22,5 gradi l'uno dall'altro, come illustrato nella fig. 9. Convenzionalmente i 4 microfoni installati sono stati denominati Pa, Pb, Pc e Pd a partire da quello posizionato all'altezza del piano del ferro.

Lo schema illustrato nella fig. 9 e relativo all'indagine 3, eseguita a ridosso del nuovo ponte di Ostiglia (MN), è stato riprodotto anche nelle altre prove effettuate per i ponti con attacco diretto ed i viadotti in cemento armato precompresso.

Per realizzare lo schema proposto senza interferire con il normale esercizio della linea ferroviaria sono state individuate delle aree di golena che permettessero di posizionare opportune strutture di sostegno dei microfoni.

Per poter posizionare i microfoni Pa e Pb alle quote di interesse è stato predisposto uno speciale stativo controventato che ha permesso di raggiungere il livello del ponte partendo dal piano campagna situato a 13 m più in basso. Per il posizionamento dei microfoni Pc e Pd sono invece stati utilizzati degli stativi standard e/o treppiedi in virtù delle quote notevolmente più basse rispetto al piano campagna.

Nelle indagini 1, 2 e 3 è stata inoltre prevista una po-

aerodynamic noise and propulsion mechanisms are less important at the normal passage speeds.

Dutch experiences show that the overall sound emissions at the passage of a train on the most non ballasted-permanent way bridges turn to be from 5 dB to 9 dB higher than the corresponding values generated by ballasted-permanent way lines with wooden sleepers.

Some France experiences on non ballasted-permanent way bridges with lattice girders show increases of about 11 dB(A).

Literature data show that the rolling noise component generated during a train passage on a metallic bridge is lightly higher (+2 dB(A)) than the corresponding component relevant to ballasted-permanent way structures. The increase of the rolling noise component is reasonably due to the absence of ballast and to the relevant noise absorption function.

### 3. Experimental tests

Italferr carried out a first series of experimental tests aiming to compare the sound emissions produced by train passage on new generation bridges with the emissions generated by non ballasted-permanent way bridges, pre-compressed reinforced concrete viaducts and embankments.

Table 1 summarizes the works taken into consideration.

Tests nearby elevation works were carried out by installing 4 microphones along a circle arch (circle radius  $R=10$  m) whose centre was situated along the centre line of the track at a height of 1 m above the upper surface of the rail. This configuration was selected with the aim to record the sound field generated by train passage in the orthogonal plane (with respect to the line layout). Microphones were located along such circle at a reciprocal an-

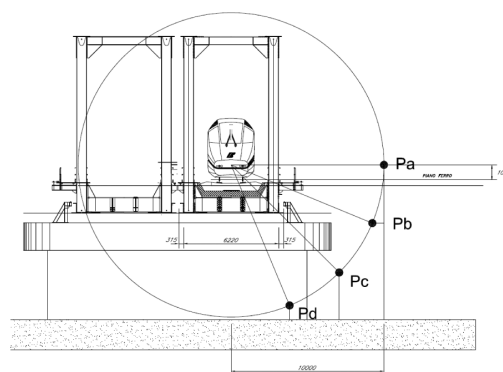


Fig. 9 - Schema di installazione dei microfoni. *Installation scheme of microphones.*

TABELLA 1 - TABLE 1

SINTESI DELLE INDAGINI SPERIMENTALI CONDOTTE DA ITALFERR.  
SUMMARY OF THE EXPERIMENTAL TESTS CARRIED OUT BY ITALFERR

Indagine Test	Linea ferroviaria Railway Line	Opera indagata Work under consideration	Postazione di misura Measurent station
1	BO-VR Storica BO-VR Historical line	Ponte metallico con attacco diretto dell'armamento Ponte sul fiume Po Ostiglia (MN) <i>Metallic bridge with non-ballasted permanent way Bridge of Ostiglia (MN) on the river Po</i> (fig. 11)	Rilevato Embankment (fig. 12)
2	BO-PD	Ponte metallico con attacco diretto dell'armamento Ponte sul fiume Po Pontelagoscuro (FE) <i>Metallic bridge with non-ballasted permanent way Bridge of Pontelagoscuro (FE) on the river Po</i> (fig. 18)	Rilevato Embankment (fig. 19)
3	BO-VR Nuova	Ponte metallico con posa su ballast dell'armamento Ponte sul fiume Po Ostiglia (MN) <i>Metallic bridge with ballasted-permanent way Bridge of Ostiglia (MN) on the river Po</i> (fig. 22)	Rilevato Embankment (fig. 23)
4	BO-VR Nuova	Viadotto in cemento armato precompresso con posa su ballast dell'armamento (Ostiglia) <i>Pre-compressed reinforced concrete viaduct with ballasted permanent way (Ostiglia)</i> (fig. 29)	-

stazione fonometrica a ridosso dei rilevati di approccio ai ponti ferroviari (denominata Pr). In tali postazioni i microfoni sono stati posizionati ad una distanza di 10 metri dall'asse del binario esterno e ad una quota di un metro sul piano del ferro. Il posizionamento dei microfoni Pr nelle tratte in rilevato è dunque direttamente confrontabile con quello del punto Pa nelle sezioni a ridosso delle opere d'arte in elevazione.

Per le indagini fonometriche è stata adottata una strumentazione conforme al DM 16/3/1998 "Tecniche di rileva-

gular distance of 22.5 degrees as illustrated in fig. 9. The four microphones were conventionally named Pa, Pb, Pc and Pd starting from the one located at the height of the upper surface of the rail.

The installation scheme of fig. 9 is relevant to the test n. 3 carried out nearby the new bridge of Ostiglia (MN); similar schemes have been given for the other tests relevant to non ballasted-permanent way bridges and pre-compressed reinforced concrete viaducts.

Some bank areas have been detected for the installation of proper microphone supporting structures thus allowing the implementation of the proposed scheme without interfering with the normal operation of the railway line.

A particular brace holder was prepared in order to install the microphones Pa and Pb in the right position thus allowing to reaching the bridge level starting from the ground level that is 13m below it. Some standard holders and/or tripods were on the contrary used to install the microphones Pc and Pd of which the heights above the ground level are considerably lower.

A phonometric measuring point (named Pr) was moreover installed in the tests 1, 2 and 3 near the embankments approaching the railway bridges. The relevant microphones were installed at a distance of 10 meters from the centre of the outer track at a height of 1 m above the surface of the rail. The microphone positioning in the point Pr of the embankment sections can be then compared with the corresponding positioning in the measuring point Pa near the elevation structures.

The equipment used for the phonometric tests matches with the Ministerial Decree DM 16/3/1998 "Tecniche di rilevamento e di misurazione dell'inquinamento acustico". An Integration Phonometer - 4 independent channel Real Time Analyzer was in particular used for measures near the elevation structures in order to contemporarily collect data relevant to the 4 points Pa, Pb, Pc and Pd with one single measuring equipment. An Integration Phonometer - single channel Real Time Analyzer was used for the measuring points near the embankments.

mento e di misurazione dell'inquinamento acustico". In particolare per le misure a ridosso delle opere in elevazione è stato utilizzato un Fonometro Integratore - Analizzatore Real Time a 4 canali indipendenti in modo da poter acquisire i dati relativi alle 4 postazioni microfoniche Pa, Pb, Pc e Pd in contemporanea con un'unica strumentazione.

Per le postazioni a ridosso dei rilevati è stato utilizzato un Fonometro Integratore - Analizzatore Real Time monocanale.

La misura è stata condotta campionando ogni decimo di secondo i livelli di pressione sonora globali ponderati A in bande di frequenza di terzi d'ottava. L'acquisizione è stata eseguita in contemporanea nelle 4 postazioni a ridosso dell'opera d'arte e in quella prossima al rilevato. L'acquisizione in contemporanea nelle varie postazioni ha permesso confronti relativi a dati acustici registrati in corrispondenza di un determinato transito ferroviario.

Contestualmente alle apparecchiature fonometriche è stato posizionato un sistema di videosorveglianza in modo da contestualizzare il dato fonometrico rilevato alla tipologia, composizione e velocità del convoglio ferroviario transitato.

Una volta posizionata la strumentazione e aver effettuato le opportune verifiche e calibrazioni in campo sono stati avviati i rilievi che hanno permesso l'acquisizione dei livelli di pressione sonora con alcune decine di transiti ferroviari. I convogli con i quali sono state acquisite le emissioni ferroviarie sono quelle di norma transitanti nelle linee indagate ossia Merci, REG ed ES\*. Tuttavia le analisi riportate nel seguito sono quasi esclusivamente relative ai transiti di ES\* che utilizzano materiale ferroviario di ultima generazione: ETR500, ETR460/480, ETR 600. Infatti le altre categorie di treno sono caratterizzate da una variabilità di materiale utilizzato molto elevata che si riflette in una dinamica dei livelli di emissione sonora molto marcata e di fatto rende difficile analisi comparative tra treni non contestualmente misurati.

#### 4. Elaborazione dati

I dati acustici acquisiti con gli analizzatori fonometrici sono stati correlati alle informazioni dedotte dal sistema di videosorveglianza e a quelle ricavate dai "Grafici Storici" del "Circolato" di RFI. L'insieme delle informazioni/dati ha permesso di produrre delle tabelle nelle quali sono riportati, per ogni transito ferroviario:

- n. progressivo T1....Tn;
- data e ora;
- categoria (REG, ES\*, MERCI, etc.);
- origine e destinazione;
- n. motrici e carrozze;
- materiale (ETR500, 460/480, 600, Ordinario, etc.);

The test measure was carried out by sampling every tenth of second the global weighted sound pressure levels A in third-octave bands. Data acquisition was done contemporary in the four measuring points near the structure and in the measuring point near the embankment. The contemporary data acquisition made it possible to compare the recorded sound data relevant to a defined train passage.

A video-surveillance system was even installed in order to associate the recorded phonometric data to the typology, composition and speed of the train passage.

After the installation of the measuring equipment and the execution of proper on-field verifications and calibrations the mentioned test campaign begun, thus allowing to recording the sound pressure levels relevant to some dozens of train passages. The types of train under test are those usually running the considered lines (freight trains, regional trains and Eurostar trains). However the analyses hereby proposed are almost exclusively relevant to Eurostar trains using last-generation rolling stock: ETR500, ETR460/480, ETR 600. The other two train types are indeed characterized by a very high variability of the used rolling stock that leads to a large dynamics of the sound emission levels thus making it difficult to compare trains by not-contemporary measures.

#### 4. Data processing

Sound data acquired with the phonometric analyzers were correlated to both data achieved from the video-surveillance system and data extrapolated from the "Historical Graphs" of the RFI running fleet. That amount of data allowed to producing specific tables that include, for each single train passage, the following parameters:

- progressive number T1....Tn;
- date and time;
- type of train (REGIONAL, ES\*, FREIGHT, etc.);
- origin and destination;
- n° of coaches and motor coaches;
- rolling stock (ETR500, 460/480, 600, Ordinary, etc.);
- overall length in meters;
- speed in km/h.

Moreover the following data are presented for each single train passage and for each phonometric measuring point Pa, Pb, Pc and Pd (nearby the bridge) and Pr (nearby the embankment):

- the *Maximum sound pressure Level (Lmax)* in dB(A) reached during the event;
- the *Time duration of the event and the Exposure Time (Te)* in seconds, defined as the time range during which the sound pressure level remains over a defined threshold value that is set to a -10 dB(A) with respect to the maximum value Lmax (fig. 10);



- lunghezza complessiva in metri;
- velocità in km/h.

Inoltre, per ogni transito ferroviario e per ogni postazione fonometrica  $P_a$ ,  $P_b$ ,  $P_c$  e  $P_d$  (a ridosso del ponte) e  $P_r$  (a ridosso del rilevato) sono riportati:

- il *massimo livello di pressione sonora* ( $L_{max}$ ) in dB(A) raggiunto durante l'evento;
- la *durata dell'evento o tempo di esposizione* ( $T_e$ ) in secondi, definito come l'intervallo di tempo durante il quale il livello di pressione sonora si mantiene al di sopra di un livello di soglia posto a -10 dB(A) rispetto al valore  $L_{max}$  (fig. 10);
- il *livello sonoro del singolo evento* ( $SEL$ ) in dB(A):

$$SEL = 10 * \log \left[ \frac{1}{T_0} \int_0^{T_e} \frac{P_A^2(t)}{P_0^2} dt \right]$$

dove:  $P_A(t)$  è il valore istantaneo della pressione sonora ponderata "A" del segnale acustico,  $P_0 = 20 \mu Pa$  è la pressione sonora di riferimento e  $T_0$  è la durata di riferimento pari ad 1 secondo.

- l'analisi in frequenza lineare del SEL per bande d'ottava in dB.

Le tabelle redatte hanno costituito la base di lavoro per l'elaborazione successiva dei dati i cui risultati vengono di seguito descritti.

## 5. Risultati dell'indagine sperimentale

### 5.1. Ponti in acciaio ad attacco diretto

L'indagine 1 (figg. 11 e 12), realizzata a ridosso del ponte storico ad attacco diretto sul fiume Po della linea



Fig. 11 - Indagine 1 - Installazione dei microfoni a ridosso del ponte ad attacco diretto di Ostiglia (MN) sulla linea storica BO-VR. Test n. 1 - Installation of microphones near the non ballasted-permanent way bridge of Ostiglia (MN) along the historical line BO-VR.

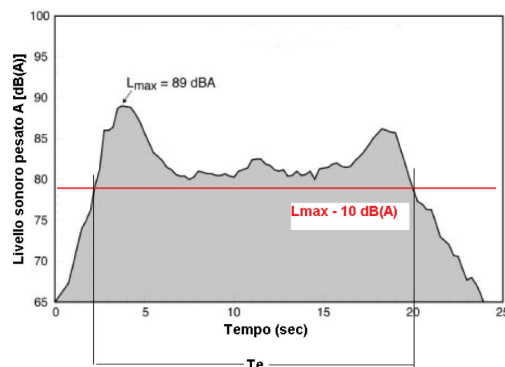


Fig. 10 - Determinazione del Tempo di esposizione. Determination of the Exposure Time.

- the *sound level of the single event* ( $SEL$ ) in dB(A):

$$SEL = 10 * \log \left[ \frac{1}{T_0} \int_0^{T_e} \frac{P_A^2(t)}{P_0^2} dt \right]$$

where:  $P_A(t)$  is the instant value of the weighted sound pressure "A" of the acoustic signal,  $P_0 = 20 \mu Pa$  is the reference sound pressure and  $T_0$  is the reference duration of 1 second;

- the linear frequency analysis of the SEL in octave bands in dB.

The said tables represented a working base for the subsequent data processing of which the results are below described.

## 5. Results of the experimental tests

### 5.1. Steel bridge with non ballasted-permanent way

Test n. 1 (figg. 11 and 12) was carried out in November 2008 near the non ballasted-permanent way historical bridge on the river Po of the railway line Bologna-Verona (this historical bridge, opened to operation in November 1911, is composed of 7 simply supported single-track metallic lattice girders (through arch upper-closure girders) with spans of about 70 m.

The experimental tests returned data relevant to the train passage for speed values ranging from 30 to 80 km/h. The rolling stock running on the historical bridge during the analyzed time window was composed of 34 trains divided into ordinary rolling stock, ETR500 trains and freight trains.

Fig. 13 shows the weighted sound pressure levels "A" measured during the passage of an ETR500 train as a function of time. The yellow lines represent the sound

Bologna-Verona (ponte aperto all'esercizio nel novembre 1911, costituito da 7 travate metalliche reticolari a singolo binario, semplicemente appoggiate, a via inferiore, chiuse superiormente, ognuna di circa 70 m di luce), è stata eseguita nel novembre del 2008, pochi giorni prima che il transito dei treni venisse deviato sul binario dispari del nuovo ponte realizzato ad Ostiglia.

L'indagine ha fornito dati relativi al transito dei treni in un intervallo di velocità compreso tra 30 e 80 km/h. Durante la finestra temporale di indagine, il circolato è risultato composto da 34 treni suddivisi in materiale ordinario, ETR 500 e merci.

La fig. 13 illustra l'andamento nel tempo dei livelli di pressione sonora ponderati "A" registrati durante un transito di un treno ETR500. I grafici in toni di giallo rappresentano i livelli di pressione sonora a ridosso del ponte (postazioni Pa=CH1, Pb=CH2, Pc=CH3 e Pd=CH4) mentre la curva in blu quelli in prossimità del rilevato (postazione Pr).

L'analisi delle curve relative ai microfoni posizionati a ridosso del ponte evidenzia una sostanziale uniformità dei livelli di pressione sonora registrati nelle postazioni Pa e Pb mentre si assiste ad un progressivo incremento nelle postazioni Pc e Pd.

Al fine di quantificare la variabilità del campo acustico a ridosso del ponte sono stati calcolati i SEL relativi ai 34 transiti ferroviari nelle postazioni Pa, Pb, Pc e Pd. È stata poi eseguita un'analisi comparativa eseguendo la differenza tra i SEL riscontrati rispettivamente nelle postazioni Pb, Pc e Pd e quella, assunta come riferimento, Pa. L'analisi comparativa trova la sua sintesi nel grafico radiale di fig. 14 in cui si riportano i valori medi delle differenze riscontrate.

Si denota come i SEL misurati nella postazione Pc e soprattutto Pd siano maggiori rispetto a quelli rilevati in Pa rispettivamente di 1.4 e 4.6 dB(A). Le medie sono state calcolate su un campione di treni caratterizzati da materiale ordinario e ETR 500 con velocità variabile tra 30 e 80 km/h. L'analisi statistica risulta caratterizzata da una deviazione standard molto contenuta che evidenzia una sostanziale costanza del dato in relazione alla tipologia di treno e alla velocità di transito, almeno nel range 30-80 km/h.

La fig. 15 illustra la composizione in frequenza dei SEL rilevati in corrispondenza di un transito di ETR500 alla comune velocità di 43 km/h sul ponte e sul rilevato. L'analisi dei dati a ridosso del ponte mette in evidenza che nella postazione Pd si ha un incremento generalizzato di tutte le frequenze rispetto alla postazione Pa. Tale incremento appare meno marcato per le frequenze in area 125-250 Hz. Per quantificare questo aspetto è stata fatta un'analisi comparativa analoga a quella della fig. 14 utilizzando al posto dei SEL complessivi ponderati "A" i singoli livelli per bande d'ottava. Il risultato è riportato nella successiva fig. 16 che conferma l'analisi qualitativa che si evinceva dalla fig. 15.



Fig. 12 - Indagine 1 - Installazione del microfono a ridosso di un rilevato prossimo al ponte storico di Ostiglia sulla linea BO-VR. Test n. 1 - Installation of microphones in an embankment section of the line BO-VR, near the historical bridge of Ostiglia.

pressure levels near the bridge (points Pa=CH1, Pb=CH2, Pc=CH3 and Pd=CH4) while the blue line is the sound pressure level in the considered embankment section (measuring point Pr).

The analysis of the graphs relevant to the microphones installed near the bridge shows an essential uniformity of the sound pressure levels recorded in the measuring points Pa and Pb. The measures recorded in the points Pc and Pd reveal, on the contrary, a progressive increase of the sound pressure levels.

The SEL values relevant to 34 train passages by the measuring points Pa, Pb, Pc and Pd were then calculated in order to quantify the acoustic field variability. A comparative analysis was then carried out by making the difference between the SEL values recorded in the measuring points Pb, Pc and Pd and the corresponding values

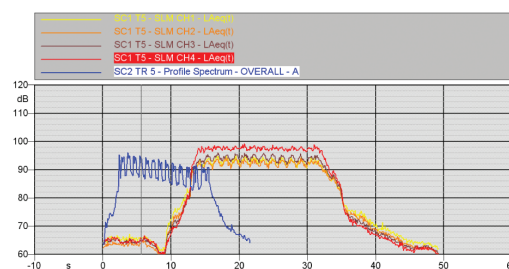


Fig. 13 - Indagine 1: andamento dei livelli di pressione sonora ponderata "A", in dB(A), misurati durante un transito di un ETR500 a ridosso del Ponte (postazioni Pa, Pb, Pc e Pd) e del Rilevato (Pr). Test n. 1: Weighted sound pressure levels "A", in dB(A) as a function of time, measured during the passage of an ETR500 train on the considered bridge (measuring points Pa, Pb, Pc e Pd) and on the said Embankment (Pr).

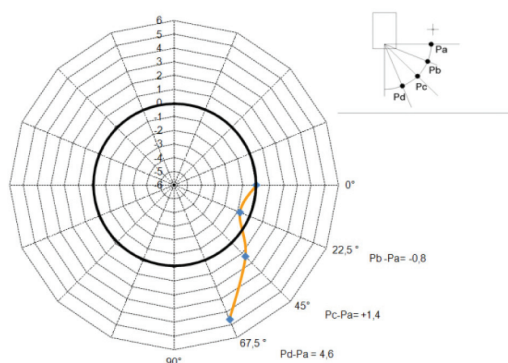


Fig. 14 - Indagine 1: media delle differenze in dB(A) tra i SEL misurati nelle postazioni Pb, Pc e Pd e quelli relativi alla postazione di riferimento Pa (Livelli globali pesati A). Test n. 1: Average of the differences, in dB(A), between the SEL values measured in the points Pb, Pc and Pd and the values relevant to the reference measuring point Pa (weighted global levels A).

La successiva tabella 2 sintetizza i dati riportati nei grafici di fig. 14 e di fig. 16.

Per quanto attiene ad un confronto tra le emissioni sonore relative al ponte e quelle relative al rilevato si può in prima battuta analizzare la fig. 13. Da tale figura emerge che i livelli di pressione sonora misurati in corrispondenza del rilevato risultano inferiori rispetto a quelli presenti a ridosso del ponte nonostante che nella sezione in rilevato la velocità di transito del convoglio è risultata maggiore. Tale dato può essere evinto in maniera qualitativa dalla lunghezza della registrazione a ridosso del rilevato che risulta più corta rispetto a quelle relative al ponte.

Per un confronto significativo tra le emissioni sonore in corrispondenza del ponte e del rilevato sono stati selezionati i treni che hanno transitato con velocità simili nelle due sezioni. I confronti effettuati hanno messo in luce che le emissioni ferroviarie in corrispondenza della postazione Pa del ponte risultano caratterizzate da SEL superiori mediamente di 7.8 dB(A) (deviazione standard = 0.9) rispetto a quelle presenti a ridosso del rilevato (Postazione Pr).

TABELLA 2 – TABLE 2

INDAGINE 1 – ANALISI STATISTICA DELLE DIFFERENZE TRA I SEL MISURATI NELLE POSTAZIONI Pb, Pc E Pd E QUELLI RILEVATI NELLA POSTAZIONE DI RIFERIMENTO Pa. TEST 1 – STATISTICAL ANALYSIS OF THE DIFFERENCES BETWEEN THE SEL VALUES MEASURED BY THE SITES Pb, Pc AND Pd AND THE VALUES RELEVANT TO THE REFERENCE SITE Pa

		Δ SEL							
		Globali "A"	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Pb-Pa	Media	-0.8	-0.2	-0.5	-0.8	-0.9	-0.7	-0.8	-0.4
	dev. St.	0.1	0.7	0.4	0.3	0.2	0.1	0.1	0.4
Pc-Pa	Media	1.4	2.2	1.2	0.5	1.8	1.7	1.6	0.9
	dev. St.	0.2	0.9	0.4	0.3	0.2	0.2	0.2	0.3
Pd-Pa	Media	4.6	5.4	2.6	3.4	5.1	5.0	4.8	4.5
	dev. St.	0.2	1.5	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0.8

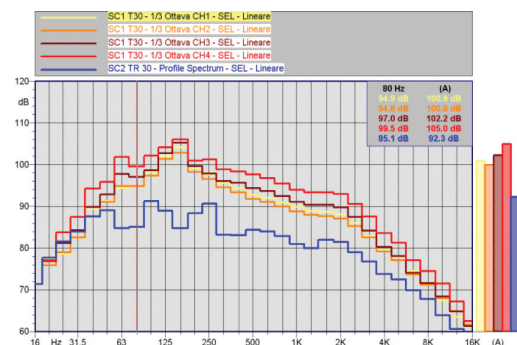


Fig. 15 - Indagine 1: spettro del SEL in bande di terzi d'ottava in dB(lin) misurato durante un transito di un ETR500 a ridosso del Ponte (postazioni Pa, Pb, Pc e Pd) e del rilevato (Pr). V= 43 km/h. Test n. 1: SEL spectrum in third-octave bands in dB(lin) measured, during the passage of an ETR500 train, near the considered bridge (measuring points Pa, Pb, Pc and Pd) and in the embankment section area (Pr). V= 43 km/h.

recorded in the point Pa assumed as reference point. The comparative analysis is summarized in the radial graph of fig. 14 that shows even the average values of the recorded differences.

It can be noted that the SEL values measured in the point Pc and particularly Pd are respectively 1.4 and 4.6 dB(A) higher than the corresponding values recorded in Pa. The average values were calculated on a sample composed of ordinary rolling stock and ETR500 trains with speed values varying from 30 to 80 km/h. The statistical analysis is characterized by a very low standard deviation revealing an essential steadiness of the measured values with respect to both train typology and passage speed, at

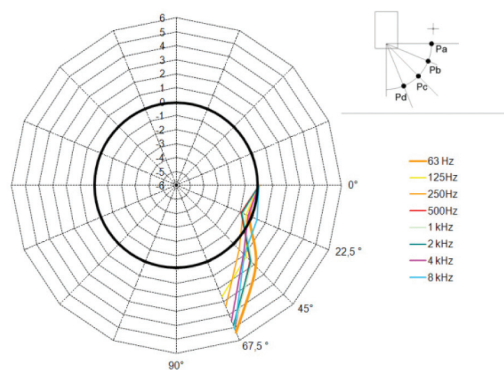


Fig. 16 - Indagine 1: media delle differenze in dB tra i SEL misurati nelle postazioni Pb, Pc e Pd e quelli relativi alla postazione di riferimento Pa (Livelli per bande di frequenza 1/1 ottava). Test n. 1: Average of the differences, in dB, between the SEL values measured by the sites Pb, Pc and Pd and the values relevant to the reference site Pa (Levels for frequency bands of 1/1 octave).



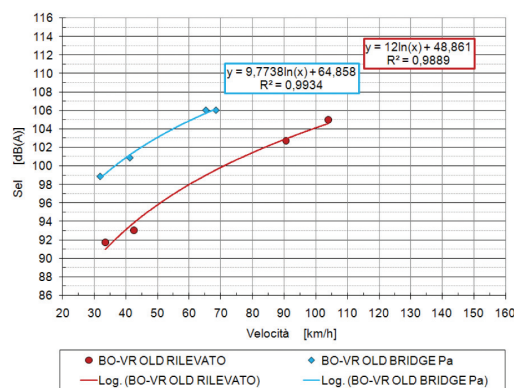


Fig. 17 - Indagine 1: variazione dei livelli di singolo evento (SEL) con la velocità di transito di treni ETR 500. Livelli misurati in prossimità del ponte (Postazione Pa) e del rilevato (Pr) sulla vecchia linea BO-VR. Test n.1: Single Event Levels (SEL) as a function of the passage speed of ETR500 trains. Levels measured near the bridge (point Pa) and in the embankment section area (Pr) along the historical line BO-VR.

Quanto detto si riscontra anche nella fig. 17 che illustra il confronto tra i SEL globali ponderati "A" rilevati in corrispondenza del rilevato e del ponte (nella postazione Pa) durante il transito di treni ETR500. I dati vengono relazionati alla rispettiva velocità di transito sul rilevato e sul ponte. Nella medesima figura si riportano anche le curve di tendenza logaritmiche. Si denotano, a parità di velocità, incrementi di 7-8 dB(A) dei SEL rilevati in corrispondenza del ponte rispetto a quelli a ridosso del rilevato.

L'indagine 1, realizzata a ridosso del ponte storico ad attacco diretto sul fiume Po della linea Bologna-Verona, ha fornito dati relativi al transito dei treni in un intervallo di velocità compreso tra 30 e 80 km/h. Al fine di ampliare il range di velocità di transito dei treni, nel novembre del 2009, è stata eseguita l'analoga indagine 2 a ridosso del ponte sul Po della linea Bologna-Padova in prossimità della località Pontelagoscuro. Tale sperimentazione è stata eseguita anche al fine di avere dei riferimenti su di un'opera tradizionale di recente realizzazione (anno di costruzione 2001) (figg. 18 e 19).

A ridosso di questo ponte, caratterizzato da una struttura simile a quella del ponte sulla vecchia linea Bologna-Verona, ma di più recente realizzazione, sono stati ricavati dati per velocità comprese tra 100 e 150 km/h. Durante la finestra temporale d'indagine, il circolato è risultato composto da 28 treni suddivisi in materiale ordinario, ETR 500/600 e merci.

Anche in questo caso è stata eseguita un'analisi comparativa tra i SEL riscontrati nelle varie postazioni a ridosso del ponte. Tale analisi trova la sua sintesi nel grafico radiale di fig. 20 ed in tabella 3 in cui si riportano i va-

least in the speed range 30-80 km/h.

Fig. 15 shows the frequency content of the SEL values measured, in the bridge area and in the embankment area, at the passage of an ETR500 train with a speed of 43 km/h. The analysis of the data collected near the bridge shows a generalized increase of all the frequency measured in the point Pd with respect to the corresponding measures in the point Pa. Such increase seems to be lower for the frequency range 125-250 Hz. A comparative analysis, similar to the analysis of fig. 14, was then carried out in order to quantify this aspect; the single levels per octave-bands were in particular used instead of the global weighted SEL values "A". The result is presented in the following fig. 16 that confirms the qualitative analysis of fig. 15.

The following table 2 summarizes the data relevant to figg. 14 and 16.

Fig. 13 can be first analyzed in order to compare the sound emissions in the bridge area and in the embankment section area. Such analysis reveals that the sound pressure levels measured in the embankment section area



Fig. 18 - Indagine 2 - Installazione dei microfoni a ridosso del ponte ad attacco diretto di Pontelagoscuro (FE) sulla linea BO-PD. Test n. 2 - Installation of microphones near the non ballasted permanent way bridge of Pontelagoscuro (FE), along the railway line BO-PD.





Fig. 19 - Indagine 2 - Installazione del microfono a ridosso di un rilevato prossimo al ponte di Pontelagoscuro (FE) sulla linea BO-PD. Test n. 2 - Installation of microphones in an embankment section area near the bridge of Pontelagoscuro (FE), along the railway line BO-PD.

lori medi delle differenze riscontrate tra i SEL in Pd, Pc e Pd e quelli in Pa, assunta come postazione di riferimento.

Si denota un andamento assolutamente in linea con quanto misurato a ridosso del ponte storico della BO-VR caratterizzato da un incremento medio di 4.0 dB(A) dei SEL misurati nella postazione Pd rispetto alla postazione Pa. Le medie sono state calcolate su un campione di 28 transiti di treni caratterizzati da materiale ordinario e ETR 500/600 con velocità variabile tra 100 e 150 km/h. L'analisi statistica risulta caratterizzata da una deviazione standard molto contenuta che evidenzia una sostanziale costanza del dato in relazione alla tipologia di treno e alla velocità di transito, almeno nel range 100-150 km/h.

Per effettuare un confronto tra le emissioni sonore relative al ponte e quelle relative al rilevato sono stati selezionati i treni che hanno transitato con velocità simili nelle due sezioni. I confronti effettuati hanno messo in luce che le emissioni ferroviarie in corrispondenza della postazione Pa del ponte risultano caratterizzate da SEL superiori mediamente di 11.5 dB(A) (deviazione standard =1.3) rispetto al rilevato.

TABELLA 3 - TABLE 3

INDAGINE 2 - ANALISI STATISTICA DELLE DIFFERENZE TRA I SEL MISURATI NELLE POSTAZIONI Pb, Pc E Pd E QUELLI RILEVATI NELLA POSTAZIONE DI RIFERIMENTO Pa. TEST N. 2 - STATISTICAL ANALYSIS OF THE DIFFERENCES BETWEEN THE SEL VALUES MEASURED IN THE POINTS Pb, Pc AND Pd AND THE VALUES RELEVANT TO THE REFERENCE POINT Pa

		0 SEL (globale "A") dB(A)
Pb-Pa	Media	0
	dev. St	0.2
Pc-Pa	Media	2.3
	dev. St	0.2
Pd-Pa	Media	4
	dev. St	0.2

are lower than the corresponding levels recorded near the considered bridge despite the train speed is higher when running the embankment line section. This piece of information can be deduced in a qualitative way by observing that the recording duration in the embankment area is shorter than the corresponding duration relevant to the bridge.

Three trains, passed with similar speed values by the bridge section and the embankment section, were selected in order to make a significant comparison between the corresponding sound emissions. Such comparison revealed that the sound emissions of the bridge in the measuring point Pa are characterized by SEL values that are averagely 7.8 dB(A) higher (standard deviation =0.9) than the corresponding values measured in the embankment section area (Point Pr).

This can be even found in fig. 17 illustrating a comparison between the global weighted SEL values "A" in the embankment section area and the corresponding values near the bridge (in the measuring point Pa) during passage of ETR500 trains. Data are related to the corresponding passage speed by the embankment section and by the bridge. The same figure shows even the logarithmic tendency curves. It reveals, for the same speed, increases of 7-8 dB (A) of the SEL values measured in the bridge area with respect to the corresponding values measured in the embankment section area.

The experimental test n. 1, carried out near the historical non ballasted-permanent way bridge crossing the river Po along the railway line Bologna-Verona, returned data relevant to the train passage for speed values ranging from 30 to 80 km/h. A similar test (n. 2) was executed in November 2009 in order to enlarge the passage speed

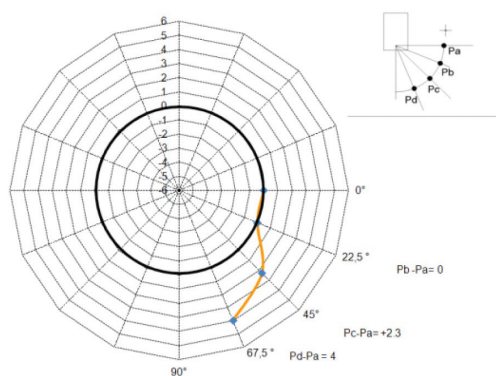


Fig. 20 - Indagine 2: media delle differenze in dB(A) tra i SEL misurati nelle postazioni Pb, Pc e Pd e quelli relativi alla postazione di riferimento Pa (Livelli globali pesati A). Test n. 2: Average of the differences, in dB (A), between the SEL values measured in the points Pb, Pc and Pd and the values relevant to the reference point Pa (weighted global levels A).

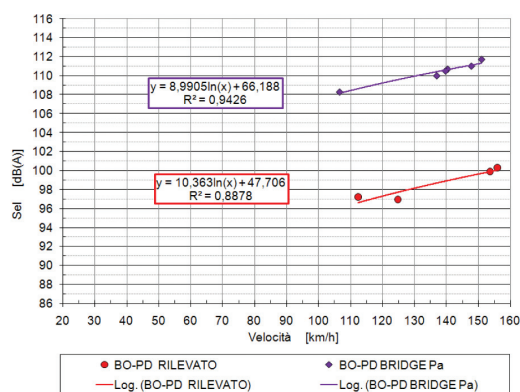


Fig. 21 - Indagine 2: variazione dei livelli di singolo evento (SEL) con la velocità di transito di treni ETR 500. Livelli misurati a ridosso del ponte (Postazione Pa) e del rilevato (Pr) sulla linea BO-PD. Test n. 2: Single Event Levels (SEL) as a function of the passage speed of ETR500 trains. Levels measured near the bridge (measuring point Pa) and in the embankment section area (point Pr) along the railway line BO-PD.

Quanto detto si riscontra anche nella fig. 21 che illustra il confronto tra i SEL globali ponderati "A" rilevati in corrispondenza del rilevato e del ponte (nella postazione Pa) durante il transito di treni ETR500. I dati vengono relazionati alla relativa velocità di transito sul rilevato e sul ponte. Nella medesima figura si riportano anche le curve di tendenza logaritmiche. Si denotano, a parità di velocità, incrementi dell'ordine degli 11 dB(A) dei SEL rilevati a ridosso del ponte rispetto a quelli a ridosso del rilevato.



Fig. 22 - Indagine 3 - Installazione dei microfoni a ridosso del nuovo ponte di Ostiglia (MN) sulla linea BO-VR. Test n.3 - Installation of microphones near the new bridge of Ostiglia (MN), along the railway line BO-VR.

range. Such test was carried out near the Pontelagoscuro bridge crossing the river Po along the railway line Bologna-Padova. This experimentation was carried out even aiming to gain some reference data on a traditional work of recent construction (year of construction 2001) (figg. 18 and 19).

Specific data were collected near that recent construction bridge whose structure is similar to the structure of the bridge on the historical line Bologna-Verona. Data were collected for speed values ranging from 100 to 150 km/h. Rolling stock running the bridge during the test-time window was composed of 28 trains divided into ordinary rolling stock, ETR500/600 trains and freight trains.

A comparative analysis between the SEL values recorded in the different measuring points near the bridge was carried out in this case too. Such analysis is summarized in the radial graph of fig. 20 and in table 3 that show the average values of the differences between the SELs in Pd, Pc and Pd and the corresponding values in Pa, assumed as reference measuring point.

It can be noted that data measured are absolutely similar to data collected near the historical bridge of the line BO-VR, characterized by an average increase of 4.0 dB(A) of the SEL values measured in the point Pd with respect to the corresponding values in the point Pa. The average values were calculated on a sample of 28 trains (ordinary rolling stock and ETR500/600) with speed values ranging from 100 to 150 km/h. The statistical analysis is characterized by a very low standard deviation revealing an essential steadiness of the measured values with respect to both train typology and passage speed, at least in the speed range 100-150 km/h.

Some trains, passed with similar speed values by the bridge section and the embankment section, were selected in order to make a significant comparison between the



Fig. 23 - Indagine 3 - Installazione del microfono a ridosso di un rilevato prossimo al nuovo ponte di Ostiglia sulla linea BO-VR. Installation of a microphone in an embankment section area near the new bridge of Ostiglia along the railway line BO-VR.

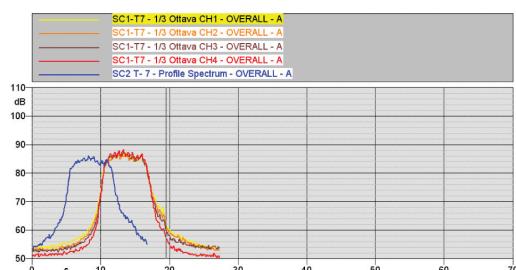


Fig. 24 - Indagine 3: andamento dei livelli di pressione sonora ponderata "A", in dB(A), misurati durante un transito di un ETR460 a ridosso del Ponte (postazioni Pa, Pb, Pc e Pd) e del Rilevato. Test n.3: Weighted sound pressure levels "A" in dB(A) as a function of time, measured during the passage of an ETR460 train on the considered bridge (measuring points Pa, Pb, Pc and Pd) and on the said embankment line section.

## 5.2. Ponte metallico con posa dell'armamento su ballast

L'indagine 3, realizzata a ridosso del nuovo ponte sul fiume Po della linea Bologna-Verona, è stata eseguita nel febbraio del 2009, poco tempo dopo l'attivazione del binario dispari dello stesso (figg. 22 e 23).

L'indagine ha fornito dati relativi al transito dei treni in un intervallo di velocità compreso tra 60 e 140 km/h. Il circolato è risultato composto da 60 treni suddivisi in materiale ordinario, ETR 460/480 e merci.

La fig. 24 riporta i livelli di pressione sonora ponderata "A" misurati in corrispondenza di un transito di un ETR 460 a ridosso del ponte e del rilevato alla velocità di 135 km/h. I grafici in toni di giallo rappresentano i livelli di pressione sonora a ridosso del ponte (postazioni Pa=CH1, Pb=CH2, Pc=CH3 e Pd=CH4) mentre la curva in blu quella in prossimità del rilevato (Postazione Pr).

L'analisi delle curve relative ai microfoni posizionati a ridosso del ponte mette in evidenza che tra questi punti la variazione del SEL è minima.

Anche in questo caso è stata eseguita un'analisi comparativa tra i SEL riscontrati nelle varie postazioni a ridosso del ponte. Tale analisi trova la sua sintesi nel grafico radiale di fig. 26 e in tabella 4 in cui si riportano i valori medi delle differenze riscontrate tra i SEL in Pd, Pc e Pd e quelli in Pa, assunta come postazione di riferimento.

Si denota un andamento diverso rispetto a quanto riscontrato a ridosso dei ponti caratterizzati dall'attacco diretto dell'armamento: i SEL misurati risultano sostanzialmente uguali nelle postazioni a ridosso del ponte e nella postazione Pd l'incremento medio rispetto alla Pa è contenuto in solo 1.3 dB(A).

La fig. 25 illustra i contenuti in frequenza dei SEL rilevati in corrispondenza di un transito di un ETR460 alla comune velocità di 135 km/h sul ponte e sul rilevato.

corresponding sound emissions. Such comparison revealed that the sound emissions of the bridge in the measuring point Pa are characterized by SEL values that are 11.5 dB(A) averagely higher (standard deviation =1.3) than the corresponding values measured in the embankment section area.

This can be even found in fig. 21 illustrating a comparison between the global weighted SEL values "A" in the embankment section area and the corresponding values near the bridge (in the measuring point Pa) during passage of ETR500 trains. Data are related to the corresponding passage speed by the embankment section and by the bridge. The same figure shows even the logarithmic tendency curves. It reveals, for the same speed, increases of about 11 dB (A) of the SEL values measured in the bridge area with respect to the corresponding values measured in the embankment section area.

## 5.2. Metallic bridge with ballasted-permanent way

Test n. 3, regarding the new bridge crossing the river Po along the railway line Bologna-Verona, was carried out in February 2009 just before the inauguration of its down track (figg. 22 and 23).

The said experimental test returned data relevant to the train passage for speed values ranging from 60 to 140 km/h. Running fleet was composed of 60 trains divided into ordinary rolling stock, ETR 460/480 and freight trains.

Fig. 24 shows the weighted sound pressure levels "A" as a function of time. Pressure levels are measured near the bridge and the embankment during the passage of an ETR 460 train at a speed of 135 km/h. The yellow lines represent the sound pressure levels near the bridge (measuring points Pa=CH1, Pb=CH2, Pc=CH3 and Pd=CH4)

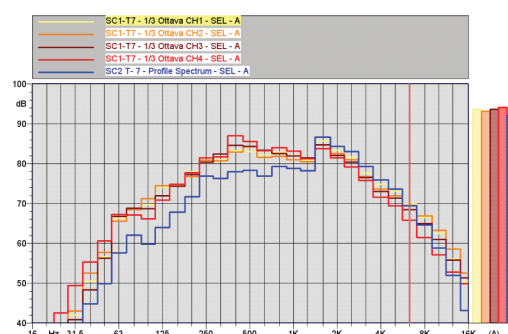


Fig. 25 - Indagine 3: spettro del SEL in bande di terzi d'ottava in dB(lin) misurato durante un transito di un ETR460 a ridosso del Ponte (postazioni Pa, Pb, Pc e Pd) e del rilevato. V= 135 km/h. Test n.3: SEL spectrum in third-octave bands in dB(lin) measured, during the passage of an ETR460 train, near the considered bridge (measuring points Pa, Pb, Pc and Pd) and in the embankment section area. V= 135 km/h.



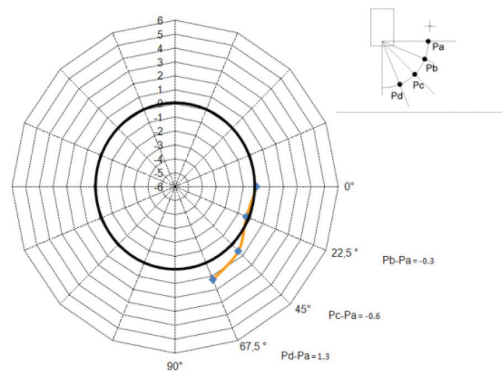


Fig. 26 - Indagine 3: media delle differenze in dB(A) tra i SEL misurati nelle postazioni Pb, Pc e Pd e quelli relativi alla postazione di riferimento Pa (Livelli globali pesati A). Test n. 3: Average of the differences, in dB (A), between the SEL values measured in the points Pb, Pc and Pd and the values relevant to the reference point Pa (weighted global levels A).

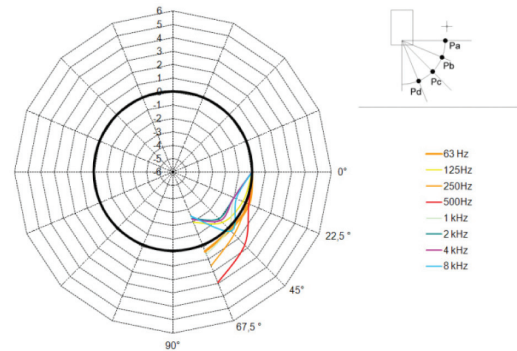


Fig. 27 - Indagine 3: media delle differenze in dB tra i SEL misurati nelle postazioni Pb, Pc e Pd e quelli relativi alla postazione di riferimento Pa (Livelli per bande di frequenza 1/1 ottava). Test n.3: Average of the differences, in dB, between the SEL values measured in the points Pb, Pc and Pd and the values relevant to the reference point Pa (Levels for frequency bands of 1/1 octave).

TABELLA 4 – TABLE 4

INDAGINE 3 - ANALISI STATISTICA DELLE DIFFERENZE TRA I SEL MISURATI NELLE POSTAZIONI Pb, Pc E Pd E QUELLI RILEVATI NELLA POSTAZIONE DI RIFERIMENTO Pa. TEST N. 3 - STATISTICAL ANALYSIS OF THE DIFFERENCES BETWEEN THE SEL VALUES MEASURED IN THE POINTS Pb, Pc AND Pd AND THE VALUES RELEVANT TO THE REFERENCE POINT Pa

	Globale "A"	A SEL							
		63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
Pb-Pa	Media	-0.3	0.2	-0.3	0.0	0.2	-1.0	-1.0	-0.9
	dev. St.	0.3	0.9	0.6	0.6	0.3	0.4	0.4	0.6
Pc-Pa	Media	0.6	0.1	-0.7	0.6	1.7	0.0	-1.1	-0.9
	dev. St.	0.4	1.3	0.7	0.6	0.5	0.5	0.4	1.1
Pd-Pa	Media	1.3	0.4	-1.9	1.5	2.9	0.6	-2.3	-2.4
	dev. St.	0.6	1.4	1.0	0.6	0.5	0.7	0.6	1.2

Il risultato dell'analisi comparativa delle componenti spettrali del SEL nei punti a ridosso del ponte è riportato nella successiva fig. 27. Si vince che nella postazione Pd si è in presenza di incremento delle frequenze in area 250-500 Hz e una forte riduzione delle componenti in alta frequenza.

La successiva tabella 4 sintetizza i dati riportati nei grafici di figg. 26 e 27.

Per quanto attiene ad un confronto tra le emissioni sonore relative al ponte e quelle relative al rilevato, la fig. 24 evidenzia che i livelli di pressione sonora misurati in corrispondenza del ponte risultano di poco superiori rispetto a quelli in corrispondenza del rilevato (la variazione sul SEL è risultata dell'ordine del dB(A)).

La fig. 28 illustra il confronto tra i SEL globali ponderati "A" rilevati in corrispondenza del rilevato e del ponte (nella postazione Pa) durante il transito di treni ETR460/480.

I dati vengono relazionati alla velocità di transito sul rilevato e sul ponte. Nella medesima figura si riportano

while the blue line is the sound pressure level in the considered embankment section area (measuring point Pr).

The analysis of the graphs relevant to the microphones installed near the bridge shows a minimum variation of the SEL values measured in those points.

A comparative analysis between the SEL values recorded in the different measuring points near the bridge was carried out in this case too. Such analysis is summarized in the radial graph of fig. 26 and in table 4 that show the average values of the differences between the SELs in Pd, Pc and Pd and the corresponding values in Pa, assumed as reference measuring point.

Data collected show a different evolution with respect to data measured near the non ballasted-permanent way bridges: the SEL values are practically similar in the measuring points near the bridge and the average increase of the SEL in the point Pd with respect to its corresponding value in Pa is limited to 1.3 dB(A).

Fig. 25 shows the frequency content of the SEL values measured, in the bridge area and in the embankment area, at the passage of an ETR460 train with a speed of 135 km/h.

A comparative analysis of the SEL spectral components in the measuring points near the bridge is illustrated in the following fig. 27. It reveals an increase of the spectral components in the frequency range 250-500 Hz and a strong reduction of such components in the high frequency range.

The following table 4 summarizes data of the graphs in figg. 26 and 27.

A comparison between sound emissions near the bridge and in the embankment area revealed (see fig. 24)



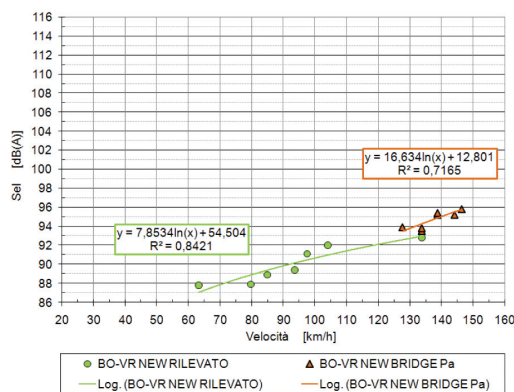


Fig. 28 - Indagine 3: variazione dei livelli di singolo evento (SEL) con la velocità di transito di treni ETR460. Livelli misurati in prossimità del ponte (Postazione Pa) e del rilevato sulla nuova linea BO-VR. Test n.3: Single Event Levels (SEL) as a function of the passage speed of ETR460 trains. Levels measured near the bridge (measuring point Pa) and in the embankment section area, along the railway line BO-VR.

anche le curve di tendenza logaritmiche. Purtroppo la diversa velocità di transito rilevata sulle due sezioni di misura (in tutti i casi tranne quello di fig. 24) rende impossibile un confronto diretto tra le emissioni ferroviarie in rilevato e sul ponte. Tuttavia le curve di tendenza logaritmiche confermano quanto messo in luce dalla fig. 24 e cioè che i SEL riscontrati in corrispondenza del ponte risultano di poco superiori (1-3 dB(A)) a quelli in rilevato.

La fig. 25 illustra i contenuti in frequenza dei SEL rilevati in corrispondenza di un transito di un ETR460/480 alla comune velocità di 135 km/h sul ponte e sul rilevato. Il confronto tra i dati relativi al ponte e quelli al rilevato fanno emergere che la componente strutturale del rumore si caratterizza da componenti in frequenza inferiori al kHz.

### 5.3. Viadotto in cemento armato precompresso

L'indagine 4, realizzata a ridosso di un viadotto di appoggio al nuovo ponte sul fiume Po della linea Bologna-Verona, è stata eseguita nel maggio del 2009 (fig. 29).

Tale viadotto è realizzato con impalcati affiancati, a singolo binario, semplicemente appoggiati della tipologia a mono cassone in c.a.p..

L'indagine ha fornito dati relativi al transito dei treni in un intervallo di velocità compreso tra 60 e 140 km/h. Il circolato è risultato composto da 50 treni suddivisi in materiale ordinario, ETR 460/480 e merci.

Anche in questo caso è stata eseguita un'analisi comparativa tra i SEL riscontrati nelle varie postazioni a ridosso del viadotto. Tale analisi trova la sua sintesi nel grafico radiale di fig. 30 in cui si riportano i valori medi del-

that the sound emission data measured near the bridge are lightly higher than the corresponding values measured in the embankment section area (SEL variation turned out to be of about 1 dB (A)).

Fig. 28 illustrates a comparison between the global weighted SEL values "A" in the embankment section area and the corresponding values near the bridge (in the measuring point Pa) during passage of ETR460/480 trains.

Data are related to the corresponding passage speed by the embankment section and by the bridge. The same figure shows even the logarithmic tendency curves. Unfortunately the different passage speed values recorded in the two measuring sections (with the exception of the case in fig. 24) make it impossible a direct comparison of the railway sound emissions in the embankment area and near the bridge. The logarithmic tendency curves confirm anyway that the SEL values measured near the bridge are lightly higher (1-3 dB(A)) than the corresponding values in the embankment area, as already shown in fig. 24.

Fig. 25 shows the frequency content of the SEL values measured, in the bridge area and in the embankment area, at the passage of an ETR460/480 train with a speed of 135 km/h. Data comparison shows that noise structural component is characterized by frequency values lower than 1 KHz.

### 5.3. Pre-compressed reinforced concrete viaduct

The test n. 4 was carried out in May 2009 near the viaduct approaching the new bridge on the river Po, along the railway line Bologna-Verona (fig. 29).

Such viaduct is composed of simply supported single-track decks. They are pre-compressed reinforced concrete single box decks and are laid down side by side.



Fig. 29 - Indagine 4 - Installazione dei microfoni a ridosso di un viadotto in cemento armato precompresso sulla nuova linea BO-VR. Test n. 4 - Installation of microphones near a pre-compressed reinforced concrete viaduct along the new railway line BO-VR.

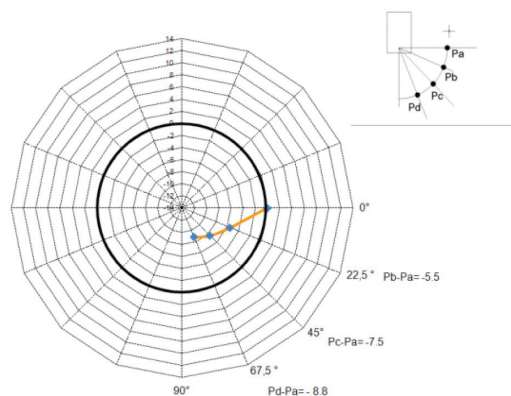


Fig. 30 - Indagine 4: Media delle differenze in dB(A) tra i SEL misurati nelle postazioni Pb, Pc e Pd e quelli relativi alla postazione di riferimento Pa (Livelli globali pesati A). Test n. 4: Average of the differences, in dB (A), between the SEL values measured in the points Pb, Pc and Pd and the values relevant to the reference point Pa (weighted global levels A).

le differenze riscontrate tra i SEL in Pd, Pc e Pd e quelli in Pa, assunta come postazione di riferimento. Si denota un andamento assolutamente diverso rispetto ad entrambe le tipologie di ponti metallici caratterizzato da una forte riduzione dei SEL rilevati nelle postazioni in basso rispetto a quelli misurati in quella di riferimento Pa. Le medie sono state calcolate su un campione di 50 transiti di treni caratterizzati da materiale ordinario e ETR 460/480 con velocità variabile tra 60 e 140 km/h.

Il risultato dell'analisi comparativa delle componenti spettrali del SEL nei punti a ridosso del viadotto è riportato nella successiva fig. 31. Nella postazione Pd si assiste ad una generalizzata riduzione delle medie e alte frequenze rispetto alla postazione di riferimento Pa. Si denota al contrario un leggero incremento delle componenti in bassa frequenza 63-125 Hz.

La successiva tabella 5 sintetizza i dati riportati nei grafici delle figg. 30 e 31.

TABELLA 5 - TABLE 5

INDAGINE 4 - ANALISI STATISTICA DELLE COMPONENTI TRA I SEL MISURATI NELLE POSTAZIONI Pb, Pc E Pd E QUELLI RILEVATI NELLA POSTAZIONE DI RIFERIMENTO Pa. TEST N.4 - STATISTICAL ANALYSIS OF THE DIFFERENCES BETWEEN THE SEL VALUES MEASURED IN THE POINTS Pb, Pc AND Pd AND THE VALUES RELEVANT TO THE REFERENCE POINT Pa

		A SEL							
		globale "A"	63 Hz	125Hz	250Hz	500Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
		(dB(A))	dB	dB	dB	dB	dB	dB	dB
Pb-Pa	Media	-5.5	1.6	0.5	-1.5	-3.6	-7.6	-9.2	-8.3
	dev. St	1.2	2.4	1.2	0.7	0.6	0.9	1.8	0.9
Pc-Pa	Media	-7.5	1.8	-1.0	-2.6	-4.4	-10.6	-15.2	-13.9
	dev. St	1.6	3.8	2.5	2.0	1.2	1.0	1.4	0.6
Pd-Pa	Media	-8.8	3.1	2.4	-3.7	-6.1	-11.9	-19.0	-20.3
	dev. St	1.9	4.9	3.8	2.5	1.2	1.3	1.2	0.9

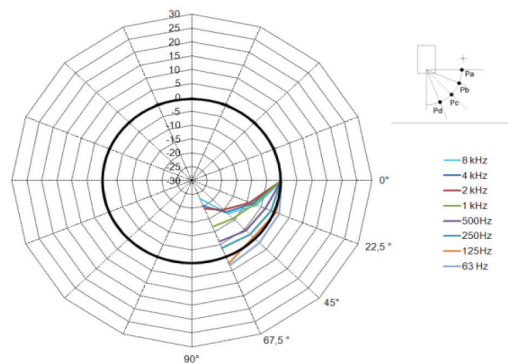


Fig. 31 - Indagine 4: Media delle differenze in dB tra i SEL misurati nelle postazioni Pb, Pc e Pd e quelli relativi alla postazione di riferimento Pa (Livelli per bande di frequenza 1/1 ottava). Test n.4: Average of the differences, in dB, between the SEL values measured in the points Pb, Pc and Pd and the values relevant to the reference point Pa (Levels for frequency bands of 1/1 octave).

The said experimental test returned data relevant to the train passage for speed values ranging from 60 to 140 km/h. The running fleet was composed of 50 trains divided into ordinary rolling stock, ETR 460/480 and freight trains.

A comparative analysis between the SEL values recorded in the different measuring points near the viaduct was carried out in this case too. Such analysis is summarized in the radial graph of fig. 30 that shows the average values of the differences between the SELs in Pd, Pc and Pd and the corresponding values in Pa, assumed as reference measuring point.

Data collected show a completely different evolution of the SEL if compared with data recorded in both types of metallic bridges; there is indeed a strong reduction of the SEL values recorded in the lower measuring points with respect to the corresponding values measured in the reference point Pa. The average values were calculated on a sample of 50 trains (ordinary rolling stock and ETR460/480) with speed values ranging from 60 to 140 km/h.

A comparative analysis of the SEL spectral components in the measuring points near the viaduct is illustrated in the following fig. 31. It reveals, for the measuring point Pd, a generalized reduction of the spectral components in the medium and high frequency range with respect to the reference point Pa. It moreover shows, on the contrary, a light increase of the low frequency components in the range 63-125 Hz.

The following table 5 summarizes the data relevant to figg. 30 and 31.

Fig. 32 illustrates a comparison between the global weighted SEL values "A" in the embankment section area and the corresponding values near the viaduct (in the measuring point Pa) during passage of ETR460/480

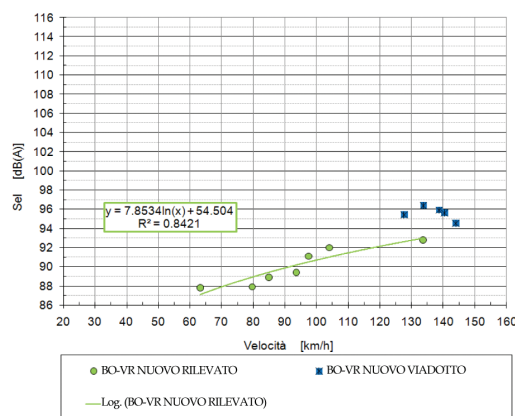


Fig. 32 - Indagine 4: Variazione dei livelli di singolo evento (SEL) con la velocità di transito di treni ETR460/480. Livelli misurati in prossimità del viadotto (Postazione Pa) e del rilevato sulla nuova linea BO-VR. Test n.4: Single Event Levels (SEL) as a function of the passage speed of ET460/480 trains. Levels measured near the viaduct (measuring point Pa) and in the embankment section area, along the railway line BO-VR.

La fig. 32 illustra il confronto tra i SEL globali ponderati "A" rilevati in corrispondenza del rilevato e del viadotto (nella postazione Pa) durante il transito di treni ETR460/480. I dati che si riferiscono al rilevato sono quelli acquisiti nella campagna di indagine 3. La curva di tendenza logaritmica mette in evidenza che i SEL riscontrati in corrispondenza del viadotto risultano di poco superiori (1-3 dB(A)) a quelli in rilevato.

Inoltre nella postazione Pa a ridosso del viadotto si evidenzia una scarsa dipendenza dei SEL dalla velocità di transito del treno, almeno nell'intervallo di velocità indagato (130-145 km/h).

## 6. Conclusioni

Con l'entrata in esercizio del nuovo ponte ferroviario sul fiume Po della linea Bologna-Verona caratterizzato dalla posa dell'armamento su ballast, Italferr ha condotto degli studi sperimentali al fine di verificare i vantaggi della nuova tipologia costruttiva nel campo delle emissioni acustiche generate dai transiti ferroviari.

Al fine di effettuare dei confronti con le emissioni ferroviarie in corrispondenza dei ponti tradizionali, caratterizzati dall'attacco diretto dell'armamento, sono state condotte ulteriori indagini sperimentali:

- a ridosso del ponte storico sul Po della linea BO-VR che ha fornito informazioni relative ad un range di velocità di transito compreso tra 30 e 80 km/h;
- a ridosso del ponte sul Po della linea BO-PD che ha fornito informazioni relative ad un ponte di più recente

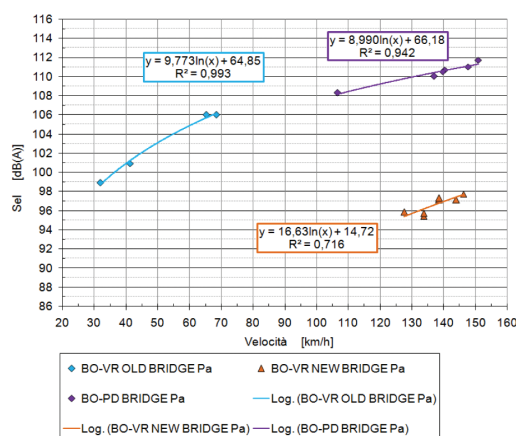


Fig. 33 - Variazione dei livelli di singolo evento (SEL) con la velocità di transito di treni ETR 500 su ponti in acciaio. Single Event Levels (SEL) as a function of the passage speed of ET500 trains on steel bridges.

trains. Data relevant to the embankment were collected during the test campaign n. 3. The logarithmic tendency curve shows that the SEL values measured near the viaduct are lightly higher (1-3 dB(A)) than the corresponding values in the embankment area.

Moreover the SEL values in the measuring point Pa reveals to be very few dependant on the train passage speed, at least in the analyzed range (130-145 km/h).

## 6. Conclusions

The start of the operation on the new ballasted-permanent way bridge crossing the river Po along the railway line Bologna-Verona, allowed Italferr to carry out some experimental tests aiming to verify the advantages of the new construction typology in the field of the sound emissions generated by train passage.

Further experimental tests were carried out aiming to make a comparison with the sound emissions near traditional non ballasted-permanent way bridges. These tests were executed:

- near the historical bridge crossing the river Po along the railway line BO-VR; it returned data relevant to passage speed values ranging from 30 to 80 km/h;
- near the bridge crossing the river Po along the railway line BO-PD; it returned data relevant to a more recent construction bridge for passage speed values ranging from 100 to 150 km/h;

Fig. 33 illustrates a comparison between the different global weighted SEL values "A" recorded in the measuring point Pa during passage of ETR500 trains. SEL data were related to the corresponding passage speed values on non

te costruzione, in un range di velocità di transito compreso tra 100 e 150 km/h.

La fig. 33 illustra il confronto tra i SEL globali ponderati "A" rilevati nella postazione Pa in corrispondenza di transiti di treni ETR500. I dati di SEL sono stati relazionati alle rispettive velocità di transito del treno su ponti metallici ad attacco diretto (BO-VR OLD BRIDGE Pa, BO-PD BRIDGE Pa) e su ponti di nuova concezione (BO-VR NEW BRIDGE Pa). Nella medesima figura si riportano anche le curve di tendenza logaritmiche.

Al fine di eseguire un confronto omogeneo tra i SEL rilevati nelle varie indagini, i dati di transito relativi agli ETR460/480 transitati lungo la nuova linea Bologna - Verona (BO-VR NEW BRIDGE) sono stati normalizzati a transiti di ETR 500 mediante la seguente relazione:

$$SEL_{ETR500} = SEL_{ETR460} + 10 \cdot \log\left(\frac{14}{9}\right) = SEL_{ETR460} + 1.9 \text{ dB}$$

che porta in conto il fatto che gli ETR 500 e gli ETR460/480 misurati sono caratterizzati rispettivamente da 14 e 9 carrozze.

L'incremento di 1.9 dB(A) del SEL relativo al transito di ETR460/480 normalizzato ai valori relativi ad ETR 500 è sostanzialmente in accordo con [2] che, nella caratterizzazione acustica a 25 m e a 100 km/h, indica una differenza tra i SEL dei due treni pari a 1.7 dB(A).

L'analisi della fig. 33 mette in evidenza che in corrispondenza dei ponti caratterizzati da attacco diretto dell'armamento sono state riscontrate emissioni ferroviarie degli ETR500 di gran lunga maggiori rispetto a quelle misurate in prossimità del nuovo ponte sul Po della linea BO-VR. Nel range di velocità tra 125 e 145 km/h l'incremento riscontrato nel SEL relativo al transito ferroviario è dell'ordine dei 13-14 dB(A) nella postazione Pa.

Le ulteriori indagini eseguite sulla nuova linea BO-VR a ridosso di un viadotto in cemento armato precompresso e di un rilevato permettono inoltre di eseguire un confronto tra le emissioni ferroviarie in corrispondenza di queste sezioni con quelle relative alla nuova tipologia di ponte.

La fig. 34 illustra il confronto tra i SEL relativi al transito di treni ETR500 sul rilevato (BO-VR (NUOVO RILEVATO postazione Pr), sul viadotto (BO-VR NEW VIADOTTO Pa) e sul ponte di nuova concezione (BO-VR NEW BRIDGE Pa). I dati di SEL sono stati relazionati alla rispettive velocità di transito del treno.

Dalla fig. 34 si denota che nell'intervallo di velocità tra 125 e 145 km/h, le emissioni ferroviarie in corrispondenza del nuovo Ponte di Ostiglia sono risultate comparabili a quelle riscontrate in corrispondenza del viadotto in cemento armato precompresso e di poco superiori (1-3 dB(A)) a quelle riscontrabili in rilevato.

Infine il campo acustico che genera un transito ferroviario a ridosso di un'opera in elevazione è risultato

ballasted-permanent way bridges (BO-VR OLD BRIDGE Pa, BO-PD BRIDGE Pa) and on new conception bridges (BO-VR NEW BRIDGE Pa). The same figure shows even the logarithmic tendency curves.

Data relevant to the passage of ETR460/480 trains along the new railway line Bologna-Verona (BO-VR NEW BRIDGE) were normalized to the passage data of ETR 500 by means of the following mathematical relation:

$$SEL_{ETR500} = SEL_{ETR460} + 10 \cdot \log\left(\frac{14}{9}\right) = SEL_{ETR460} + 1.9 \text{ dB}$$

taking into account that the ETR500 trains and the ETR460/480 trains are respectively equipped with 14 and 9 coaches.

The increase of 1.9 dB(A) of the SEL value relevant to the passage of an ETR460/480 train, necessary to normalize it to an ETR500 train, does basically match with that proposed, in the sound characterization at 25 m and 100 km/h, a difference of 1.7 dB(A) between the SEL values of the two trains.

The analysis of fig. 33 shows that sound emissions measured at the passage of ETR500 trains on non ballasted-permanent way bridges are consistently higher than the corresponding values measured near the new bridge crossing the river Po along the line BO-VR. The recorded increase of the SEL level relevant to train passage speed values ranging from 125 to 145 km/h is about 13-14 dB(A) in the measuring point Pa.

Further tests carried out alongside the new railway

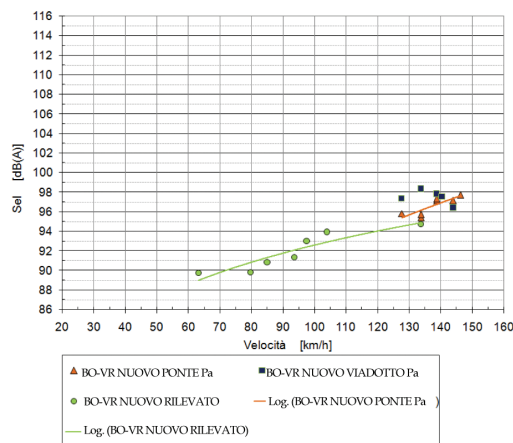


Fig. 34 - Variazione dei livelli di singolo evento (SEL) con la velocità di transito di treni ETR 500 su ponte in acciaio con posa dell'armamento su ballast, su viadotto in cemento armato precompresso e rilevato. Single Event Levels (SEL) as a function of the passage speed of ETR500 trains on a steel bridge with ballasted-permanent way, on a pre-compressed reinforced concrete viaduct and on an embankment line section.



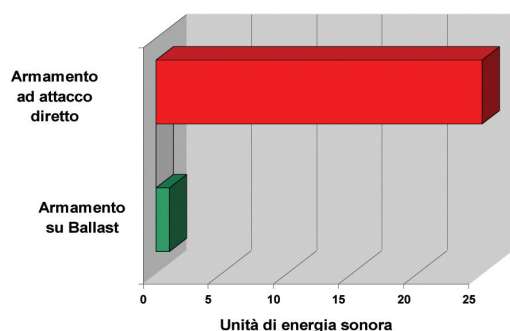


Fig. 35 - Comparazione energetica tra armamento ad attacco diretto e armamento su ballast. *Energetic comparison between ballasted-permanent way and non-ballasted permanent way.*

differente nei vari casi studiati. In particolare si è visto che al piede di un ponte metallico (postazione Pd) ad attacco diretto le emissioni ferroviarie sono risultate maggiori rispetto a quelle misurate in prossimità del piano del ferro (postazione Pa). Nel caso della nuova tipologia di ponti tale incremento è risultato assai meno sensibile. Al contrario in corrispondenza del viadotto in cemento armato precompresso nella postazione Pd il rumore ferroviario è di gran lunga più ridotto rispetto alla Postazione Pa.

A titolo semplificativo, per dare un'idea della differenza energetica che c'è tra l'emissione sonora generata da un transito ferroviario su di un ponte con armamento ad attacco diretto e quella relativa ad un transito alla medesima velocità su di un ponte con armamento su ballast, bisogna tener conto della differenza tra scala logaritmica (dB) e quella lineare. Tale differenza che nel suddetto caso è pari a 14 dB (a 130 km/h) corrisponde ad un incremento di energia pari a 25 volte (fig. 35).

line BO-VR, near a pre-compressed reinforced concrete viaduct and an embankment section, did moreover allow to making a comparison with the sound emissions recorded for the new bridge typology.

Fig. 34 illustrates a comparison between different SEL values relevant to ETR500 train passage on an embankment line section (BO-VR NEW EMBANKMENT) (measuring point Pr), on a viaduct (BO-VR NEW VIADUCT Pa) and on a new concept bridge (BO-VR NEW BRIDGE Pa). SEL data are related to the corresponding passage speed values.

Fig. 34 does even show that the railway sound emissions near the new bridge of Ostiglia are comparable, for speed values ranging from 125 to 145 km/h, to the corresponding values measured near the pre-compressed reinforced concrete viaduct; they are moreover lightly higher (1-3 dB(A)) than the values recorded in the embankment section.

Finally the sound field generated by a train passage on an elevation structure revealed to be different in the different cases taken into consideration.

In particular sound emissions at the base of a non ballasted-permanent way metallic bridge (measuring point Pd) revealed to be higher than the corresponding values measured at the upper surface of the rail (measuring point Pa). Such increase revealed to be quite lower for the new bridge typology. On the contrary the railway noise generated by a train passage on a pre-compressed reinforced concrete viaduct is quite lower in the measuring point Pd than in the point Pa.

The energetic difference between the sound emission generated by a train passage, at a definite speed, on a non ballasted-permanent way bridge and the corresponding emission generated by a train passage, at the same speed, on a ballasted-permanent way bridge, is better represented by taking into account the difference between logarithmic scale (dB) and linear scale. Such difference is in this case of 14 dB (at 130 km/h) corresponding to an energy increase of 25 times (fig. 35).

#### BIBLIOGRAFIA – REFERENCES

- [1] J.A. Boss, "Noise emission: Solutions for steel", 3<sup>rd</sup> international Symposium on Steel Bridge, Rotterdam, 1996.
- [2] RFI, "Stima dei livelli sonori ai sensi del DM Ambiente 29/11/2000", Rapporto delle misure – Volume 1 Emissione dei treni.
- [3] U.S. Department of Transportation, Federal Railroad Administration - High-Speed Ground Transportation Noise and Vibration Impact Assessment, 2005.

#### Errata Corrige

A causa di un errore tipografico, il titolo dell'articolo pubblicato su IF 12/2010 a pag. 1047 è: "Lo svio – Cento e più anni di ricerche su un problema complesso. La scuola tedesca".

### Sommaire

ANALYSE EXPÉRIMENTALE DES ÉMISSIONS ACOUSTIQUES RELATIVES AU TRANSIT DES CONVOIS FERROVIAIRES SUR LES PONTS MÉTALLIQUES DE NOUVELLE GÉNÉRATION (Dédié à la mémoire de l'ingénieur Marco MASSARI)

Avec l'entrée en fonction du nouveau pont ferroviaire sur le fleuve Po à Ostiglia (MN) de la ligne Bologne-Verone, Italferr, la société d'Ingénierie des chemins de fer de l'Etat, a conduit une série d'études expérimentales afin de vérifier les avantages de la nouvelle typologie constructive dans le champ des émissions acoustiques engendrées par le transit des véhicules ferroviaires. Ce pont, qui est constitué par des systèmes de poutres métalliques réticulées par chaque rail, simplement posées, à voie inférieure, renfermées dans leur partie supérieure et ayant des portées théoriques entre les axes d'appui allant de 64,4 à 73,6 m, est doué d'armement avec ballast sur base continue en conglomeré de béton armé. La solution structurelle observée présente différentes caractéristiques innovatrices par rapport aux systèmes traditionnels de poutres métalliques réticulées avec pose directe du rail, parmi lesquelles une réduction significative du bruit.

Le travail synthétise les aspects principaux de l'expérience avec une attention particulière aux analyses comparatives entre les émissions acoustiques du nouveau pont de la ligne Bologne-Verone et celles relatives à d'autres ponts métalliques caractérisés par l'accrochage direct du béton armé. En outre, des analyses comparatives ont été réalisées par rapport à d'autres typologies d'oeuvres civiles présentes sur la même ligne, comme par exemple les structures de support en béton armé pré-compressé.

### Zusammenfassung

EXPERIMENTELLE ANALYSE DER GERÄUSCHEMISSIONEN, DIE DER ZUGLAUF AUF STAHLBRÜCKEN NEUER GENERATION ERZEUGT

Nach der Inbetriebnahme der neuen Eisenbahnbrücke über dem Fluss Po, in der Nähe von Ostiglia, wurde eine Reihe von Experimenten geführt, die die Vorteile einer neuen Bautechnik im Feld der Geräuschemissionen deutlich machen konnte. Die Brücke besteht aus oben geschlossenen Fachwerkträger der Länge von 64,4 und 73,6 m; der Oberbau mit Ballast wird von einer ununterbrochenen Betonplatte getragen.

Diese Lösung präsentiert verschiedenen Neurungen und dazu niedrigere Geräuschemissionen im Bezug auf älteren ballastlosen Stahlfachwerkträgern. Es werden die erwähnenswerten Experimentmerkmale zusammengefasst; danach wird es Beachtung dem Vergleich der Emissionen mit denen von anderen Brücken gegeben. Der Vergleich wird auch auf anderen Bauwerke ausgedehnt.



Il nostro talento non si ferma mai  
*Our skill never stops*

www.spil.it

 **SPII**  
TALENTO TECNOLOGICO IN EVOLUZIONE  
*Technological skill in evolution*

active caos