



CONFERENZA DELLE REGIONI E DELLE PROVINCE AUTONOME 12/98/CR6/C5

Documento delle Regioni e delle Province Autonome sul “Piano degli interventi di contenimento ed abbattimento del rumore - RFI s.p.a.”

Il gestore dell'infrastruttura ferroviaria, Rete Ferroviaria Italiana S.p.A. (RFI), ha predisposto il Piano degli interventi di contenimento e abbattimento del rumore, come stabilito dall'art. 10, comma 5, della legge 447/1995; su tale piano, in data 1 luglio 2004, è stata sancita l'Intesa in Conferenza Unificata, come previsto dall'art. 5, comma 2, del decreto del Ministro dell'Ambiente e della Tutela del Territorio del 29 novembre 2000, relativamente agli interventi di contenimento previsti nelle prime 4 annualità.

L'Intesa sugli interventi relativi al primo quadriennio stabiliva che:

- gli interventi di mitigazione passiva fossero dimensionati anche in funzione delle riduzioni alla sorgente da ottenere a medio e lungo termine sia con interventi sul binario che sul materiale rotabile;
- il piano fosse aggiornato al termine del primo quadriennio sulla base degli interventi realizzati, degli approfondimenti tecnici e di ulteriori analisi territoriali, nonché di esperienze di mitigazione effettuate alla sorgente;
- eventuali opere di mitigazione integrative su recettori anche esterni alla fascia A fossero progettate e realizzate con risorse aggiuntive.

RFI ha presentato l'aggiornamento del Piano al 30 gennaio 2009 senza modificare la scelta di prevedere esclusivamente interventi di mitigazione sul percorso di propagazione del rumore (barriere acustiche) e interventi sui recettori isolati, senza fornire ulteriori elementi sulla possibilità di risanamento alla sorgente, né analizzando la presenza di recettori esterni alla fascia A.

Come risulta dalla comunicazione sullo stato di avanzamento degli interventi del piano di risanamento acustico di RFI del 5/07/2010, presentata come previsto dall'art. 6 comma 1 del dm Ambiente 29 novembre 2000, a più di sei anni dall'avvio del Piano, risultano ultimati solo 11 dei 428 interventi previsti per le prime 4 annualità; RFI nella nota di trasmissione evidenzia che la principale problematica nell'attuazione del piano è legata alla difficoltà da parte degli enti locali ad approvare i progetti definitivi presentati da RFI.

La resistenza da parte di Comuni e popolazione è dovuta alla non accettazione di interventi fortemente invasivi dal punto di vista paesaggistico e urbanistico, quali l'inserimento di barriere acustiche opache alte anche più di 7 metri, nonostante dal territorio provengano forti richieste di mitigazione del rumore. Al fine di superare le riluttanze dei Comuni, per alcuni casi, RFI ha richiamato la possibilità di un intervento sostitutivo da parte delle Regioni; a tal proposito si evidenzia che tale intervento sostitutivo non è previsto dal vigente quadro normativo; inoltre, ai sensi dell'art 10, comma 5, della legge 447/1995, il controllo del rispetto dell'attuazione del Piano è demandato al Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio

e del Mare. In merito si allega la nota del Settore “Affari giuridici e legali per le materie ambientali e del territorio” della Regione Toscana (Allegato 1).

Di seguito si esprimono alcune considerazioni relativamente al Piano predisposto da RFI e al relativo aggiornamento, vengono individuate le criticità e proposte alcune possibili azioni e interventi da attuare al fine di pervenire al risanamento dell’infrastruttura ferroviaria entro i termini stabiliti dalla Legge 447/1995:

Priorità degli interventi

L’art. 5, comma 3, del dm 29 novembre 2000, stabilisce che gli interventi strutturali finalizzati all’attività di risanamento devono essere effettuati secondo la seguente priorità:

- a) sulla sorgente rumorosa
- b) lungo la via di propagazione del rumore
- c) direttamente sul ricettore

Il piano presentato da RFI prevede esclusivamente interventi relativi alle tipologie b) e c).

Per quanto riguarda gli interventi di tipo a), nell’Allegato 2 al presente documento si fornisce una sintesi degli interventi maggiormente utilizzati a livello internazionale per abbattere alla fonte il rumore ferroviario. Preme sottolineare che si tratta di interventi non sperimentali, ma ampiamente praticati sia in altri Stati che in Italia da gestori di servizi e di infrastrutture ferroviarie diversi da Trenitalia ed RFI. A suffragare la fattibilità di interventi sulla sorgente si allegano gli approfondimenti tecnici effettuati dall’Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale della Toscana (ARPAT): “Misure di rugosità della rotaia e Analisi tipo dei possibili interventi alternativi alle barriere” (Allegato 3) e “Riduzione del rumore ferroviario: possibili soluzioni alla sorgente” (Allegato 4).

La scelta di RFI di privilegiare esclusivamente interventi di tipo b) con l’utilizzo di un’unica tipologia di barriere opache, particolarmente critiche dal punto di vista dell’inserimento visivo e paesaggistico, non risulta facilmente accettabile soprattutto nelle zone turistiche o con particolari valenze paesaggistiche che costituiscono una ricchezza e una risorsa per il Paese. Nella progettazione degli interventi futuri RFI dovrebbe tenere presenti le esperienze di risanamento già realizzate utilizzando barriere non opache; un esempio di ottimale inserimento visivo in ambiente urbano, in tal senso, può essere costituito dall’intervento messo in atto (sulla base di uno specifico accordo di programma) sulla linea Pescara-Ancona, nel tratto interno alla città di Pescara. La scelta di RFI di utilizzare una sola tipologia di barriere, probabilmente dettata da ragioni organizzative interne di tipo logistico legate alla necessità di standardizzazione delle attività di riparazione e manutenzione, potrebbe essere rivista, contemplando, nei casi più critici dal punto di vista dell’impatto visivo, soluzioni individuate utilizzando un approccio combinato con interventi sulla sorgente e presso i ricettori per quei casi in cui la barriera risulti insufficiente, inoltre potrebbe essere previsto l’inserimento, laddove possibile, di quinte arboree per mitigare l’impatto visivo delle barriere.

Per quanto concerne gli interventi al punto c), che fuori dall’Italia sono di gran lunga preferiti da frontisti, Enti Locali e Gestori dell’Infrastruttura per motivi di costo, rapidità di intervento e ridotta invasività; in Italia la loro diffusa applicabilità è compromessa dalla mancata operatività della Commissione prevista dall’art. 4, comma 6 del dpr 459/98 e da un quadro normativo sfavorevole nel settore “servitù”.

Approccio combinato

In molte situazioni può essere più efficace un utilizzo congiunto di azioni di mitigazione del rumore, che comporta l'utilizzo nello stesso luogo di interventi volti al contenimento del rumore alla sorgente, lungo l'infrastruttura e presso i recettori; tale approccio porta a vantaggi sia dal punto di vista dell'efficacia degli interventi sia per il rapporto costi/benefici. Ad esempio spesso la mitigazione del rumore con barriere acustiche di altezza elevata comporta alti costi di installazione e manutenzione, a fronte di una scarsa efficacia nei confronti di recettori posti ai piani più alti degli edifici prossimi all'infrastruttura; in questo caso si potrebbe attuare il risanamento con barriere di dimensioni più contenute e contemporaneamente interventi diretti sui recettori, quali la sostituzione dei serramenti, per i piani alti degli edifici nonché interventi sulla sorgente di cui alla lettera a) del paragrafo precedente.

Coinvolgimento gestori dei servizi di trasporto

Gli interventi alla sorgente possibili riguardano, sicuramente, anche interventi sul materiale rotabile che è di proprietà dei gestori dei servizi pubblici di trasporto; pertanto è indispensabile che gli interventi siano progettati con il coinvolgimento di tali soggetti, anche con la messa in atto di politiche che incentivino un progressivo miglioramento del materiale rotabile. Come previsto dalle Direttive UE recepite in Italia con il d.lgs. 188/2003, si possono adottare pedaggi differenziati (art. 18) per penalizzare economicamente il materiale rotabile non conforme alla decisione della Commissione 861/2006/CE (TSI/STI "carri") e privilegiare i carri conformi (cioè silenziosi). Svizzera e Germania hanno già ufficializzato l'applicazione di pedaggi differenziati dal 1 gennaio 2013. Il coinvolgimento dei Gestori del Trasporto nelle azioni di risanamento acustico è peraltro esplicitamente previsto dalla legge 447/95 (art. 10, comma 5) e dal dm 29/11/2000 (art. 1) laddove si citano gli "enti gestori di servizi pubblici di trasporto" come soggetti che dovrebbero presentare il piano di intervento di contenimento ed abbattimento del rumore.

Aggiornamento del Piano

Dati di traffico e popolazione

Il Piano deve essere aggiornato sulla base di dati relativi a traffico e popolazione attuali, anche in relazione alle modifiche del parco mezzi in circolazione. In uno scenario di rinnovamento significativo del materiale rotabile accompagnato da previsioni della evoluzione nel tempo di tale rinnovamento il fabbisogno di interventi di mitigazione sul percorso di propagazione e al recettore potrebbe essere più contenuto. In tal caso le previsioni di rinnovamento del materiale dovrebbero essere monitorate nel loro effettivo verificarsi, in modo da evitare che gli interventi che si realizzassero sulla base di questo scenario "ottimistico" risultino, a regime, insufficienti rispetto alle esigenze di mitigazione.

Ricettori

Il Piano prende in considerazione solo le situazioni critiche ricadenti nella sottofascia A (ampiezza 100m per lato) della fascia di pertinenza complessiva dell'infrastruttura (ampiezza 250m per lato); il risanamento deve essere effettuato presso tutti i recettori per i quali si abbia superamento dei limiti di immissione per effetto delle immissioni delle infrastrutture di trasporto, ivi compresi i fabbricati di tipo industriale.

Concorsualità

Le attività di risanamento nel caso di più sorgenti sonore che immettono rumore nello stessa area devono essere valutate nel rispetto di quanto previsto dall'art. 4, commi 2 e 3, e dal relativo allegato 4 del dm 29 novembre 2000.

Monitoraggio e Collaudo

Il Piano deve prevedere le modalità con cui si intendono gestire gli eventuali superamenti nonché le azioni da mettere in atto per il collaudo e il monitoraggio dei singoli interventi.

L'Allegato 5 riporta il capitolo "Considerazioni Generali" del documento "Osservazioni sull'aggiornamento del Piano di Contenimento e Abbattimento del Rumore (DM 29/11/2000) presentato da Rete Ferroviaria Italiana" di ARPAT, già trasmesso dalla Regione Toscana al Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, che evidenzia problematiche del Piano che riguardano l'impostazione complessiva.

Roma, 21 giugno 2012



REGIONE TOSCANA
Giunta Regionale

Prot. N. int
da citare nella risposta

Allegato 1

**Direzione Generale delle politiche
territoriali ed ambientali**
Settore AFFARI GIURIDICI E LEGALI
PER LE MATERIE AMBIENTALI E
DEL TERRITORIO

Data 20.07.2010

Allegati

Risposta al foglio del

n.

Oggetto: Interventi di risanamento acustico lungo la rete ferroviaria di RFI – Risposta a nota del 17 giugno 2010 prot. n. A00-GRT-162926-A30-120

Al Dirigente responsabile del Settore
TUTELA DALL'INQUINAMENTO
ELETTROMAGNETICO ED
ACUSTICO E RADIOATTIVITA'
AMBIENTALE

Sede

Con nota del 17 giugno 2010 prot. n. A00-GRT-162926-A30-120, il Settore in indirizzo ha chiesto un parere in merito alla fondatezza delle richieste di intervento sostitutivo della Regione formulate da RFI. A tal fine sono state allegate due note di RFI del 4 giugno 2010, in cui si riferisce che:

- RFI ha predisposto il piano di contenimento ed abbattimento del rumore contenente l'elenco degli interventi da attuare sulla linea ferroviaria di competenza.

- Il piano è stato approvato dal Ministero dell'Ambiente d'intesa con la Conferenza unificata in data 1 luglio 2007, secondo quanto previsto dal DM 29 novembre 2000 per i piani relativi alle infrastrutture di interesse nazionale.

- RFI ha provveduto ad elaborare e a trasmettere ai comuni di Montevarchi (il 18 aprile 2008) e di Cascina (l'11 gennaio 2007) i progetti preliminari degli interventi relativi alla tratta dei territori di competenza. RFI ha inoltre provveduto ad illustrare il progetto alla popolazione del Comune di Montevarchi in data 25 giugno 2009.

- Sebbene RFI abbia partecipato agli incontri con le amministrazioni comunali ed abbia provveduto ad evadere le richieste di integrazione e di chiarimenti formulate, i Comuni di Montevarchi e di Cascina non si sono ancora pronunciati in merito ai progetti presentati.

- RFI ha invitato pertanto i Comuni di Montevarchi e Cascina a concludere il procedimento con un provvedimento espresso, riservandosi di chiedere l'intervento sostitutivo della Regione, ai sensi della L. 447/1995, in caso di protratta inerzia dei suddetti Comuni.

Nel merito della richiesta (ancora non formalizzata da parte di RFI) di un intervento sostitutivo della Regione, si condividono le conclusioni del Settore in indirizzo. Ciò sulla base delle seguenti considerazioni.

La L. 447/1995 (articolo 10, comma 5) prevede che le società e gli enti gestori dei servizi pubblici di trasporto o delle relative infrastrutture predispongano e presentino all'autorità competente piani per il contenimento ed abbattimento del rumore, nel rispetto della tempistica e delle specifiche tecniche successivamente individuate con il DM 29 novembre 2009. Il DM 29

novembre 2009 prevede che i piani relativi alle infrastrutture di interesse nazionale o di più regioni siano approvati dal Ministro dell'Ambiente, previa intesa in Conferenza unificata. Esso prevede inoltre l'obbligo, a carico dei soggetti che hanno presentato i piani, di rendicontazione delle risorse accantonate e di comunicazione dello stato di avanzamento dei lavori, nonché l'effettuazione del controllo, da parte delle Autorità competenti, sul conseguimento degli obiettivi di risanamento. Nulla si dice in merito alle procedure relative all'approvazione dei progetti ed alla realizzazione dei relativi interventi.

La l.r. 89/1998 recepisce le disposizioni della normativa nazionale, riservando al Consiglio regionale la competenza ad approvare i piani relativi alle infrastrutture di interesse regionale, senza nulla disporre in merito alle procedure relative all'approvazione dei progetti degli interventi ivi individuati.

Per quanto riguarda nello specifico l'esercizio dei poteri sostitutivi, la L. 447/1995 (articolo 4, comma 1 lettera b) ne demanda la disciplina alle regioni. La l.r. 88/1998 (articolo 10) prevede e disciplina l'esercizio dei poteri sostitutivi, ponendoli in capo alle province, per i casi di mancata approvazione del piano comunale di classificazione acustica e del piano comunale di risanamento acustico. E' di tutta evidenza che la fattispecie di cui si tratta (mancata approvazione dei progetti degli interventi contenuti nel piano presentato da RFI) non rientra tra i casi in cui la l.r. 89/1998 prevede l'attivazione dei poteri sostitutivi, ove necessario.

Né, infine, l'intervento sostitutivo della Regione può essere legittimamente invocato in base a quanto previsto nello schema di intesa approvato dalla Conferenza Unificata in data 29 ottobre 2009, ove si demanda al Ministero dell'Ambiente il controllo sull'attuazione dei piani presentati dai soggetti gestori, e si prevede che regioni, province e comuni **si adoperino** affinché le procedure di approvazione dei progetti degli interventi si concludano tempestivamente e possibilmente entro un anno dalla relativa presentazione. Sul punto si fa presente che:

a) i poteri sostitutivi devono essere previsti e disciplinati da norme di legge, e non da altri atti aventi diversa natura;

b) le regioni, le province ed i comuni, **ciascuno nell'ambito e limitatamente all'esercizio delle funzioni di cui sono titolari per legge**, si adoperano per la rapida conclusione dell'iter di approvazione dei progetti presentati dai soggetti gestori. Nella fattispecie in esame, pertanto, la Regione può – eventualmente – sollecitare i comuni interessati, ma non sostituirsi ad essi.

Dott.ssa Daniela Banchini

Daniela Banchini

AD
AD

INTERVENTI SULLA SORGENTE PER LA RIDUZIONE DELLE EMISSIONI ACUSTICHE DEI VEICOLI FERROVIARI

Modifiche impianto frenante dei carri merci.

Sostituzione dei ceppi dei freni in ghisa (tipo GG) con altri in composito (tipo K), con un costo compreso tra 5.000 e 7.000 Euro per ogni carro. Questa azione abbatta le emissioni di un treno merci da 8 a 10 dB.

Si ricorda anche che ben presto potrebbe essere omologato da UIC (**Unione Internazionale delle Ferrovie**) un carrello di nuova concezione per i carri merci (è in attesa da oltre 4 anni). È stato studiato per ridurre al minimo le emissioni acustiche ed è in grado di ridurre la rumorosità di 18 dB rispetto agli attuali Y25cs con freni a ceppi GG e di circa 9 dB rispetto a quelli con ceppi K. Sta inoltre circolando in Europa da dicembre 2010 un treno sperimentale (<http://europetrain.uic.org/>) con ceppi tipo LL, in composito ma compatibili con i GG, che dovrebbe portare alla loro omologazione entro dicembre 2012.

Utilizzazione delle "ruote silenziate".

Sostituzione delle ruote attuali con altre "silenziate" brevettate in Italia. Il costo si aggira attorno ai 500 Euro/ruota. Questa azione abbatta le emissioni di un treno merci di circa 5 dB, in particolare nelle alte ed altissime frequenze dello spettro, le più fastidiose. Si sottolinea che questa tipologia di intervento è già praticata in Italia nel caso della Val Venosta: STA, il proprietario dell'infrastruttura e dei veicoli, ha infatti prescritto ruote silenziate e tutti i veicoli utilizzati da SAD ne sono dotati. Si tratta di GTW 2/6 diesel e di FLIRT 4 e 6 casse elettrici, entrambi i tipi di veicoli transitano anche su impianti di RFI.

Modifica del coefficiente di attrito ruota-rotaia.

Per le curve di piccolo raggio dove vi è un strisciamento tra ruota e rotaia è possibile un trattamento localizzato con acqua ed una bassissima percentuale di speciale tensioattivo "HPF" sviluppato in Giappone. Ciò è sufficiente a modificare il comportamento della ruota ed abbattere le emissioni tipiche dello stridio, che sono sempre ad altissima frequenza e quindi fastidiosissime. L'abbattimento in curve critiche arriva a -20 dB, inoltre si rilevano notevoli diminuzioni della mazzatura, ulteriore causa di rumorosità. Questo tipo di approccio è stato adottato dalla metropolitana di Tokyo e prima ancora, negli anni Settanta, da ATM di Milano (solo acqua). Anche Canadian National (gestore di infrastruttura e servizi merci in Canada) ha avviato la applicazione di apparecchi simili lungo la propria linea transcontinentale.

Modifiche sulla via di propagazione (barriere basse)

Anche se non si tratta di un intervento diretto sulla fonte, il caso delle cosiddette "barriere basse", in taluni casi, può servire a mitigare acusticamente situazioni altrimenti non mitigabili.

RFI ha effettuato sperimentazioni su barriere cosiddette "basse" (dai 90 ai 120 cm di altezza dal piano del ferro) in collaborazione con Tubosider attorno alla metà degli anni '90 presso il campo prove di Figline Valdarno.

Sembra che i risultati dell'abbattimento, chiaramente dipendenti dalla posizione del ricettore, arrivino anche ad oltrepassare i 10 dB. L'applicazione di queste barriere è efficace se praticata in estrema vicinanza al binario di transito e pare che sia proprio tale vicinanza a violare alcune regole di sicurezza italiane che riguardano l'evacuazione rapida di passeggeri dalla carrozza.

Questa tipologia di barriera viene efficacemente utilizzata in altre nazioni (la Germania utilizza altezze di 80 cm sul piano del ferro, considerandole "marciapiede"), e il suo utilizzo in Italia potrebbe comunque essere introdotto con opportuni adattamenti per quelle situazioni in cui:

- vi è una grande estensione di binari affiancati;
- transitano molti carri merci;
- l'altezza degli edifici richiederebbe la completa copertura dei binari.

In effetti le grandi estensioni di binari affiancati (scali, stazioni) è spesso fonte di rumore non mitigabile con barriere tradizionali collocate a 2,70 m dalla rotaia "esterna" dell'area rumorosa (DPR 753/80). Peraltro non è nemmeno raro il caso in cui tali estensioni si trovino all'interno di territori fortemente antropizzati con elevate esposizioni della popolazione.

**CONVENZIONE TRA REGIONE TOSCANA E AGENZIA REGIONALE PER
LA PROTEZIONE AMBIENTALE (ARPAT) PER LA REALIZZAZIONE DI
UNO STUDIO DI APPROFONDIMENTO DEL PIANO DI RISANAMENTO DI
RFI CON PARTICOLARE RIFERIMENTO A POSSIBILI INTERVENTI
ALTERNATIVI ALLE BARRIERE**

**Misure di rugosità della rotaia
e
Analisi tipo dei possibili interventi
alternativi alle barriere**

CTP Fisico

Dott. Diego Palazzuoli

**Il responsabile del Settore Tecnico Produzione e
Promozione delle Attività e dei Servizi**

Dott. Gaetano Licitra

INDICE

Premessa	4
Il rumore e la rugosità della rotaia	5
La misura e valutazione della rugosità	9
Il quadro normativo	9
Le misure di rugosità della rotaia presso alcuni siti della rete RFI in Toscana	11
STAZIONE DI STATUTO, LOC. IL ROMITO	11
Descrizione del sito di misura	11
Tratti indagati	12
LOC. ROVEZZANO	19
Descrizione del sito di misura	19
Tratti indagati	19
LOC. S.SALVI.....	28
Descrizione del sito di misura	28
Tratti indagati.....	28
Conclusioni	35
Ringraziamenti.....	36

Misure di rugosità della rotaia

Premessa

La presente relazione illustra le attività effettuate in riferimento all'art. 3 della "Convenzione tra Regione Toscana e Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale (ARPAT) per la realizzazione di uno studio di approfondimento del Piano di Risanamento di RFI con particolare riferimento a possibili interventi alternativi alle barriere" che prevedeva una valutazione del *"corrugamento in alcuni siti rappresentativi scelti in collaborazione con RFI in previsione dell'utilizzo del modello previsto dalla commissione europea a seguito della direttiva 49/2002"*.

Per ovvi motivi di sicurezza e di gestione del servizio ferroviario, i siti e i tempi nei quali effettuare una prima valutazione del corrugamento (rugosità) della rotaia, sono stati concordati e scelti insieme a RFI che ha provveduto a mettere a disposizione personale in affiancamento ai tecnici dell'Agenzia.

La presente indagine, anche in considerazione delle difficoltà nell'individuazione di periodi di misura e siti idonei, si non può che configurarsi come preliminare e propedeutica ad ulteriori sessioni e approfondimenti ad oggi in corso di definizione.

In particolare potrà essere valutata la rugosità della rotaia in altri siti di particolare interesse per la mitigazione del rumore e che ricadono nei primi anni delle azioni di mitigazione previste dal Piano di Risanamento di RFI nelle province di Pisa e Livorno. I siti in cui effettuare le ulteriori misure saranno oggetto di discussione in una prossima riunione con la Direzione di RFI.

Il rumore e la rugosità della rotaia

La rugosità della ruota e della rotaia è identificabile come il principale meccanismo di generazione del rumore ferroviario di rotolamento. Il profilo della rugosità superficiale può essere scomposto in uno spettro continuo di lunghezze d'onda. A lunghezze d'onda piccole rispetto alle dimensioni della superficie di contatto ruota-rotaia, la rugosità è mediata dal contatto stesso (*contact patch filtering*) risultando meno influente per la generazione di rumore. Generalmente la superficie di contatto della rotaia presenta uno spettro di rugosità a "larga banda" anche se possono presentarsi marcati andamenti periodici (corrugamento) di ampiezza significativamente maggiore (vedi Figura 1). Tali formazioni sono identificabili come zone più "brillanti" sulla testa della rotaia con passo tipico tra 30 e 80 mm. La differenza di rumore emesso al passaggio di materiale rotabile con ruote levigate su binari lisci o con evidente corrugamento può raggiungere anche i 20 dB(A).



Figura 1. Evidente corrugamento della rotaia.

Le lunghezze d'onda della rugosità superficiale della ruota e della rotaia, di interesse per le emissioni acustiche, si collocano tra 5 e 200 mm anche se le lunghezze d'onda minori sono "filtrate" dalle dimensioni della zona di contatto (10-15 mm), *Rail and wheel roughness – implication for noise mapping based on the Calculation of Railway Noise procedure*, AEATR-PC&E-2003-002 a report produced for DEFRA. La frequenza delle vibrazioni eccitate al passaggio del materiale rotabile sono legate alla lunghezza d'onda della rugosità ($\lambda_{\text{rugosità}}$) e alla velocità del treno, V_{treno} , attraverso la relazione:

$$f_{\text{vibrazione}} = V_{\text{treno}} / \lambda_{\text{rugosità}} \quad (1)$$

Il valore della rugosità è generalmente espresso in scala logaritmica come:

$$20 \cdot \log_{10}(A_{\text{RMS}} / 10^{-6}) \text{ dB}$$

le ampiezze delle imperfezioni della ruota e della rotaia più rilevanti nella generazione del rumore di rotolamento si collocano tra 0.3 e 120 μm picco-picco. In Figura 2 si riportano a titolo di esempio alcuni spettri della rugosità di rotaie con diverso grado di corrugamento (P.Dings, M.G. Dittrich "Roughness on Dutch Railway wheels and rails", Journal of Sound and Vibration, 193 103-112, 1995).

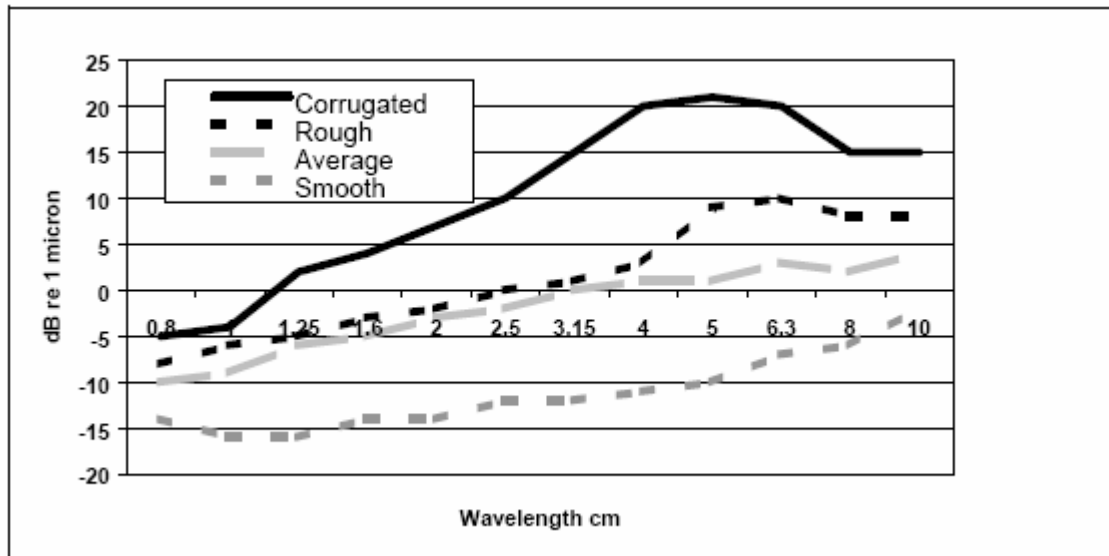


Figura 2. Tipici spettri della rugosità di rotaie con diverso grado di corrugamento (P.Dings, M.G. Dittrich "Roughness on Dutch Railway wheels and rails", Journal of Sound and Vibration, 193 103-112, 1995).

Generalmente se la superficie della rotaia presenta un livello molto alto di rugosità, lo spettro di rumore può contenere componenti discrete di frequenza, e le armoniche associate, chiaramente rivelabili con un'analisi in bande 1/3 di ottava. In Figura 3 è presentato uno spettro di rumore generato al passaggio di un treno su una rotaia con un alto grado di corrugamento. La presenza di rugosità accentuata è rivelata dal picco a circa 500 Hz e 1000 Hz. Spettri di rumore generati a diverse velocità sulla stessa rotaia corrugata mostrano una variazione lineare dei picchi di frequenza con la velocità di percorrenza al contrario, la posizione delle risonanze meccaniche come quelle dovute alle ruote non varia al variare della velocità di percorrenza del materiale rotabile. Quindi se i picchi presenti nello spettro di rumore generato dal passaggio del treno non variano un funzione della velocità di percorrenza, la causa del rumore è probabilmente non individuabile in un'accentuata rugosità o in qualsiasi difetto periodico della rotaia stessa. Le lunghezze d'onda della rugosità può essere misurata e paragonata alle frequenze presenti nell'analisi spettrale del rumore emesso dal passaggio del materiale rotabile per individuare se la rugosità è la causa preponderante nella generazione di rumore.

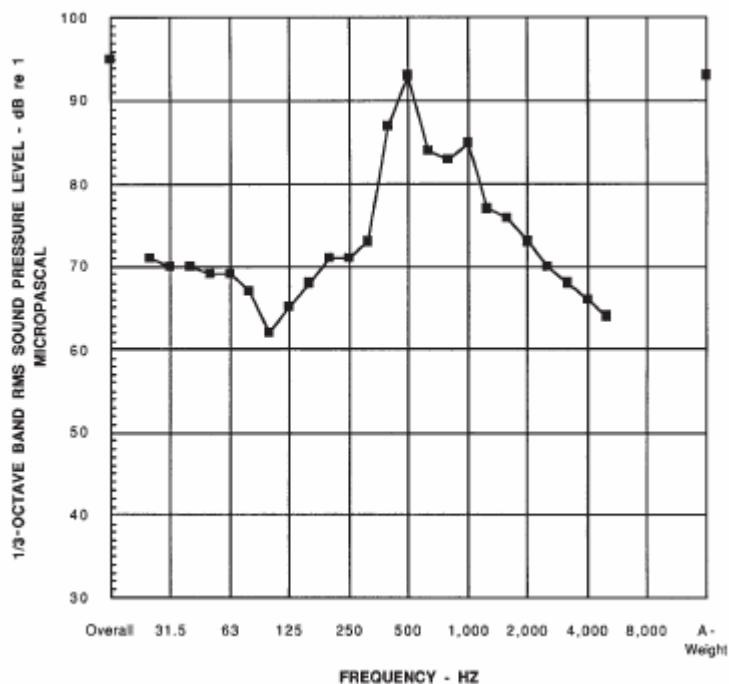


Figura 3. Analisi in frequenza del rumore emesso dal passaggio di un treno su una rotaia corrugata (TCRP Report 23, Transportation Research Board, National Research Council, National Academy Press, Washington, D.C. 1997).

Gli indicatori di rugosità a singolo indice

Ad oggi sono stati proposti alcuni indicatori a singolo indice per definire il livello di rugosità della rotaia. In particolare si segnalano:

- La somma energetica di tutti i livelli in terzi di ottava (F.J.W. Biegstraten, M.G. Dittrich, P.C.G.J. Dings *Rolgeluid, karakterisering van wielruwheden va NS Materieel; SVV Deelproject 1.1 (Rolling noise: characteristics of wheel roughness of Dutch trains)TNO – report TPD-HAG-RPT-93-0131*) 1993;
- Il massimo valore del livello in bande di terzi di ottava con una lunghezza d'onda tra 1 e 4 cm (P.C.G.J. Dings, *Spoorstaafruwheid, spoorstaafdwarsprofiel en geluid; deelproject 1.2 vav SVV-project 1 (Rail roughness, lateral rail profile and noise) NSTO report CTO/7/10.448/0021*), 1994;
- Il livello di rugosità pesato A impiegando la conversione tra lunghezza d'onda e frequenza data dall'equazione (1) (P.C.G.J. Dings, M.G. Dittrich *Roughness on Dutch railway wheels and rails*, Journal of Sound and Vibration, 193, pp. 103-112, 1996.

Thompson, seguendo un differente approccio (D.J. Thompson, *On the relationship between wheel and rail surface roughness and rolling noise*, Journal of Sound and Vibration, 193, pp. 149-160,

1996), definisce una funzione di trasferimento $H(f)$ dallo spettro della rugosità combinata ruota-rotaia $L_r(f)$ al livello SPL pesato A misurato $L_{pA}(f)$. Utilizzando il modello TWINS è stata proposta (D.J. Thompson, B.Hemsworth, N. Vincent, *Experimental validation of the TWINS prediction program for rolling noise, part 1: Description of the model and method*, Journal of Sound and Vibration 193, pp. 123-135, 1996), per situazioni tipiche in Olanda e per passaggi di treni alla velocità di 160 km/h, la funzione “peso” nel dominio della frequenza:

$$L_{AV}(f) = L_A(f) + 20 \log(\min(f/1000, 25))$$

tale funzione di trasferimento è stata successivamente estesa per le altre velocità impiegando il modello TWINS ottenendo la cosiddetta “pesatura lambda”:

$$L_\lambda = -a \log(\lambda/5)$$

con a costante e uguale a 25, e la lunghezza d'onda espressa in cm. Tale “pesatura lambda” combinata con il filtro di contatto e pesatura A da origine all'indice $L_{\lambda CA}$.

La quantità $L_{\lambda CA}$ risulta essere, entro l'incertezza delle misure e del modello, proporzionale al rumore emesso al passaggio di un treno. La variazione nello spettro di rugosità sul livello di rumore può essere valutato inoltre con un'incertezza di ± 1 dB(A) (*HARMONOISE Deliverable 12 part 1 HAR12TR-020813-AEA10, luglio 2003*).

La misura e valutazione della rugosità

Sin dal 1980 sono stati studiati e impiegati diversi sistemi di misura della rugosità della rotaia. Le due tipologie di strumenti capaci di effettuare misure accurate di rugosità sono essenzialmente:

- sistemi di misura *trolley* (con la possibilità di misurare con continuità lunghi spezzoni di rotaia);
- apparecchi fissati alla rotaia con elemento di misura scorrevole su brevi tratti di lunghezza fissata.

Il sistema di misura utilizzato per la valutazione della rugosità in tutte i siti analizzati è stato il *CAT Corrugation Analysis Trolley* prodotto da Grassie. Il valore di rugosità, ottenuto integrando due volte il segnale proveniente da un accelerometro, è campionato ad intervalli di 2 mm o 1 mm. Il software in dotazione alla catena strumentale permette di valutare il corrugamento della rotaia a lunghezze d'onda fissate considerando inoltre la loro distribuzione spettrale. In particolare è possibile valutare il profilo della rotaia nei seguenti intervalli di lunghezze d'onda:

- 10 – 30 mm
- 30 – 100 mm
- 100 – 300 mm
- 300 – 1000 mm
- 1000 – 3000 mm
- 30 – 300 mm
- 300 – 3000 mm
- 150 – 1500 mm.

Per ogni lunghezza d'onda o per i valori non filtrati è possibile valutare il valore RMS della rugosità dell'intero tratto di rotaia indagata.

I dati grezzi possono essere inoltre analizzati in bande di terzi di ottava dei valori RMS della rugosità.

Il quadro tecnico e normativo

Successivamente agli studi condotti tra il 1980 e il 1990 dall'Amministrazione delle ferrovie europee (ERRI) che contribuirono a identificare nella rugosità della ruota e della rotaia uno dei maggiori meccanismi nella generazione del rumore da rotolamento, la Commissione Europea finanziò una serie di progetti (ad es. EuroSabot sulla rugosità delle ruote o Silent Track relativo alla rugosità della rotaia) che miravano a chiarire i processi di generazione e crescita del corrugamento. A seguito di tali studi la rugosità viene inserita nel contesto legislativo europeo.

Ad oggi l'unico standard di misura della rugosità è la norma EN ISO 3095 "Railway applications—acoustics—measurement of noise emitted by railbound vehicles" alla quale fa riferimento anche la norma sulle specifiche tecniche per l'interoperabilità del materiale rotabile ad alta velocità (Technical Specification for Interoperability, Decision 2002/735/EC concerning the technical

specification of interoperability for high speed trains, Annex 4.1.8, Boundary characteristics linked to exterior noise, 30 May 2002) che definisce una procedura di misura e un limite in funzione della frequenza per la rugosità in funzione delle prove di accettabilità della rumorosità del materiale rotabile. Inoltre il modello europeo ad interim per la previsione del rumore prodotto dalle infrastrutture ferroviarie (RMR) richiede che la rugosità sia misurata in riferimento alla EN ISO 3095.

Ad oggi manca comunque una produzione normativa che definisca le procedure e i metodi per il controllo della rugosità al fine della mitigazione del rumore ferroviario.

Al di là della valutazione spaziale della distribuzione delle microasperità della superficie della rotaia risulta utile l'utilizzo di un singolo parametro che possa definire lo stato complessivo della tratta di binario valutato. In mancanza di riferimenti tecnici normativi sia a livello italiano che europeo sulla base della produzione scientifica a disposizione (vedi A.Bracciali, "Rail corrugation growth in a metro curve", Atti della 7th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems (CM2006), Brisbane, Australia, September 24-26, 2006 e i riferimenti lì riportati) è stato scelto di considerare:

- un'analisi di tipo "block RMS", sui dati filtrati nella banda 30-300 mm, dove l'acquisizione del profilo della rotaia è mediato RMS su singoli tratti di 1 m;
- un indice di rugosità media (r) definito come il valore RMS della rugosità stessa sull'intero tratto indagato nella banda 30-300 mm;
- un'analisi in bande di terzi di ottava sui dati non filtrati per identificare eventuali frequenze caratteristiche correlabili con il tipo di traffico ferroviario presente.

L'elaborazione dei dati è stata effettuata impiegando il software CAT in dotazione allo strumento.

Le misure di rugosità della rotaia presso alcuni siti della rete RFI in Toscana

In accordo con RFI, per motivi di sicurezza e di servizio sono state effettuate valutazioni della rugosità del binario nei seguenti siti presso il compartimento di Firenze:

1. Rovezzano: linea Firenze-Roma, sia sulla linea lenta (km 306+405) che in DD (km 253+425);
2. Stazione di Statuto, zona "Il Romito";
3. Zona San Salvi.



Figura 4. Particolare dell'apparato di misura CAT.

Nel prosieguo saranno descritti dettagliatamente i siti di misura e i risultati ottenuti.

STAZIONE DI STATUTO, LOC. IL ROMITO

Descrizione del sito di misura

Il sito di misura è costituito dai binari adiacenti la fermata di Firenze Statuto. I binari di cui è stata rilevata la rugosità sono 6, 2 della linea direttissima (DD) Firenze-Roma, 2 del Raccordo Rifredi-Campo di Marte e 2 dell'Interconnessione tra gli ultimi (futura linea AV). Il sito è circondato da abitazioni.



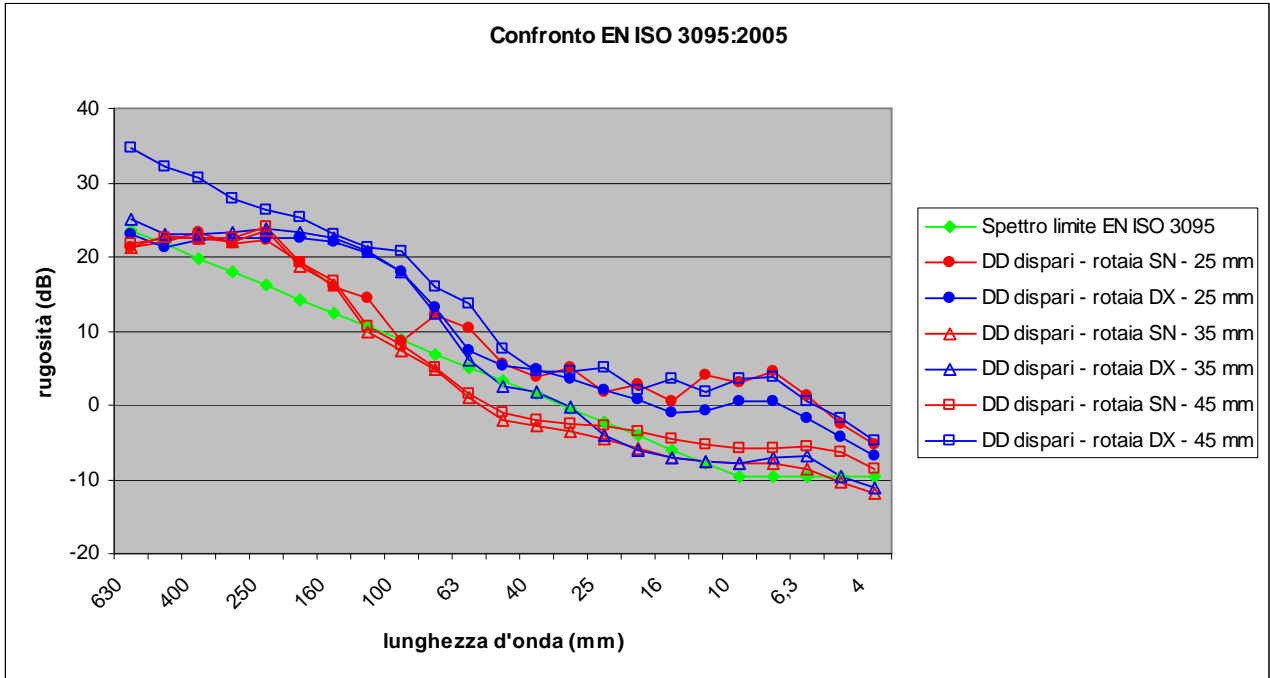
Figura 5. Panoramica del sito di misura di Firenze Statuto.

Tratti indagati

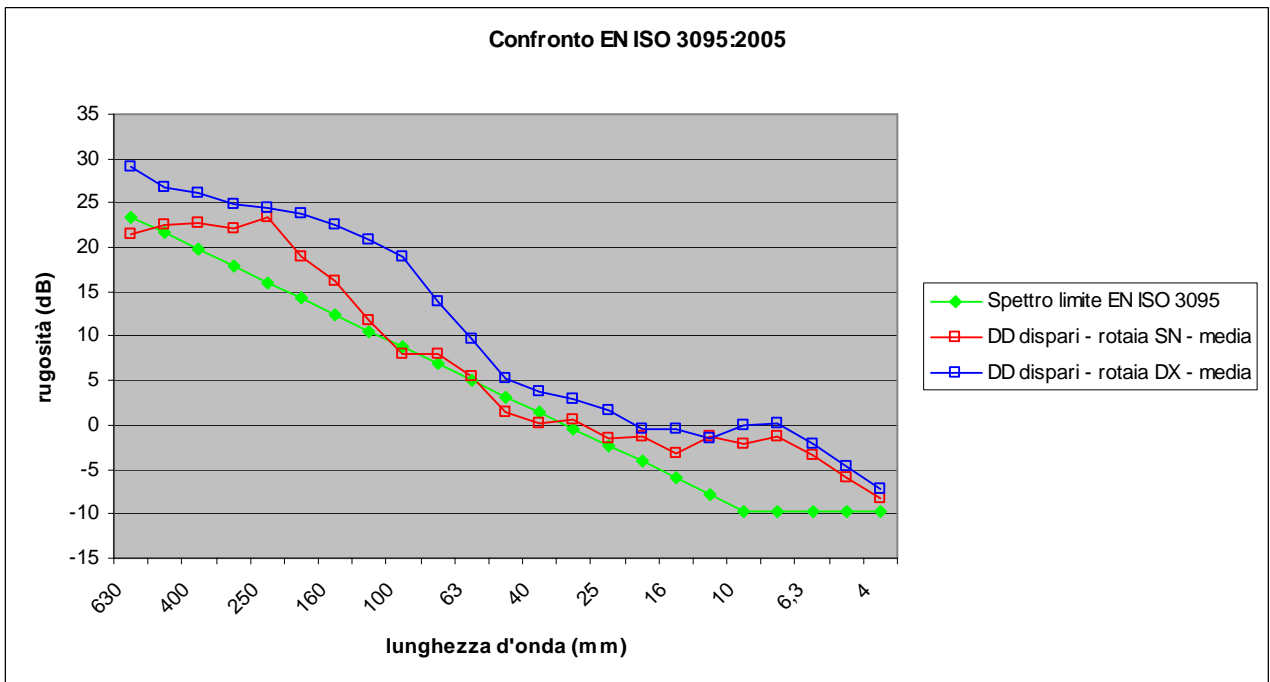
1. Linea Direttissima (DD) binario dispari alle distanze dal bordo di 25, 35 e 45 mm nella *running band*; lunghezza del tratto m 100.
2. Linea Direttissima (DD) binario pari alle distanze dal bordo di 25, 35 e 45 mm nella *running band*; lunghezza del tratto m 100.
3. Interconnessione binario dispari alla distanza dal bordo di 40 mm nella *running band*; lunghezza del tratto m 100.
4. Interconnessione binario pari alla distanza dal bordo di 40 mm nella *running band*; lunghezza del tratto m 100.
5. Raccordo dispari binario 1 alle distanze dal bordo di 30 e 40 mm nella *running band*; lunghezza del tratto m 100.
6. Raccordo pari binario 2 alle distanze dal bordo di 30 e 40 mm nella *running band*; lunghezza del tratto m 100.

Linea Direttissima (DD) binario dispari alle distanze dal bordo di 25, 35 e 45 mm nella running band

Singola rotaia diverse distanze nella running band

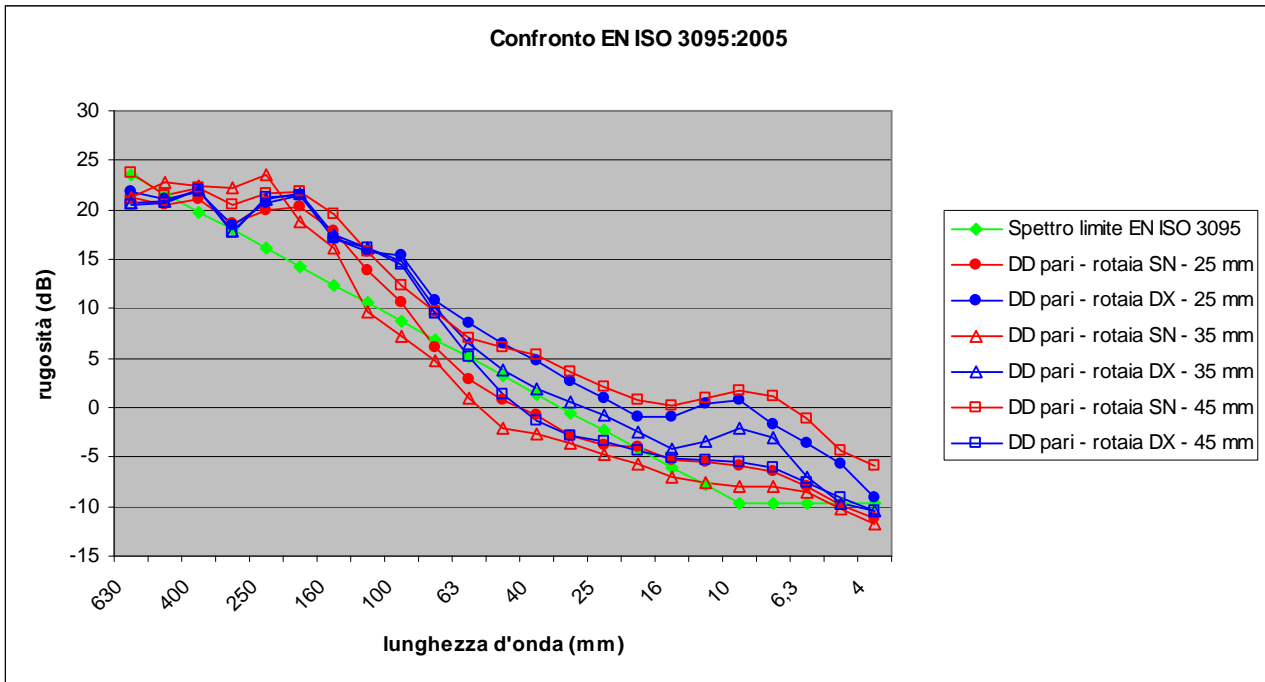


Spettro medio

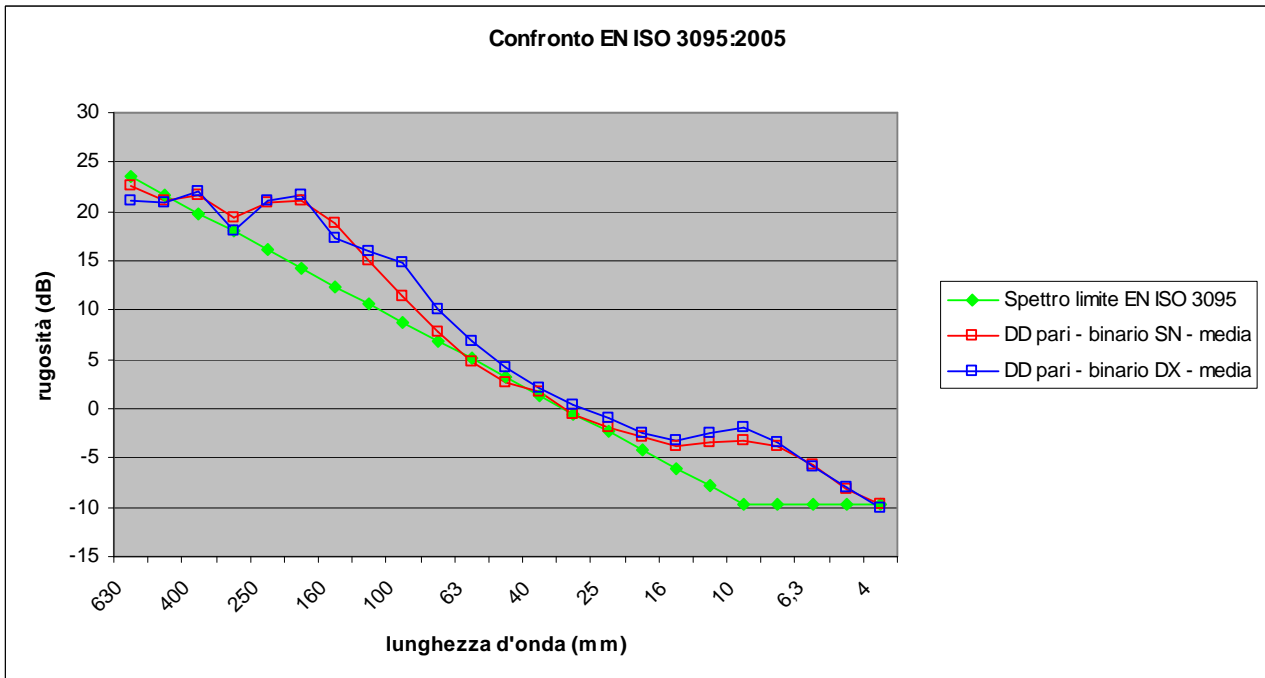


Linea Direttissima (DD) binario pari alle distanze dal bordo di 25, 35 e 45 mm nella running band

Singola rotaia diverse distanze nella running band

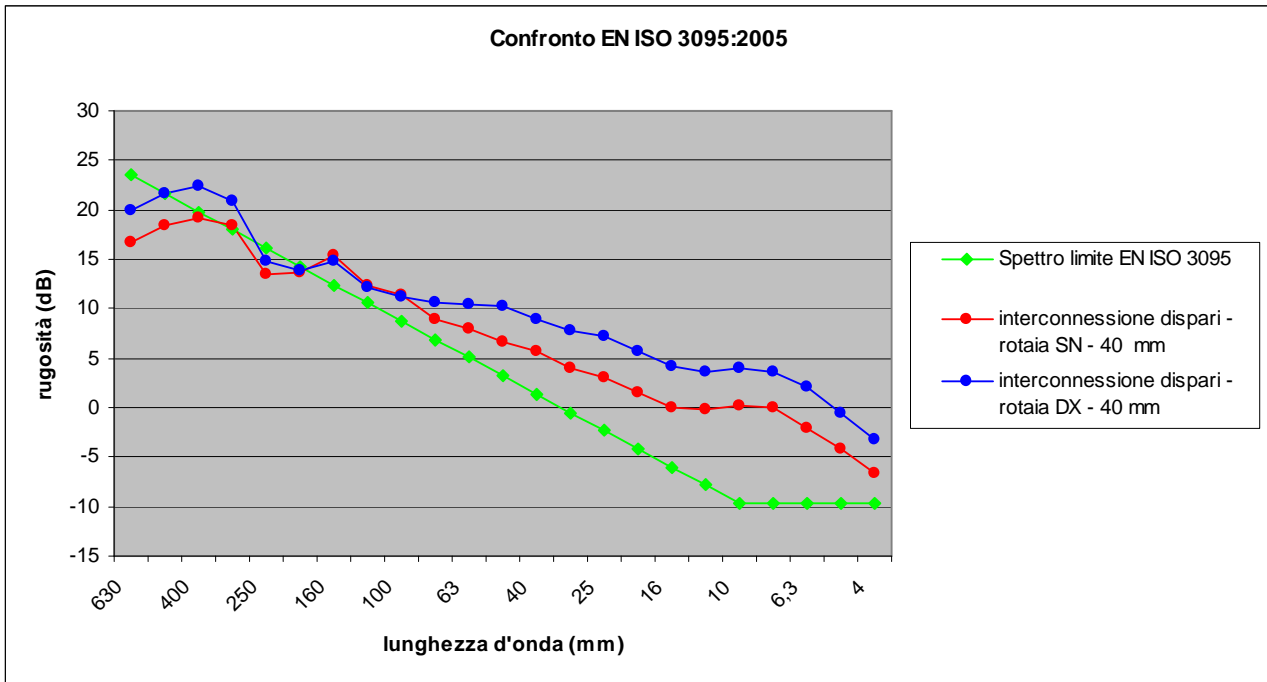


Spettro medio



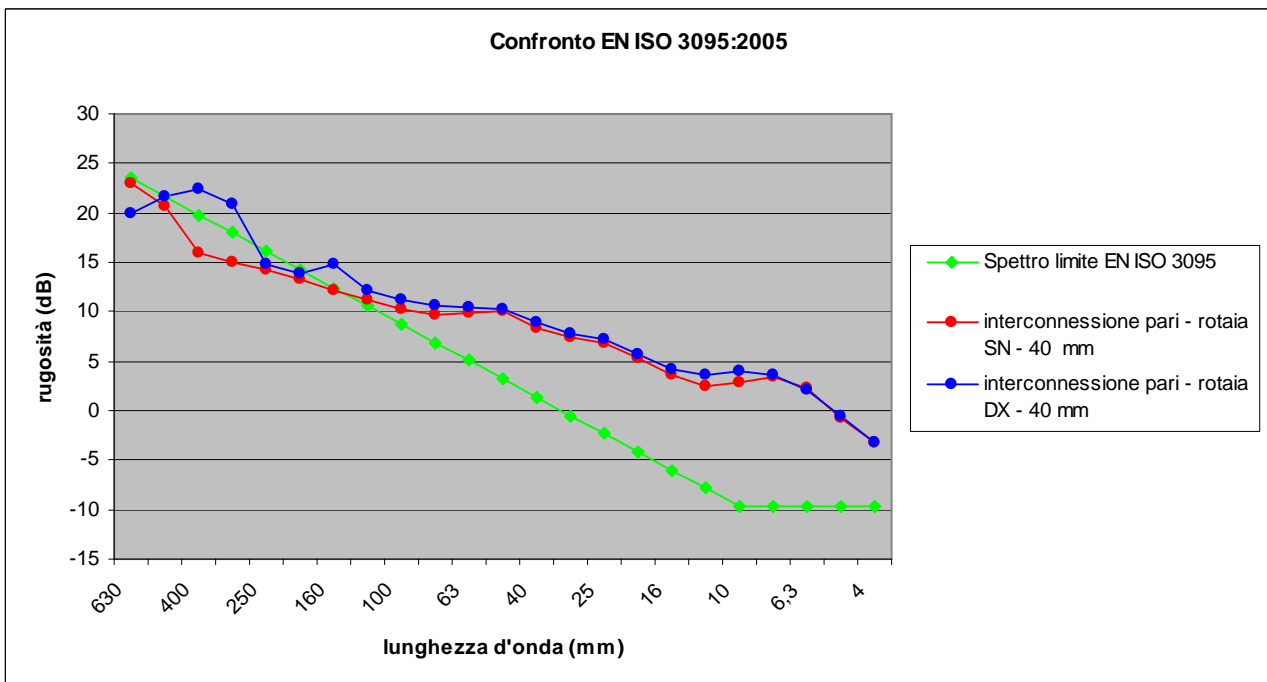
Interconnessione binario dispari alla distanza dal bordo di 40 mm nella running band

Singola rotaia



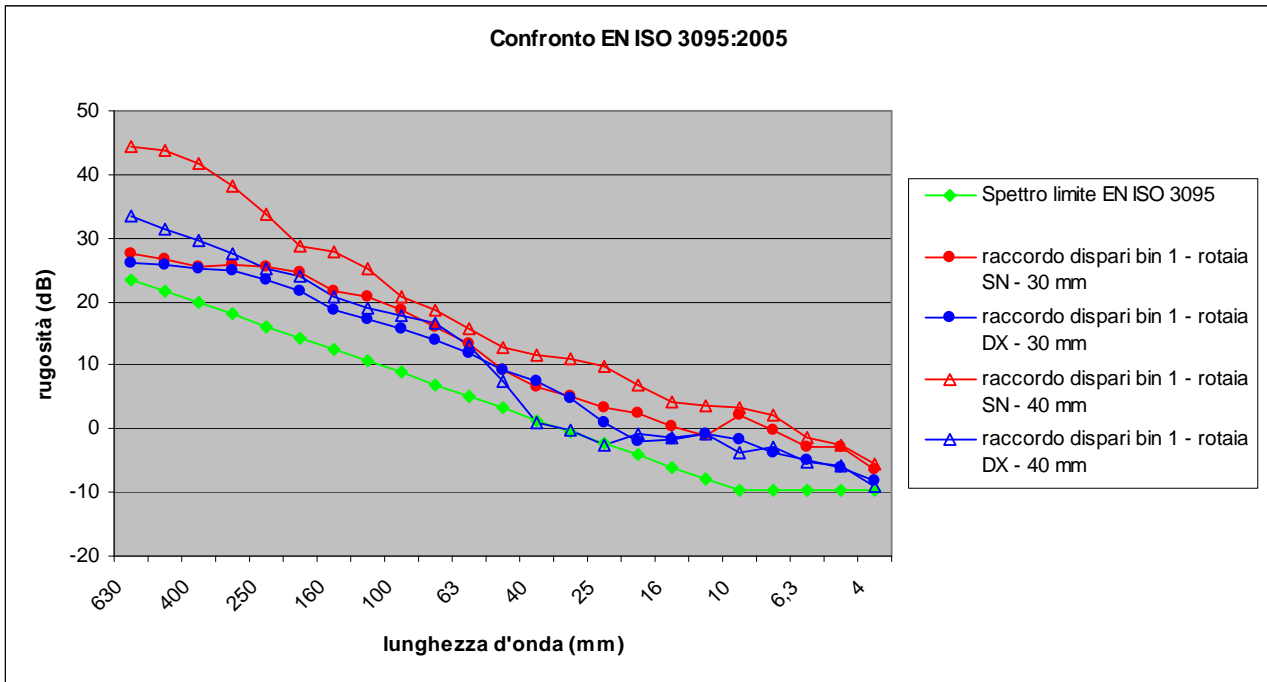
Interconnessione binario pari alla distanza dal bordo di 40 mm nella running band

Singola rotaia

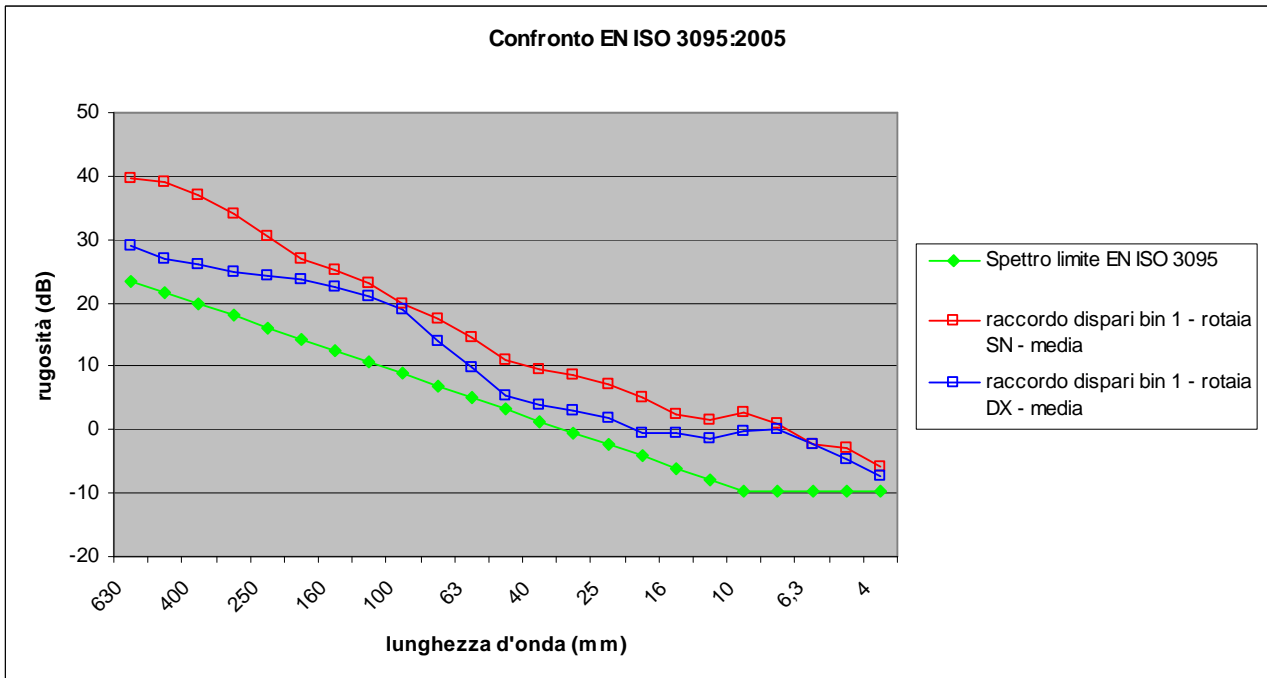


Raccordo dispari binario 1 alle distanze dal bordo di 30 e 40 mm nella running band

Singola rotaia diverse distanze nella running band

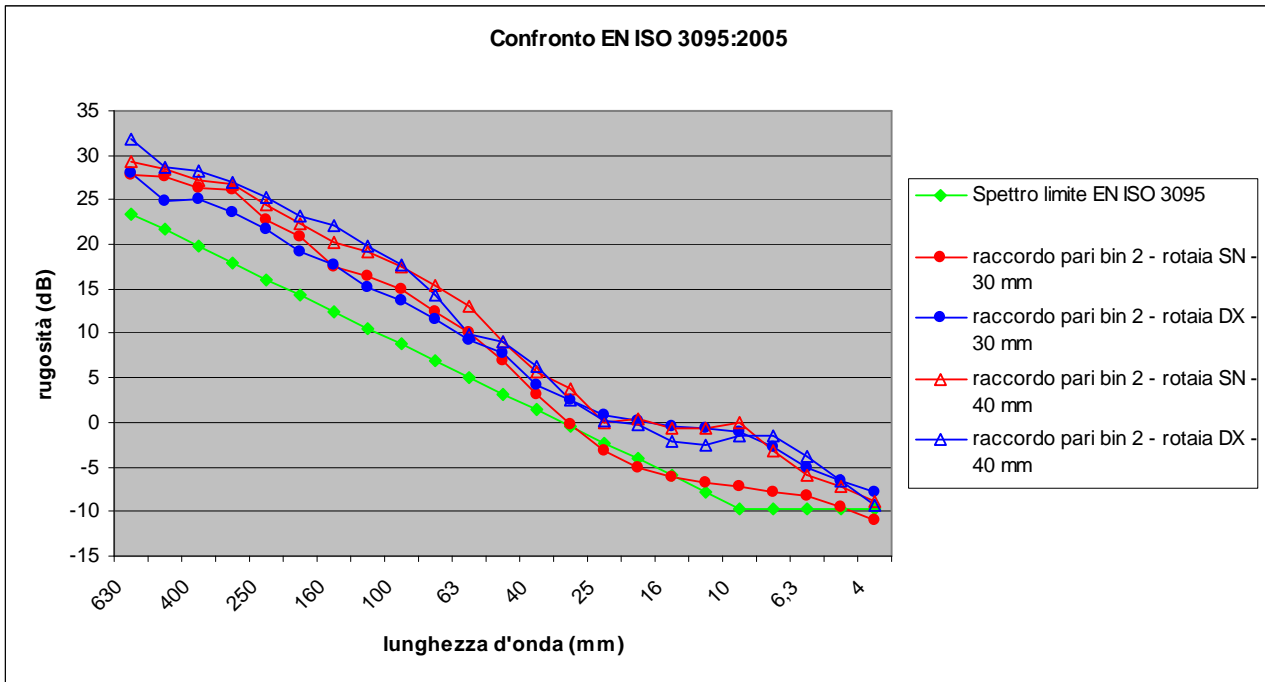


Spettro medio



Raccordo pari binario 2 alle distanze dal bordo di 30 e 40 mm nella running band

Singola rotaia diverse distanze nella running band



Spettro medio

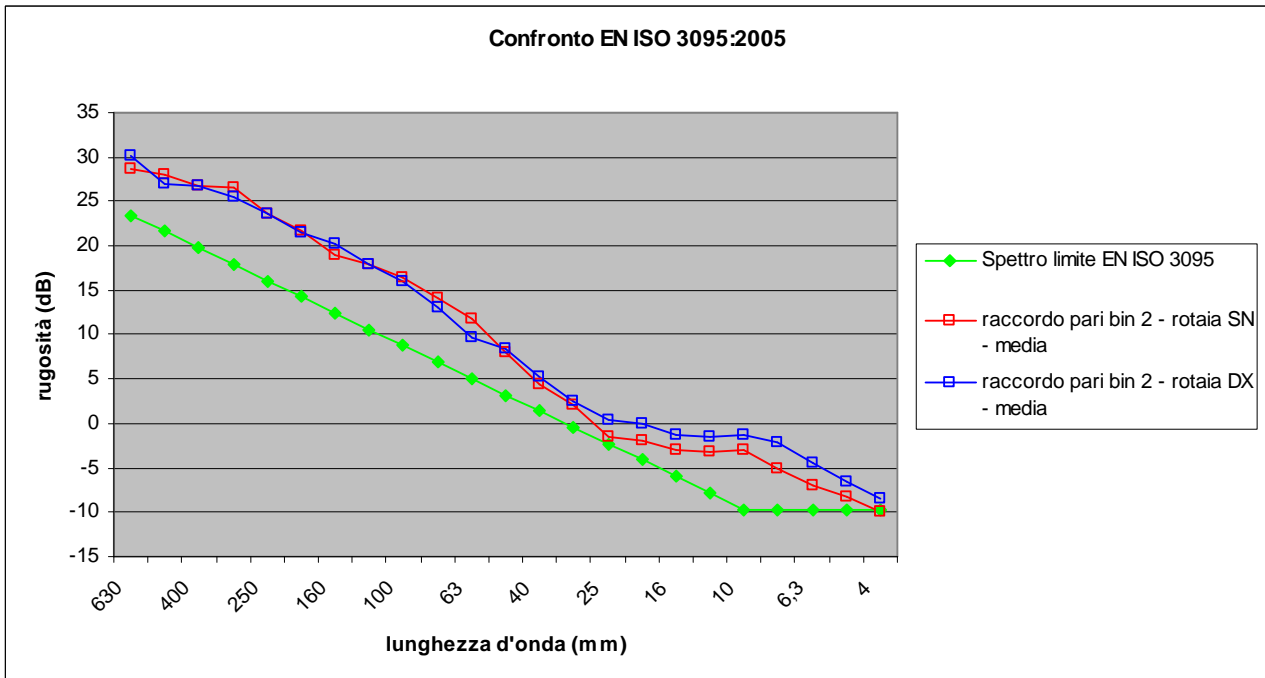


Tabella riassuntiva dell'indice r di rugosità media

<i>linea</i>	<i>rotaia</i>	<i>distanza nella running band (mm)</i>	<i>RMS RAW (μm)</i>	<i>RMS 30-300 mm (μm)</i>
DD - dispari	SN	25	65,6	19,8
DD - dispari	DX	25	51,2	27
DD - dispari	SN	35	52,1	19,7
DD - dispari	DX	35	66,2	29,3
DD - dispari	SN	45	53,7	20,7
DD - dispari	DX	45	195	39,1
DD - pari	SN	25	45,9	17,9
DD - pari	DX	25	47,1	20,3
DD - pari	SN	35	54,2	19,9
DD - pari	DX	35	47,4	20,5
DD - pari	SN	45	56,1	21,7
DD - pari	DX	45	47,2	20,1
interconnessione binario dispari	SN	40	37,7	12,8
interconnessione binario dispari	DX	40	41,5	14,7
interconnessione binario pari	SN	40	52,2	11,8
interconnessione binario pari	DX	40	51,5	12,3
raccordo dispari bin 1	SN	30	81,5	33,4
raccordo dispari bin 1	DX	30	67	25,9
raccordo dispari bin 1	SN	40	456,6	89,4
raccordo dispari bin 1	DX	40	162,2	33,9
raccordo pari bin 2	SN	30	76,7	24,9
raccordo pari bin 2	DX	30	66,5	21,8
raccordo pari bin 2	SN	40	81	30,1
raccordo pari bin 2	DX	40	127,4	32,8

LOC. ROVEZZANO

Descrizione del sito di misura

Il sito di misura è costituito dalla linea Firenze-Roma in località di “Bivio Rovezzano”, sia la linea lenta (km 306+405) che la direttissima (DD) (km 253+425). Il sito si trova in corrispondenza di alcune abitazioni ed esercizi commerciali. È stata rilevata la rugosità su 5 dei 6 binari presenti. Il traffico veicoli rilevato è vario (Eurostar, intercity, regionali, merci e mezzi di servizio). La velocità rilevata non supera mai i 90 km/h.



Figura 6. Panoramica del sito di misura di Rovezzano.



Figura 7. Progressiva relativa alla linea lenta Firenze-Roma (a sinistra) e alla linea direttissima (a destra).

Tratti indagati

1. Binario pari lento alle distanze dal bordo di 30 e 45 mm nella *running band*; lunghezza del tratto m 100 (punto di misura N1).

2. Linea Direttissima (DD) binario pari alle distanze dal bordo di 40 mm nella *running band*; lunghezza del tratto m 100 (punto di misura N2).
3. Interconnessione binario dispari alla distanza dal bordo di 31 e 41 mm nella *running band*; lunghezza del tratto m 100 (punto di misura N3).
4. Interconnessione binario pari alla distanza dal bordo di 33 e 43 mm nella *running band*; lunghezza del tratto m 100 (punto di misura N4).
5. Bivio Rovezzano dispari linea lenta alle distanze dal bordo di 30 e 45 mm nella *running band*; lunghezza del tratto m 100 (punto di misura N5).

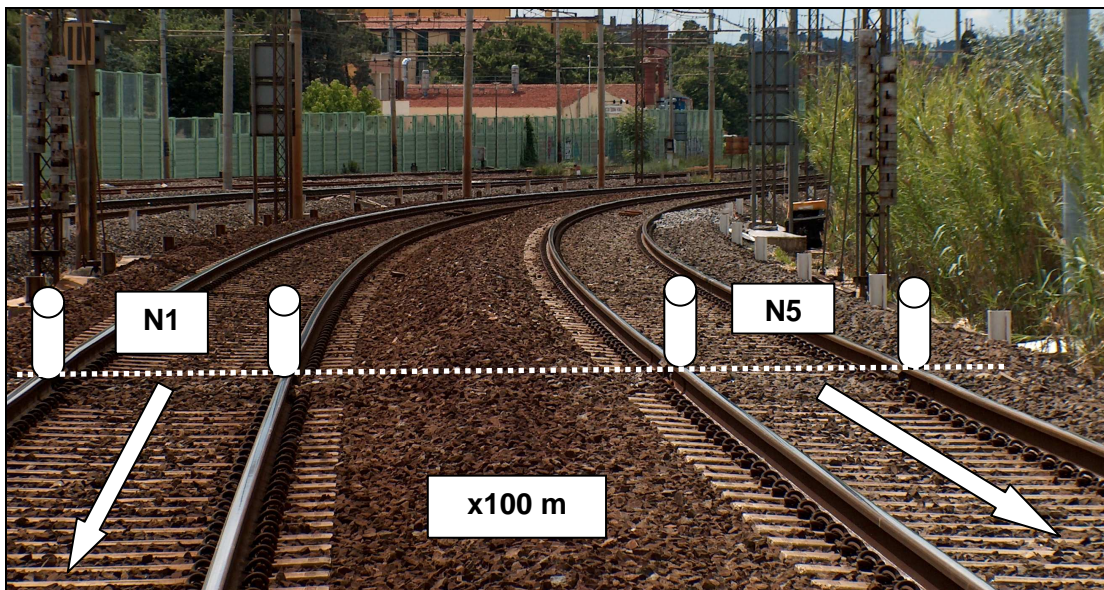


Figura 8. Inizio punti di misura e riferimenti sulla linea lenta.

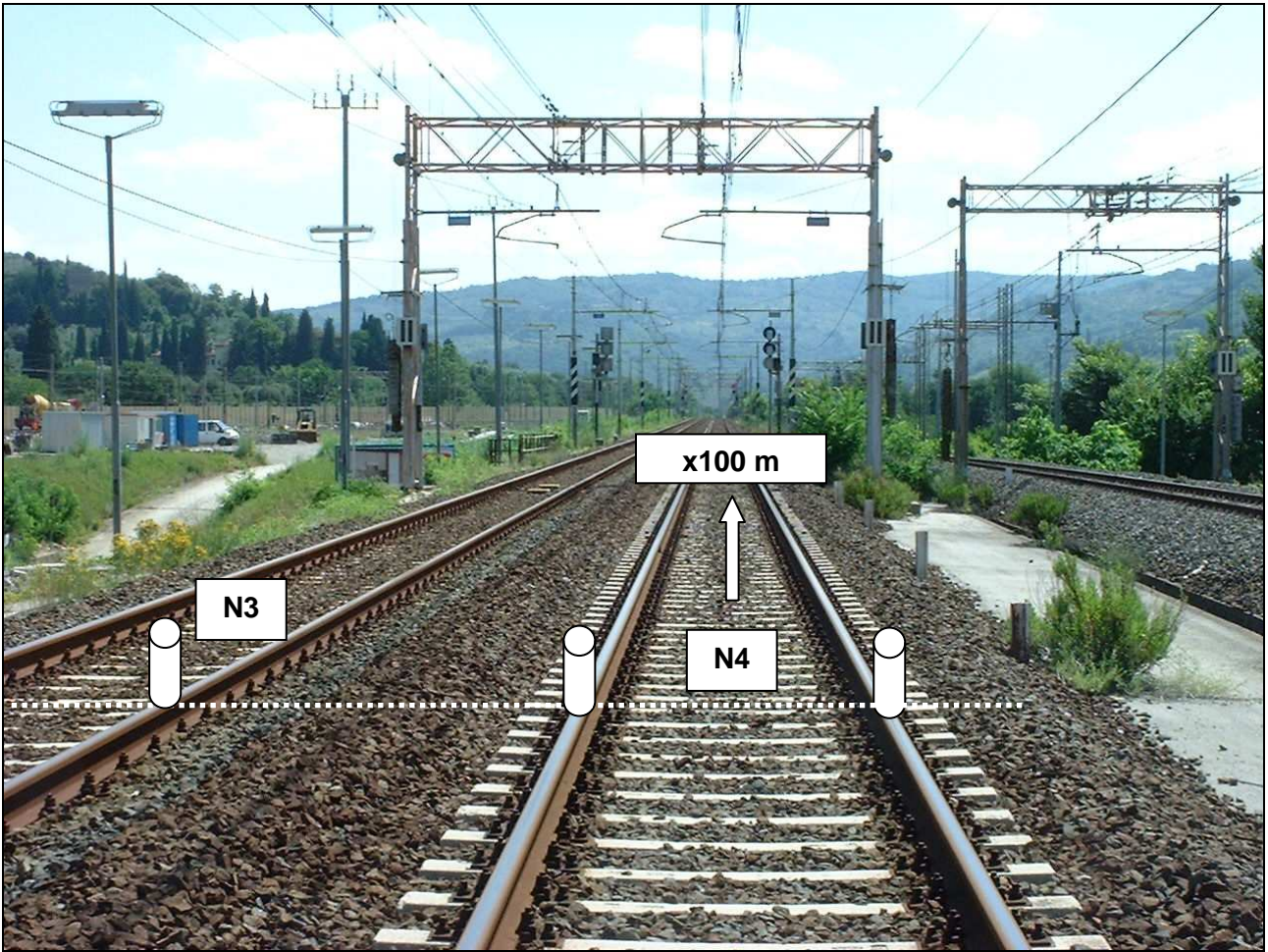


Figura 9. Inizio punti di misura e riferimenti sulla interconnessione.

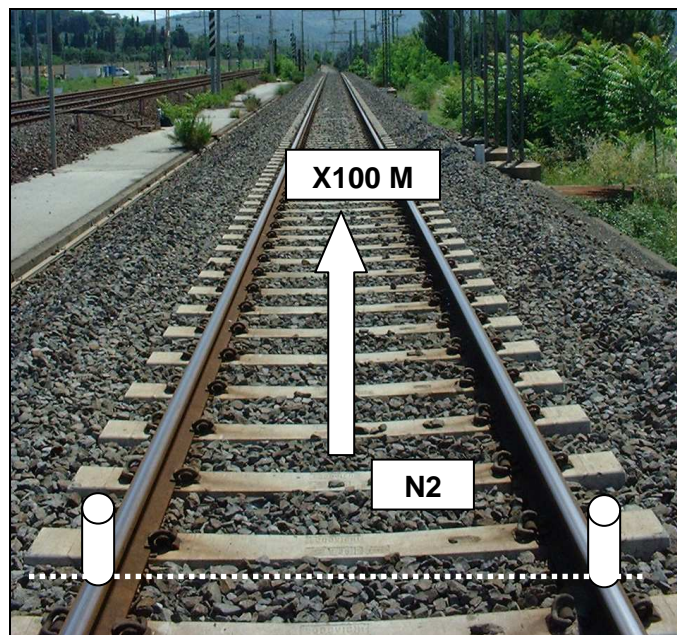
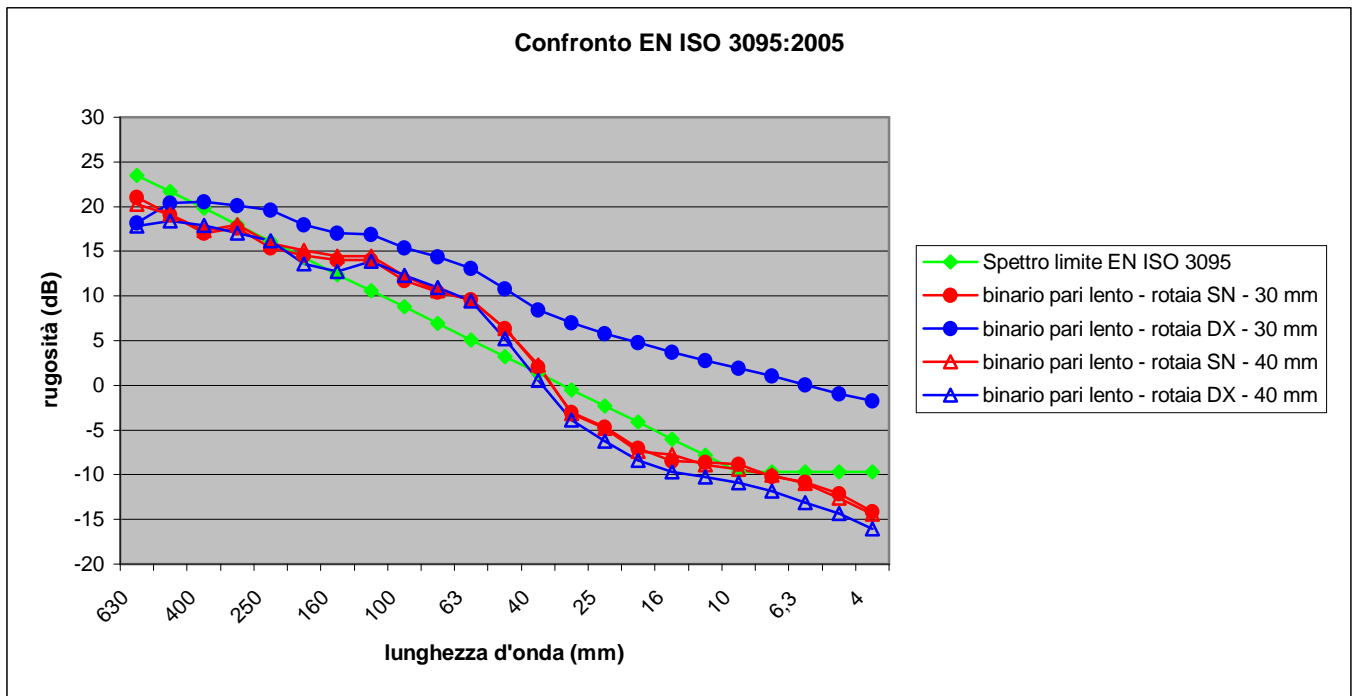


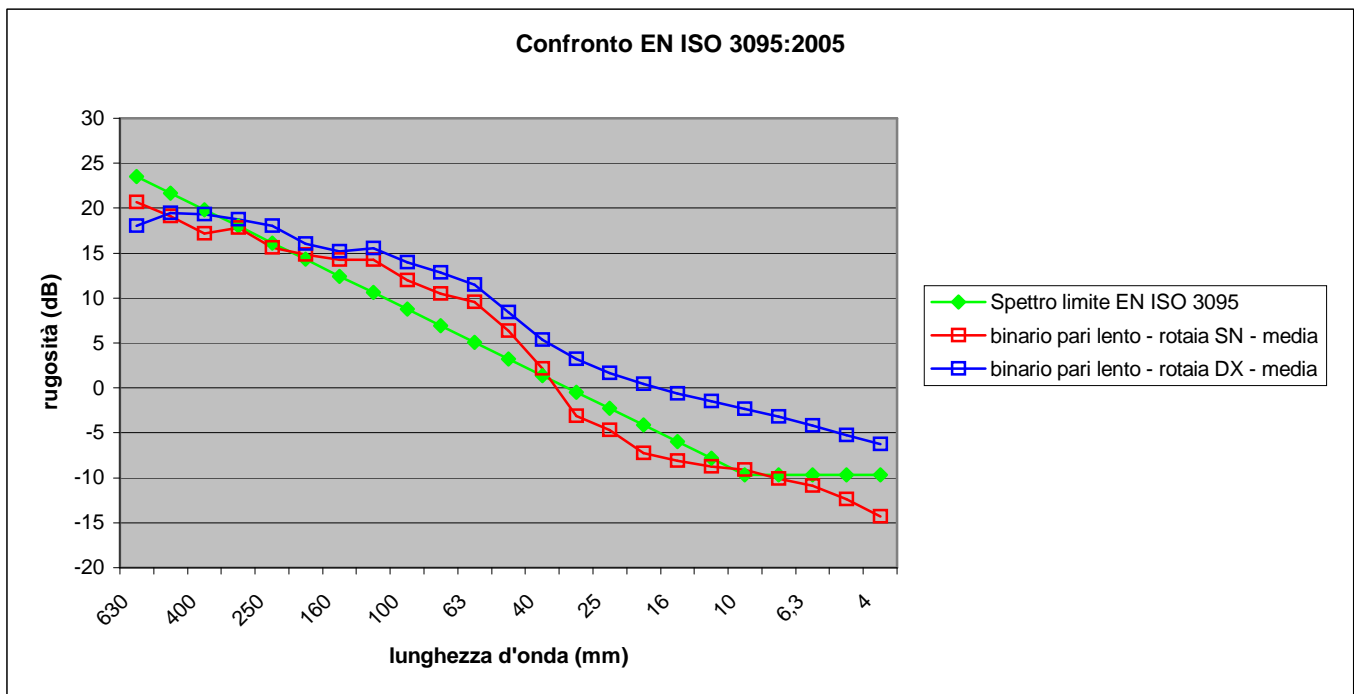
Figura 9. Inizio punti di misura e riferimenti sulla linea direttissima.

Binario pari lento alle distanze dal bordo di 30 e 45 mm nella running band

Singola rotaia diverse distanze nella running band

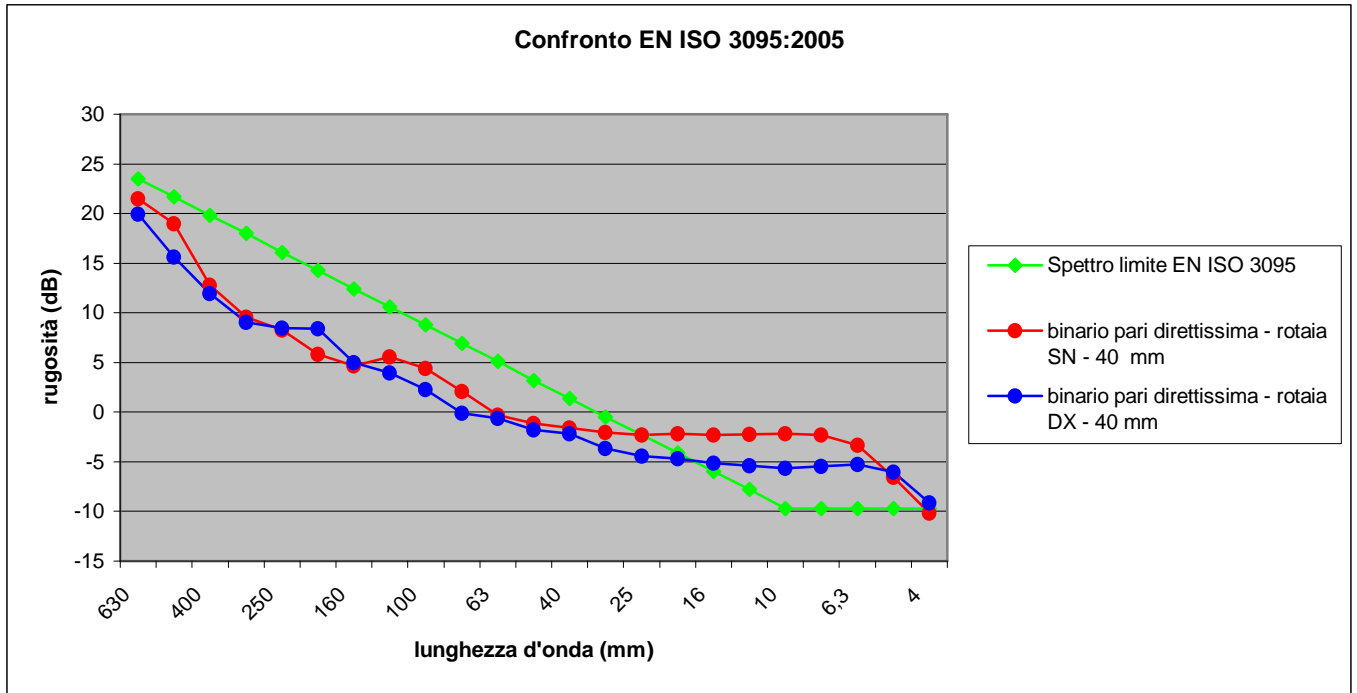


Spettro medio



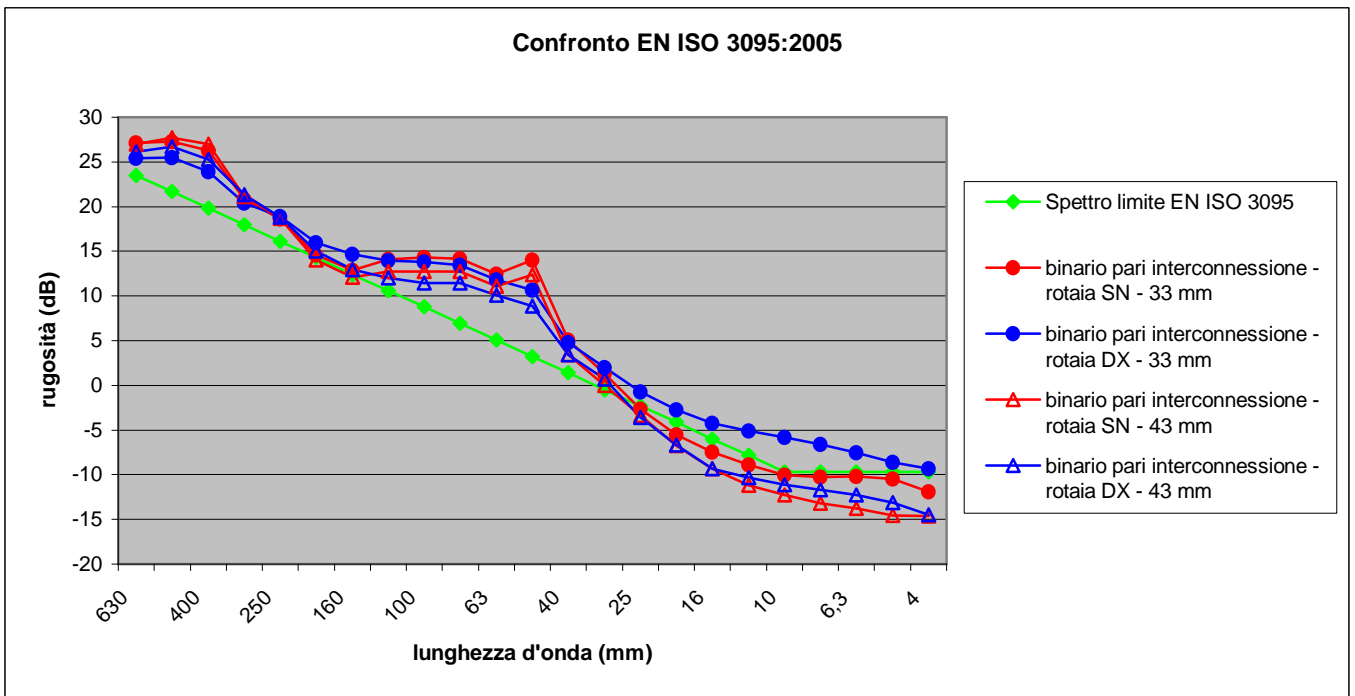
Linea Direttissima (DD) binario pari alle distanze dal bordo di 40 mm nella running band

Singola rotaia diverse distanze nella running band

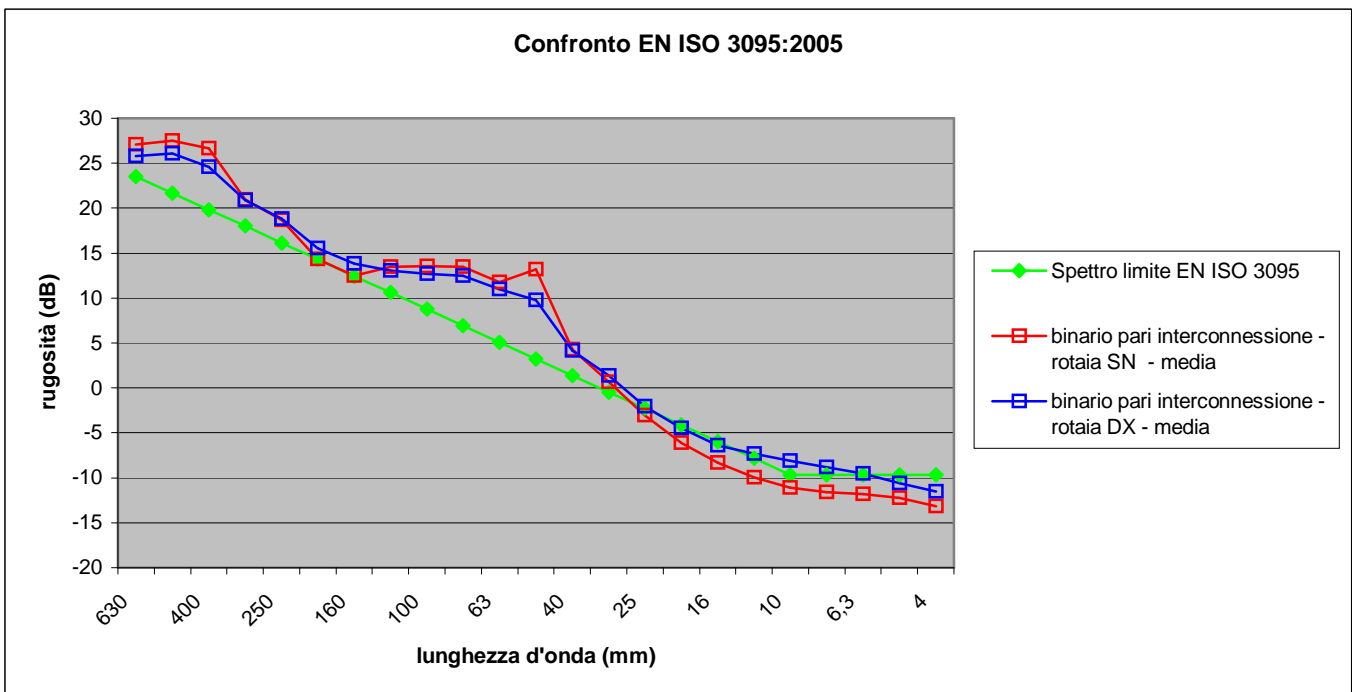


Interconnessione binario pari alla distanza dal bordo di 33 e 43 mm nella running band

Singola rotaia diverse distanze nella running band

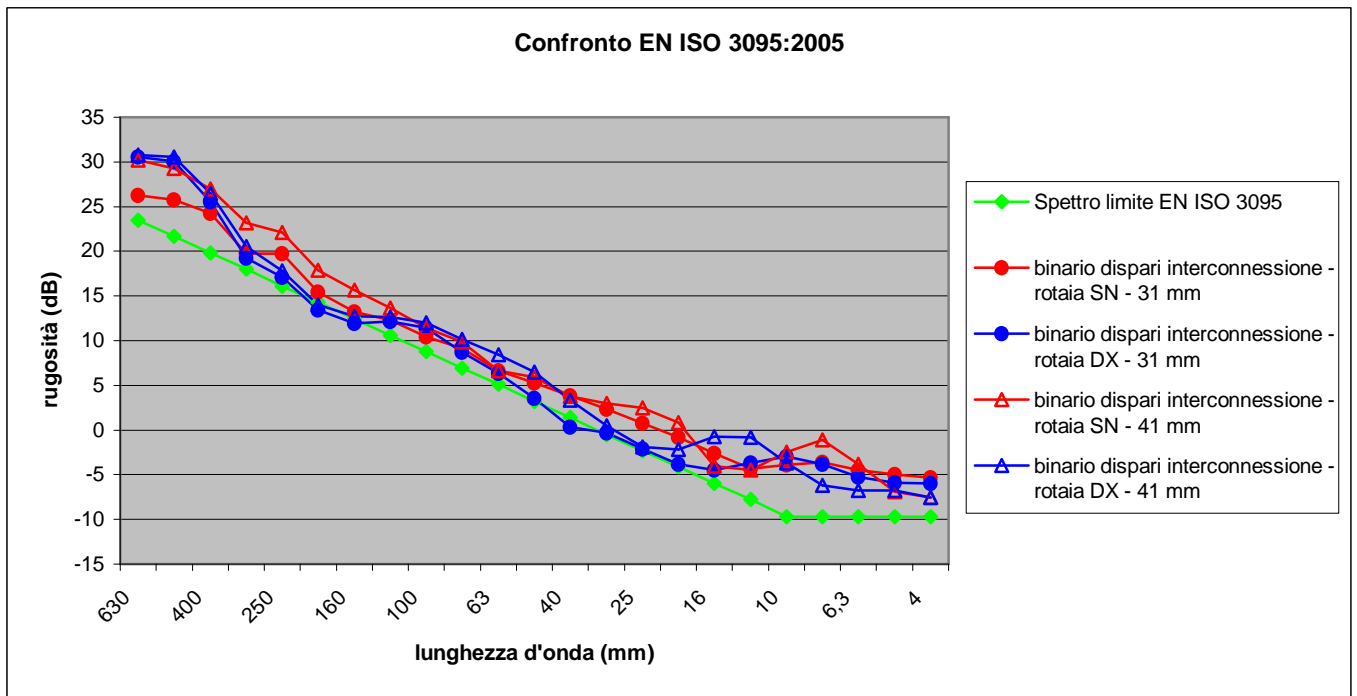


Spettro medio

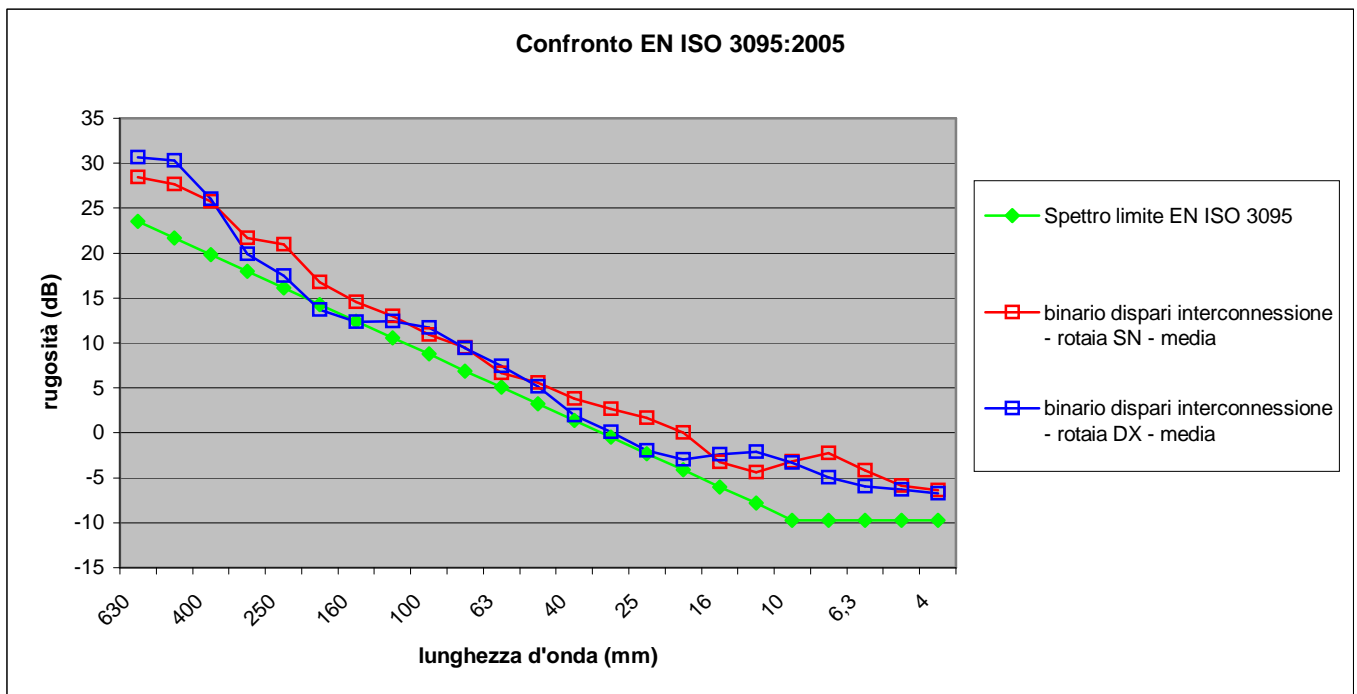


Interconnessione binario dispari alla distanza dal bordo di 31 e 41 mm nella running band

Singola rotaia diverse distanze nella running band

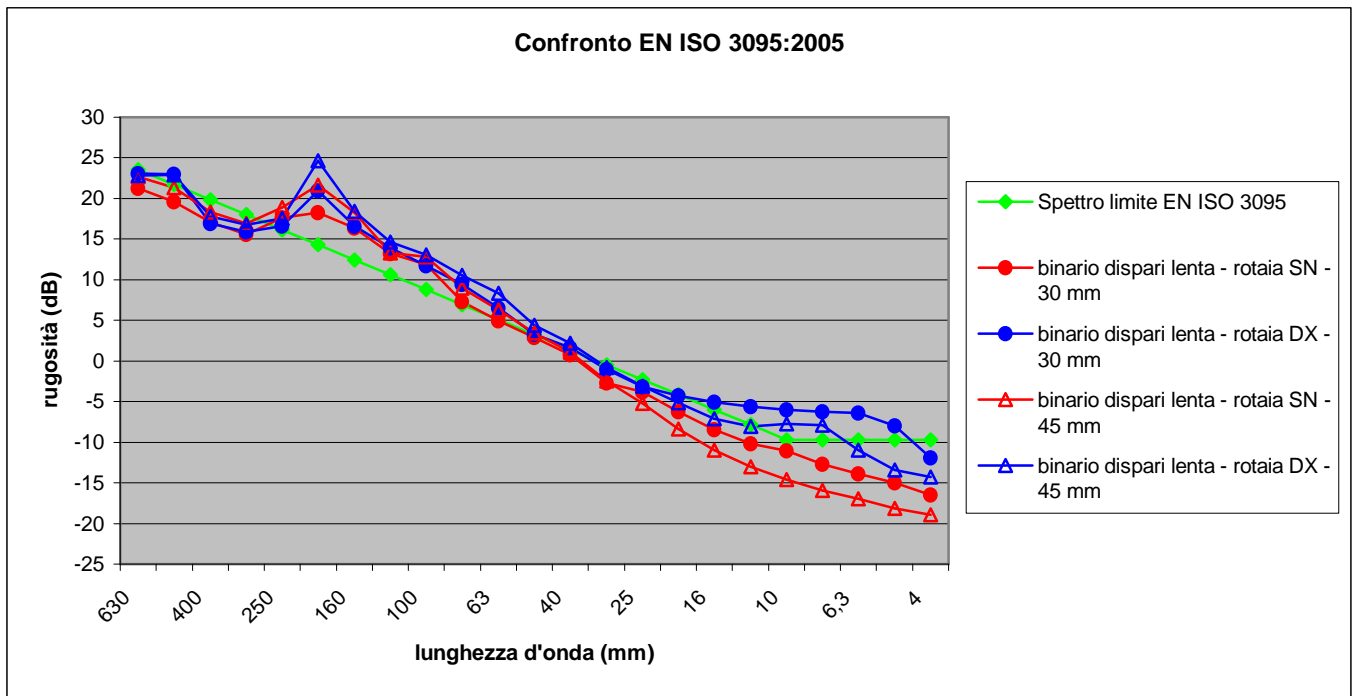


Spettro medio



Bivio Rovezzano dispari linea lenta alle distanze dal bordo di 30 e 45 mm nella running band

Singola rotaia diverse distanze nella running band



Spettro medio

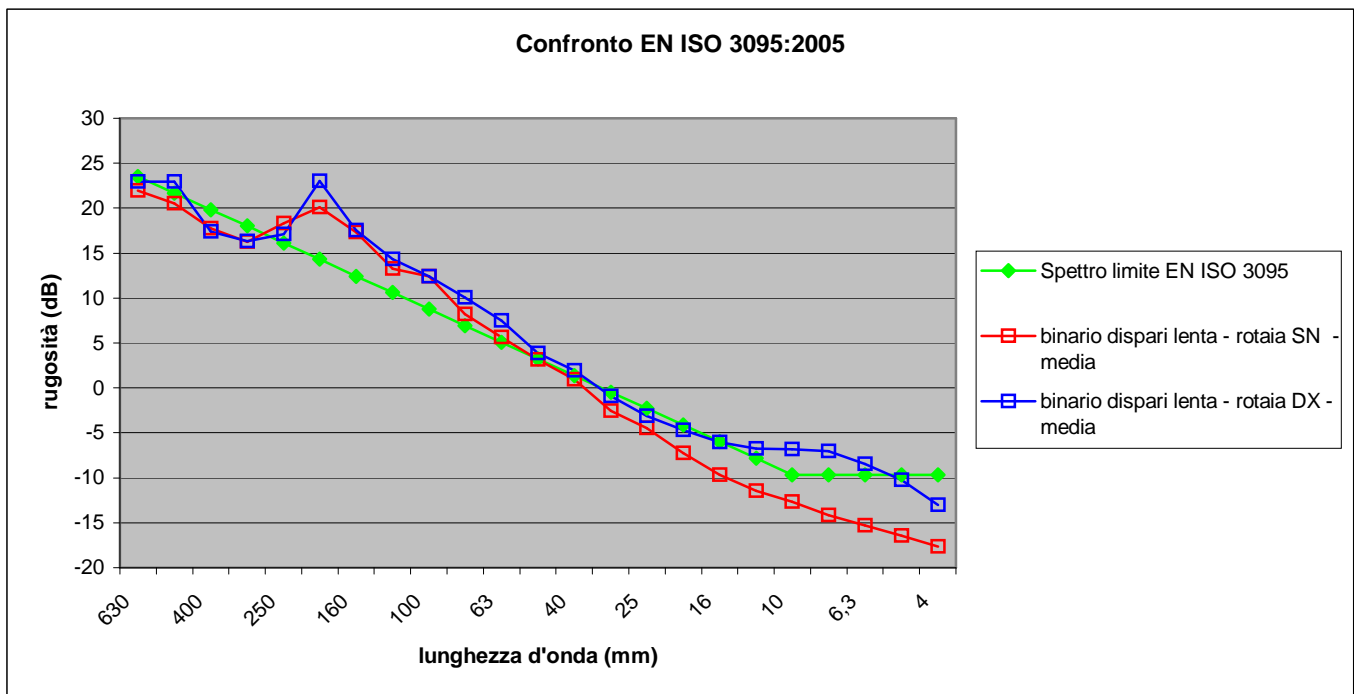


Tabella riassuntiva dell'indice r di rugosità media

<i>linea</i>	<i>rotaia</i>	<i>distanza nella running band (mm)</i>	<i>RMS RAW (μm)</i>	<i>RMS 30-300 mm (μm)</i>
Rovezzano - binario pari lento	SN	45	48,8	14
Rovezzano - binario pari lento	DX	45	49,1	13,2
Rovezzano - binario pari lento	SN	30	53,4	13,4
Rovezzano - binario pari lento	DX	30	64,1	19,8
Rovezzano - binario pari direttissima	DX	40	41,9	6,6
Rovezzano - binario pari direttissima	SN	40	50,8	6,3
Rovezzano - binario dispari interconnessione	SN	31	68,6	16
Rovezzano - binario dispari interconnessione	DX	31	79,4	14,9
Rovezzano - binario dispari interconnessione	SN	41	114,3	20,7
Rovezzano - binario dispari interconnessione	DX	41	75,1	17,6
Rovezzano - binario pari interconnessione	SN	33	75,7	19,1
Rovezzano - binario pari interconnessione	DX	33	68,9	17,5
Rovezzano - binario pari interconnessione	SN	43	65,3	18,2
Rovezzano - binario pari interconnessione	DX	43	69,8	16,5
Rovezzano - binario dispari lenta	SN	30	49,2	15,2
Rovezzano - binario dispari lenta	DX	30	58	16,8
Rovezzano - binario dispari lenta	SN	45	54,5	18,9
Rovezzano - binario dispari lenta	DX	45	55,9	22,1

LOC. S.SALVI

Descrizione del sito di misura

Il sito di misura è costituito dalla linea ferroviaria Firenze-Roma in località di “San Salvi”: sia la linea lenta (km 308+841) che la direttissima (DD) (km 255+798). Le misure sono state effettuate su tutti i 4 binari, per motivi di sicurezza nel tratto dove non sono installate le barriere antirumore. Il sito è interamente circondato da abitazione e il traffico è vario (Eurostar, intercity, regionali, merci e mezzi di servizio). La velocità rilevata non supera mai i 70 km/h in direzione Roma, mentre per la presenza di segnali di protezione della stazione di Firenze Campo di Marte in direzione Firenze, i convogli sono spesso fermi sul sito di misura, lo sviluppo del corrugamento dei binari è quindi ascrivibile in gran parte alle decelerazioni e accelerazioni del materiale rotabile.

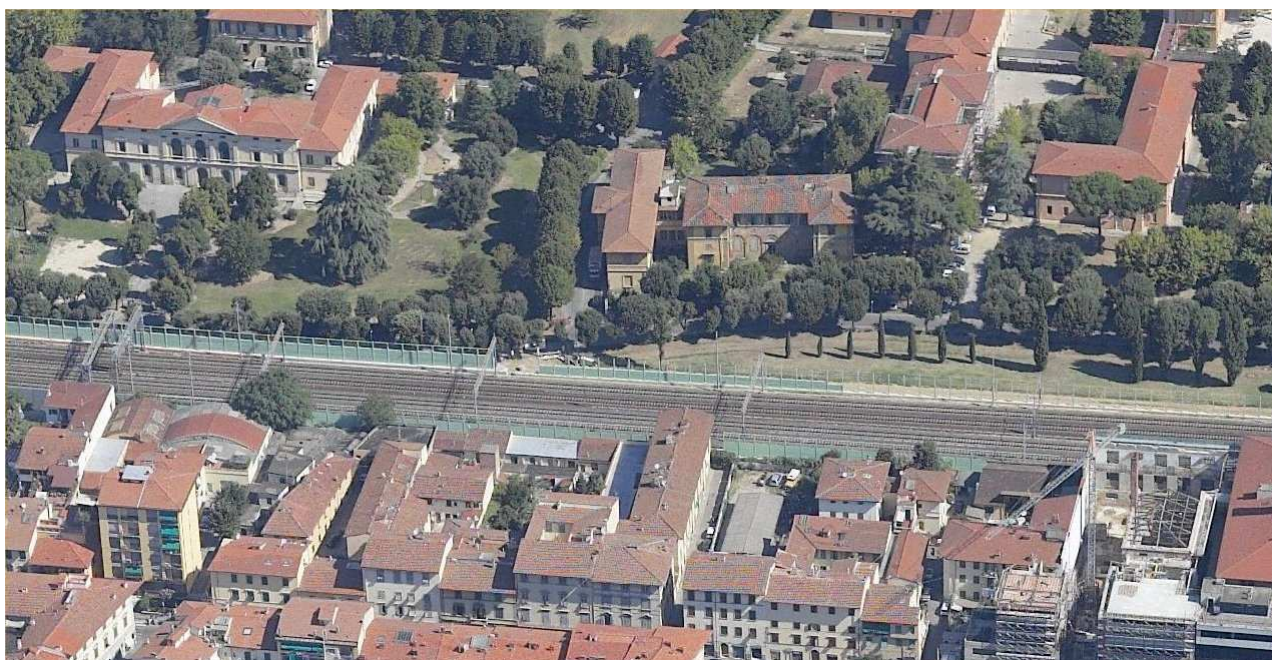


Figura 10. Panoramica del sito di misura si San Salvi.



Figura 11. Progressiva relativa alla linea lenta Firenze-Roma (a sinistra) e alla linea direttissima (a destra).

Tratti indagati

1. Binario dispari direttissima alle distanze dal bordo di 28, 33 e 38 mm nella *running band*; lunghezza del tratto m 100 (punto di misura P1).

2. Binario pari direttissima alle distanze dal bordo di 28, 33 e 38 mm nella *running band*; lunghezza del tratto m 100 (punto di misura P2).
3. Binario dispari lenta alla distanza dal bordo di 33 e 38 mm nella *running band*; lunghezza del tratto m 100 (punto di misura P3).
4. Binario pari lenta alla distanza dal bordo di 28, 33 e 38 mm nella *running band*; lunghezza del tratto m 100 (punto di misura p4).

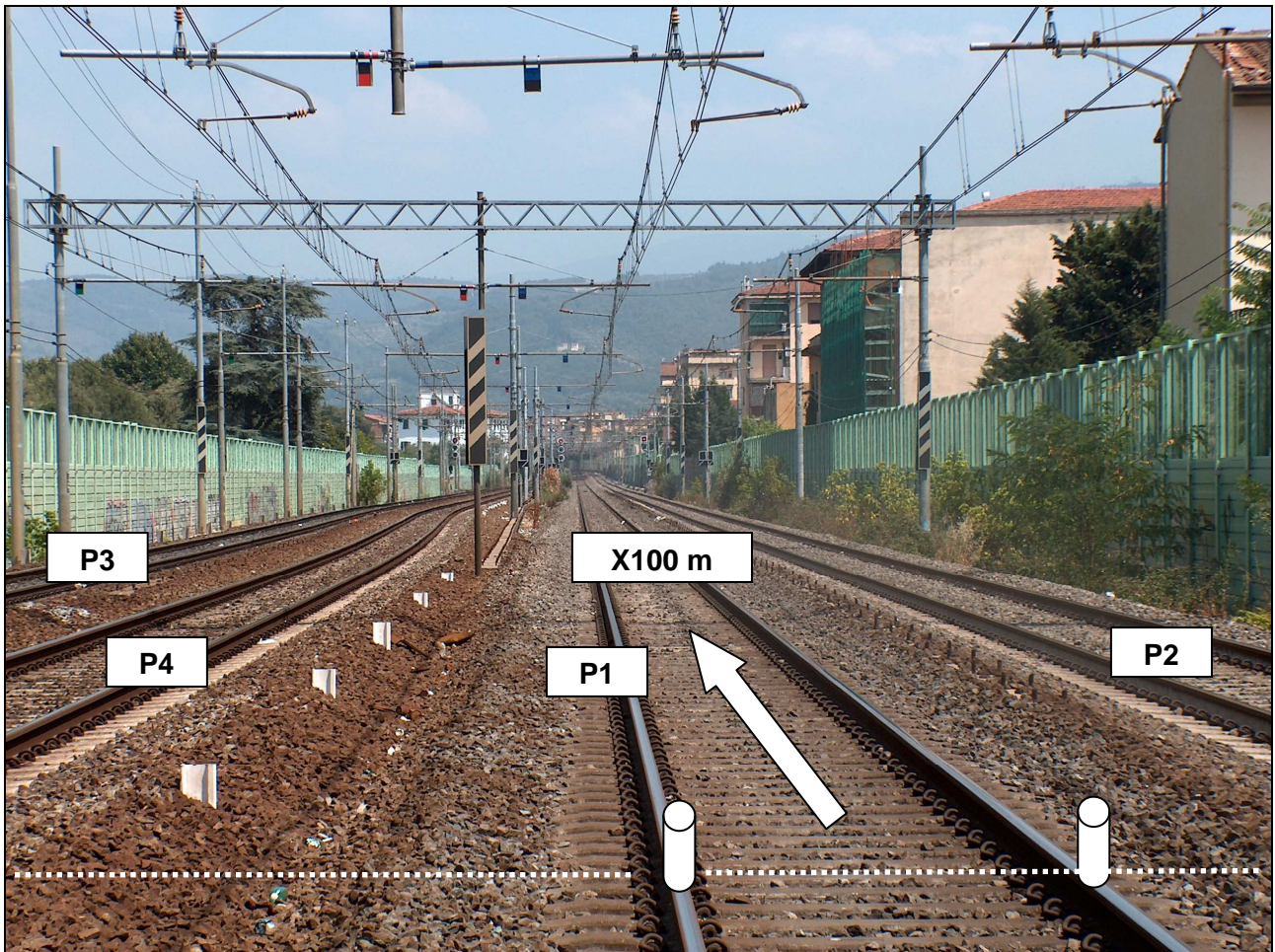
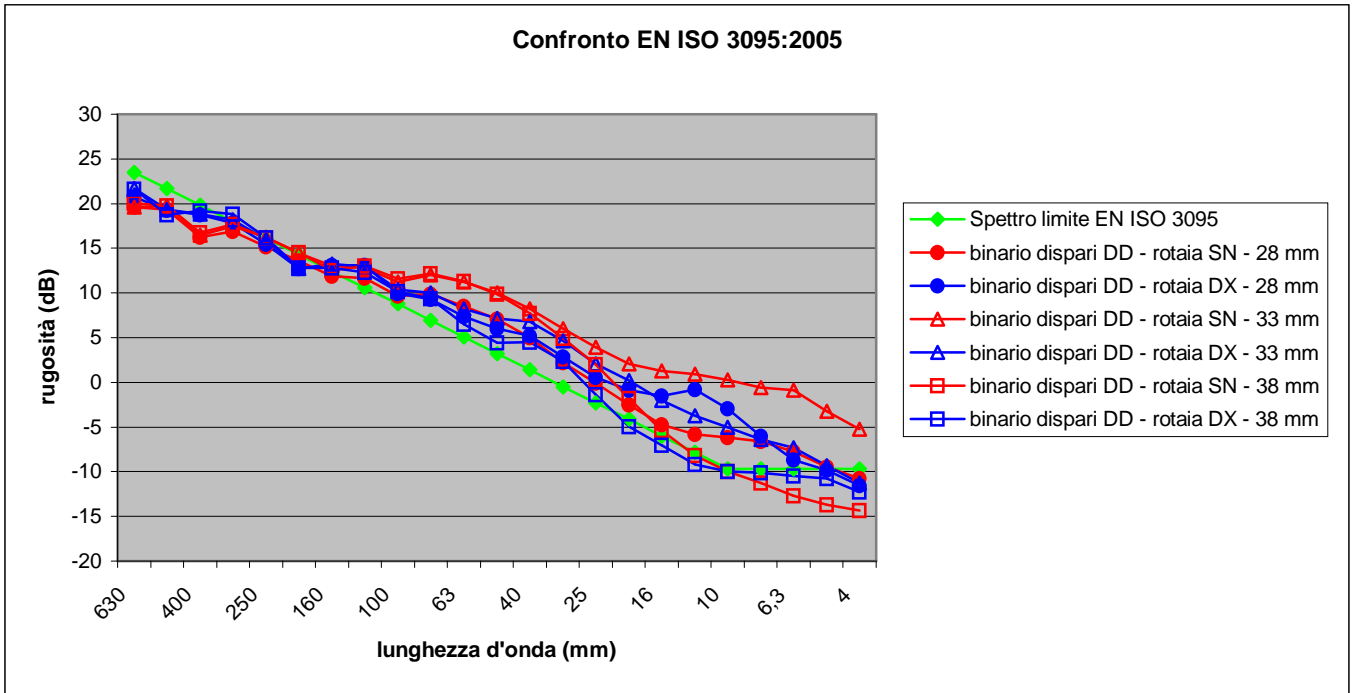


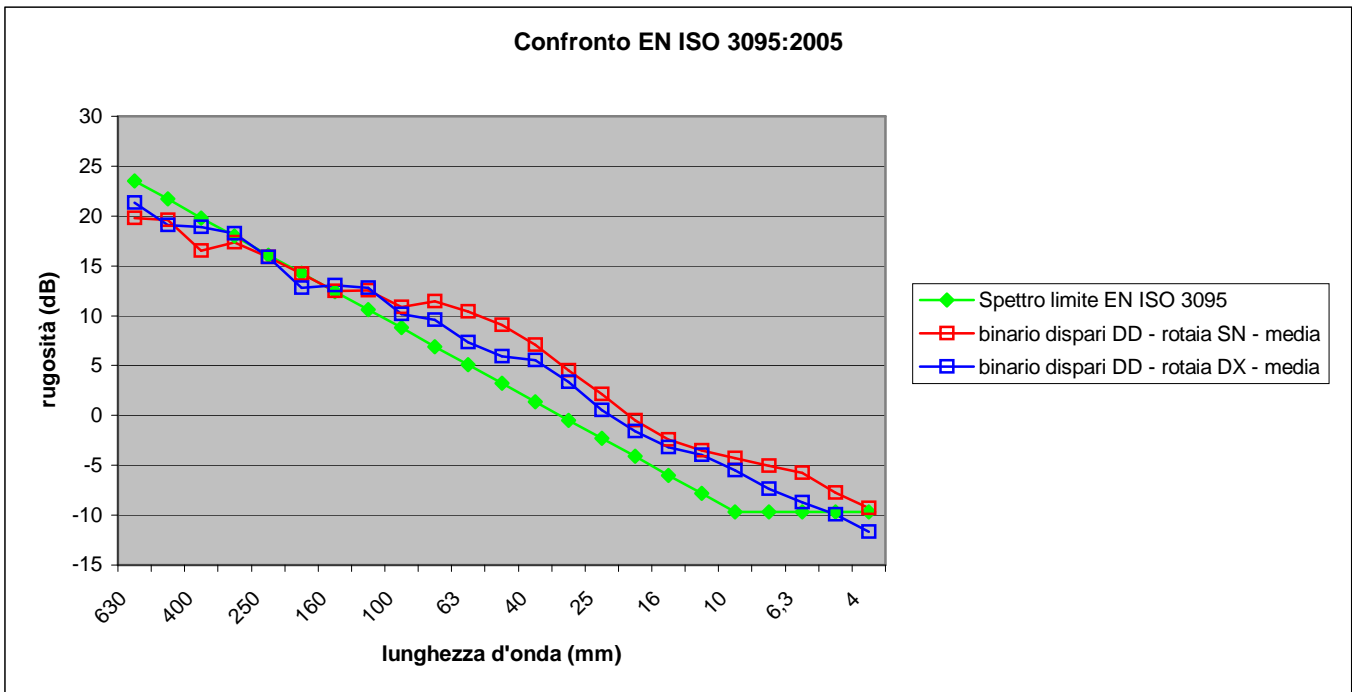
Figura 12. Inizio punti di misura e riferimenti.

Binario dispari direttissima alle distanze dal bordo di 28, 33 e 38 mm nella running band

Singola rotaia diverse distanze nella running band

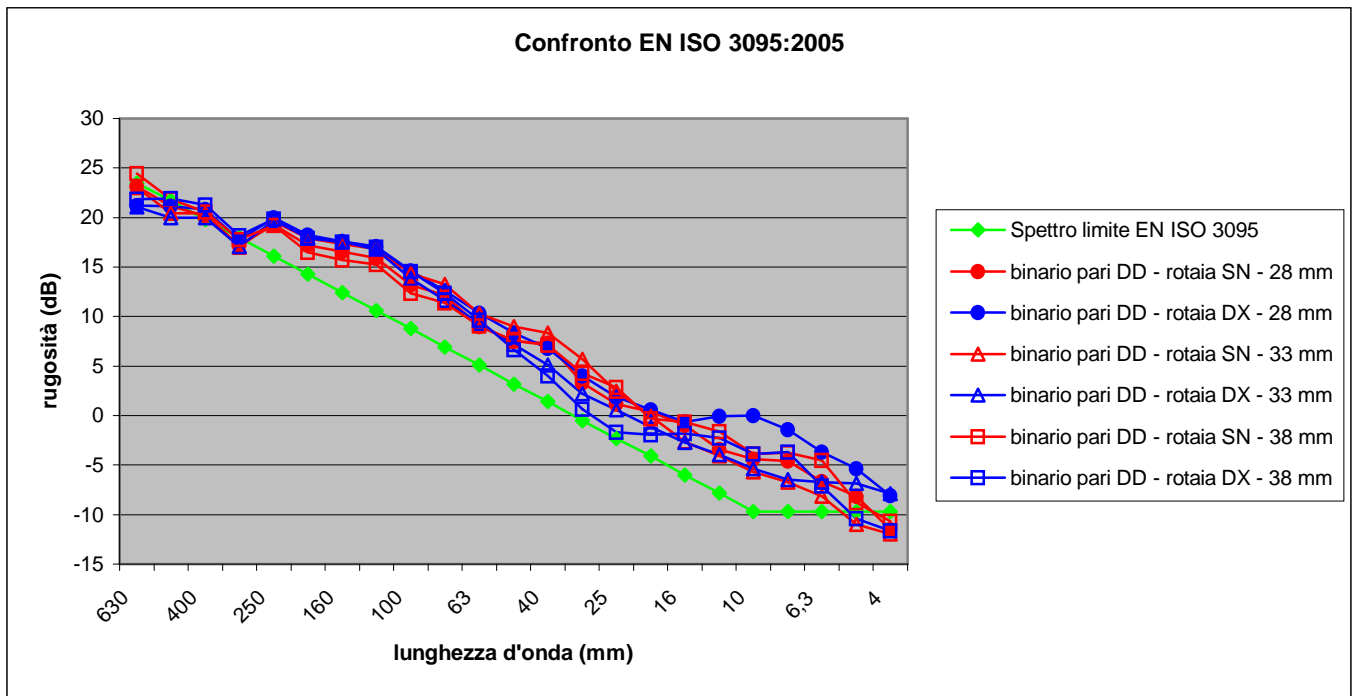


Spettro medio

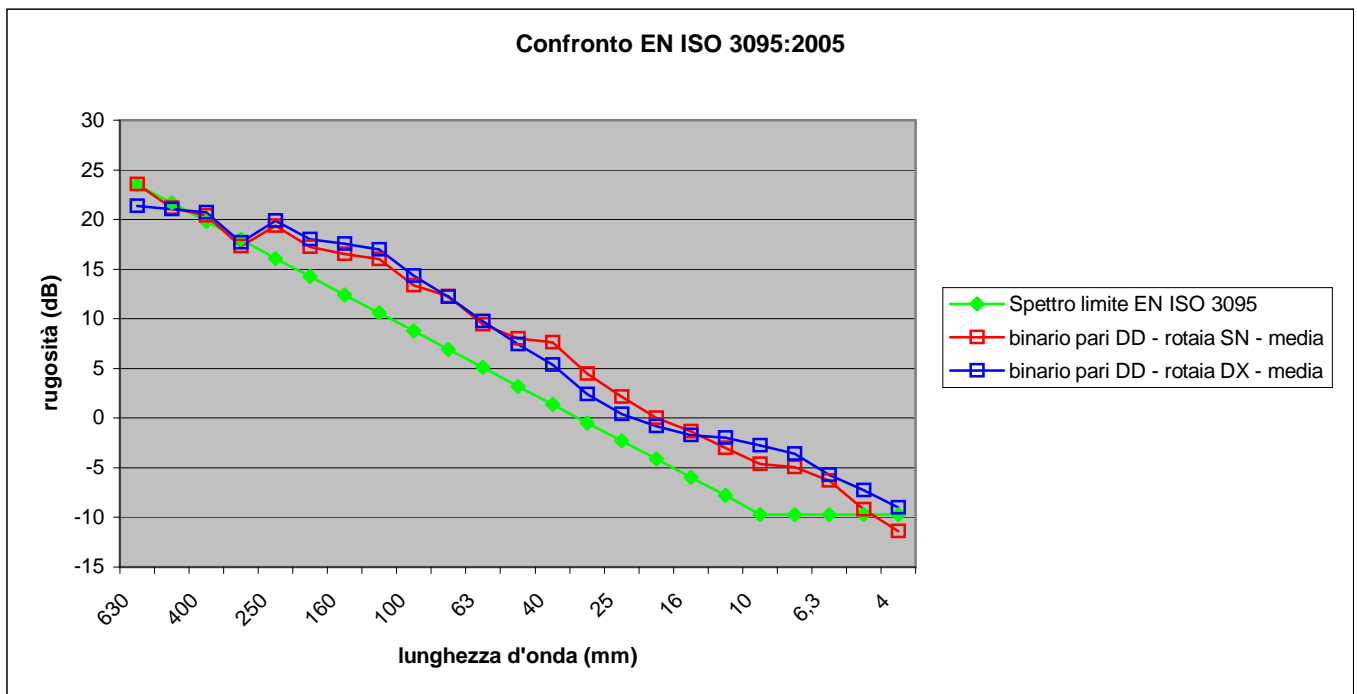


Binario pari direttissima alle distanze dal bordo di 28, 33 e 38 mm nella running band

Singola rotaia diverse distanze nella running band

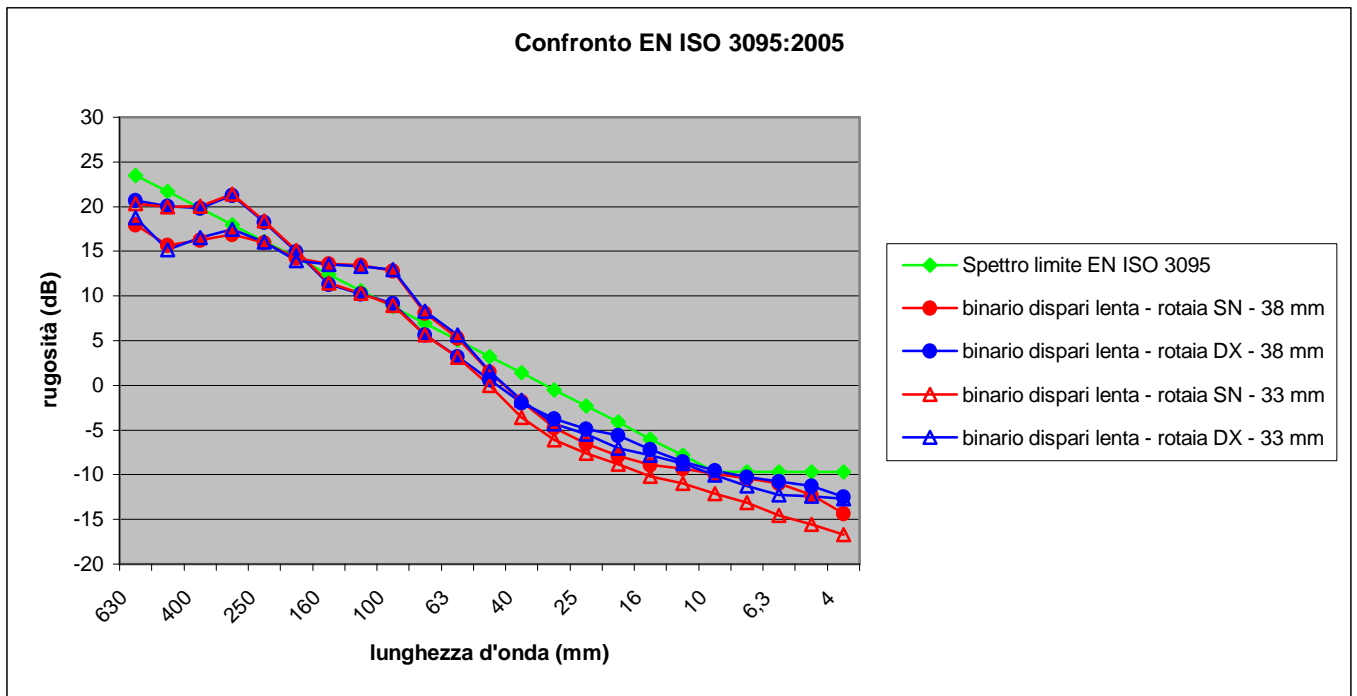


Spettro medio

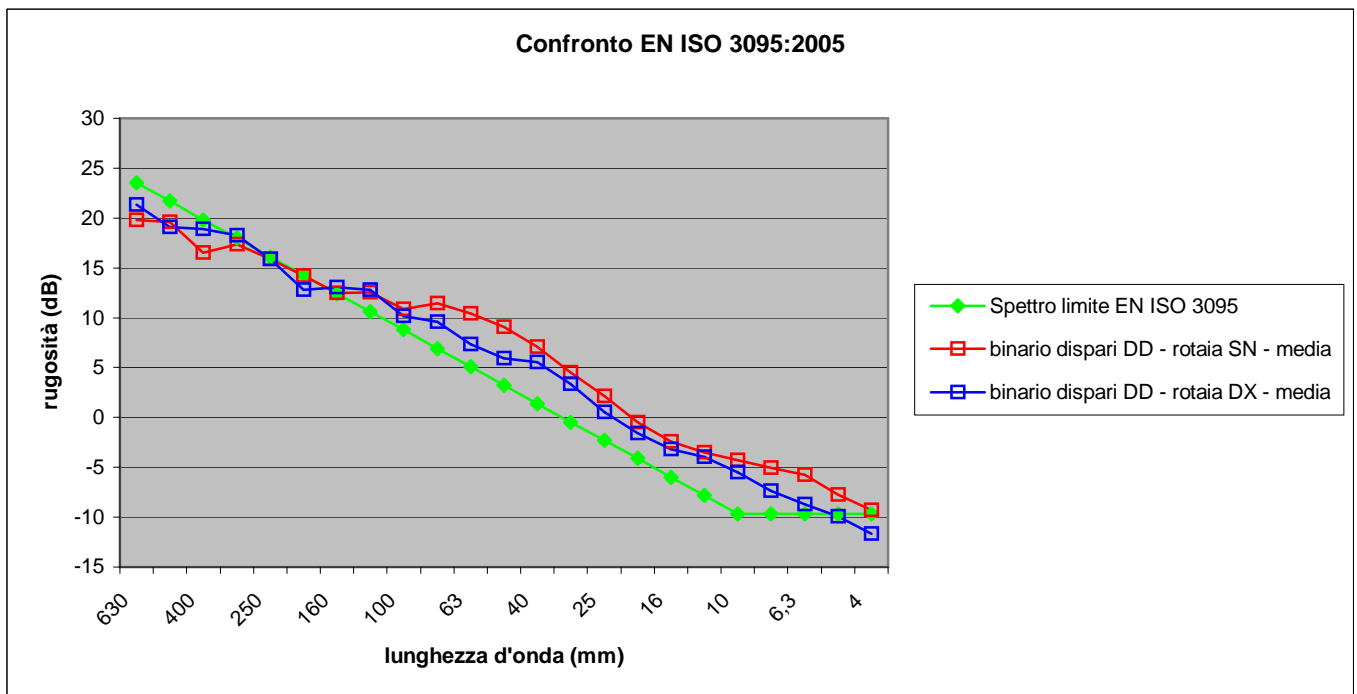


Binario dispari lenta alla distanza dal bordo di 33 e 38 mm nella running band

Singola rotaia diverse distanze nella running band

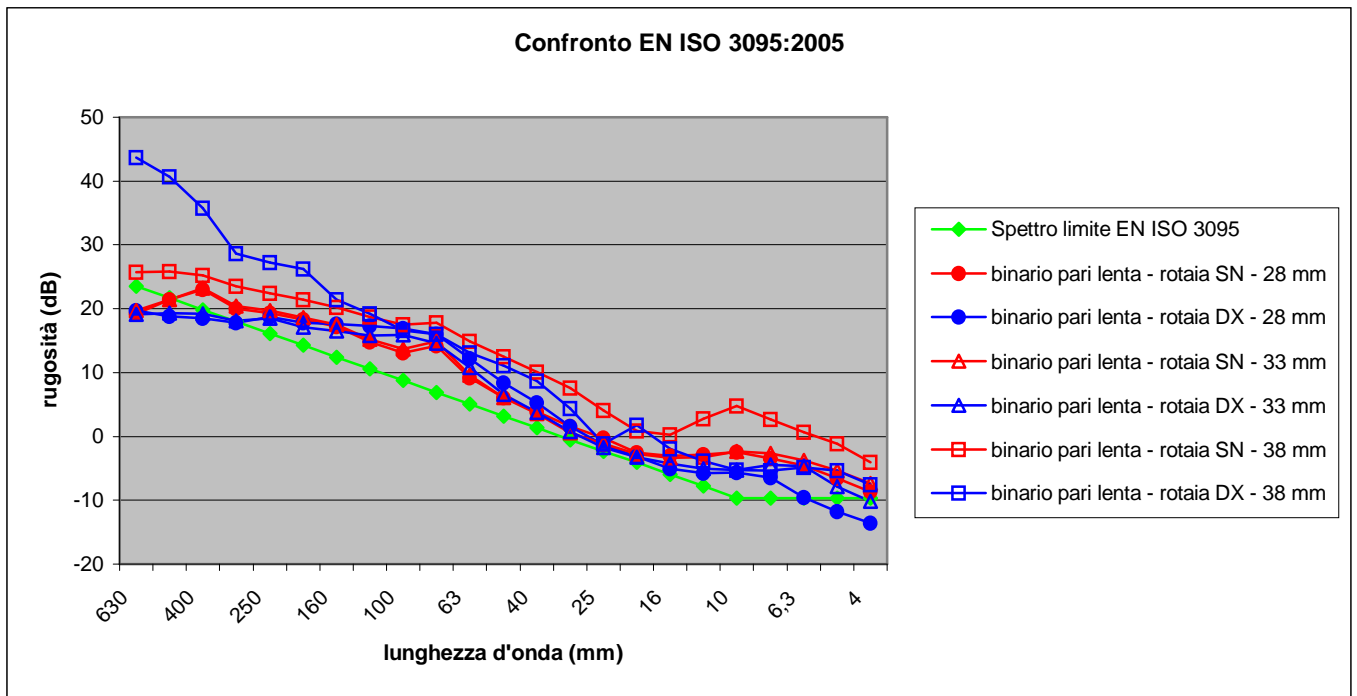


Spettro medio



Binario pari lenta alla distanza dal bordo di 28, 33 e 38 mm nella running band

Singola rotaia diverse distanze nella running band



Spettro medio

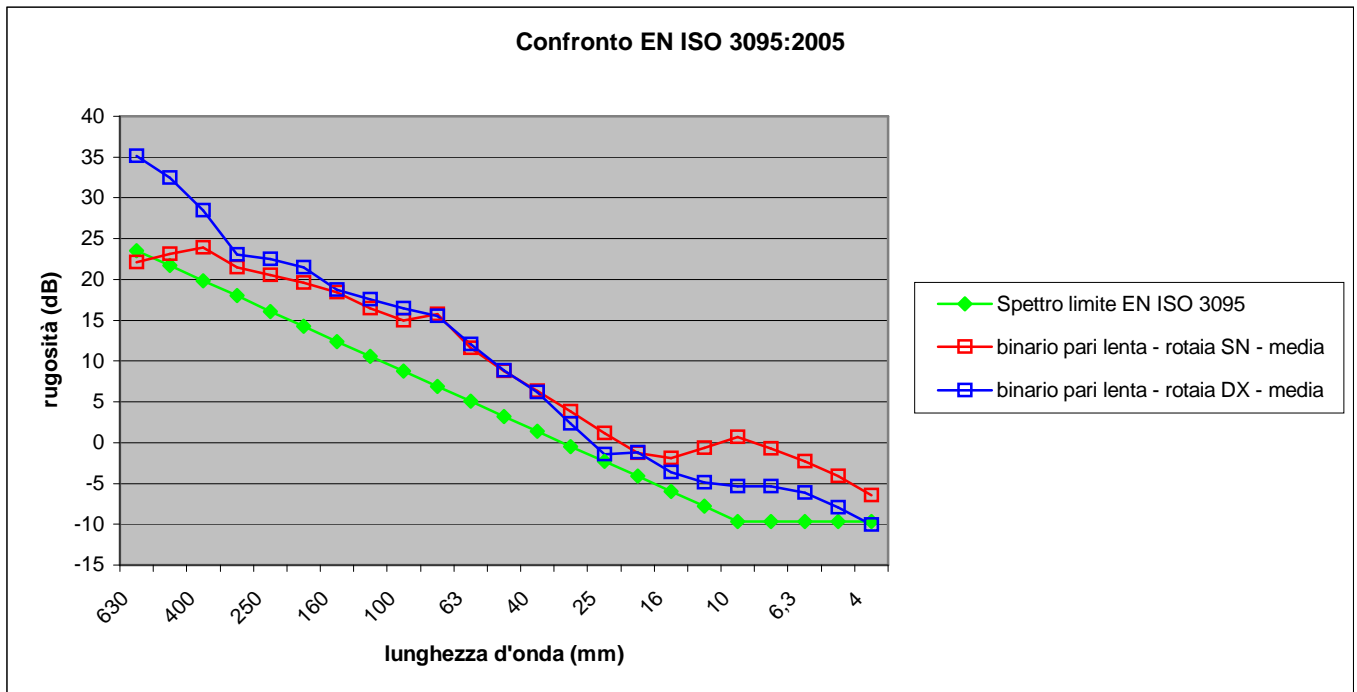


Tabella riassuntiva dell'indice r di rugosità media

<i>linea</i>	<i>rotaia</i>	<i>distanza nella running band (mm)</i>	<i>RMS RAW (μm)</i>	<i>RMS 30-300 mm (μm)</i>
San Salvi DD binario dispari	SN	28	43,6	12
San Salvi DD binario dispari	DX	28	43,2	13,4
San Salvi DD binario dispari	SN	33	52,4	14,2
San Salvi DD binario dispari	DX	33	46,4	14,2
San Salvi DD binario dispari	DX	38	46,8	13,8
San Salvi DD binario dispari	SN	38	44,3	14,1
San Salvi DD binario pari	SN	28	61,5	17
San Salvi DD binario pari	DX	28	58	19,2
San Salvi DD binario pari	SN	33	54,1	18,2
San Salvi DD binario pari	DX	33	50,8	18
San Salvi DD binario pari	SN	38	61,1	16,5
San Salvi DD binario pari	DX	38	55	18,5
San Salvi binario dispari lenta	SN	33	41,3	12,6
San Salvi binario dispari lenta	DX	33	46,2	13,8
San Salvi binario dispari lenta	SN	38	44,8	13,8
San Salvi binario dispari lenta	DX	38	41	12,8
San Salvi binario pari lenta	SN	28	50,3	18,3
San Salvi binario pari lenta	DX	28	45,9	19,1
San Salvi binario pari lenta	SN	33	52,8	19
San Salvi binario pari lenta	DX	33	52	17,4
San Salvi binario pari lenta	SN	38	85,1	27,4
San Salvi binario pari lenta	DX	38	315,2	46,3

Misura della rugosità della rotaia: Conclusioni

È stato valutato il corrugamento della rotaia in tre siti, accessibili, individuati in accordo con la direzione di RFI e rappresentativi delle situazioni più comuni nella tratta toscana della rete ferroviaria. In particolare sono stati indagati alcuni tratti di binario della linea direttissima, la linea lenta (FI-RM), e i binari di interconnessione presso Firenze Statuto.

Lo stato di rugosità della rotaia, in assenza di ulteriori valutazioni sul tipo di traffico e dello stato delle ruote dei treni che transitano sulle linee, risulta non essere particolarmente elevato. Rimane inteso che le campagne di misura “fotografano” la situazione in un preciso lasso temporale e che la rugosità tende naturalmente a incrementarsi con un *rate* dipendente fortemente dal tipo di traffico circolante a parità delle caratteristiche dinamico-meccaniche dei supporti della rotaia stessa.

Le misure effettuate in località *San Salvi* presso Firenze Statuto hanno permesso di evidenziare come il solo intervento di molatura, che potrebbe essere effettuato nella situazione presente, non garantirebbe, a questo livello di indagine, un sensibile decremento del rumore di rotolamento, anche in considerazione della non elevata velocità dei treni nel tratto considerato.

Analogamente il livello di corrugamento dei binari in località *Rovezzano* non risulta essere ad oggi elevato e tale da poter considerare efficace la *sola* molatura dei binari per la riduzione del rumore ferroviario.

In località Firenze-Statuto è evidente un maggiore corrugamento delle rotaie: si ricorda, comunque, come il sito sarà oggetto di risanamento utilizzando barriere acustiche (Codice Intervento 048017070 previsto al III e IV anno).

La scarsità di informazioni sul materiale rotabile e sullo stato delle ruote dei convogli transitanti nei siti indagati non permettono conclusioni risolutive sull'efficacia di soli interventi di molatura.

È auspicabile un monitoraggio nel tempo dello stato delle rotaie indagate analizzando nel contempo i dati di traffico e stato del materiale rotabile che permetterebbe un confronto con analoghe ricerche a livello europeo mirate sia a descrivere statisticamente lo stato delle linee ferroviarie, individuando termini correttivi per i programmi di simulazione dell'impatto acustico del trasporto ferroviario, sia a mettere a punto strategie di riduzione del rumore complementari o alternative alla posa di barriere acustiche da proporre e discutere con RFI.

Ringraziamenti

Si ringrazia il personale di RFI per la disponibilità dimostrata nel corso delle sessioni di misura coadiuvando i tecnici ARPAT Canarini Daniele, Carmagnini Andrea, Cerchiali Mauro, Simonetti Duccio e Vasarelli Fabio, laureando della Facoltà di Ingegneria di Pisa, e in particolare il Direttore Angelo Pezzati.

ARPAT

Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale della Toscana
Settore Tecnico Promozione e produzione delle attività e dei servizi

50144 FIRENZE via N. Porpora, 22
Tel 055 32061 - Fax 055 3206324

Riduzione del rumore ferroviario: possibili soluzioni alla sorgente

Il CTP Fisico

Dott. Diego Palazzuoli

Il Responsabile del Settore Tecnico Promozione e
produzione delle attività e dei servizi

Dott. Gaetano Licitra



Indice

Indice	2
Introduzione	3
Le principali sorgenti di rumore ferroviario.....	5
Rumore di rotolamento	6
Rumore impattivo	7
Squeal noise.....	7
Principali meccanismi di controllo del rumore	7
Sistemi di mitigazione del rumore ferroviario alla sorgente disponibili sul mercato europeo .	8
Soluzioni di mitigazione diretti alla ruota	8
Soluzioni di mitigazione diretti alla rotaia	10
Soluzioni di riduzione dello <i>squeal noise</i>	11
Analisi dei risultati.....	13
Riferimenti.....	14

Introduzione

Il controllo e la gestione del rumore generato dalle infrastrutture di trasporto si delinea sempre più come una delle principali sfide e priorità per le amministrazioni locali, sia per le evidenze scientifiche degli effetti sanitari e sociali [1, 2] sia per il costante interesse del cittadino anche in un'ottica di una corretta informazione ambientale.

Una delle sorgenti di rumore principali in ambito urbano è rappresentato dalle infrastrutture di trasporto su gomma e su rotaia.

Il Decreto Ministeriale 29.11.2006 all'interno delle azioni previste dalla L. 447/95 per la protezione dei cittadini e dell'ambiente dal rumore, prevede che i gestori di servizi pubblici di trasporto e delle relative infrastrutture individuino le aree dove per effetto delle infrastrutture stesse si abbia un superamento dei limiti previsti e presentino opportuni piani di contenimento e abbattimento del rumore prodotto. Il Decreto fissa inoltre le priorità di intervento finalizzate al risanamento (art. 5) indicando come primarie le azioni effettuate direttamente alla sorgente come del resto indicato dalle politiche europee anche nell'ottica di un programma di sviluppo del traffico sui rotaia per la riduzione delle emissioni inquinanti [3].

In ottemperanza a quanto previsto dal DM 29/11/2000 Rete Ferroviaria Italiana (RFI) ha presentato nell'aprile 2004 al Ministero dell'Ambiente e agli organismi regionali competenti il Piano di Risanamento Acustico.

La Conferenza Unificata (Repertorio atti n. 757/CU del 1 luglio 2004) ha espresso parere favorevole all'intesa sul Piano degli interventi di contenimento e abbattimento del rumore ferroviario presentato da RFI condividendo gli interventi di mitigazione passiva per il primo quadriennio a partire dal 2004 sottolineando però il fatto che tali interventi venissero dimensionati **“anche in funzione delle riduzioni alla sorgente da ottenere nel medio-lungo termine sia con interventi sul binario, che sul materiale rotabile (art. 5 c. 3 DM 29/11/2000)”**. Al termine del primo quadriennio il Piano e il relativo riparto finanziario dovranno essere rivisti sulla base delle esperienze maturate, degli approfondimenti tecnici e di analisi territoriali effettuate nonché di **esperienze di mitigazione alla sorgente**.

Dopo la presentazione del Piano proposto da RFI, la Regione Toscana ha dato mandato ad ARPAT di esaminare tecnicamente il Piano stesso con particolare riferimento alla valutazione dei possibili interventi alternativi alle barriere d'intesa con quanto previsto dall'intesa presso la Conferenza Unificata del 1 luglio 2004 (Delib. Consiglio Regionale 23 novembre 2004, n. 155).

Nel luglio 2004 ARPAT ha presentato alla Regione Toscana le *“Osservazioni al Piano degli interventi di contenimento e abbattimento del rumore ai sensi del DM Ambiente 29/11/00 presentato da RFI”* in cui si forniva una descrizione dei possibili metodi di riduzione del rumore alla sorgente alternativi alle barriere e la relativa efficacia.

Il presente rapporto, all'interno delle attività previste dalla "Convenzione tra Regione Toscana e l'Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale (ARPAT) per la realizzazione di uno studio di approfondimento del piano di risanamento di RFI con particolare riferimento a possibili interventi alternativi alle barriere" stipulata in data 08/08/2005, intende presentare le attuali possibili tecniche di mitigazione de rumore alla sorgente e la relativa letteratura tecnica necessaria per una valutazione oggettiva dei prodotti presenti sul mercato europeo.

L'individuazione delle possibili tecniche di mitigazione alla sorgente disponibili sul mercato europeo, è frutto di un indagine conoscitiva presso le aziende fornitrici a livello europeo attraverso la richiesta di materiale tecnico/informativo e incontri con le ditte fornitrici stesse.

Sono allegati al presente rapporto, gli atti del workshop internazionale RAILNOISE 2006 "Railway noise in urban areas: possible source noise reduction measures" che ha visto riuniti a Pisa nei giorni 9 e 10 novembre 2006 i maggiori esperti europei sulle tematiche della riduzione del rumore ferroviario alla sorgente, componenti della Commissione Europea, ricercatori, aziende produttrici di sistemi di mitigazione e i gestori delle infrastrutture ferroviarie e materiale rotabile.

Le principali sorgenti di rumore ferroviario

È possibile individuare le principali sorgenti di rumore ferroviario in:

- motore e sistemi di raffreddamento
- interazione ruota/rotaia
- rumore aerodinamico.

L'intensità relativa del rumore prodotto dalle varie sorgenti dipende dalla velocità del treno, in particolare:

- il rumore prodotto dai motori e dai sistemi di raffreddamento è preponderante fino a circa 60 km/h;
- interazione/ruota rotaia fino a velocità dell'ordine di 280-330 km/h;
- rumore aerodinamico per velocità superiori a 300 km/h.

Nella Figura 1 è schematicamente rappresentata l'intensità relativa delle singole sorgenti di rumore e la dipendenza dalla velocità [3].

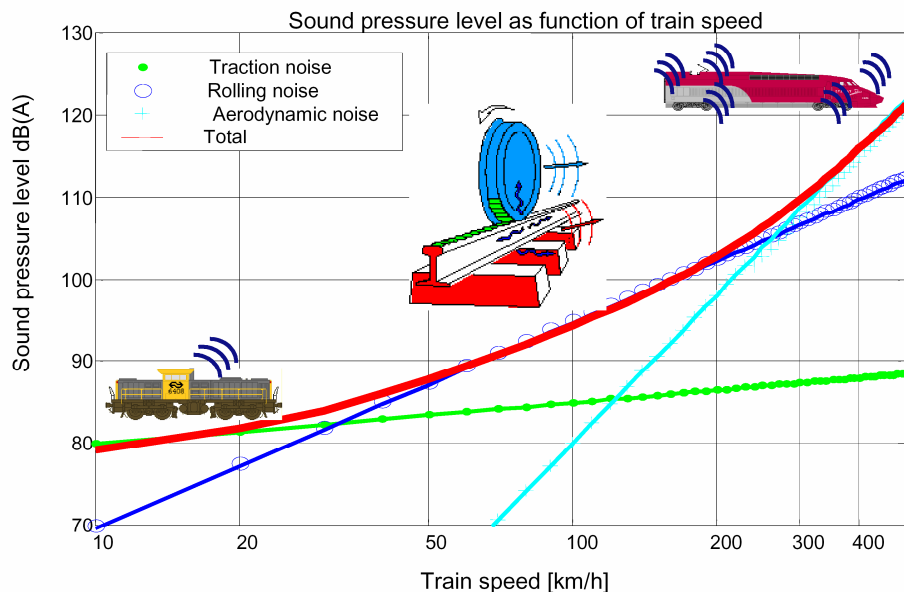


Figura 1. Andamento del rumore ferroviario in funzione della velocità del treno. È evidente la diversa dipendenza delle singole sorgenti dalla velocità del treno [3].

I sistemi di mitigazione indagati nel presente report si riferiscono solo al rumore prodotto dall'interazione ruota/rotaia, in particolare:

- rumore di rotolamento dovuto alle asperità delle superfici di contatto;
- rumore impattivo generato da imperfezioni macroscopiche sulle superficie della ruota o della rotaia;

- *squeal noise* (stridio) generato in curva.

Nelle successive sezioni si riportano per completezza le caratteristiche delle singole tipologie di rumore per poi passare ad una panoramica delle possibili soluzioni alla sorgente proposte sul mercato europeo.

Rumore di rotolamento

Il “normale” rumore di rotolamento è dovuto essenzialmente alla rugosità della ruota e della rotaia, al brusco cambiamento del modulo elastico locale o della rigidità del supporto del binario. Generalmente una riduzione del normale rumore di rotolamento, considerato come il livello massimo da raggiungere attraverso gli altri sistemi di mitigazione, è raggiungibile montando schermi (*skirts*) ai lati del materiale rotabile, installando un adeguato materiale fonoassorbente sulla parte inferiore del treno (riduzioni dell'ordine di 2 dB) o montando ruote con smorzatori (-2dB).

L'aumento del rumore di rotolamento è dovuto essenzialmente ad un'eccessiva rugosità delle superfici della ruota e della rotaia. Il meccanismo di formazione della rugosità, ad oggi, risulta ancora non ben compreso.

Le azioni che possono essere intraprese per la riduzione e il controllo del rumore da rotolamento sono principalmente:

- la molatura della rotaia
- riprofilatura della ruota
- modifica del coefficiente di frizione tra ruota e rotaia
- ottimizzazione del veicolo (riduzione del disallineamento, ad esempio)
- selezione di materiale opportuno per la rotaia [5]
- impiego materiali resilienti a supporto della rotaia.

La molatura (ordinaria o acustica) risulta essere la misura più efficace e utilizzata per la rimozione della rugosità esistente. Inoltre, la molatura preventiva dei nuovi binari in fase di installazione rallenta la formazione della rugosità stessa [6]. La molatura della rotaia, ipotizzando una ruota liscia, permette una riduzione del rumore fino a 3 dB e oltre nel caso di rotaie altamente corrugate.

Le limitazioni fondamentali per l'implementazione di programmi di molatura della rotaia risiedono principalmente negli alti costi della strumentazione, del personale impiegati e nei tempi di chiusura della linea. È comunque evidente come un monitoraggio della rugosità, in tratti di linea che interessano centri abitati o che scorrono in prossimità siti particolarmente esposti, potrebbero portare a interventi mirati con una sostanziale riduzione dei costi.

Rumore impattivo

Il *rumore impattivo* rientra nella più generale categoria del rumore da rotolamento e si genera in presenza di accentuate asperità sulla superficie della ruota e/o della rotaia. In assenza di giunti saldati o discontinuità tra singole spezzoni di rotaia, tale rumore è dovuto al corrugamento della rotaia stessa: la molatura essere anche in questo caso il metodo più efficace per la riduzione del rumore impattivo raggiungendo un'efficacia di addirittura -10 dB.

Squeal noise

Lo *squeal noise* è rilevante e localizzato soltanto in presenza di curve. I meccanismi di generazione di tale rumore sono identificabili in:

- stretto raggio di curvatura
- velocità del treno
- geometria e dinamica dell'interazione ruota rotaia.

Il tipico "stridio" è causato da localizzate e ripetute perdite di aderenza della ruota che "striscia" sulla superficie della rotaia.

Il controllo di tale rumore, oltre che sul cambiamento delle condizioni geometriche della linea e della superficie di contatto ruota rotaia, si basa sull'impiego di liquidi (acqua, ad esempio) spruzzati opportunamente sulla superficie della rotaia o della ruota [7].

Principali meccanismi di controllo del rumore

Per poter mitigare il rumore alla sorgente è possibile intervenire direttamente sul **meccanismo di generazione**, oppure riducendo l'**efficienza di radiazione** dei singoli componenti (ruota, rotaia, ballast...). Tra i principali metodi che diminuiscono l'efficienza di radiazione ricordiamo:

- il controllo dei modi di vibrazione della ruota [8];
- smorzamento della vibrazione della ruota [9, 10];
- smorzamento dei modi di vibrazione della rotaia [11, 12].

Impiegando smorzatori alla ruota e alla rotaia si ottengono riduzioni di livello di rumore fino a 7-8 dB(A).

Sistemi di mitigazione del rumore ferroviario alla sorgente disponibili sul mercato europeo

All'interno della convenzione tra ARPAT e Regione Toscana citata in precedenza, è stata effettuata un'indagine conoscitiva su 20 aziende leader europee richiedendo informazioni tecnico/commerciali e materiale documentale scientifico sui prodotti commercializzati e i relativi costi di implementazione.

Nelle sezioni successive si riportano dati di letteratura, dove presente, o ricavati dal materiale informativo delle singole aziende relativi ad alcune soluzioni di mitigazione ad oggi già disponibili. Dal momento che questo rapporto tecnico mira a individuare le soluzioni presenti sul mercato, si rende necessario presentare i singoli prodotti forniti dalle aziende e non solo una panoramica generale sull'efficacia dei vari sistemi, peraltro già presente nella letteratura scientifica prodotta in questi anni sull'argomento.

Soluzioni di mitigazione diretti alla ruota

Il metodo impiegato consiste nello smorzamento dei modi propri della ruota, è efficace al di sopra dei 40-50 km/h e la riduzione di rumore ottenibile può raggiungere mediamente i 4 dB(A). L'impiego di ruote smorzate, in alcuni casi, permette di ridurre di gran lunga lo *squeal noise*.

Le aziende che hanno risposto alla richiesta di informazioni e materiale tecnico sui prodotti sviluppati sono:

1. Lucchini Sidermeccanica
2. Valdunes
3. Icerbrakes
4. Schrey & Veit GmbH

Lucchini Sidermeccanica ha sviluppato due diversi prodotti: *Syope®* low noise wheels (ruote standard con applicato un materiale viscoelastico, Fig. 2) e *Galene®* (ruote con assorbitori in acciaio e materiale polimerico).

L'effetto smorzante è ottenuto sulle ruote *Syope®*, impiegando un foglio di alluminio o acciaio fissato alla ruota attraverso un biadesivo viscoelastico sviluppato da 3M. L'applicazione di tale smorzatore non necessita di modifiche alla ruota e ne incrementa il peso di circa 3,5-9 kg.

Dai dati di letteratura forniti [13, 14, 15, 16] l'impiego di ruote silenziate del tipo *Syope®* può portare ad una diminuzione da 4 a 5 dB(A) del rumore prodotto. I dati forniti provengono da una campagna di misura in condizioni standard (7,5 m dall'asse del binario a 1,2 m dal livello del terreno) del rumore prodotto da un ETR500 a velocità di percorrenza tra 200 e 300 km/h. Test di laboratorio riportano una riduzione fino a 6 dB(A) nelle bande tra 1,6 e 2,5 kHz a 290 km.

L'abbattimento dello *squeal noise* è documentato da misure effettuate presso la Circumvesuviana di Napoli nel luglio 2001.

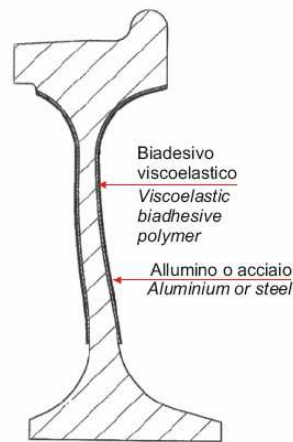


Figura 2. Lo strato viscoelastico è applicato sul bordo della ruota (dalla brochure Lucchini Syope®).

Galene® è la soluzione proposta da Lucchini per i carri merci; utilizza smorzatori modulari accordabili a diverse frequenze. I dati forniti da Lucchini presentano un abbattimento del rumore di rotolamento di 3 dB(A) ad una velocità di 90 km/h e una riduzione dello *squeal noise* fino a 13 dB(A) a 20 km/h.

Valdunes produce ruote silenziate e smorzatori specifici a seconda della velocità di percorrenza e la tipologia di treno sul quale applicarli. Riguardo l'efficacia dei sistemi prodotti dai dati forniti [17, 18, 19], si ricava:

- Impiego di ruote silenziate o smorzatori su metro e treni a bassa velocità di esercizio (50-100 km/h): riduzione dello *squeal noise* fino a 10-15 dB(A), impiegando smorzatori ad anello singoli o doppi;
- Treni passeggeri e merci a media velocità di esercizio (100-150 km/h): riduzione del rumore di rotolamento utilizzando sistemi smorzanti modulari su materiale rotabile con *composite brake blocks* fino a 4-5 dB(A);
- Treni ad alta velocità (150-300 km/h): ottimizzando la geometria delle ruote e impiegando schermi, smorzatori accordati e assorbitori acustici la riduzione del rumore arriva fino a 4-7 dB(A).

Icerbrakes mira a introdurre sul mercato freni di tipo LL capaci di ridurre il rumore di rotolamento, dovuto alla formazione del corrugamento della ruota, fino a 8-10 dB(A).

Sistemi smorzanti applicabili alle ruote sono prodotti anche dalla *Schrey & Veit GmbH* arrivando valori di riduzione del rumore intorno a 8 dB(A).

Soluzioni di mitigazione diretti alla rotaia

I principali interventi rivolti alla rotaia sono individuabili in:

- Molatura di mantenimento e molatura acustica della rotaia;
- Riduzione dell'efficacia di radiazione della rotaia attraverso l'impiego di smorzatori.

Hanno risposto all'indagine condotta da ARPAT 8 aziende europee leader nel settore della produzione di sistemi di mitigazione o fornitura di servizi per la riduzione del rumore alla rotaia.

La molatura di mantenimento della rotaia permette di raggiungere livelli di abbattimento del rumore intorno a 10 dB(A) [20, 21, 22], la molatura acustica incrementa di 3-4 dB(A) tali valori. I dati riguardo tali valori sono stati forniti da *Schweerbau* e *Speno International SA*.

Edilon B.V. Rail System produce e fornisce sistemi di fissaggio della rotaia efficaci per lo smorzamento dei modi propri della rotaia. RFI e FS hanno approvato la tecnica dell'*embedded rail* e i sistemi di fissaggio alla traversina (Figura 3) [23].



Figura 3. Edilon Corkelast® Embedded rail system (a sinistra) e Edilon Corkelast® Block System.

In particolare la tecnica dell'*embedded rail* è stata applicata per la prima volta in Italia sul ponte in acciaio che collega la Stazione di Pisa Centrale alla Stazione di Pisa S.Rossore [24], Figura 4. I risultati sperimentali evidenziano una riduzione del rumore emesso dalla struttura, montando anche elementi assorbenti nella struttura del ponte, quantificabile in 3-4 dB(A).



Figura 4. Vista del ponte sull'Arno tra le Stazione di Pisa Centrale e Pisa S.Rossore [25]

Campagne di misura presso il ponte a Purmered sul canale Noordhollands, eseguite in accordo con le Ferrovie Olandesi, indicano una riduzione di circa 5 dB(A) per effetto dell'installazione del sistema di fissaggio Edilon Corkelast® Embedded Block System.

Schrey & Veit GmbH e *Corus* producono sistemi di smorzamento applicabili alle rotaie anche già esistenti. In particolare *Schrey & Veit GmbH* commercializza il sistema VICON-AMSA che arriva a ridurre il rumore emesso di circa 2-3.9 dB(A) con un abbattimento di 10-15 dB(A) riguardo lo *squealing noise*.

I prodotti *Corus*, Silent Track™, come dichiarato dalla ditta stessa consentono un abbattimento di circa 6 dB(A).

Soluzioni che si basano sulla riduzione delle vibrazioni impiegando materassini antivibranti sono prodotti e commercializzati dalle imprese *CDM*, *Getzner Werkstoffel* e *SaarGummi GmbH* che hanno risposto all'indagine ARPAT. L'applicazione di tali materiali resilienti permettono di ridurre il rumore secondario riemesso dalle strutture a causa delle vibrazioni [26, 27, 28].

Soluzioni di riduzione dello *squeal noise*

Elpa d.o.o. implementa un sistema di lubrificazione della rotaia denominato CL-E1 e installazioni a bordo del materiale rotabile (DRYproLUB) che utilizza una soluzione contenente il 40% di materiale metallico in grado di ridurre totalmente lo *squeal noise*. Il sistema è attualmente utilizzato nella linea ferroviaria di Merano con risultati di totale rimozione del rumore *squeal noise*. Non sono stati forniti certificato di sostenibilità ambientale emanati da enti italiani (giugno 2006).

Nella Tabella 1 sono riportati i riferimenti dei produttori individuati e contattati da ARPAT.

#	ditta	indirizzo	contatto
1	BECORIT GmbH	Rumplerstraße 6 – 10 45659 Recklinghausen Germany	Cpienitz@becorit.de Hfreudenberg@becorit.de
2	Bochumer Verein Verkehrstechnik	Alleestraße 70 D-44793 Bochum Germany	info@bochumer-verein.de
3	Bonatrans a.s.	Bezrucova 300 735 94 Bohumin Czech Republic	info@bonatrans.cz
4	CAF	Street 26 20200 Beasain Guipúzcoa Spain	caf@caf.net
5	Corus - Rail Products	2, Avenue du President Kennedy 78100 Saint-Germain- en-Laye France	Dave.Farrington@corusgroup.com david.benton@corusgroup.com milan@corusgroup.com
6	CosRail GmbH	Schnieringshof 10	info@cosrail.de

		D-45329 Essen	
7	Edilon BV	PO Box 1000 NL-2003 RZ Haarlem Netherlands	bart.stollenwerk@edilon.nl
8	ELPA d.o.o.	Paka 39/d SLO-3320 Velenje Slovenia	info@elpa.si
9	Frenoplast Bulhak I Cieslawski SP.J.	Korpele 75 – Strefa 12-100 Szczytno Poland	emaciejewska@frenoplast.pl
10	Getzner Werkstoffe GmbH	Herrenau 5 A-6706 Bürs Austria	Pavel.Vavroch@getzner.at
11	ICER BRAKES S.A.	Poligono Agustinos c/G, s/n 31013 Pamplona Spain	icer@icer-brakes.com
12	Knorr-Bremse AG	Moosacher Straße 80 80809 München Germany	sfs@knorr-bremse.com
13	LUCCHINI S.p.A - Sede Centrale	Via Oberdan, 1/a -25128 Brescia (BS)	ebelluati@lucchini.it
14	Pandrol Rail Fastenings	63 Station Road Addlestone Surrey KT15 2AR United Kingdom	info@pandrol.com
15	RockDelta	Hovedgaden 485 DK-2640 Hedehusene Denmark	sales@rockdelta.dk
16	Schrey & Veit GmbH	Zotzenheimer Str. 42 D-55576 Sprendlingen Germany	G.Veit@t-online-de
17	SG technologies	66687 Wadern- Büschfeld Germany	Werner.koch@sgtechnologies.com
18	SPENO INTERNATIONAL S.A.	26, parc Château- Banquet - P.O. Box 16 1211 Geneva 21 - Switzerland	info@speno.ch
19	VALDUNES	BP12, 59125 Trith Saint Léger France	Francois.DEMILLY@valdunes.com
20	CDM	Reutenbeek 9-11, 3090 Oveijse Belgium	general@cdm.be
21	Schweerbau	Schweerbau GmbH & Co. KG Industriestraße 12 D-31655 Stadthagen	Stadthagen@schweerbau.de

Tabella 1. Produttori contattati da ARPAT all'interno dell'indagine conoscitiva

Analisi dei risultati

Dall'indagine condotta da ARPAT emerge come siano ad oggi disponibili molte soluzioni di mitigazione del rumore ferroviario alla sorgente alternative (o complementari) alla messa in opera di barriere acustiche. Risulta, nel contempo, difficile disporre di risultati sperimentali certificati da enti esterni (università, enti di ricerca...), che possano validare risultati ottenuti *in situ*. Di non secondaria importanza, inoltre, è la scarsa (quando se non addirittura assente) fornitura di dati riguardo i costi e tempi di implementazione delle soluzioni fornite. Il costo di alcuni interventi di mitigazione rivolti alla sorgente è, ad esempio, ad oggi ancora stimabile utilizzando i risultati del progetto SILENT TRACK (Tabella 2) completato nell'anno 2000.

<i>intervento</i>	<i>costo</i>	<i>riferimento</i>
Molatura acustica	4.6 €/binario m/anno	Hemsworth B., Silent Track project-Final Report, 00615/7/ERRI/T/A, ERRI, 2000.
Smorzatori alla rotaia	187 €/binario m	Hemsworth B., Silent Track project-Final Report, 00615/7/ERRI/T/A, ERRI, 2000.

Tabella 2. Stima dei costi per alcuni interventi alla sorgente

All'interno di un'analisi costi/benefici dei diversi sistemi di riduzione del rumore ferroviario, è interessante a questo proposito ricordare alcuni risultati preliminari di uno studio condotto da ARPAT presso un sito particolarmente esposto al rumore ferroviario all'interno della fascia di rispetto di 100 m lungo la linea Genova Roma nei pressi di Livorno. Il numero di treni che quotidianamente transitano lungo la linea è riportato in Tabella 3.

<i>tipo</i>	<i>giorno</i>	<i>notte</i>
Passeggeri	65	21
Merci	21	16

Tabella 3. Numero di transiti sulla linea Tirrenica Genova Livorno

Da indagini fonometriche dettagliate, risultava che 4 edifici sono esposti a livelli di rumore diurno superiori ai 70 dB(A) mentre 39 a livelli superiori ai 60 dB(A) nel periodo notturno individuati come limiti dalla normativa vigente.

Sono stati simulati i livelli di rumore nel periodo notturno e diurno che potrebbero essere raggiunti in seguito alla sostituzione dei ceppi in ghisa dei treni merci con freni in materiale composito. L'effetto della diminuzione di 10 dB(A) nell'emissione del singolo treno, consente di raggiungere livelli di rumore nel periodo notturno più bassi di circa 4 dB(A) rispetto agli attuali risultati che si traduce in una riduzione del 23% nel numero di edifici esposti a livelli di rumore superiori ai limiti normativi. Inoltre **il miglioramento del solo sistema frenante dei carri merci**

consentirebbe di ridurre la superficie delle barriere, previste per il risanamento del sito, dagli attuali 4200 m² a circa 2900 m².

Riferimenti

- [1] Stansfeld SA, Lercher P. Non-auditory physiological effects of noise: five year review and future directions. In: de Jong et al. Proceedings of the 8th International Congress on Noise as a Public Health Problem. Rotterdam, the Netherlands, 2003. Page 84-90.
- [2] WHO, Guidelines for community noise, Geneva, 2001.
- [3] Position Paper on the European strategies and priorities for railway noise abatement”, WG Railway Noise of the European Commission, Version 19403.
- [4] Pierre-Etienne Gautier, “Railway noise: a review of recent progress and research”, Proc. of 5th European Conference on Noise Control, Naples 2003
- [5] K. Oostermeijer, “Causation of rail corrugation and contributing factors”, The world congress on railway research (WCRR), Edinburgh, Scotland United Kingdom, 28 September – 1 October 2003
- [6] A. Guidat, “The fundamental benefits of preventive rail grinding”, Rail Engineering Journal, No. 1 1996
- [7] TCRP Report 23 “Wheel/Rail Noise Control Manual”, Transportation Research Board, National Research Council 1997
- [8] P. E. Gautier, N. Vincent, D. J. Thompson and G. Hölzl , Railway wheel optimization , in Proceedings of Internoise’93, Leuven 1993, pp.1455-1458,(1993)
- [9] B. Hemsworth, P. E. Gautier and R. Jones, Silent Freight and Silent Track projects, in Proceedings of Internoise’2000, Nice 2000,(2000)
- [10] C. Jones and D. J. Thompson, A. Frid, M. O. Wallentin, Design of a railway wheel with acoustically improved cross-section and constrained layer damping, in Proceedings of Internoise’2000, Nice 2000, vol. 2, pp.673-678 (2000)
- [11] L. Guccia, P. Fodiman, P. E. Gautier, N. Vincent and P. Bouvet, High-speed rolling noise: design and validation of low noise components, in Proceedings of Word Congress on Railway Research, Florence 1997, pp.179-187,(1997)
- [12] D. J. Thompson, C. J. C. Jones and D. Farrington, The development of a rail damping device for reducing noise from railway track, in Proceedings of Internoise 2000, Nice 2000, vol. 2, pp.685-690 (2000).
- [13] A.Bracciali, “Damped wheels as an efficient measure to reduce railway noise”, Proc. of 5th European Conference on Noise Control, Naples 2003.
- [14] S.Cervello, A.Bracciali “Development of a vibro-acoustical methodology for the design and validation of low noise railway wheels”, WCRR’97 16-19 November 1997.

- [15] A.Borrelli, S.Cervello "Syope. La nuova ruota ferroviaria a ridotta emissione acustica sviluppata e prodotta da Lucchini Sidermeccanica. Campagna sui convogli della Circumvesuviana", *Ingegneria Ferroviaria* n. 5, 2003.
- [16] S.Cervello "Syope promises quieter running", *Railway Gazette International*, September 2002.
- [17] J.P.Wetta, F.Demilly "Reduction of wheel squeal noise generated on curves or during braking" *Congrès des essieux-montés PARIS* 1995.
- [18] Rapport Vibratex n°304.012 RA.01.A du 2/08/2002.
- [19] G.Stévenot, F.Demilly, C.Pignerol. RGCF 02/2000, "L'innovation dans les roues ferroviaires et l'évolution des marches".
- [20] Ødegaard & Danneskiold-Samsøe A/S, "Noise as part of a European rail grinding strategy" Annex II, March 2004.
- [21] M.Beier, DB AG, F.Hlösters NS, J.C. Schaffner Speno International S.A. "Roughness measurements", *Proceedings of the workshop. Utrecht, May 1999.*
- [22] H.J. Giesler "Geräuschemissionen von Eisenbahnen", *Umweltbundesamt, Berlin* 2003.
- [23] Research report n. 1974, from Technische Universität München "Examination of the system "EDILON ERS UIC60 für DB-AG" with continuously embedded rail, 30.10.2002.
- [24] R.Mele, M.Testa, M.Tisalvi, "Un nuovo sistema di binario per ponti metallici", *La tecnica professionale*, n. 10 Ottobre 2003
- [25] L.Ricciardi "The railway bridge in pisa: new concept in noise mitigation", *Proceedings of "Railway noise in urban areas: possible source noise reduction measures"*, Pisa 9-10 november 2006.
- [26] Rüdiger Wettschreck, "Vibration and structure-borne noise insulation by means of cellular polyurethane (PUR) elastomer in railway track applications", *Rail Engineering International Edition*, n. 2, 1995 and reference therein.
- [27] Test report on static stiffness on sub ballast mats, removed from a rapid transit track in Munich, Germany, G.Leykauf, Technische Universität München Prüfamts Für bau von Landverkehrswegen, 27.10.2000.
- [28] Test report from Müller – BBM "Dynamic stiffness of a ballast mat type Sylomer® B-851 after 17 years of use in the tunnel near Kulturzentrum GASTEIG in Munich".