

FOCUS



Le vibrazioni trasmesse nelle abitazioni dai treni della metropolitana

L'usura ondulatoria delle rotaie (marezzatura) e la necessità della molatura periodica

DI GIORGIO CAMPOLONGO*

Il transito dei treni delle linee delle metropolitane provoca vibrazioni e rumore spesso insopportabili nelle abitazioni lungo le linee, con scosse che si susseguono dal primo treno del mattino delle 6 fino all'ultimo delle 24, più frequenti e con maggiore intensità nelle ore di punta, ma sempre fortemente fastidiosi. In tutte le metropolitane su rotaia del mondo e in Italia in quelle di Milano, Roma, Napoli e Catania, i livelli più alti di vibrazioni si rilevano in prossimità delle stazioni, quando i treni accelerano o frenano, e soprattutto nelle tratte in curva, quando i carrelli dei treni riscontrano difficoltà a inscrivere perché non hanno il differenziale come le auto (Figura 1). Le vibrazioni, oltre al disturbo nelle abitazioni, appaiono provocare fessurazioni negli intonaci e causano una considerevole svalutazione degli immobili.

LA MAREZZATURA DELLE ROTAIE E LE IRREGOLARITÀ DEI CERCHIONI DELLE RUOTE

La marezzatura è l'usura anomala della superficie delle rotaie (in inglese *corrugation*) ed è ben visibile a occhio nudo, appare come un susseguirsi di picchi e avvallamenti (Figura 2). Si misura con la sua "profondità" tra picchi e avvallamenti che, pur producendo vibrazioni significative, è di piccola entità, soltanto centesimi di millimetro (o decine di micron), e nei casi gravi non supera il millimetro. La marezzatura è un difetto grave delle rotaie, perché provoca vibrazioni e rumore, si verifica so-

prattutto sulla rotaia interna alle curve, che a causa della sovralevazione in curva è detta rotaia "bassa" (e quella esterna "alta"). L'origine delle vibrazioni è nel contatto tra le ruote dei treni e le rotaie: se le ruote fossero sempre perfettamente rotonde e le rotaie sempre perfettamente lisce le proteste per le vibrazioni non ci sarebbero. La spiegazione delle cause che producono la marezzatura è complessa e nelle curve la principale causa è che i treni non hanno il "differenziale" come le auto.

LA MAGGIORE CRITICITÀ DEL CONTATTO RUOTA-ROTAIA NELLE METROPOLITANE RISPETTO ALLE FERROVIE

Questi difetti di usura nelle rotaie e nelle ruote sono inevitabili perché sono congeniti nell'esercizio ferroviario, sono accentuati nelle

metropolitane perché le stazioni, che richiedono frenate e accelerazioni, e le curve con raggio stretto sono molto più numerose rispetto alle ferrovie. Inoltre la dinamica del contatto ruota-rotaia si ripete con estrema sistematicità. Infatti in metropolitana, diversamente dalla ferrovia, l'usura della rotaia in *quel* punto del binario vicino a quella stazione o in quella curva avviene sempre in *quel* modo al passaggio delle ruote dei treni, che transitano tutte con quella velocità, quella frenata o accelerazione, quella iscrizione del carrello in curva, su quella rotaia bassa. Quella rotaia sopporta il transito di più di un milione di assi all'anno che producono colpi di oltre dieci tonnellate ciascuno, sempre uguali tra loro, con frequenza di ripetizione dei colpi (cioè delle vibrazioni) di 4 mila assi transitati al giorno per 365

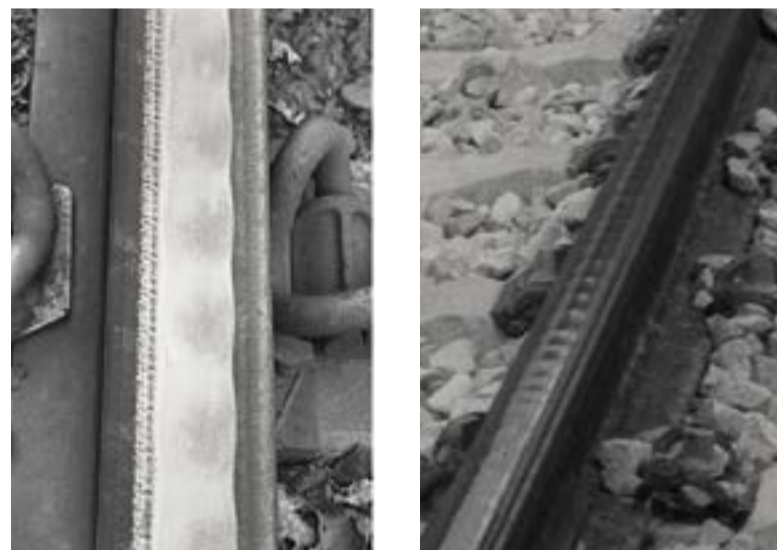


Figura 2. L'usura ondulatoria delle rotaie, cd. "marezzatura"

giorni all'anno. In queste condizioni e senza ricorrere a complicati modelli matematici è intuitivo che l'estrema ripetitività del contatto ruota-rotaia provochi una forte usura delle due superfici,

maggiore di quella delle ferrovie dove il traffico è promiscuo (mixed traffic) e con velocità di transito e carichi per asse diversi tra loro (di motrici, vagoni passeggeri e carri merci).

Per la ricerca delle cause della formazione della marezzatura gli ingegneri ferroviari di tutto il mondo da sempre, da quando esistono le ferrovie, studiano l'instabilità del contatto ruota-rotaia per i vari tipi di linea e di treni: passeggeri, merci, ad alta velocità, tram e metropolitane. In particolare per la rotaia "bassa", cioè interna, delle curve strette delle metropolitane (Figura 3).

LA MISURAZIONE DELL'AMPIEZZA O PROFONDITÀ DELLA MAREZZATURA

L'apparecchio per misurare l'ampiezza o profondità della marezzatura, detto *Corrugation Analysis Trolley (CAT)* o anche "marezzimetro", è costituito da un carrello trainato a mano, munito di sensori accelerometrici con contatto sulla rotaia (Figura 4), e può anche



Figura 1. La rete della metropolitana di Milano con i punti delle segnalazioni di lamenti per vibrazioni da gennaio a maggio 2021 [6]

essere installato su un treno in normale esercizio passeggeri con sensori laser senza contatto con la rotaia. L'accuratezza della misurazione è anche di pochi micron.

I mazzimetri sono disponibili sul mercato da molto tempo (Grassie, 1999). Il primo mazzimetro risale al 1976 ed era di proprietà di ATM, società che gestisce il trasporto pubblico a Milano [1].

Il risultato della misurazione è espresso in dB "pesato" a seconda della lunghezza d'onda della mazzatura con la curva di ponderazione della norma UNI EN ISO 3095:2013 (Acustica - Applicazioni ferroviarie - Misurazione del rumore emesso dai veicoli su rotaia).

LA LUNGHEZZA D'ONDA DELLA MAREZZATURA

Alcune volte, quando si è in attesa del treno in una stazione della metropolitana, sulla superficie delle rotaie si può notare la luce riflessa dalle lampade installate nella banchina opposta (Figura 5). La luce riflessa sulla rotaia è discontinua perché la superficie della rotaia è mazzata con un susseguirsi di piccoli tratti brillanti e tratti opachi. Ognuno di questi tratti è un picco con un avvallamento di mazzatura, pari a una ondulazione completa. Con pazienza, muovendo la testa a destra e a sinistra, si riescono a contare i tratti con diversa luminosità e quindi ad avere una prima stima della lunghezza d'onda della mazzatura. Nelle stazioni MM di Milano il binario è in rettilineo con il treno o in frenata o in accelerazione e la lunghezza d'onda è da 5 a 10 cm circa.

In un tratto di linea in curva, nell'interstazione dove i treni viaggiano a oltre 50 km/h, in un edificio prossimo alla linea sono state effettuate misurazioni delle vibrazioni e la frequenza è risultata di 45 Hz. La lunghezza d'onda della mazzatura è calcolabile semplicemente come rapporto tra la velocità del treno (50 km/h = 14 m/s) e la frequenza misurata delle vibrazioni, come segue:

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{14}{45} = 0,31[m] = 31[cm]$$

La misurazione della frequenza delle vibrazioni è stata effettuata nell'abitazione senza conoscere la velocità del transito del treno in quel punto, né il raggio della curva (forse maggiore di 400 m) e senza poter accedere in galleria metropolitana per misurare la lunghezza d'onda della mazzatura in quel punto. Tuttavia sapendo che la velocità nell'interstazione è maggiore di 50 km/h (> 14 m/s) si conclude che la lunghezza d'onda della mazzatura in quello punto è maggiore di 31 cm.

Questo valore è di molto maggiore della lunghezza d'onda compresa tra 4 e 14 cm (Figura 11 e 16) della rotaia interna della curva di piccolo raggio (120 m) della metropolitana di Stoccolma misurata da Peter T. Torstensson.

L'inglese Stuart L. Grassie riferendosi alla metropolitana di Londra con treni alla velocità massima di 80 km/h distingue la mazzatura corta, con lunghezza d'onda da 3

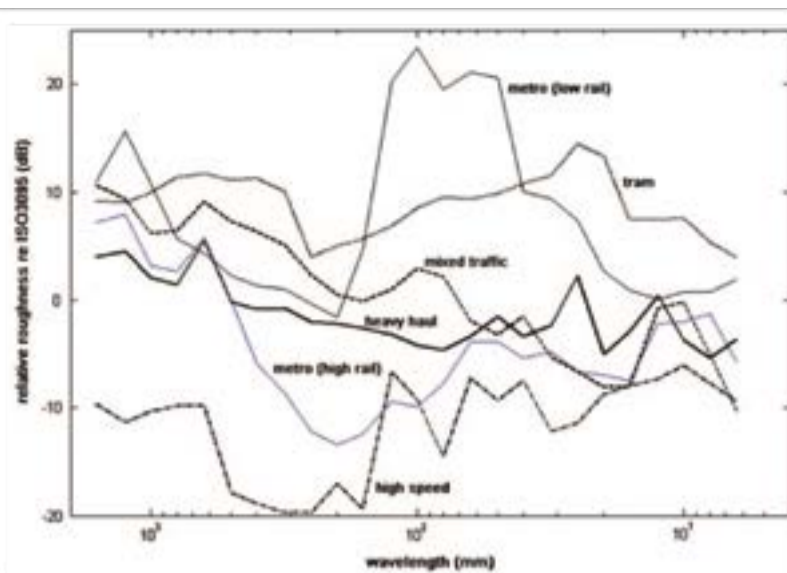


Figura 3. L'ampiezza della mazzatura ferroviaria in funzione della lunghezza d'onda in mm, con a destra le lunghezze d'onda corte e a sinistra quelle lunghe [7]. L'ampiezza è espressa su scala logaritmica, in dB con il riferimento 0 dB di una norma ISO: la differenza di 10 dB significa il triplo dell'ampiezza della mazzatura e di 20 dB significa dieci volte maggiore. Il grafico mostra che la mazzatura maggiore si ha nelle metropolitane sulla rotaia "bassa" delle curve (low rail) e sulle rotaie tranviarie, minore nelle ferrovie normali (mixed traffic) e ancora minore con l'alta velocità. Nelle curve delle metropolitane la mazzatura sulla rotaia "bassa" è di ben 25 dB maggiore della mazzatura sulla rotaia "alta" (high rail), esterna alla curva. La differenza di 25 dB è molto grande, pari all'ampiezza di 30 volte maggiore. In pratica la mazzatura delle rotaie delle metropolitane in curva è soltanto sulla rotaia "bassa"



Figura 4. Un moderno "mazzimetro" per la misurazione continua sulle rotaie

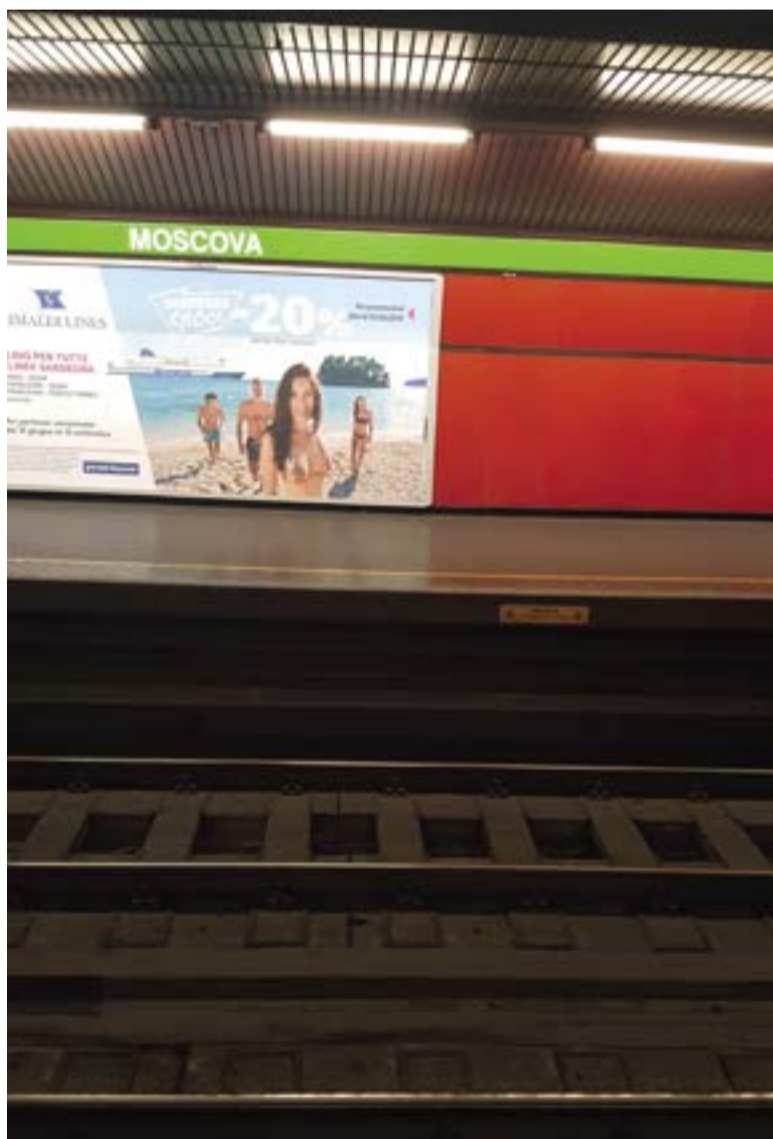


Figura 5. Sulle rotaie della stazione Moscova della linea M2 di Milano si vedono i tratti con diversa luminosità della luce riflessa dalle lampade della banchina opposta. La diversa riflessione è dovuta alla mazzatura e si possono contare all'incirca 10 avvallamenti (con maggiore riflessione della luce) di mazzatura su un tratto di rotaia di circa 70 cm tra due traversine. Quindi la lunghezza d'onda della mazzatura è di circa 7 cm

a 10 cm, da quella lunga, da 10 cm a 1 m, che a quella velocità corrisponde alle frequenze, rispettivamente, tra 220 e 740 Hz e tra 22 e 220 Hz.

IL DISTURBO DELLE VIBRAZIONI E I DANNI AGLI EDIFICI

Le vibrazioni (Figura 6) trasmesse negli edifici sono regolamentate da due norme: una per il disturbo alle persone, la UNI 9614:2017 "Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo", e l'altra per il danno agli edifici, la UNI 9916 "Criteri di misura e valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici".

Nel caso di un edificio situato lungo la linea M1 di Milano il rumore provocato dai treni è risultato eccedente di larga misura il limite della tollerabilità di giurisprudenza dell'art. 844 codice civile (Immissioni), che è di non più di 3 dB oltre il rumore di fondo (Figura 7). Il rumore di fondo è il livello quasi-minimo (misurato dopo un treno e prima del successivo) e nel caso in esame è circa 20 dBA. I treni producono oltre 40 dBA e quindi eccedono largamente il limite massimo della tollerabilità. Detto superato del limite della tollerabilità ha l'aggravante al disturbo causato dall'estenuante ripetuto transito di 180 treni al giorno, anche in orari dedicati al riposo. Il disturbo cessa soltanto durante la sospensione del servizio per alcune ore notturne (Figura 8).

IL DANNO AGLI EDIFICI PRODOTTO DALLE VIBRAZIONI DEI TRENI DELLA METROPOLITANA

La già citata norma UNI 9916:2014 chiarisce che:

"In generale, danni strutturali all'edificio nel suo insieme attribuibili a fenomeni vibratorii sono estremamente rari e quasi sempre derivano dal concorso di altre cause. Perché le vibrazioni possano arrecare danni strutturali è necessario che esse raggiungano livelli tali da causare, prima, fastidio e disturbo agli occupanti.

Sono invece frequenti altre forme di danno, di entità definita 'di soglia', che, senza compromettere la sicurezza strutturale degli edifici, ne possono determinare una riduzione del valore. I danni di soglia si possono presentare sotto forma di fessure nell'intonaco, accrescimenti di fessure già esistenti, danneggiamenti di elementi architettonici. - Nota: Nella terminologia anglosassone questi danni si indicano come 'danni estetici' (cosmetic damage)".

La norma UNI stabilisce che per effettuare una prima valutazione dei danni provocati agli edifici dalle vibrazioni occorre effettuare la misurazione della "velocità di picco di una componente puntuale" (p.c.p.v., peak component particle velocity), che è il valore massimo oscillografico (per i tecnici: integrato da accelerazione a velocità, ma non integrato a livello in dB).

In Figura 9 è riportato il risultato delle misurazioni effettuate in un edificio a Milano per le vibrazioni dei treni della linea M1. Nel primo dei tre grafici l'andamento oscillografico della p.c.p.v. delle vibrazioni trasmesse dal treno durano circa 9 secondi. Nel secondo grafico la frequenza delle vibrazioni è compresa tra 40 e 50 Hz. Nel terzo il confronto con i limiti massimi prescritti dalla DIN 4150 (come è indicato nella norma UNI 9916) mostra che nel caso in esame non vi possono essere danni all'edificio attribuibili alle vibrazioni dei treni della metropolitana.

LA RELAZIONE TRA LA MAREZZATURA E LE VIBRAZIONI TRASMESSE NEGLI EDIFICI

La relazione diretta tra l'ampiezza della mazzatura delle rotaie delle metropolitane e l'intensità delle vibrazioni trasmesse negli edifici attigui alle linee è una questione che la letteratura tecnica nazionale e internazionale evita di trattare e, soprattutto, non riporta i risultati delle misurazioni fonovibrometriche negli edifici in funzione dell'ampiezza della ma-



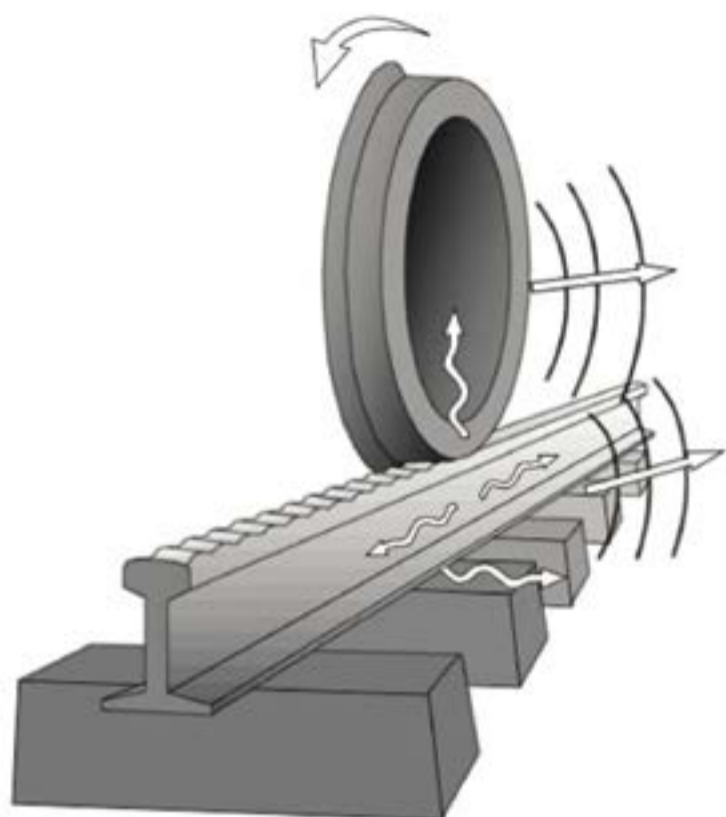
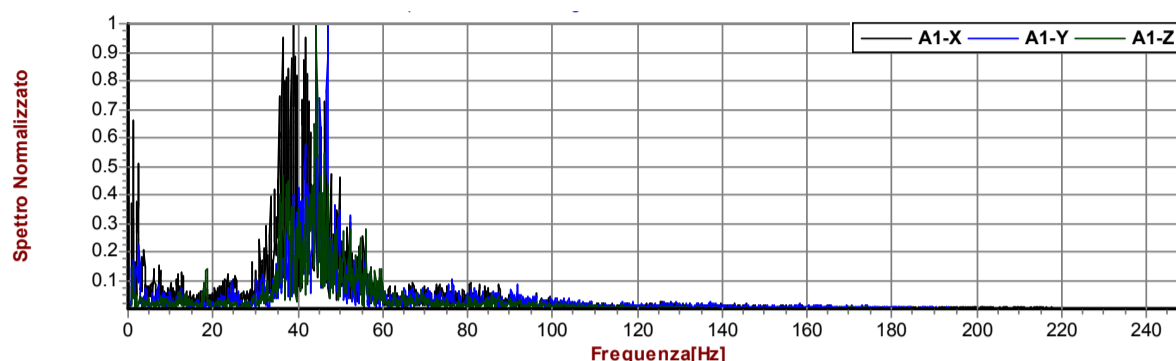
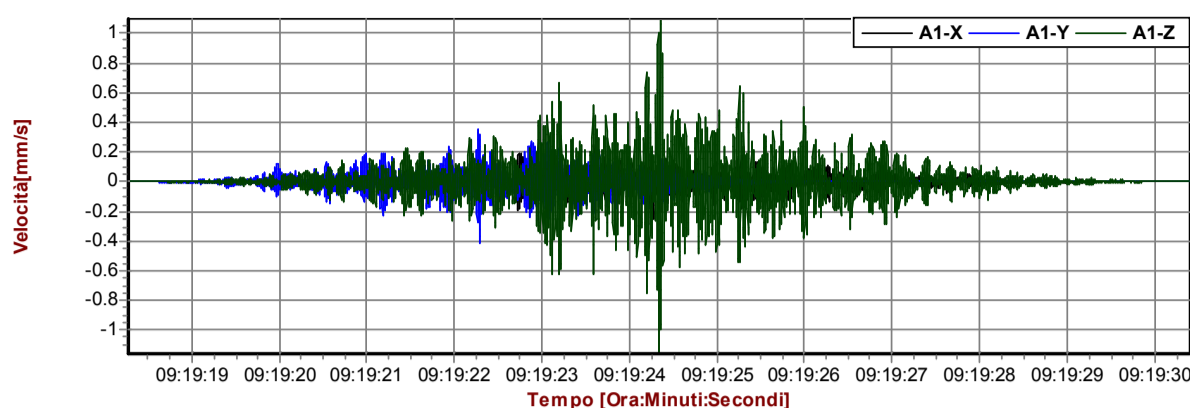


Figura 6. Il transito dei treni sulla superficie ondulata delle rotaie (marezzatura) produce vibrazioni e rumore



Normativa DIN4150-3 Soglie Vibrazione Breve: Strutture Residenziali

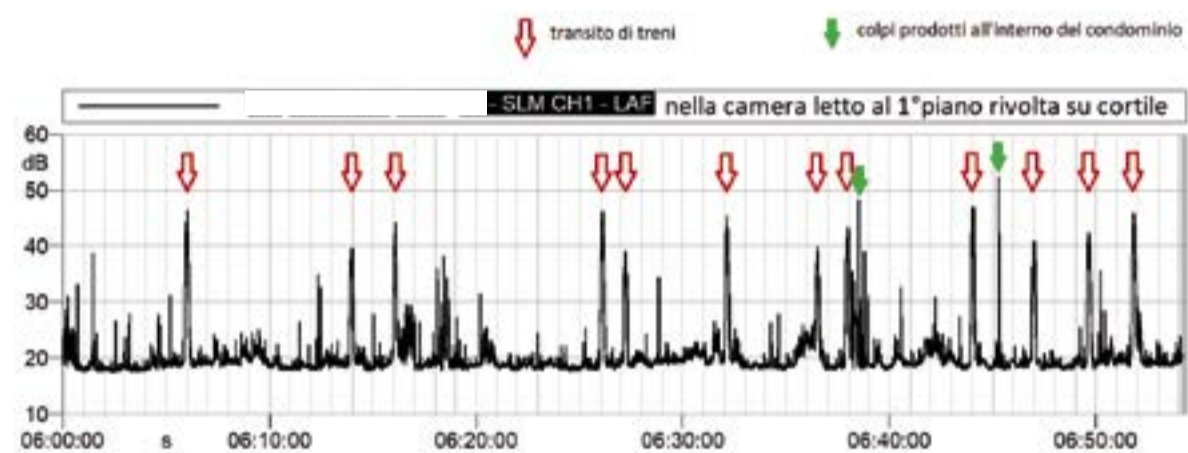
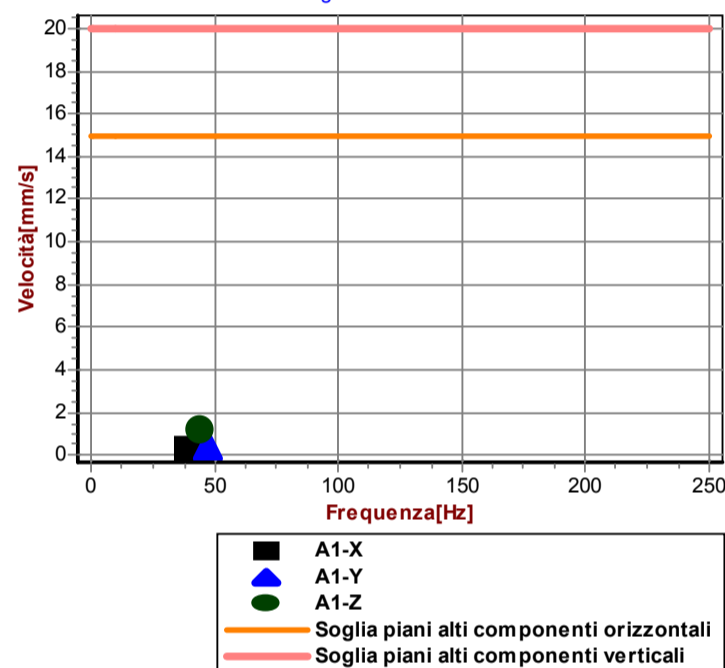


Figura 7. Il rumore in una camera da letto di un'abitazione trasmesso dal primo treno della linea M1 di Milano alle ore 6:06, con picco 45 dBAFmax e rumore di fondo di meno di 20 dBA. Nei successivi 50 minuti altri 11 treni con 40-50 dBAFmax [8]

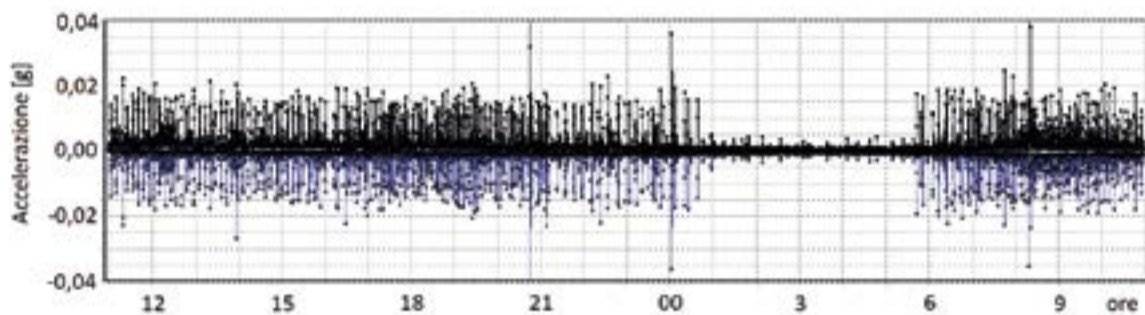


Figura 8. L'andamento oscillografico delle vibrazioni trasmesse in un edificio dai treni della linea M1 della metropolitana di Milano nelle 24 ore, nel maggio 2019. È ben visibile l'effetto della sospensione notturna del servizio (misurazioni effettuate da SolGeo Srl di Seriate MB)

rezzaatura delle rotaie. Per misurare la trasmissione delle vibrazioni dal contatto ruota-rotaia agli edifici attigui alle linee metropolitane occorre effettuare doppie misurazioni, sulle rotaie e negli edifici. Ma per l'esercente del trasporto pubblico della metropolitana le misurazioni negli edifici non sono facilmente eseguibili perché vanno effettuate con strumentazione (accelerometri e microfoni) da installare proprio in quelle abitazioni da cui sono giunte le lamentele per le vibrazioni. Da notare che le persone disturbate dalle vibrazioni potrebbero facilmente farle misurare, essendo in casa propria, ma non hanno la possibilità di effettuare l'altra misurazione, della marezzatura delle rotaie, perché per farlo occorre accedere in galleria (con un marezzimetro, come si è visto) o attrezzare strumentalmente un treno. Le soluzioni sono entrambe

impossibili per le persone (al di là dei costi) senza l'espressa autorizzazione dell'esercente della metropolitana. Nonostante la difficoltà di accedere negli edifici gli esercenti delle metropolitane in tutto il mondo, vista l'importanza e la gravità del problema del disturbo delle vibrazioni, non possono non avere queste misurazioni custodite nei loro uffici tecnici ma non le rendono pubbliche. Questa ritrosia si spiega con il timore che se le misurazioni fossero pubblicate sarebbe dimostrato che le vibrazioni dipendono dalla manutenzione effettuata sulle rotaie (molatura) e questo si ritorcerebbe contro di loro nelle controversie giudiziarie per il disturbo e i danni reclamati dalle persone che si ritengono danneggiate dalle vibrazioni. I risultati della correlazione tra vibrazioni negli edifici e marezzatura delle rotaie non sono stati anco-

ra pubblicati da nessuno. Esiste soltanto lo studio di London Underground della riduzione del rumore (*ground-borne noise*, che però è diverso dalle vibrazioni) in funzione della riduzione della marezzatura conseguita con la molatura delle rotaie e i risultati delle misurazioni sono riportati nel diagramma in Figura 10, che a conoscenza dell'Autore è il solo studio pubblicato su questa materia.

LA CRESCITA DELLA MAREZZATURA DOPO OGNI MOLATURA

L'aumento della marezzatura sulla rotaia bassa è stato monitorato durante un anno intero, ogni due mesi circa, con inizio delle misurazioni subito prima della molatura e ripetute subito dopo (Figura 11 e 12).

IL FENOMENO DI "ATTACCA E SCIVOLA" (STICK AND SLIP)

Il fenomeno "attacca e scivola" (stick and slip) avviene quando

una superficie attaccata a un'altra si stacca dall'attrito statico e scivola sull'altra superficie con attrito radente (cioè dinamico) e quando le due superfici accoppiate oscillano ciclicamente tra la fase "attacca" e la fase "scivola". In generale il punto di contatto tra due oggetti è in equilibrio dinamico stabile o perché le superfici sono ferme l'una rispetto all'altra oppure perché una si muove rispetto all'altra senza scatti, con forza di trascinamento che almeno uguaglia la forza dell'attrito nel punto del contatto. L'attrito statico (con le due superfici a contatto ferme l'una rispetto all'altra) è maggiore rispetto a quando le due superfici non sono ferme cioè strisciano o scivolano l'una rispetto all'altra. Quando la velocità relativa tra le due superfici è nulla l'aderenza è massima mentre quando la velocità relativa non è nulla, cioè quando una superficie si muove o tende a muoversi rispetto all'altra, l'aderenza diminuisce e avviene il distacco, come uno strappo, e una superficie scivola sull'altra perché è spinta o tirata dalle forze elastiche presenti nel contatto. Una volta avvenuto il distacco si riduce la deformazione

elastica statica, la forza elastica viene meno, la superficie scivola di meno cioè con minore velocità relativa e prevale l'aderenza, con il maggiore attrito statico. Le due superfici ritornano ferme, a contatto tra loro, e il ciclo riprende, avvenendo molte volte in un secondo, con trasmissione di vibrazioni e rumore alla frequenza di decine, centinaia o migliaia di Hertz a seconda di quale fenomeno si tratti. Gli esempi dello stridore di "attacca e scivola" sono numerosi: il gesso che scorre sulla lavagna (Figura 13), il dito bagnato che scorre lentamente sul bordo di un calice, le ganasce del freno del treno che entra in stazione frenando e l'archetto del violino che sfrega sulla corda. Altri esempi sono l'ABS dei freni dell'auto, i cilindri oleodinamici, i macchinari per la levigatura e alcune lavorazioni meccaniche industriali. Il fenomeno "attacca e scivola" (*stick and slip*), è presente in innumerevoli esempi e situazioni comuni [2]. Nelle curve della metropolitana il ciclo "attacca e scivola" del contatto ruota-rotaia si ripete 40-50 volte in un secondo e genera marezzatura che trasmette vibrazioni

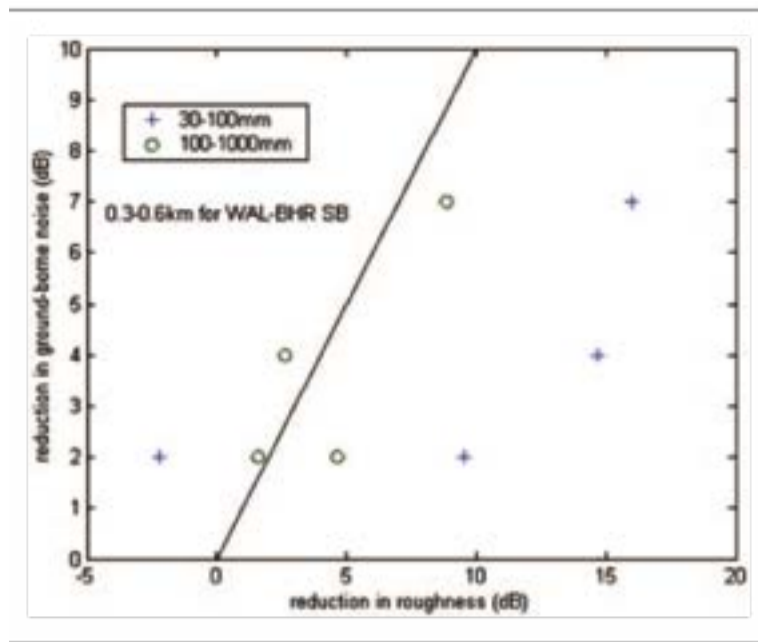


Figura 10. Correlazione della riduzione del rumore (dBA) trasmesso per via solida nelle vicine abitazioni e della riduzione della mazzatura delle rotaie (espressa in dB con riferimento 1 micron). La molatura riduce il rumore di circa 2-8 dB con riduzione della mazzatura di circa 2-9 dB nelle lunghezze d'onda da 10 cm a 1 m e fino a 16 dB per le lunghezze d'onda più corte. In un caso si è verificato un leggero aumento della mazzatura di corta lunghezza d'onda (misurazioni della London Underground, riportate da Grassie nel 2012)

alla stessa frequenza (Figure 9 e 14). La mazzatura è anche provocata dalla frequenza di risonanza a torsione della "sala montata" (l'insieme dell'asse e delle ruote), tipicamente a 50-100 Hz, e a queste basse frequenze le vibrazioni si trasmettono bene agli edifici e possono anche essere amplificate da risonanze delle strutture degli edifici stessi.

LA RICERCA DEI RIMEDI PER RIDURRE LE VIBRAZIONI

L'Unione Europea nel periodo 2002-2006 ha promosso un progetto finanziato con 4,2 milioni di euro per studiare la mazzatura di metropolitane e tram.

La ricerca mondiale, compresa quella recente delle metropolitane cinesi e coreane (che si estendono a un ritmo impressionante), ha prodotto - con vari gradi di successo - armamenti vibro-isolanti di vari tipi, rotaie con superfici di scorrimento di durezza maggiore, assorbitori dinamici per rotaie e per ruote, assorbitori dinamici delle vibrazioni a torsione delle sale montate, carrelli sterzanti e a geometria variabile, nonché assi con ruote indipendenti (come le auto con il differenziale).

Sono stati anche realizzati lubrifi-

catori per binari in curva (*friction modifiers*, FM) per ridurre l'attrito del contatto ruota-rotaia soprattutto sulla rotaia "alta" (esterna) della curva, che esercita una forza considerevole sul bordino della ruota esterna dell'asse anteriore del carrello perché ha difficoltà a inscrivere nella curva. Con il lubrificatore l'asse anteriore si iscrive in curva più facilmente e la ruota interna alla curva striscia di meno sulla rotaia interna riducendo la mazzatura (Figura 16).

In varie metropolitane, in Europa e in Giappone, sono stati ottenuti buoni risultati di contenimento della mazzatura mediante i lubrificatori in curva, con rallentamento dello sviluppo o addirittura l'eliminazione della mazzatura [3].

Un rimedio alle vibrazioni, sempre disponibile e di efficacia immediata, è la riduzione della velocità dei treni in curva, che però non è un rimedio accettabile sul lungo periodo perché la forte riduzione della forza centrifuga (con il quadrato della velocità) e la sopraelevazione in curva (progettata per la velocità normale) inducono il treno a pesare sulla rotaia interna della curva premendola verso l'esterno del binario con il risultato di provocare un'anomala torsione della

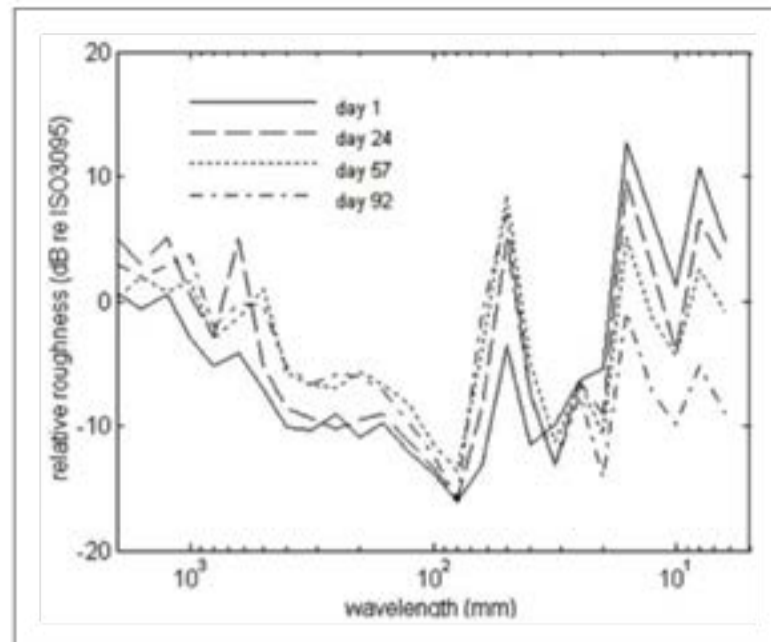


Figura 12. L'ampiezza della mazzatura è indicata con gli spettri per 1/3 d'ottava della lunghezza d'onda della mazzatura stessa (entrambe le scale, dell'ampiezza e della lunghezza d'onda della mazzatura, sono logaritmiche). Sono indicati i giorni trascorsi dopo la molatura, con le misurazioni effettuate subito dopo (in linea continua) e ripetute fino al 92° giorno. La lunghezza d'onda della mazzatura è 5 cm. Subito dopo la molatura, malgrado che fosse stata effettuata molto bene, rimaneva una mazzatura residua, molto piccola, di ampiezza 0,05 mm. I picchi visibili a lunghezze d'onda molto piccola, minore di 20 mm, sono dovuti all'impronta lasciata dalla molatura stessa e si riducono di oltre 10 dB nei 3 mesi successivi [7]

rotaia stessa e ulteriori anomali fenomeni di usura che aggravano la manutenzione.

LA MOLATURA DELLA ROTAIE

Allo stato attuale per rimediare alle vibrazioni prodotte dalla mazzatura non vi è che molare le rotaie (*rail grinding*) e riprofilare i cerchioni con la frequenza maggiore possibile.

Il problema sembra semplice perché se le rotaie fossero lisce (senza mazzatura) e le ruote rotonde (senza piani né altre irregolarità) non si avrebbero le vibrazioni forti che invece oggi sono registrate e che dal 2018 sono lamentate più spesso rispetto al passato per le metropolitane di Milano, Roma, Napoli e Catania.

La mazzatura delle rotaie è come l'erba dei prati: non si può impedire che cresca, a meno di usare un erbicida che però per la mazzatura delle rotaie non è ancora stato inventato. L'erba può solo essere tagliata e le rotaie e le ruote possono soltanto essere molate e, nei casi peggiori, fresate. E occorre farlo periodicamente come per l'erba anche per le rotaie.

L'ELEVATO COSTO DELLA MOLATURA DELLE ROTAIE

Il problema è che questa manutenzione di rotaie e ruote dei treni è parecchio costosa. Soprattutto la molatura delle rotaie è molto dispendiosa perché deve essere effettuata mediante gli appositi treni molatori, che ATM (Azienda Trasporti Milanese) noleggia, e per la necessità di dover essere eseguita di notte in galleria durante la sospensione del servizio dei treni. L'avviso di gara per "Appalto n. 755 - SERVIZIO DI MOLATURA BINARIO RETE METROPOLITANA - CIG 6584558527" indica il costo della molatura in € 3.520.000 IVA esclusa, per i due anni dal 2016 al 2018 e per un solo treno molatore [4]. Al costo del noleggio del treno molatore occorre aggiungere il costo del lavoro notturno in galleria, fra l'ultimo treno della notte e il primo della mattina. Ma il tempo a disposizione agli addetti alla manutenzione in una notte è molto breve e,

per giunta, occorre attendere l'arrivo del treno molatore che parte dalla sua postazione dopo l'ultimo treno passeggeri e deve farvi ritorno prima del primo treno della mattina. La durata molto breve disponibile per notte obbliga a suddividere il lavoro di molatura in più notti, aumentandone i costi. Occorre aggiungere il costo del lavoro di rettifica dei cerchioni delle ruote dei treni, che è effettuata nel normale orario di lavoro diurno in officina. Infine, vi sono anche i costi degli addetti ai controlli e alle misurazioni dell'entità della mazzatura e delle irregolarità dei cerchioni, mediante apposite apparecchiature.

Le proteste delle persone che abitano lungo le linee delle metropolitane di Milano, Roma, Napoli e Catania sono sempre avvenute, ma a partire dal 2018 sono aumentate. La deduzione logica è che la molatura delle rotaie sia stata ridotta, evidentemente allo scopo di ridurre i costi della manutenzione. Altrimenti non si spiega l'aumento delle vibrazioni trasmesse dai treni. Occorre che il gestore della metropolitana non faccia orecchie da mercante alle proteste dei cittadini ed effettui la molatura delle rotaie a pieno ritmo nella misura necessaria per tenere sempre sotto controllo la mazzatura sull'intera rete metropolitana. E per far questo forse potrebbe essere necessario estendere la durata della sospensione notturna del servizio, sopprimendo alcuni degli ultimi treni della notte e del mattino presto, e di conseguenza aumentare il servizio notturno sostitutivo con autobus.

Occorrerà anche migliorare la manutenzione delle ruote dei treni aumentando la rettifica e la fresatura della superficie dei cerchioni. Lo scopo è di riportare le vibrazioni e il rumore trasmessi agli edifici almeno ai livelli dei primi anni 2000 e per far questo il costo potrebbe aumentare di alcuni milioni di euro all'anno.

Rinviare a domani il costo di alcuni milioni di manutenzione significa pagarne molti di più, dovendo recuperare il tempo perduto e ripa-

rare guasti maggiori. Infatti riducendo la molatura delle rotaie e la riprofilatura dei cerchioni si provocano anche altri guasti:

- l'usura delle rotaie aumenta accelerando lo sviluppo della mazzatura in un circolo vizioso di autoeccitazione, riducendo la vita delle rotaie stesse e dell'armamento (arpioni, piastre resilienti sotto-rotaia, traversine, ballast, etc.);
- l'usura dei carrelli e delle stesse vetture aumenta, in quanto assoggettati a forti vibrazioni anomale;
- l'aumento delle vibrazioni e del rumore negli edifici provoca la svalutazione del valore commerciale degli immobili posti lungo le linee della metropolitana.

Peraltra i problemi della molatura delle rotaie, soprattutto della rotaia bassa delle curve, e della riprofilatura dei cerchioni non sono certamente nuovi per i gestori delle metropolitane. Né è una novità il loro costo elevato.

L'ACCETTAZIONE DEL LAVORO DELLA MOLATURA DELLE ROTAIE

Il lavoro della molatura delle rotaie deve essere effettuato periodicamente e, come tutti i lavori, può essere eseguito bene o male e quindi occorre che sia controllato seguendo la norma europea UNI EN 13231-3:2012 (Binario - Accettazione dei lavori - Parte 3: Accettazione della riprofilatura delle rotaie ferroviarie), sia per garantire il buon risultato del lavoro della molatura sia per pianificare la manutenzione su tutta la rete.

La norma UNI specifica i requisiti tecnici e le misurazioni che devono essere effettuate per l'accettazione del lavoro di riprofilatura longitudinale (rispetto alla rotaia) e trasversale delle rotaie ferroviarie. La riprofilatura dovrà essere effettuata con le Classi di accettazione migliori prescritte dalla norma, che sono la Classe 1 per il profilo longitudinale e la Classe Q per il profilo trasversale.

Le misurazioni di vibrazioni nelle abitazioni dei recettori, abitanti lungo le linee, dovranno essere effettuate con le metodologie prescritte della citata norma UNI 9614.

AI CITTADINI INTERESSA SOLTANTO IL RISULTATO IN TERMINI DI CONTROLLO DELLE VIBRAZIONI

Occorre distinguere i rimedi conseguibili in breve tempo con la manutenzione ordinaria, che interessano a tutti, e i rimedi nel medio-lungo tempo conseguibili mediante la ricerca e la sperimentazione, che interessano i gestori del servizio del trasporto pubblico.

Alle persone disturbate dalle vibrazioni interessano poco gli interventi da realizzare tra un anno o più tardi (gli armamenti e le strutture desolidarizzate, anche con "dalles flottantes"), né gli interventi ancora oggetto di ricerca (i modificatori di attrito, gli assorbitori dinamici, l'influen-

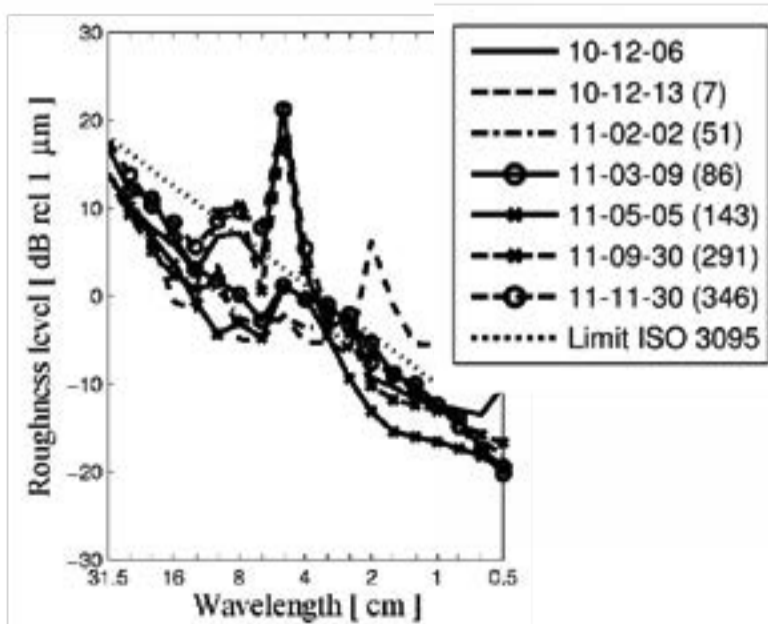


Figura 11. L'ampiezza della mazzatura (su scala logaritmica, in dB) è indicata con gli spettri per 1/3 d'ottava della lunghezza d'onda della mazzatura stessa, con le date delle misurazioni e l'indicazione (tra parentesi) dei giorni trascorsi dopo la molatura. La misurazione di prima della molatura (in linea continua) mostra che la lunghezza d'onda è compresa tra 4 e 14 cm con picchi a 5 e 8 cm. Dopo il 291° giorno la mazzatura non aumenta più ed è ritornata circa uguale a quella iniziale di prima della molatura [3]

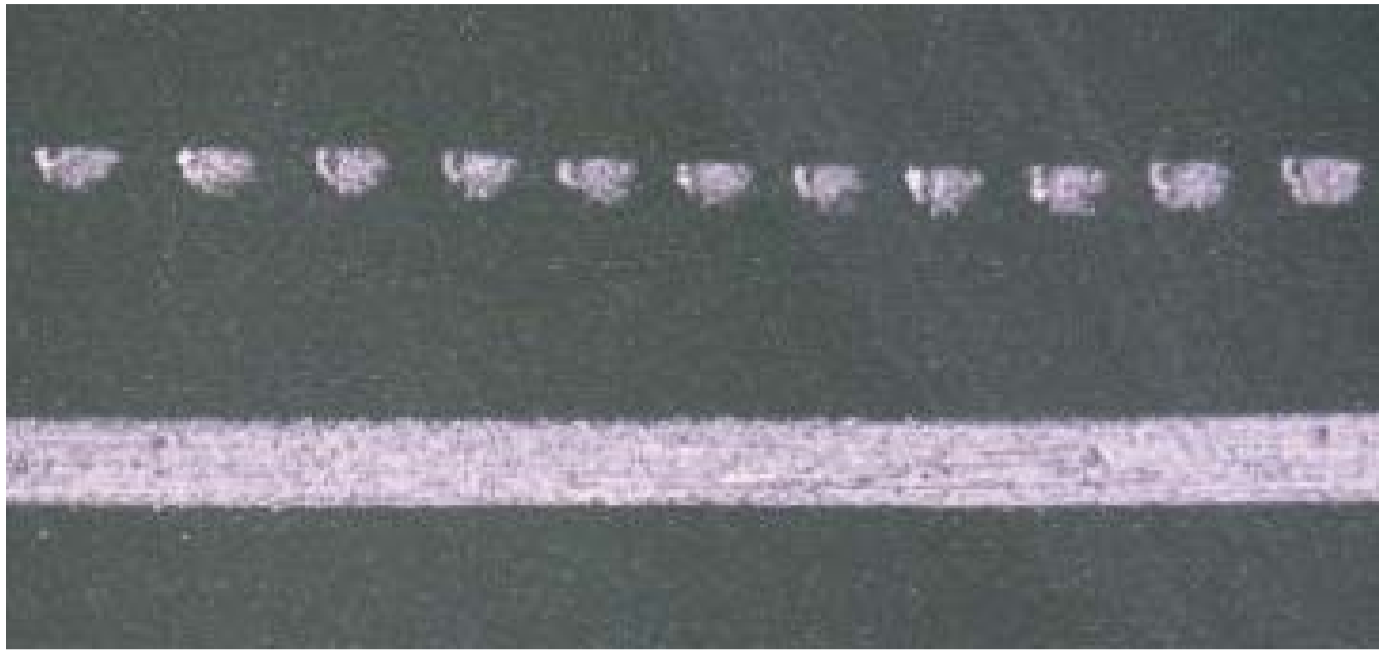


Figura 13. Il gesso sulla lavagna lascia una linea continua, ma con il gesso tenuto perpendicolare alla lavagna il contatto gesso-lavagna è discontinuo, a scatti, e la linea del gesso sulla lavagna è tratteggiata [9]

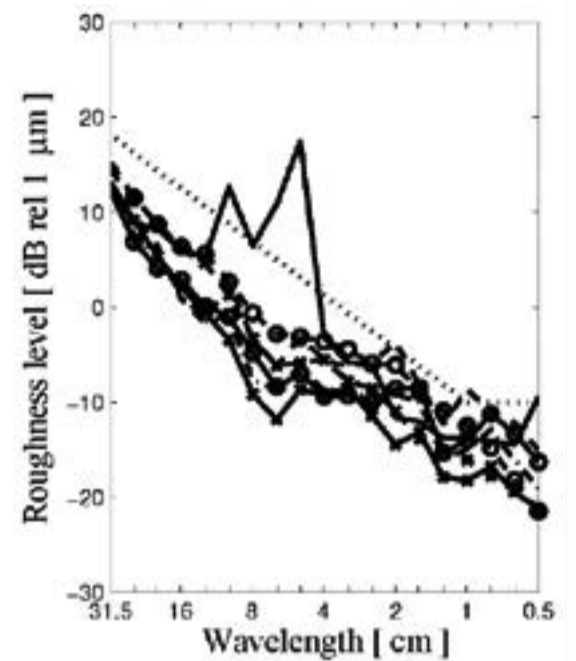


Figura 16. Un lubrificatore (friction modifier) installato sulle rotaie di una curva ha eliminato la mazzatura. La sperimentazione è stata effettuata sulla stessa curva di Figura 11 ma un anno dopo. Il grafico con linea continua è della mazzatura misurata subito prima della molatura e le successive misurazioni sono ripetute ogni due mesi [10]

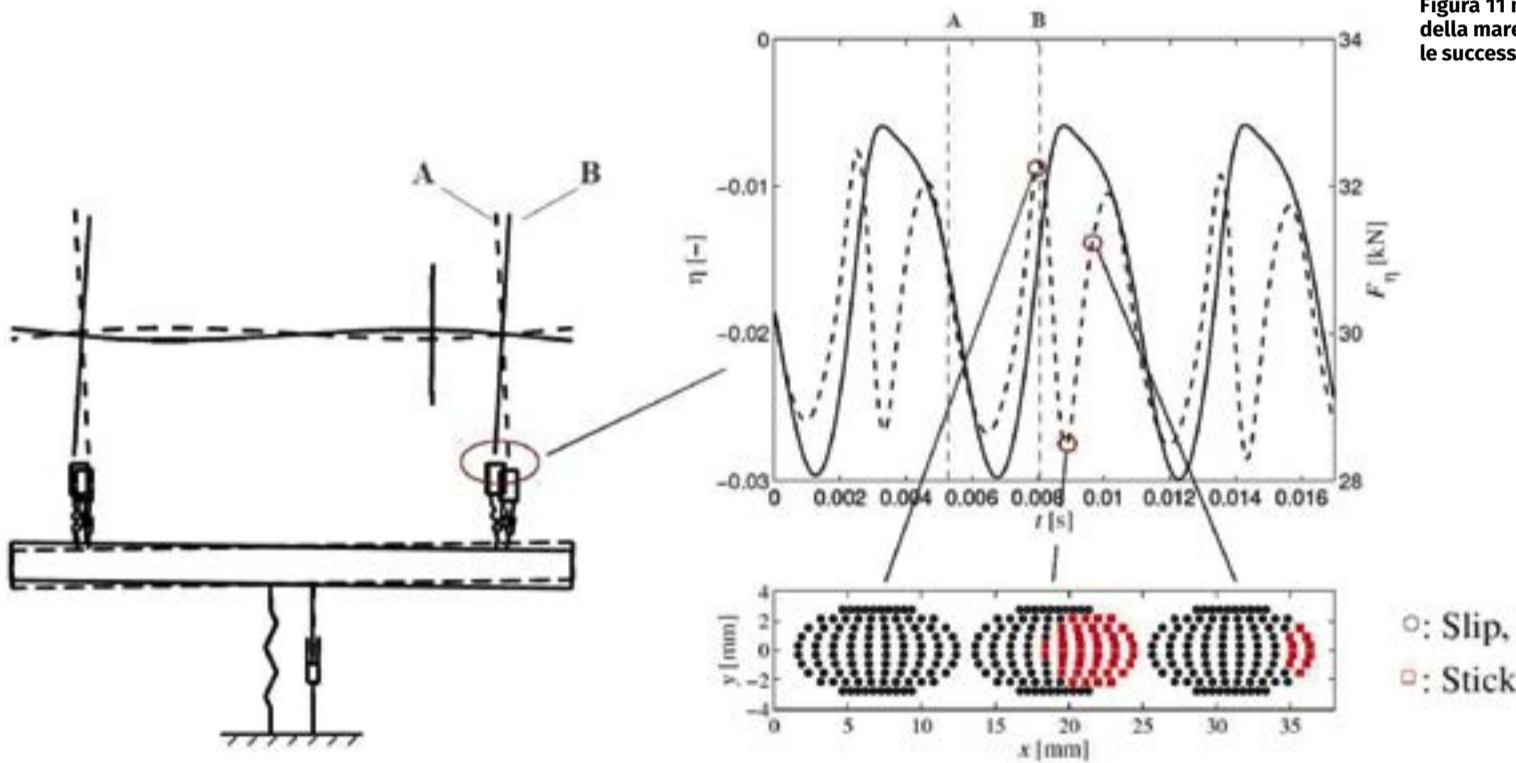


Figura 14. (a sinistra) Il modello della formazione della mazzatura in una curva molto stretta della metropolitana di Stoccolma, dove è mostrata la deformata dell'asse anteriore della curva in due momenti separati da mezzo periodo della vibrazione e (a destra) l'andamento nel tempo dello scorrimento o strisciamento o scivolamento laterale e della forza di scorrimento. È mostrata la superficie del contatto ruota-rotaia con l'area della fase di aderenza (indicata in rosso) e l'area di scivolamento o strisciamento (in nero) [10]



Cross-section, longitudinal cut

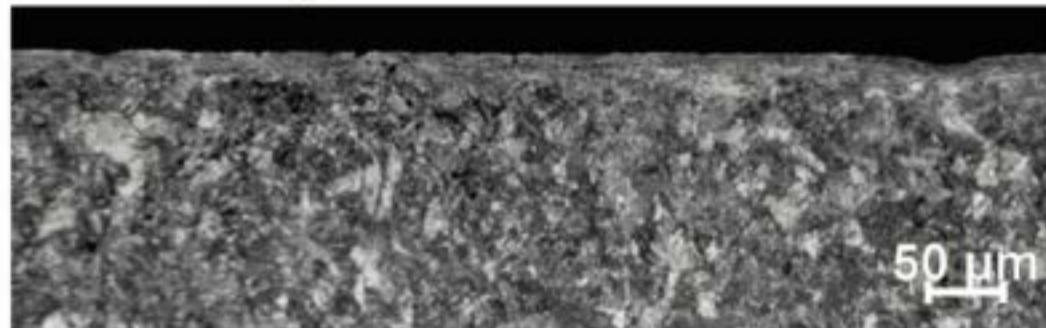
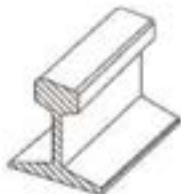
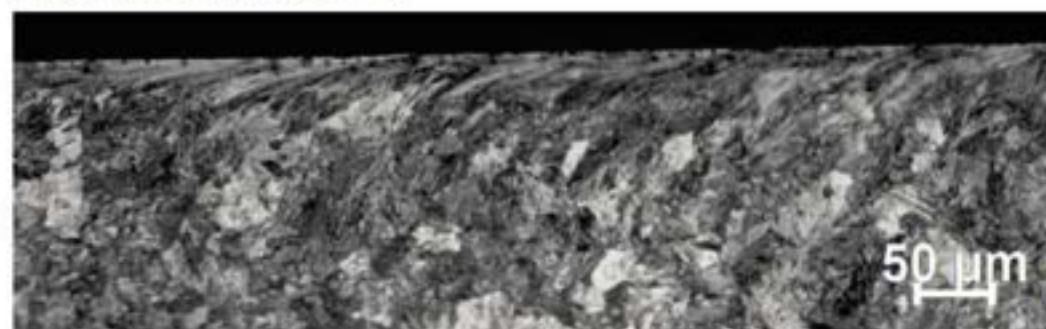


Figura 15. (sotto) La sezione trasversale di una rotaia bassa (interna alla curva) affetta da forte mazzatura mostra che lo strato superficiale della rotaia di spessore circa 50 micron è deformato plasticamente verso l'esterno del binario e (sopra) invece la sezione longitudinale della rotaia non mostra alcuna deformazione plastica dello strato superficiale



Cross-section, lateral cut



za sulle vibrazioni dei nuovi treni e della falda acquifera) e neanche le caratteristiche tecniche della manutenzione (il numero di treni motori, il numero di molature all'anno e i chilometri molati all'anno). Ai cittadini disturbati dalle vibrazioni della metropolitana interessa conoscere lo stato della superficie delle rotaie, periodicamente e sull'intera rete, e per far questo il gestore della rete metropolitana deve effettuare le misurazioni della mazzatura perché nessun altro oltre lui ha accesso alle gallerie e ai treni (per installarvi strumentazioni di misura).

I risultati delle misurazioni devono essere pubblicati o resi accessibili agli abitanti residenti lungo le linee e ai loro rappresentanti in modo da ristabilire il clima di fiducia tra i cittadini disturbati dal transito dei treni e la Pubblica Amministrazione (di cui le aziende di trasporto pubblico fanno parte). Così verrà ribaltata l'attuale situazione di lamentele dei cittadini disturbati dal rumore e dalle vibrazioni, con contestazioni pubbliche e perfino cause contro le aziende di trasporto e i Comuni con incarichi ai CTU per accertare motivi e rimedi. Cause con inevitabile aggravio di costi per entrambe le parti, cittadini e Pubblica Amministrazione, oltre che tempi lunghi e snervante attesa per la riduzione delle vibrazioni che alla lunga porta all'esasperazione [5].

La condizione ottimale e più importante è che i cittadini siano coinvolti passo-passo e partecipi agli interventi di manutenzione e alle misurazioni di controllo.

***CONSULENTE IN ACUSTICA E VIBRAZIONI, ORDINE INGEGNERI MILANO**
(ing.campolongo@gmail.com)

NOTE

- [1] G. Campolongo Continuous recording of rail corrugation, su Railway Gazette International, 1976, e Marezzimetro: dispositivo accelerometrico per la misura continua dell'usura ondulatoria delle rotaie, su Ingegneria Ferroviaria, 1977.
- [2] Animazioni di "attacca e scivola" sono disponibili in rete ai link: www.youtube.com/watch?v=SxNJa4cnDmc e www.youtube.com/watch?v=TcebgBomjRs
- [3] P.T. Torstensson, Rail corrugation growth on curves mea-

- surements, modelling and mitigation, pubblicato in Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design, Vol. 126 p. 659-666, 2015.
- [4] <https://www.atm.it/it/ImpreseFornitori/SistemiDiQualificazione/GUCE/PUBBL%20GUCE%20755.pdf>.
- [5] G. Campolongo, www.rumoreincasa.it, 14/05/2019.
- [6] www.missionerumore.it
- [7] S.L. Grassie, Studs: A squat-type defect in rails, in Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F

- Journal of Rail and Rapid Transit 226(3):243-256, may 2012. DOI:10.1177/0954409711421462
- [8] Misurazione effettuate da G. Campolongo, 2020.
- [9] <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Craie3.jpg#/media/File:Craie3.jpg>
- [10] P.T. Torstensson, Dynamic train-track interaction at high vehicle speeds considering the inertial effects due to wheel rotation, pubblicato in Journal of Sound and Vibration, Vol. 330 p. 5309-5321, 2012.