

Coordinato da:



MINISTERO
DELLE INFRASTRUTTURE
E DEI TRASPORTI

Organizzato da:

in qualità di Provider



evento realizzato in collaborazione con



Area Tematica – SOSTENIBILITA' ED EVOLUZIONE DEL SISTEMA TRAM

ESPERIENZE INTERNAZIONALI SU PROGETTAZIONE E MANUTENZIONE DELL'ARMAMENTO METROPOLITANO

Andrea Bracciali^{1,2}, Gianluca Megna¹

¹ Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università degli Studi di Firenze

² AB Consulting, Firenze

Contatti: 347 2429240, andrea.bracciali@unifi.it, abconsulting@andreabracciali.it

1. Introduzione

La riduzione del rumore e delle vibrazioni prodotte dai veicoli metropolitani, intendendo con questa accezione sia le metro vere e proprie che i tram, si può ottenere con tre metodologie distinte e complementari:

- mediante la riduzione delle eccitazioni del sistema ferrotranviario agendo sulla qualità delle superfici di acciaio in contatto;
- intervenendo sul percorso di trasmissione del disturbo oppure;
- agendo localmente sul singolo ricettore.

Scartando a priori l'ultima ipotesi, che non può essere considerata a livello di progetto ma, eventualmente, come *extrema ratio* in casi in cui non sia possibile fare altro, gli interventi sul percorso possono consistere nella realizzazione di un armamento particolarmente isolante (quali lo *slab track*

con le *booted sleepers* – o “traverse incalosciate” – o il *floating slab track* – o armamento flottante) o di barriere antirumore. Alcune metodologie, che parevano assai promettenti, quali l’uso delle trincee per abbattere la trasmissione delle vibrazioni o gli elementi elastici sotto traversa (*under sleeper pads*) o sotto massicciata (*under ballast mats*) hanno dato risultati controversi sia per quanto riguarda la pratica applicabilità che per gli abbattimenti effettivamente ottenibili.

Concentrandoci, per il caso delle metropolitane in galleria, sull’aspetto vibrazionale è evidente che la qualità superficiale delle rotaie giochi un ruolo fondamentale. Anche in questo caso è possibile intervenire in tre modi:

- evitare il deterioramento a livello di progetto, cercando per quanto possibile di non disegnare tracciati con curve di raggio stretto;
- limitare per quanto possibile il deterioramento in esercizio modificando le condizioni di interazione ruota-rotaia utilizzando i cosiddetti *friction modifiers*;
- ricorrere alla manutenzione correttiva eliminando l’irregolarità della *running band* delle rotaie mediante asportazione di materiale con tecniche di molatura o di fresatura.

L’irregolarità delle rotaie delle quali si parla quando si trattano i disturbi vibroacustici sono i *difetti longitudinali periodici*, ossia quelli che vengono compendiate nel termine inglese *rail corrugation* che li differenzia viceversa dalla *rail roughness* che è una irregolarità ad ampio spettro senza componenti dominanti.

2. I meccanismi di corrugazione delle rotaie ferroviarie

L’articolo fondamentale che ha gettato le basi per l’ultimo trentennio di analisi, studi e ricerche nel campo della corrugazione è sicuramente il lavoro di S. Grassie e J. Kalousek pubblicato nel 1993 sul *Journal of Rail and Rapid Transit* [1].

In questo lavoro venivano fornite due informazioni fondamentali: primo, le varie tipologie di corrugazione venivano classificate e descritte sistematicamente e, secondo, il meccanismo di formazione della corrugazione veniva identificato come risultante di due caratteristiche distinte, e cioè un *wavelength fixing mechanism*, cioè una condizione fisica che definisce il passo della corrugazione della rotaia, ed un *damage mechanism*, cioè il meccanismo che porta, per asportazione di materiale o per deformazione plastica, a modificare il profilo della rotaia (**Figura 1**).

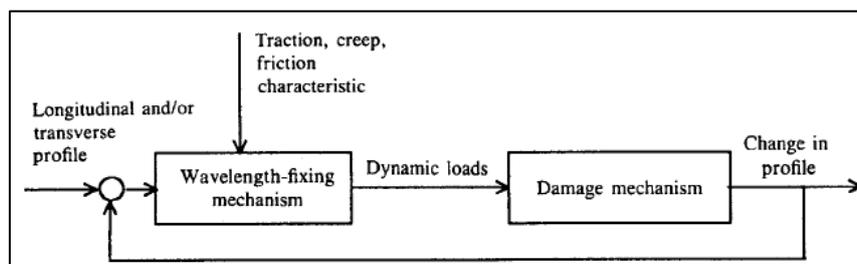


Figura 1. Diagramma di un generico meccanismo che porta alla corrugazione [1].

Quel primo articolo è stato poi ripubblicato, con identico titolo ma con contenuto aggiornato, nel 2009 [2], nel quale è riportata la tabella in **Figura 2**.

Senza entrare nel dettaglio, è sufficiente dire che alcuni meccanismi osservati, quale le *roaring rails*, la *heavy haul corrugation*, la *‘light rail’ corrugation* e la *trackform-specific corrugation*, per la puntuale disamina e descrizione dei quali si rimanda appunto all’articolo [2], sono scarsamente presenti, per non dire residuali, nelle metropolitane costruite con armamenti moderni. È pur vero, prevenendo obiezioni a quanto appena detto, che magari dopo trent’anni le rotaie si “ammalorano” anche in rettilineo, ma è pur vero che niente è eterno e che il problema può essere gestito con una molatura molto diradata (ad esempio ventennale) giusto per “rinfrescare” il profilo e cancellare non solo le irregolarità geometriche superficiali ma anche i danneggiamenti da rotolamento che con il lungo andare si possono accumulare.

Type	Wavelength-fixing mechanism	Where?	Typical frequency (Hz)	Damage mechanism	Relevant figures	References	Treatments*	
							Demonstrably successful	Should be successful
1 Pinned-pinned resonance ('roaring rails')	Pinned-pinned resonance	Straight track, high rail of curves	400-1200	Wear	2-6	[5-23]	Hard rails, control friction	Increase pinned-pinned frequency so that corrugation would be <20 mm wavelength
2 Rutting	Second torsional resonance of driven axles	Low rail of curves	250-400	Wear	2, 7-11	[5, 6, 24-36]	Friction modifier, hard rails, reduce cant excess, asymmetric profiling in curves	Reduce applied traction in curving, improve curving behaviour of vehicles, dynamic vibration absorber
3 Other P2 resonance	P2 resonance	Straight track or high rail in curves	50-100	Wear	3, 6, 17, 18	[4, 24, 37]	Hard rails, highly resilient trackforms	Reduce unsprung mass
4 Heavy haul	P2 resonance	Straight track or curves	50-100	Plastic flow in troughs	10, 12-14	[38-40]	Hard rails	Reduce cant excess when corrugation is on low rail
5 Light rail	P2 resonance	Straight track or curves	50-100	Plastic bending	15, 16	[41]	Increase rail strength and EI	Reduce unsprung mass
6 Trackform-specific	Trackform specific	Straight track or curves	-	Wear	19, 20	[24, 42]	Hard rails, friction control	Avoid 'peaky' resonances, improve steering

*Grinding or reprofiling more generally is a treatment for all types of rail corrugation. Irregularities in general, such as from welds and joints, should also be reduced as far as possible.

Figura 2. Definizione e classificazione delle varie tipologie di corrugazione, degli wavelength fixing mechanism e dei damage mechanisms [2].

Ma il meccanismo che affligge la quasi totalità delle linee metropolitane è il cosiddetto *rutting*, ossia una irregolarità periodica con energia tipicamente concentrata nelle bande di 1/3 di ottava di lunghezza d'onda 32.5, 50, 63 ed 80 mm che compare sulla "corda bassa" nelle curve di raggio stretto. Il meccanismo di generazione fu inizialmente associato alla seconda risonanza torsionale delle sale montate motrici [1], provviste quindi di riduttore, ed al periodico superamento del limite di aderenza, generando un meccanismo di *stick-slip* che provoca appunto l'irregolarità.

Negli anni la comprensione dei meccanismi di generazione del *rutting* è cambiata. Lo stesso Grassie, in un suo recentissimo lavoro del 2022 [3] indica che i risultati di ulteriori approfondimenti effettuati da altri ricercatori mostrano che "*The wavelength-fixing mechanism for this type of corrugation is the fundamental flexural resonance of axles*", attribuendo quindi la generazione del fenomeno ad una caratteristica flessionale che tutte le sale montate hanno, motrici o portanti. Questo porta Grassie a concludere che questa condizione è di fatto ineliminabile ed infatti affligge praticamente tutte le metropolitane del mondo ("*The fact that this resonance would have existed on railway vehicles since the inception of railways satisfactorily explains not only why corrugation has such a long history but also why the phenomenon is so widespread*").

Questa identificazione era parsa evidente ad uno degli autori quando nel 2007, per alcune attività effettuate per conto di RFI SpA sulla riviera ligure di Levante, aveva avuto la fortuna di osservare il passaggio di un convoglio di materiale regionale (E656+carrozze MD) nella curva in stazione di Recco lato Genova subito dopo l'inizio di una leggera pioggia, il che aveva permesso di evidenziare come la formazione di *rutting* fosse indubabilmente legata anche alla dinamica trasversale delle sale (**Figura 3**). Tale foto fu utilizzata come "logo" per il convegno *Contact Mechanics 2009* di Firenze, durante il quale egli ebbe modo di confrontarsi con i colleghi specialisti del settore (Torstensson, Nielsen, Kurzeck) che quindi svilupparono la modellazione numerica pubblicando gli articoli sopra citati e giungendo finalmente alla comprensione della *root cause* del problema.

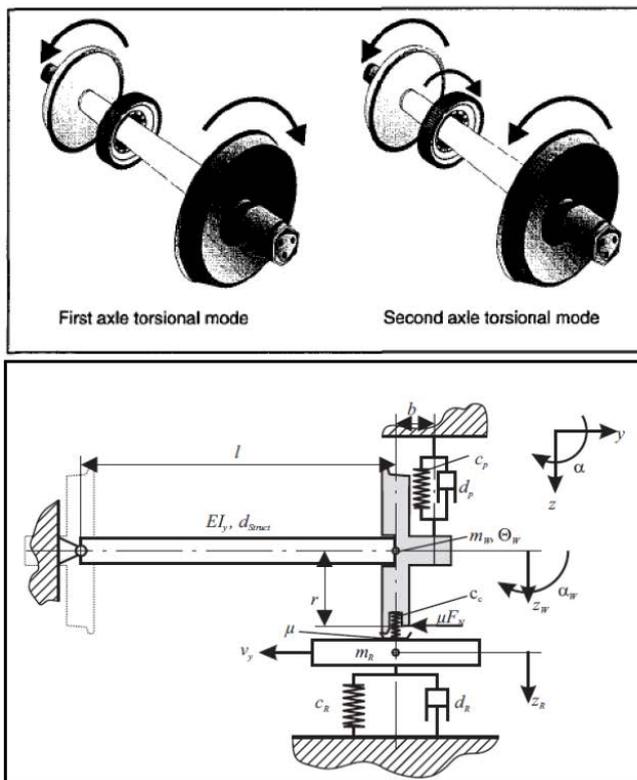


Figura 3. Iniziale attribuzione della formazione di ruting al comportamento torsionale delle sale (in alto a sinistra, da Rail Corrugation Mitigation in Transit, Transit Cooperative Research Program, Research Results Digest, June 1998--Number 26), successiva corretta attribuzione al comportamento flessionale delle sale montate (in basso a sinistra, da B. Kurzeck, Combined friction induced oscillations of wheelset and track during the curving of metros and their influence on corrugation, Wear 271 (2011) 299–310, doi:10.1016/j.wear.2010.10.049) ed evidente influenza del comportamento laterale al contatto ruota-rotaia (a destra, foto A. Bracciali, Recco, 12.02.2007).

Non bisogna dimenticare che se la classificazione è importante ancora più importante è forse comprendere quali sono i cd. *treatments*, cioè i metodi che dovrebbero tenere sotto controllo, e sperabilmente portare ad eliminare, l'usura longitudinale delle rotaie. Fra questi si distinguono [2] quelli "dimostrabilmente efficaci" (uso di *friction modifiers*, di rotaie di elevata durezza, uso di profili asimmetrici) e quelli che *should be successful*, cioè "dovrebbero funzionare" (ridurre la trazione in curva, migliorare il comportamento dinamico del veicolo, uso di assorbitori di vibrazioni) ma sui quali non si è in grado di esprimere un giudizio compiuto a livello progettuale.

3. Si può progettare un armamento che *corrugation-free*?

La domanda che tutti i gestori pongono ai progettisti è sicuramente questa. In generale una risposta univoca non esiste, in quanto il progettista dell'armamento molto spesso non conosce i dettagli del veicolo che percorrerà una certa linea (ed in molti casi anche se li conoscesse non saprebbe cosa farsene!).

In particolare, l'interazione fra le masse sospese (una e due volte) del veicolo e l'elasticità verticale del binario è responsabile della cosiddetta *P2 resonance* (si veda ancora la tabella di **Figura 2**) che può essere evitata solo con opportuni ragionamenti sulla rigidità dei supporti, sugli smorzamenti coinvolti, etc., argomenti che non possono essere dettagliati in questa memoria ma che, sicuramente, possono essere risolti con un approccio olistico all'interazione fra veicolo e struttura.

Se ne può concludere che oggi è possibile progettare un armamento *corrugation free*? La risposta purtroppo è "no" per quanto riguarda il *rutting* che, come abbiamo visto, dipende dai modi di vibrare flessionali delle sale montate.

Lo stesso Grassie, nel già citato articolo [3], relativo ad un suo lavoro di consulenza che verrà ripreso più avanti, ammette che "*No specific recommendations were made (al cliente, n.d.a.) to mitigate rutting corrugation... where rutting might be expected to occur e.g. in severe curves on the exit from*

stations and on uphill gradients... this could not have been prevented by making changes in the trackwork but could best be treated by installing friction modifier in the sections of track where it occurred...” continuando poi, con notevole onestà intellettuale, con “No one can predict with confidence whether or how quickly rail corrugation will occur as a result of a single mechanism in a single location on a single railway system. It is even more difficult, if not impossible, to predict whether or not rail corrugation will occur as a result of the many mechanisms that give rise to the phenomenon”.

Quindi è evidente che contro la *rutting corrugation* gli unici provvedimenti sono quelli mitigativi: *friction modifier* per rallentarne la crescita e molatura per rimuoverla. Magari anche molto spesso.

Giova a questo punto ricordare che secondo alcuni autori le forze al contatto ruota-rotaia nelle metropolitane possono crescere molto prima di raggiungere la saturazione del vincolo (cioè slittare per raggiungimento del limite di aderenza) con valori di aderenza addirittura fino a 0.8 [4] mentre valori pratici di 0.6 sono stati riscontrati [5] anche nella Linea 5 della metropolitana di Milano della quale si parlerà più oltre (**Figura 4**). Va da sé che questa condizione porta, nel caso si verificano le condizioni minime necessarie per la formazione del *rutting*, a degradi molto rapidi ed alla conseguente necessità di molature molto frequenti, a distanza anche di pochi mesi l'una dall'altra.

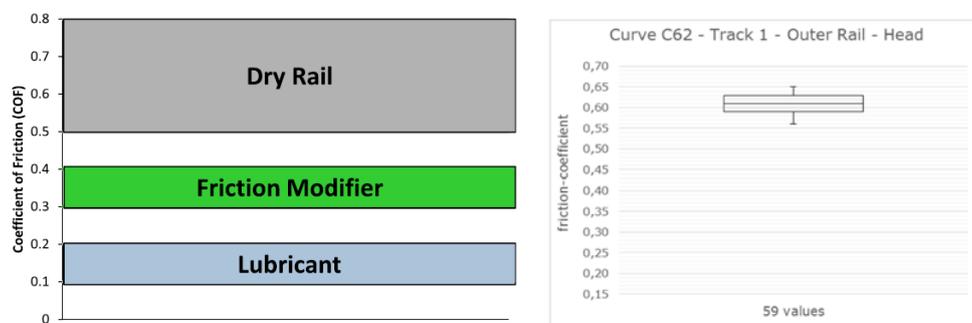


Figura 4. Valori tipici dell'aderenza per diverse condizioni delle superfici ruota-rotaia in contatto [4] (a sinistra). Valori di aderenza misurati nella linea M5 di Milano [5] (a destra).

4. Veicoli a ruote indipendenti: sono la soluzione?

Dato che l'assile e le ruote, che costituiscono un unico corpo rigido, ossia la sala montata, sono responsabili della corrugazione nelle curve delle metropolitane, sembrerebbe logico “rimuovere gli assili”, ossia adottare quell'architettura che nel mondo anglosassone è nota come IRW (*Independently Rotating Wheels*), cioè “ruote indipendenti” (come negli autoveicoli).

Numerosi studi sono stati svolti fino alla fine degli '90 sui veicoli con IRW con lo scopo precipuo di raggiungere velocità molto elevate (si può dimostrare che un carrello con ruote indipendenti non può serpeggiare con la classica instabilità di marcia), ma si è infine desistito visto che i risultati ottenuti (basti qui citare i fondamentali lavori di Bridget Eickhoff [6], una delle più grandi menti di British Rail Research, e del prof. Alan Wickens, dinamicista e padre dello sfortunato APT britannico) hanno dimostrato che i carrelli con gli assili “tagliati” o senza assili marciano con “one or other of the wheels ... in continuous flange contact” [7]. Quindi prendere un carrello normale e tagliare o togliere gli assili non funziona, eccezion fatta per i tram a piano ribassato i quali, anch'essi, viaggiano “sghebbati” senza alcun effetto centrante se non quello assolutamente insufficiente dato dal richiamo gravitazionale dato dalla eventuale conicità dei cerchioni.

È però interessante studiare alcuni veicoli che hanno avuto l'ardire di proporre soluzioni IRW. Fra questi sono degni di nota due casi, per i quali riportiamo (**Figura 5**):

- i tram ULF (*Ultra Low Floor*) di Vienna, descritti anche in una memoria che verrà diffusamente descritta nel seguito [12], inizialmente sviluppati dalla Simmering-Graz-Paukert (poi acquistata da Siemens), che per motivi legati alle conoscenze tecniche dell'epoca hanno sempre marciato “storti” ed hanno obbligato a sviluppare degli *escamotage* (abbondantemente descritti in [8]) piuttosto discutibili per “staccare” i bordini dalle rotaie alle quali sembravano particolarmente affezionati;

- i treni Talgo, con la loro architettura IRGW (*Independently Rotating Guided Wheels*), analizzata anche in [9], che è in grado di orientare le ruote indipendenti in maniera perfettamente radiale nelle curve di raggio costante ma che, a conoscenza dell'autore, a tutt'oggi non è ancora disponibile in versione motorizzata e quindi inutilizzabile per una metro.

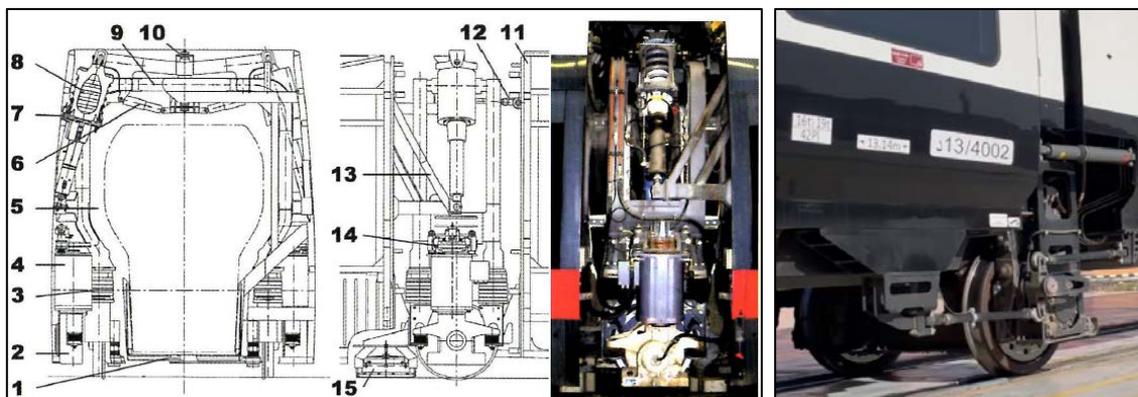


Figura 5. Portale con ruote IRW motrici del tram ULF di Siemens per il tram di Vienna (da P. Mattersdorfer - Niederflurstrassenbahn ULF, ISBN 978-3-9502250-7-5, a sinistra). Asse portante con IRW di un treno Talgo per l'Egitto (fonte: Internet).

Sembra quindi che, almeno al momento, non esista alcuna possibilità sul mercato di approvvigionarsi di un veicolo metropolitano con le relative caratteristiche di accelerazione e frenatura elettrica (che impongono la trazione almeno su 2/3 delle ruote) che sia rispettoso delle rotaie.

5. Una proposta innovativa

Le metropolitane sono caratterizzate da un piano di incarrozzamento elevato (1100 mm secondo le [10] e [11]) e percorrono linee con raggi stretti ma comunque con curve raccordate con clotoidi.

Queste caratteristiche, molto diverse da quelle dei tram che spesso sono costruiti a piano completamente o parzialmente ribassato e che percorrono tracciati anche "storici" nei quali i raccordi possono anche essere inesistenti, hanno consentito di sviluppare un concetto di veicolo metropolitano completamente nuovo e che si vuole qui descrivere brevemente rimandando per i dettagli all'articolo pubblicato nel 2021 [12].

Il convoglio metropolitano sviluppato rispetta anzitutto i parametri cinematici (accelerazione, frenatura) nonché le caratteristiche generali di un convoglio metropolitano circolante nella città di Roma (sagoma, numero di porte, lunghezza, numero di passeggeri, carico assiale, etc.).

Il convoglio proposto è azionato da ruote indipendenti montati su *rodal* del tutto simili a quelli utilizzati da Talgo (si veda ancora [9]) che però sono stati resi motori grazie all'utilizzo di motori sincroni a magneti permanenti (PMSM – *Permanent Magnet Synchronous Motor*) con architettura *direct drive* o *gearless*, ovvero sia con accoppiamento diretto motori-ruote senza l'interposizione di riduttori. La guida degli assi anteriori non è stata effettuata con sistemi attivi ma con il collaudato meccanismo del *cross-bracing*, che si può dimostrare essere perfettamente funzionante se la lunghezza del raccordo è "ragionevole", cosa che si verifica in tutte le metropolitane (mentre come già accennato la stessa cosa non può dirsi per le linee tranviarie). Per l'evidente architettura ed il sistema di azionamento delle singole ruote il veicolo è stato classificato come GDGIRW ossia *Gearless Driven Guided Independently Rotating Wheels* (**Figura 6**).

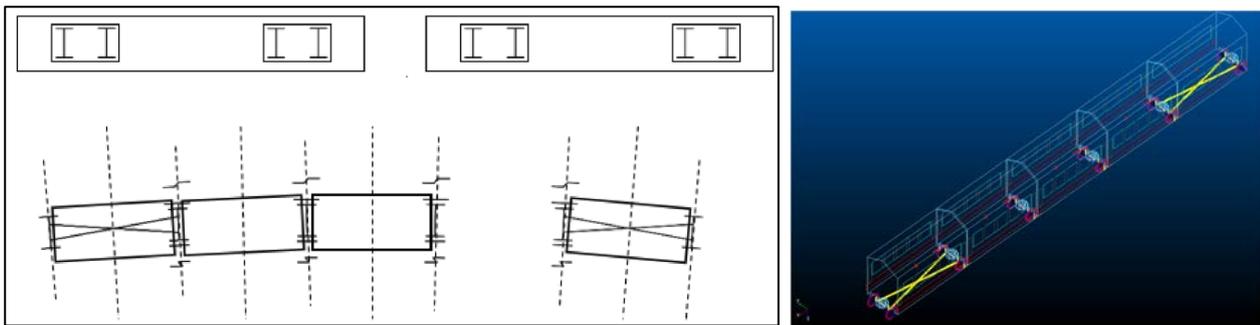


Figura 6. Confronto fra le architetture di una metro convenzionale e quella della metro GDGIRW (a sinistra) e modello multibody del veicolo GDGIRW minimo (5 casse).

L'utilizzo di motori PMSM consente un controllo in velocità assai accurato (non è necessario un controllo in posizione non trattandosi di una macchina utensile...) e la logica di funzionamento è molto semplice: stessa velocità angolare delle due ruote in rettilineo, stessa coppia delle due ruote in curva. Nel primo caso si ripristina "via software" il vincolo torsionale fra le ruote con una sorta di "assile elettrico" e quindi con tutti i benefici di autocentrimento della sala, nel secondo caso si ha un "effetto differenziale" come quello dei veicoli stradali a tutto vantaggio della inscrivibilità in curva.

Il problema del passaggio dall'uno all'altro modo in realtà non esiste, visto che nelle metro a guida automatica la posizione del veicolo è nota istante per istante e quindi è semplicissimo commutare da un modo all'altro. Si tenga presente che anche errori di comando non impattano sulla sicurezza: il veicolo è *interamente guidato meccanicamente con leve*, quindi un erroneo comando di trazione non ha alcuna conseguenza sulla sicurezza della marcia.

L'articolo [12] entra poi nel dettaglio del comportamento ad usura ed, in generale, di danneggiamento delle rotaie sia della metro convenzionale che della metro innovativa. Tutti questi fenomeni, assai presenti e ben evidenti nella simulazione comparativa con il veicolo esistente, scompaiono nel caso della metro GDGIRW per due motivi:

- il *rodal* risulta essere sempre radiale, annullando l'angolo di attacco e quindi (fra l'altro) eliminando completamente la possibilità di sormonto del bordino oltre ad annullare completamente, in condizioni di equilibrio (*cant deficiency* o accelerazione non compensata nulli) il lavoro di attrito (o *wear number*) $T\gamma$ longitudinale, il rapporto Y/Q , le forze di *ripape* e le *gauge spreading forces*;
- la trazione e la frenatura, anche al massimo delle caratteristiche richieste, portano a valori di $T\gamma$ ridicoli che non innescano neanche fenomeni di danneggiamento risultando grandemente inferiori al valore minimo perché questi si manifestino (valori fra 0 e 3 J/m contro un valore di *trigger* di circa 15 J/m per rotaie in acciaio R260 secondo EN 13674-1) anche in condizioni altamente sfavorevoli (partenza a pieno carico da fermo su curva con $R=200$ m, sopraelevazione 160 mm e pendenza del 50 ‰).

È evidente che si è in presenza di prestazioni eccezionali, non raggiungibili con alcuna architettura esistente, che garantiscono di fatto una vita "pressoché infinita" (fatte salve le operazioni "rarissime" più sopra menzionate) e, soprattutto, completamente *corrugation free* in quanto il veicolo, anche se in curve di raggio strettissimo e con condizioni cinematiche sfavorevoli, è come se stesse percorrendo un rettilineo.

6. Il mercato dei veicoli metropolitani

Gli autori hanno recentemente avuto modo di accedere alla documentazione messa a disposizione da ATM per una gara per la fornitura di locomotive elettriche di soccorso a batteria. Fra la numerosa documentazione è di interesse, per la presente memoria, il documento [13] che riporta in un unico documento le caratteristiche, peraltro reperibili con un po' di pazienza anche su Internet, del materiale circolante sulla rete metropolitana di Milano (**Figura 7**).

Non è evidentemente possibile riportare qui tutto il documento che mostra oltre 40 *figurini* di veicoli metropolitani. La stragrande maggioranza dei veicoli, dalle *Motrici Linea 1 – 1° Lotto* del 1962-63 ai

veicoli *Meneghino* e *Leonardo* del 2014, hanno la stessa architettura dei “veicoli tipo” indicati nelle già menzionate tabelle UNI ([10] e [11]) del 1973, ossia:

- cassa su due carrelli a due assi
- quattro porte per fiancata
- interperno 11100 mm
- passo carrelli 2150-2300 mm
- ...

L'unica differenza fra le varie serie di veicoli è la diversa configurazione del veicolo completo nella configurazione a 6 casse. Se in passato, infatti, si prediligeva l'uso di più UdT (Unità di Trazione) ciascuna composta da 2 o da 3 elementi (intercomunicanti o meno), oggi la tendenza è di acquistare *treni a 6 pezzi completamente intercomunicanti*, il che implica la non scomponibilità (se non per motivi gravi) del treno che quindi ha sempre la medesima composizione (non è possibile fare “treni corti” nelle ore *off-peak*). Questa configurazione ha peraltro i noti vantaggi che la rendono molto gradita all'utenza (possibilità di passare da una cassa all'altra, maggior sicurezza anche per l'uso di CCTV).

Non stupisce quindi, che tutti i veicoli che circolano e che hanno la stessa struttura meccanica provochino i problemi di cui si tratta in quest'articolo, ossia corrugazione estesa a tutte le curve al di sotto di un certo raggio di curvatura.

Gli unici convogli riportati in [13] che hanno un'architettura diversa sono i *Treni Linea 5 – MLA*, che come noto sono costituiti da una composizione fissa di 4 vetture su 5 carrelli (8 assi motori su 10) con passo 2000 mm.

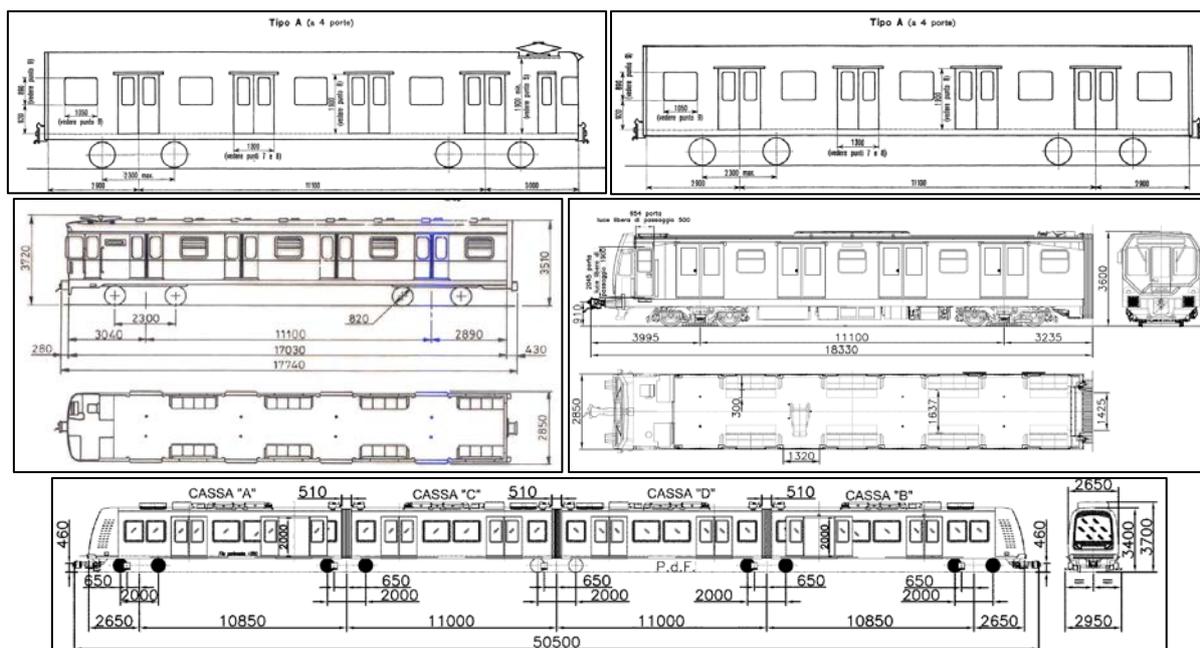


Figura 7. Da sinistra a destra, dall'alto in basso: figurini delle metro “unificate” secondo UNI 7247-73 e 7248-73; motrici linea M1 (1962) e *Leonardo* (2014) Milano, treno *MLA* linea M5 Milano.

Nonostante questa completamente nuova architettura di treno, la situazione generatasi nel 2015 all'atto dell'apertura della Linea 5 di Milano e riportata con dovizia di particolari dai quotidiani nazionali è risultata di notevole gravità, sfociando in interrogazioni al Consiglio Comunale di Milano, contenziosi con i fornitori ed interventi di esperti e consulenti esterni (**Figura 8**).

Non stupisce che anche un'architettura così diversa abbia portato agli stessi problemi dei treni precedenti: il responsabile è sempre *il carrello*, con le sue sale montate, che *vuole andare dritto nelle curve e non vuole girare*.

Metrò 5, usura anomala dei binari Ispezioni in galleria dopo l'allarme

Il Comune nomina un consulente tecnico: azioni tempestive per la sicurezza del servizio

L'allarme per la linea metropolitana M5 ha un nome ostico. La «malattia» che ha colpito la lilla si chiama «marezzatura». È un problema strutturale: un fenomeno di usura anomala dei binari che crea ondulature sulla superficie superiore delle rotaie e che ha ripercussioni anche sui cerchioni delle ruote dei treni. Un problema che si sta verificando lungo la tratta dal capolinea di Bignami fino all'hub di Garibaldi. In particolare, i più colpiti sarebbero però i quasi due chilometri che corrono tra le fermate Isola e Garibaldi.

L'anomalia dell'armamento è protagonista di un fitto carteggio tra Metro 5 (la società che ha costruito l'infrastruttura ed è concessionaria dell'appalto) e il Comune. A segnalarglielo è una nota della Commissione di sicurezza della linea metropolitana. È l'11 dicembre 2014. So-

no passati poco meno di due anni dall'apertura delle prime sette stazioni (Bignami-Zara) e dieci mesi da quella delle due fermate più afflitte dal problema. «Anomala usura dei binari e del materiale rotabile», la dicitura dell'alert inviato a Palazzo Marino. Passano due mesi — è il 6 febbraio 2015 — e dalla giunta, come ricostruisce la determina dirigenziale per la ricerca di un consulente, parte la richiesta di «effettuare ulteriori verifiche e a trasmettere una relazione tecnica per evidenziare le cause della problematica e i possibili rimedi, con descrizione delle azioni tempestive, per consentire il corretto e sicuro esercizio del servizio e, contestualmente, degli interventi per la risoluzione definitiva delle criticità emerse, nonché l'eventuale aggiornamento del programma di manuten-

zione del sistema armamento/rotabile e relativo extra costo». Il 23 febbraio, sempre la Commissione di sicurezza comunica a Palazzo Marino «l'inadeguatezza della valutazione, presentata da Metro 5, sui motivi che hanno generato l'anomalo fenomeno di usura accelerata». La partita ritorna quindi nelle mani del Comune che decide a fine giugno di chiedere un parere esterno, anche per accertarsi che il difetto non si ripresenti sul resto della linea. La scelta ricade sull'ingegnere Roberto Lucani, docente che vanta esperienze con le aziende di trasporto di Bologna, Reggio Emilia e Torino, che dovrà individuare cause e soluzioni. Il consumo fuori controllo della superficie su cui poggiano le ruote dei treni si può verificare per l'uso di acciai sca-



Rotture di staffe e supporti in presenza anche di allentamento di bulloni a bordo dei veicoli

Usure e marezzature sulla superficie di rotolamento del fungo delle rotaie

Rigature ed usure sulla superficie di rotolamento dei cerchioni delle ruote

Figura 8. A volte il rutting è così importante da finire sui giornali (in alto, Corriere della Sera ed. Milano del 05.08.2015) e da provocare danneggiamenti estesi a veicoli ed infrastruttura (in basso, P. Pezzoli, RELAZIONE TECNICA Metropolitana di Milano Linea 5 (Garibaldi FS ÷ Bignami) Tratta Garibaldi ÷ Isola. Valutazione dei fenomeni di usure e marezzature delle superfici di rotolamento, doc. INDAPRO RT-2015-016-02.doc del 05.2015)

Il lettore si domanderà se in altri contesti la situazione sia simile: gli autori hanno avuto, negli anni, possibilità di lavorare con London Underground, Metro Copenhagen, Metro Madrid, etc.... ed ovunque la situazione è la stessa, come testimoniato anche dal recentissimo articolo [14] che mostra *rutting* estensivo su una linea moderna con armamento Sonneville (*booted sleepers*) specificamente disegnato per abbattere le vibrazioni (LVT HA - *Low Vibration Track, High Absorption*).

Senza ombra di dubbio si può dire che il mercato offre quello che il cliente vuole: la *stazione appaltante* (ossimoro, dato che *stazione* vuol dire che sta ferma mentre *appaltante* vuol dire che sta facendo qualcosa) fa gare al massimo ribasso, senza neanche sapere cosa compra, l'importante è che costi poco. Se poi durante l'esercizio è uno stillicidio se ne occuperà qualcun altro.

7. Le novità degli ultimi due anni e la grande illusione

Nel 2022, come si è già visto, Grassie ha presentato nel suo articolo [3] le sue idee in merito alla misure di mitigazione nei confronti della corrugazione delle rotaie, pur con il distinguo, sopra riportato, che non è stato in grado di fornire indicazioni per eliminare il *rutting*.

Questo articolo è in realtà la prima parte del lavoro che Grassie ha effettuato per Mitsubishi Heavy Industries, responsabile per la progettazione del binario della Kajang Line di Kuala Lumpur (Malesia), linea che è stata aperta fra dicembre 2016 e luglio 2017. Nell'altra parte del lavoro, l'articolo [15], Grassie descrive le misure di corrugazione effettuate ed arriva a concludere che a

valle dell'ultima misura da lui effettuata, nel novembre 2018, *“the entire metro was essentially corrugation-free after 31MGT of operation”*, pur senza riuscire a dare una spiegazione logica (*“The metro is a minefield of conditions that are conducive to corrugation formation”*).

Alla conferenza *Contact Mechanics 2022*, svoltasi come noto a Melbourne, Grassie ha presentato un articolo abbastanza stupefacente, intitolato *“Rail corrugation: a problem solved?”* [16].

Come si può intuire questa memoria ha generato notevolissimo interesse in tutta la comunità tecnica e scientifica, in quanto una simile affermazione da parte della massima autorità internazionalmente riconosciuta sull'argomento richiedeva la massima attenzione. In realtà ad una attenta lettura a posteriori (gli articoli [3] e [15] sono stati accettati a luglio 2022, quindi prima del CM2022, ma pubblicati solo nel 2023), si osserva che il contenuto è di fatto esattamente lo stesso. L'articolo del CM2022 è stato poi, come di prassi, pubblicato sulla prestigiosa rivista *Wear* [17].

Nel 2024 Grassie è intervenuto alla *Wheel-Rail Interaction 2024 Rail Transit Conference* [18] ed una sintesi del suo intervento è stata pubblicata su *Railway Track and Structures* di novembre 2024 (**Figura 9**) con lo stesso titolo [19]. Risulta di particolare interesse riportare alcune delle dichiarazioni leggibili in detto articolo:

- *“Monitoring after two years of heavy service traffic indicates that not only is a corrugation-free rail line possible, but that the criteria for design and construction are not especially onerous. The success of the Kajang Line was built on decades of experience and knowledge gleaned from hard-won battles with rail corrugation in all its forms”* (S. Grassie);
- *“I was frankly astounded ... Corrugation is usually everywhere”* (E. Magel, Principal of EM-WRL Consulting Inc., and former Principal Engineer at the National Research Council of Canada);
- *“...through measuring and modeling numerous components, their masses, stiffness, resonances, and other parameters, he said, Stuart Grassie demonstrated that a system can be designed to be corrugation free”* (J. Tuzik, Managing Editor of Interface Journal)

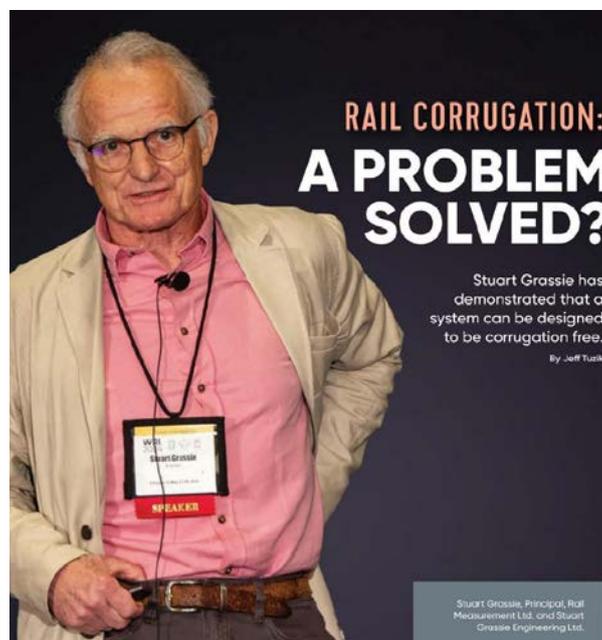


Figura 9. La prima pagina dell'articolo in cui S. Grassie dimostra che la corrugazione delle rotaie (di qualsiasi tipo) è sconfitta per sempre [19].

La battaglia contro la corrugazione sembrava vinta per sempre, ma...

8. La verità sulla Kajang Line di Kuala Lumpur

Uno degli autori è stato contattato, tramite una grande società di consulenza con sede in Olanda, per effettuare un *expertise* per problemi di rumore esattamente sulla stessa linea citata nei lavori di Grassie [3], [15], [16], [17] e [19].

Una volta giunto a Kuala Lumpur le attività di rilevazione del rumore e di vibrazioni, non interessanti nel presente contesto, hanno mostrato come l'efficacia dei sistemi di fissaggio delle rotaie (Pandrol VIPA e Pandrol Vanguard, a seconda della posizione sul tracciato) fosse molto elevata per quanto concerne le vibrazioni e come i problemi di rumore potessero essere tranquillamente affrontati con le raccomandazioni fornite ad MRTC (Mass Rapid Transit Corporation), proprietario della linea.

Durante le ispezioni è però emersa una circostanza del tutto inattesa. Il personale di MRTC e del gestore degli impianti (RRT, Rapid Rail Transit) ha mostrato numerose "corde basse" con evidenti danneggiamenti da fatica da contatto volvente (RCF – *Rolling Contact Fatigue*). I tecnici di Kuala Lumpur hanno assegnato a questo danneggiamento il nome di "turtle shelling", o "guscio di tartaruga", per il particolare e caratteristico aspetto (**Figura 10**).



Figura 10. Il fenomeno del turtle shelling, chiaro danneggiamento da RCF (Rolling Contact Fatigue). Foto A. Bracciali ed RRT.

Sebbene i dettagli di questo danneggiamento verranno discussi in lavoro attualmente in preparazione per il convegno CM2025 di Tokyo, si può riportare che essi sono molto estesi e profondi (una molatura molto “aggressiva” di ben 3 mm non ha minimamente cambiato le indicazioni ottenute con i liquidi penetranti) e riguardano tutte le curve con raggio 200 m equipaggiate con rotaie trattate termicamente R350HT di Nippon Steel.

La situazione appare particolarmente grave, anche perché molte di queste curve sono in viadotto e le conseguenze di eventuali fratture di schianto delle rotaie potrebbero essere assai pesanti. È stata immediatamente avviata una campagna di sostituzione delle rotaie con le cricche più profonde, attività non semplice e parzialmente compromessa dal fatto che l’ispezionabilità con il metodo UT di rotaie con numerosi difetti partenti dalla superficie è limitata.

L’analisi di quanto osservato è ancora in corso, ma è possibile comunque trarre alcune conclusioni intermedie.

Il fatto che la linea abbia completato l’apertura nel luglio 2017 e che entro il novembre 2018 non si fosse manifestata alcuna presenza di *rutting* non è derivato, come sostiene Grassie [19], dalla progettazione o dai suggerimenti forniti al costruttore (anche perché, come visto, non sono stati forniti suggerimenti in merito a questo specifico punto). La mancanza di *rutting* è stata dovuta, inizialmente, *esclusivamente al fatto che sono state impiegate rotaie extradure*, che limitano le usure e quindi hanno impedito la formazione di corrugazione.

A domanda diretta su quando fosse comparso per la prima volta il fenomeno del *turtle shelling*, i responsabili di MRTC hanno risposto testualmente “*The first time would be after finish DLP (defect liability period).. so 2 years after start of operation*”, quindi subito al termine della garanzia biennale... cioè nel 2019.

Se ne conclude che il merito della mancata osservazione di *rutting* è dovuto alla concomitanza di un periodo di osservazione troppo breve e dell’utilizzo di rotaie extradure che non si corrugano ma che si autodistruggono per fatica da contatto volvente.

Nel caso di Kuala Lumpur, quindi, la corrugazione, che attiene ad aspetti di rumore e di vibrazioni, è stata evitata ma ad un prezzo molto salato: le rotaie si sono talmente danneggiate che un potenziale problema di *annoyance* è stato trasformato in un problema di *safety*. Agli autori di questo articolo questa non sembra una conclusione particolarmente felice.

9. Conclusioni

La corrugazione delle rotaie ferroviarie è un fenomeno diffuso. Dei vari meccanismi di formazione della corrugazione, descritti in un’unica fonte per la prima volta nel 1993, alcuni sono affrontabili ed eliminabili a livello di progettazione dell’armamento e, peraltro, sono storicamente relativamente poco diffusi e confinati ad alcune tipologie di armamento relativamente note e quindi non del tutto imprevedibili.

L’unico meccanismo di formazione della corrugazione apparentemente endemico, cioè la comparsa sulla corda bassa delle curve di raggio stretto del cosiddetto *rutting* (o *marezzatura*), è stato finalmente chiarito intorno al 2011. Inizialmente attribuito al comportamento torsionale delle sale motrici, è stato poi appurato essere legato al comportamento flessionale delle sale, motrici o portanti che siano.

Dato che le sale montate fanno parte inscindibile del veicolo ferroviario tradizionale, è ovvio che in tutti i sistemi ferroviari e metropolitani con curve di raggio sufficientemente stretto il problema del *rutting* si verifichi in maniera pressoché ineliminabile.

Al di là di palliativi di vario genere (uso di *friction modifiers*, molatura), l’unico modo per risolvere il problema è *orientare radialmente l’asse delle ruote ed eliminare l’assile*, cose possibili in teoria mediante l’uso della tecnica delle ruote indipendenti (IRW - *Independently Rotating Wheels*). Questa

tecnica, applicata in alcune occasioni, ha purtroppo sofferto sinora di problemi intrinseci, quali costi eccessivi (nel caso di *active guiding*), marcia scorretta (nel caso di carrelli convenzionali) o difficoltà di centramento sul binario (con motori asincroni trifase). L'autore ha proposto un'architettura innovativa che, sfruttando le capacità dei motori PMSM (motori sincroni a magneti permanenti) e della guida meccanica degli assi con leveraggi potrebbe consentire di eliminare definitivamente il problema, ma al momento la proposta non ha avuto alcun seguito.

Recentemente sono stati presentati, a convegni internazionali, corsi di formazione avanzati e su riviste prestigiose, i risultati ottenuti su una linea metropolitana nella quale il *rutting* sembra essere stato definitivamente sconfitto. Uno degli autori, coinvolto per motivi diversi su quella linea, ha viceversa riscontrato come la mancanza di sviluppo del *rutting* sia in realtà dovuta all'uso di rotaie extradure (*heat treated o head hardened*) che, peraltro, mostrano endemici e gravissimi problemi di cricche da *rolling contact fatigue* estese ad intere curve. Il ricorso a rotaie ancora più dure, a volte consigliato da "esperti", non è quindi un rimedio valido sul lungo periodo, risultando un rimedio peggiore del male.

Nonostante gli sforzi degli scienziati di tutto il mondo non è quindi possibile costruire una rete metropolitana con curve di raggio stretto che non presenti la formazione di *rutting* se non vengono contemporaneamente coinvolti anche i progettisti del veicolo per una rivisitazione dello stesso e quindi con un approccio di sistema. L'unico modo è modificare l'architettura del carrello e delle sale, ad esempio nel modo indicato dall'autore di questa memoria, ma questo richiede un cambio di paradigma che né gli utilizzatori né i costruttori di materiale rotabile sembrano essere disposti ad affrontare. Dopo 30 anni, siamo ancora al punto di partenza.

Riferimenti

- [1] S.L. Grassie, *Rail corrugation: characteristics, causes and treatments*, Proc Instn Mech Engrs Vol 207, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 1993, p. 57-68.
- [2] S.L. Grassie, *Rail corrugation: characteristics, causes and treatments*, Proc. IMechE Vol. 223 Part F: J. Rail and Rapid Transit, JRRT 264, 2009, DOI: 10.1243/09544097JRRT264, p. 581-596.
- [3] S.L. Grassie, *The corrugation of railway rails: 1. Introduction and mitigation measures*, Proc IMechE Part F: J Rail and Rapid Transit, 2023, Vol. 237(5) 588–596, DOI: 10.1177/09544097221125626
- [4] R. Stock, L. Stanlake, C. Hardwick, M. Yu, D. Eadie, R. Lewis, *Material concepts for top of rail friction management – Classification, characterisation and application*, Wear, 366-367 + (2016) 225-232. doi:10.1016/j.wear.2016.05.028
- [5] K. Riessberger et al., Technical Report - Measurement of the friction-coefficient at Line 5 of Milano Metro, TU Graz, 18.04.2016
- [6] B.M. Eickhoff, *The application of independently rotating wheels to railway vehicles*, Proc Instn Mech Engrs Vol 207, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 1993, p. 43-54.
- [7] A. Wickens, *Fundamentals of rail vehicle dynamics*, Swets & Zeitlinger, 2005, ISBN 0-203-97099-3
- [8] O. Krettek, P. Lehotzky, *Running behaviour of the single wheel and its influence illustrated by example of the ULF Ultra Low Floor tramcar of the Vienna transport authorities*, 5th Mini Conf on Vehicle System Dynamics, Identification and Anomalies, Budapest, Nov. 11-13, 1996
- [9] A. Bracciali, *Railway wheelsets: history, research and developments*, International Journal of Railway Technology, 5(1), 23-52, 2016. doi:10.4203/ijrt.5.1.2. Invited Opening Lecture at the Third International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance, Cagliari, Italy, 5-8.4.2016.
- [10] UNI 7247-73, Metropolitane. Carrozze con cabina di guida. Dimensioni principali. UNI, Ente Nazionale di Unificazione, Milano.
- [11] UNI 7248-73, Metropolitane. Carrozze senza cabina di guida. Dimensioni principali. UNI, Ente Nazionale di Unificazione, Milano
- [12] G. Megna, A. Bracciali, *Gearless Track-Friendly Metro with Guided Independently Rotating Wheels*, Urban Rail Transit (2021). <https://doi.org/10.1007/s40864-021-00159-2>.

- [13] ATM, Materiale Rotabile Metropolitano, rev. 06 del 21.09.2018.
- [14] L. Faccini, E. Di Gialleonardo, A. Collina, F. Verdoliva, *Study on the effect of mitigation strategies for rail corrugation in metro lines*, Proc IMechE Part F: J Rail and Rapid Transit 2024, Vol. 0(0) 1-12, DOI: 10.1177/09544097241290542
- [15] S.L. Grassie, *The corrugation of railway rails: 2. Monitoring and conclusions*, Proc IMechE Part F: J Rail and Rapid Transit, 2023, Vol. 237(5) 597-605, DOI: 10.1177/09544097221122011
- [16] S.L. Grassie, *Rail corrugation: a problem solved?*, Proceedings of the 12th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems(CM2022), Melbourne, Australia, 4-7 September 2022.
- [17] S.L. Grassie, *Rail corrugation: a problem solved?*, Wear 530-531 (2023) 205005, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.205005>, available online 28 June 2023.
- [18] <https://wri.wheel-rail-seminars.com/rail-transit-seminar-bios-abstracts#bio-s-grassie>, consultato il 01.12.2024.
- [19] S.L. Grassie, *Rail corrugation: a problem solved?*, Railway Track & Structures, November 2024, 10-15.