



## Politecnico di Torino

---

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E AEROSPAZIALE - DIMEAS  
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

### TESI DI LAUREA MAGISTRALE

# Algoritmi di monitoraggio di veicoli ferroviarie e relativi sistemi di misura

*Railway freight vehicle monitoring algorithms  
and related measurement systems*

Candidato  
**Domenico Antonacci**  
Matricola 242044

Docente  
**Chiar.mo Prof. Ing.  
Aurelio Somà**

*Alla mia Famiglia*

# Indice

<b>Abstract</b>	<b>1</b>
<b>1 Introduzione</b>	<b>3</b>
<b>2 Stato dell'arte</b>	<b>5</b>
2.1 Il contesto economico attuale e prospettive . . . . .	5
2.2 Tecnologie di recupero energetico . . . . .	8
2.3 L'internet of Things applicato al Mercato dei Sistemi di Monitoraggio per Veicoli Ferroviari . . . . .	15
2.4 Soluzioni competitive presenti sul mercato . . . . .	17
2.4.1 Il Progetto del "Carro Intelligente" . . . . .	17
2.4.2 L'AxleRing di Positrex . . . . .	19
2.4.3 Perpetuum - Rail Applications . . . . .	20
2.4.4 AMRA wireless sensor technology (Bosch Engineering) . . . . .	21
2.4.5 SKF Insight Rail . . . . .	24
2.4.6 Il progetto S.W.A.M. Rail di Movimatica . . . . .	24
<b>3 Le Moderne Tecniche di Monitoraggio</b>	<b>26</b>
3.1 Una panoramica sulle moderne tecniche di monitoraggio a bordo dei veicoli	26
3.2 Tecniche di Elaborazione dei Segnali . . . . .	28
3.3 Wireless Sensor Networks: tipologie di sensori e grandezze monitorate . . .	29
<b>4 Studio delle cause di danneggiamento nell'infrastruttura ferroviaria</b>	<b>35</b>
4.1 Il progetto D-RAIL FP7 . . . . .	35
4.1.1 Derailments caused by Infrastructure failures . . . . .	36
4.1.2 Derailments caused by Rolling Stock failures . . . . .	38

4.1.3	Derailments caused by Operation failures . . . . .	38
4.1.4	I risultati ottenuti . . . . .	39
<b>5</b>	<b>Wheel-Flat Detection: Definizione di un algoritmo</b>	<b>43</b>
5.1	Introduzione al <i>wheel-flat</i> . . . . .	43
5.2	Dinamica del Wheel-Flat . . . . .	44
5.3	Tipologie di Wheel-flat . . . . .	48
5.4	Modello del contatto fra ruota e rotaia . . . . .	50
5.4.1	Modello semplificato della rotaia . . . . .	51
5.5	Studio del moto nel dominio del tempo . . . . .	53
5.6	Modello Teorico . . . . .	55
5.7	Definizione dell'algoritmo . . . . .	60
5.8	Simulazione e Risultati ottenuti . . . . .	63
5.8.1	Analisi delle grandezze cinematiche simulate per $D$ variabile . . . . .	63
5.8.2	Analisi delle grandezze cinematiche simulate per $v$ variabile . . . . .	65
5.8.3	Analisi delle grandezze cinematiche simulate per $l$ variabile . . . . .	67
5.9	Esempio di Monitoraggio . . . . .	69
5.9.1	Studio dell'accelerazione in funzione della velocità $v$ per diametri differenti . . . . .	70
5.9.2	Studio dell'accelerazione in funzione della velocità $v$ per differenti lunghezze del difetto . . . . .	73
5.9.3	Studio dell'accelerazione variando la lunghezza del difetto $l$ per differenti velocità del treno . . . . .	75
5.9.4	Studio dell'accelerazione in funzione della lunghezza del difetto $l$ per differenti diametri . . . . .	76
5.9.5	Studio del segnale campionato . . . . .	78
<b>6</b>	<b>Conclusione e Sviluppi Futuri</b>	<b>84</b>
<b>A</b>	<b>Script Matlab</b>	<b>87</b>
	<b>Ringraziamenti</b>	<b>98</b>

# Elenco delle figure

2.1	Emissioni di $CO_2$ per tonnellata-chilometro nell'UE (2012) - Fonte: Cortei dei conti europea, sulla base dei dati dell'Agenzia europea dell'Ambiente, [2]. . . . .	7
2.2	Prototipo di carro merci con pannello fotovoltaico nell'ambito del Progetto PVTRAIN - Photovoltaic Train di Trenitalia S.p.A., [3] . . . . .	9
2.3	Modello PPA-1012 . . . . .	10
2.4	(a) Generatore risonante in oscillazione mediante una forza di vibrazione. (b) Generatore rotazionale azionato da una coppia costante. (c) Soluzione ibrida per convertire il moto lineare in un moto rotatorio, [8]. . . . .	12
2.5	Configurazioni per i <i>capacitive harvesters</i> , [11] . . . . .	14
2.6	I livelli della catena del valore dell'IoT (Fonte: TIG, 2015), [14] . . . . .	16
2.7	Rotore Magnetico . . . . .	17
2.8	Il "Carro Intelligente" . . . . .	17
2.9	Rete di sensori CEMAT, [5] . . . . .	18
2.10	AxleRing di Positrex . . . . .	19
2.11	L'Energy Harvester di Perpetuum, [6] . . . . .	21
2.12	AMRA wireless sensor technology . . . . .	22
2.13	Dislocamento dei vari sensori su carro . . . . .	23
2.14	SKF Insight Rail . . . . .	24
3.1	Schema a blocchi di un sistema di monitoraggio, [10] . . . . .	27
3.2	Schema a blocchi per i Model-based methods, [10] . . . . .	28
3.3	Schema a blocchi per i Signal-based methods, [10] . . . . .	29
4.1	Incidenti ferroviari classificati per causa . . . . .	40
4.2	Rolling stock-related accidents by cause . . . . .	41

4.3	Infrastructure Failures-related accidents by cause . . . . .	41
4.4	Operational Failures-related accidents by cause . . . . .	42
5.1	Un caso di <i>wheel-flat</i> . . . . .	43
5.2	Grandezze geometriche di interesse per un <i>wheel-flat</i> . . . . .	44
5.3	Caso di <i>degenerated wheel-flat</i> che soddisfa i criteri di stabilità . . . . .	46
5.4	Caso $\varphi > 0$ . . . . .	47
5.5	Rotazione di una ruota con uno spiattellamento ideale . . . . .	49
5.6	Modello del contatto fra ruota e rotaia . . . . .	50
5.7	Diagramma di Bode del Modello . . . . .	52
5.8	Grandezze geometriche necessarie per descrivere il moto . . . . .	53
5.9	Dettaglio del contatto fra ruota con difetto e binario . . . . .	54
5.10	Traiettoria del baricentro della ruota, velocità verticale e forza di contatto .	55
5.11	La funzione di Heaviside . . . . .	56
5.12	Traiettoria del centro della ruota per $R = 0.5\text{ m}$ e $l = 0.1\text{ m}$ . . . . .	57
5.13	Velocità del centro della ruota per $R = 0.5\text{ m}$ e $l = 0.1\text{ m}$ . . . . .	58
5.14	Individuazione matematica del wheel-flat sulla traiettoria . . . . .	59
5.15	Accelerazione del centro della ruota per $R = 0.5\text{ m}$ e $l = 0.1\text{ m}$ . . . . .	59
5.16	Condizioni iniziali . . . . .	60
5.17	Traiettoria, Velocità e Accelerazione verticale del centro della ruota per una singola rivoluzione. . . . .	62
5.18	Traiettoria, Velocità e Accelerazione verticale del centro della ruota per 5 rivoluzioni. . . . .	62
5.19	Traiettoria del centro della ruota mantenendo costanti $l$ e $v$ . . . . .	63
5.20	Velocità verticale del centro della ruota mantenendo costanti $l$ e $v$ . . . . .	64
5.21	Accelerazione verticale del centro della ruota mantenendo costanti $l$ e $v$ . .	65
5.22	Traiettoria del centro della ruota mantenendo costanti $l$ e $D$ . . . . .	65
5.23	Velocità verticale del centro della ruota mantenendo costanti $l$ e $D$ . . . . .	66
5.24	Accelerazione verticale del centro della ruota mantenendo costanti $l$ e $D$ . .	66
5.25	Traiettoria del centro della ruota mantenendo costanti $v$ e $D$ . . . . .	67
5.26	Velocità verticale del centro della ruota mantenendo costanti $v$ e $D$ . . . . .	68
5.27	Accelerazione verticale del centro della ruota mantenendo costanti $v$ e $D$ .	69

5.28	Studio dell'accelerazione RMS in funzione della velocità del treno per differenti diametri della ruota: $D = 0.8\text{ m}$ (sopra), $D = 1.0\text{ m}$ (al centro), $D = 1.2\text{ m}$ (sotto). . . . .	70
5.29	Studio dell'accelerazione RMS in funzione della velocità del treno e per differenti lunghezze del difetto: $l = 0.1\text{ m}$ (alto sx), $l = 0.2\text{ m}$ (alto dx), $l = 0.3\text{ m}$ (basso sx), $l = 0.4\text{ m}$ (basso dx) . . . . .	73
5.30	Andamento dell'accelerazione RMS in funzione della lunghezza del difetto per differenti velocità del treno . . . . .	75
5.31	Studio dell'accelerazione in funzione di $l$ per differenti diametri . . . . .	77
5.32	Segnale campionato e Soglia di rumore, $f = 200\text{ Hz}$ , $l = 0.05\text{ m}$ , $v = 40\text{ km/h}$	78
5.33	Segnale campionato e Soglia di rumore, $f = 200\text{ Hz}$ , $l = 0.05\text{ m}$ , $v = 70\text{ km/h}$	79
5.34	Segnale campionato e Soglia di rumore, $f = 200\text{ Hz}$ , $l = 0.05\text{ m}$ , $v = 140\text{ km/h}$ . . . . .	79
5.35	Segnale campionato e Soglia di rumore, $f = 200\text{ Hz}$ , $l = 0.05\text{ m}$ , $v = 20\text{ km/h}$	80
5.36	Segnale campionato e Soglia di rumore, $f = 200\text{ Hz}$ , $l = 0.04\text{ m}$ , $v = 20\text{ km/h}$	81
5.37	Segnale campionato e Soglia di rumore, $f = 200\text{ Hz}$ , $l = 0.03\text{ m}$ , $v = 20\text{ km/h}$	81
5.38	Segnale campionato e Soglia di rumore, $f = 200\text{ Hz}$ , $l = 0.02\text{ m}$ , $v = 20\text{ km/h}$	82
5.39	Segnale campionato e Soglia di rumore, $f = 200\text{ Hz}$ , $l = 0.015\text{ m}$ , $v = 20\text{ km/h}$ . . . . .	82
5.40	Individuazione del valore di soglia per l'accelerazione in funzione di $l$ . . .	83

# Elenco delle tabelle

2.1	Il traffico merci in Italia per livelli in miliardi di $t\text{-km}$ - Elaborazioni Ufficio Studi Confcommercio su dati Eurostat, Istat, Conto Nazionale delle Infrastrutture e dei Trasporti, [1] . . . . .	6
3.1	Panoramica generale della sensoristica di monitoraggio dell'infrastruttura ferroviaria, [17] . . . . .	33
3.2	Oggetti mobili monitorati, grandezze misurate e dispositivi di misura, [17] .	34
5.1	Coefficienti funzione di trasferimento . . . . .	52
5.2	Range di variazione delle grandezze di riferimento . . . . .	63
5.3	Variazione della profondità $d$ in funzione della variazione di $D$ . . . . .	64
5.4	Profondità del difetto $d$ in funzione della lunghezza del difetto $l$ . . . . .	67
5.5	Valori minimi e massimi di velocità al variare di $l$ . . . . .	68
5.6	Valori minimi e massimi di velocità al variare di $l$ . . . . .	69
5.7	Valori di accelerazione RMS per ogni velocità $v$ del treno . . . . .	71
5.8	Tabella riassuntiva . . . . .	72
5.9	Valori RMS di accelerazione per ogni velocità $v$ del treno . . . . .	74
5.10	Tabella riassuntiva . . . . .	74
5.11	Tabella riassuntiva . . . . .	76
5.12	Tabella riassuntiva . . . . .	77
5.13	Tabella riassuntiva . . . . .	83

# Elenco dei simboli e delle sigle

Simboli e Sigle	Nome
<i>ERA</i>	European Union Agency for Railways
<i>IoT</i>	Internet of Things
<i>IOAT</i>	Internet of Autonomous Things
<i>ICT</i>	Information and Communication Technology
<i>CEMAT</i>	Combined European Management And Transportation SpA
<i>UTI</i>	Unità di Trasporto Intermodale
<i>GSM</i>	Global System for Mobile Communications
<i>GPS</i>	Global Positioning System
<i>GPRS</i>	General Packet Radio Service
<i>AMRA</i>	Asset Monitoring for Railway Applications
<i>SWAM</i>	Sistema Wireless Autoalimentato di Monitoraggio
<i>T&amp;T</i>	Tracking and Tracing
<i>WSNs</i>	Wireless Sensor Networks
<i>FBG</i>	Fiber Bragg Grating
<i>SAW</i>	Surface Acoustic Wave
<i>TDR</i>	Time Domain Reflectometer
$v_c$	Velocità critica
$\gamma$	Funzione dipendente dalla geometria del sistema, dal materiale e dall'infrastruttura
$g$	Accelerazione di gravità
$R$	Raggio della ruota del treno
$m_{all}$	Massa totale della ruota
$m_w$	Massa della ruota
$l$	Lunghezza dello spiattellamento

$d$	Quantità di materiale perso, profondità del difetto
$\theta$	Angolo che sottende il difetto
$\theta_H$	Angolo che sottende un degenerated-flat
$\varphi$	Angolo di rotazione della ruota attorno all'asse
$\vec{t}$	Versore tangente all'irregolarità
$A$	Area sottesa da difetto
$x_0$	Spostamento longitudinale
$z_0$	Spostamento verticale
$W$	Carico statico applicato
$X(s)$	Trasformata di Laplace dello spostamento
$F(s)$	Trasformata di Laplace del carico applicato
$y$	Traiettoria del centro della ruota
$H(x)$	Funzione di Heaviside
$FWHM$	Full Width at Half Maximum
$v$	Velocità con cui si muove il treno
$\dot{y}$	Velocità verticale del centro della ruota
$\ddot{y}$	Accelerazione verticale del centro della ruota
$RMS$	Root Mean Square
$f$	Frequenza di campionamento
$a_{RMS}$	Valore RMS di accelerazione
$a_{RMS,mean}$	Valore RMS medio di accelerazione
$\sigma_{STD}$	Deviazione standard
$\mu$	Valore medio
$z_{\alpha/2}$	Quantile della distribuzione normale
$\sigma^2$	Varianza
$n$	Numero di campioni
$I_n$	Intervallo di confidenza

# Abstract

Il seguente lavoro di tesi vuole fornire una panoramica completa dei sistemi di monitoraggio dei veicoli ferroviari merci, i quali, sfruttando un insieme di sensori a basso costo ma intelligenti e tramite lo sviluppo di opportuni algoritmi, permettono una migliore analisi dello stato di salute dell'architettura ferroviaria, migliorandone l'affidabilità e la sicurezza. Nella prima parte verranno analizzati gli approcci applicati nell'ambito della misurazione e nel rilevamento di dati, includendo non solo le metodologie, ma anche teorie e applicazioni più innovative. Pertanto, lo scopo sarà quello di costruire un *benchmark* per valutare criticamente vantaggi e svantaggi e per definire quale fra le soluzioni risulti essere la più efficace ed efficiente per conseguire gli obiettivi preposti, al fine di prevenire ed evitare guasti di ogni tipologia mediante l'utilizzo di tecniche avanzate di filtraggio, di identificazione del sistema e di analisi del segnale. Tali approcci teorici, non richiedono lo sviluppo di modelli matematici e algoritmi complessi per studiare il sistema e permettono di superare per quanto possibile le difficoltà legate a non linearità e variazioni dei parametri nel sistema.

Nella seconda parte, l'attenzione sarà focalizzata sulla possibilità di integrare algoritmi sui sistemi di monitoraggio a bordo veicolo di cui prima e funzionanti tramite un'architettura hardware sviluppata dal politecnico di Torino nell'ambito di un progetto di ricerca, al fine di valutare in loco eventuali danneggiamenti sul sistema favorendo quindi una più rapida velocità di intervento. Se non rilevati in una fase iniziale, gli eventuali difetti presenti possono comportare un rapido deterioramento ed eventuali guasti che comporterebbero elevati costi di manutenzione. Invece, se tale difetti venissero immediatamente individuati, i costi di manutenzione potrebbero essere ridotti al minimo. Partendo quindi da un'analisi generale si entrerà successivamente nello specifico del problema, andando a sviluppare un algoritmo che permetta, nella sua semplicità, di individuare dei valori di soglia per il monitoraggio di alcuni difetti più comuni nella movimentazione ferroviaria.

# Abstract (English Version)

The following work provides a complete overview of the most common monitoring systems available on the market, which allow a better analysis of the state of health of railway architecture, improving its reliability and safety by exploiting a set of low-cost but intelligent sensors and through the development of appropriate algorithms.

In the first part of this document the approaches applied in the field of measurement and data collection will be analyzed, including not only the methodologies, but also the most innovative theories and applications. Therefore, the aim will be to build a *benchmark* to evaluate the advantages and disadvantages and also to define which of these solutions appears to be the most effective and efficient to achieve the goals, in order to prevent and avoid any kind of breakdown by using advanced filtering, system identification and signal analysis techniques. These theoretical approaches do not require the development of mathematical models and complex algorithms to study the system and they allow to overcome as far as possible the difficulties related to non-linearity and variations of the parameters in the system.

In the second part, the attention will be focused on the possibility of integrating algorithms on the on-board monitoring systems and working through a simple hardware architecture, in order to evaluate on site any damages on the system thus favoring a faster speed of intervention. If not detected at an early stage, any defects present may result in rapid deterioration and any failures that would result in high maintenance costs. Instead, if such defects were immediately identified, maintenance costs could be reduced to a minimum. Starting from a general analysis, we will then go into the specifics of the problem, developing an algorithm that allows, in its simplicity, to identify threshold values for the monitoring of some of the most common defects in railway handling.

# Capitolo 1

## Introduzione

Nell'ambito della sicurezza e affidabilità della rete ferroviaria italiana ed internazionale, ricopre un ruolo di assoluto rilievo l'*Agenzia Ferroviaria Europea* (ERA) che punta con il proprio lavoro a migliorare il livello di interoperabilità dei sistemi ferroviari, a sviluppare un approccio comune in materia di sicurezza del sistema ferroviario europeo e a contribuire alla creazione di uno spazio ferroviario europeo unico senza frontiere, garantendone un elevato livello di sicurezza. In un progetto di ricerca condotto nel periodo dal 1990 al 2009, è emerso come il numero di incidenti "gravi" nella rete europea fosse di 402 dovuti a cause diverse come collisioni di treni, deragliamenti e incendi, incidenti nei pressi di passaggi a livello, *etc.*. In particolare, in venti anni di servizio in Europa, il numero di incidenti gravi (con un numero di vittime superiore a 5) sono stati in totale 100 con 979 morti e 1343 feriti. Il database ERA raccoglie in 6 categorie tali incidenti e per ciascuno ne fornisce il numero totale di vittime e feriti:

- Incidente provocato da rotture di componenti in moto (decessi: 24, feriti: 3);
- Incendio dei componenti rotabili (decessi: 21, feriti: 10);
- Incidenti nei pressi di passaggi a livello (decessi: 349, feriti: 143);
- Collisione di treno con un ostacolo (decessi: 32, feriti: 120);
- Deragliamenti (decessi: 269, feriti: 417);
- Collisione dei treni (decessi: 284, feriti: 650).

Detto ciò, l'importanza della prevenzione in ambito ferroviario è fondamentale per ridurre al minimo i costi di intervento e aumentare sicurezza ed efficacia dell'intera infrastruttura.

Il principio su cui è basato l'intero lavoro di tesi è appunto quello di realizzare uno strumento che fosse in grado di individuare immediatamente la presenza o meno di difetti al fine di garantire delle efficaci misure preventive di intervento. La volontà, infine, è quella di fornire una descrizione ragionevolmente completa dello scenario attuale, sebbene questo sia ulteriormente complicato da una realtà estremamente dinamica, che costringe tutti coloro che sono coinvolti nel mondo ferroviario a riconsiderare politiche e nuove strategie competitive da adottare.

# Capitolo 2

## Stato dell'arte

Introdotta per la prima volta nel 1999 da *Kevin Ashton*, fondatore degli *Auto-ID Labs del Massachusetts Institute of Technology (MIT)*, il concetto di ***Internet of Things (IoT)*** sta ad indicare tutte quelle tecnologie che consentono di trasformare un qualunque oggetto della vita quotidiana (analogico) in un dispositivo "*smart*" connesso a Internet e per questo dotato di tutte le funzionalità e caratteristiche dei device nati e progettati per essere utilizzati sul web.

In questo lavoro di tesi verrà mostrato come il concetto dell'IoT possa essere perfettamente applicato nel settore ferroviario e più specificamente nell'ambito logistico della gestione e del monitoraggio in moto di flotte di *cargo*. La complessità del rendere *smart* un carro merci sta nel recuperare una fonte primaria di alimentazione, vista l'assenza di energia elettrica a bordo carro che rende quindi impossibile l'utilizzo di un qualsiasi dispositivo elettronico di localizzazione e monitoraggio. Negli ultimi anni la ricerca si è orientata nel valutare delle soluzioni che per semplicità ed economicità riescano a soddisfare le esigenze dei proprietari dei mezzi: quelle più diffuse sfruttano il lavoro di *sensory wireless* con dispositivi di raccolta di energia adeguatamente progettati tenendo conto del ciclo di lavoro specifico.

### 2.1 Il contesto economico attuale e prospettive

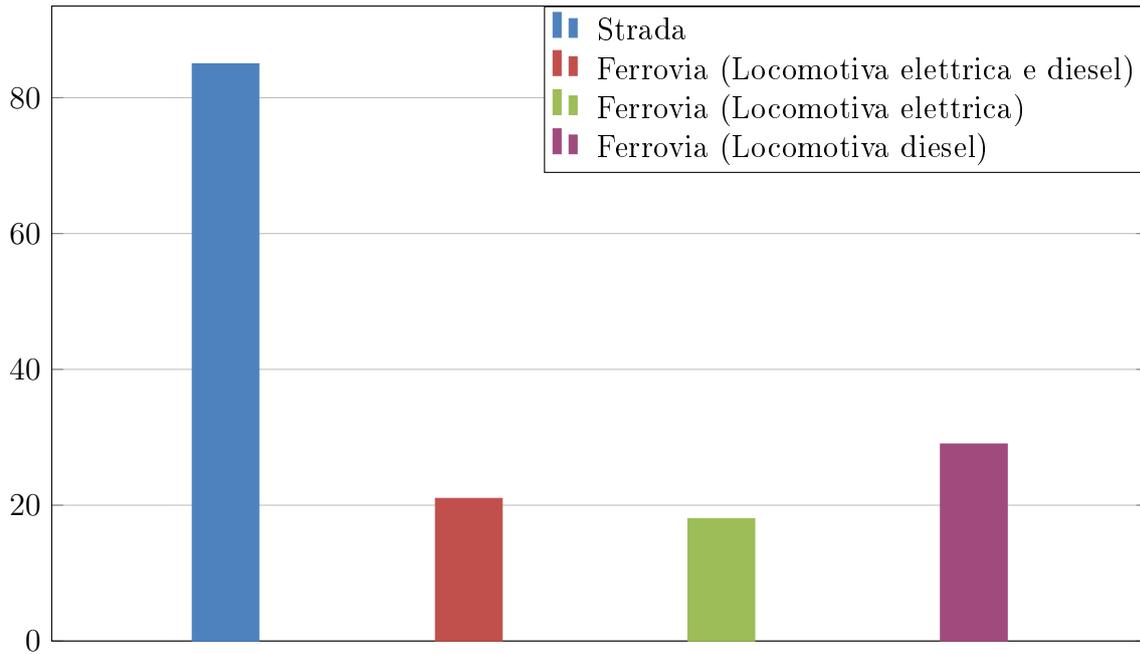
La mobilità delle merci è una componente essenziale del mercato interno dell'UE, in quanto non solo contribuisce, in modo significativo, a rendere competitivi l'industria e i

servizi europei, ma anche perché ha un impatto sostanziale sulla crescita economica e sulla creazione di posti di lavoro. Negli ultimi anni, il volume di trasporto interno delle merci in Italia (su strada, rotaia, per vie navigabili interne e per via aerea) si è stabilizzato a circa 450 miliardi di tonnellate-chilometro all'anno, come mostrato nella tabella seguente.

Anno	Gomma	Ferro	Mare	Aereo	Totale
2003	203.3	20.4	276.6	0.3	500.5
2004	227.8	22.1	279.5	0.3	529.6
2005	242.9	22.7	288.9	0.3	554.7
2006	229.3	24.2	296.9	0.3	550.7
2007	223.6	25.3	296.9	0.3	546.2
2008	222.6	16.3	301.1	0.3	540.3
2009	207.9	17.8	301.1	0.2	527.1
2010	216.5	18.6	276.4	0.3	511.7
2011	185.6	19.7	267.1	0.3	472.7
2012	166.7	20.3	261.6	0.3	448.9
2013	168.6	19.0	246.7	0.3	434.6
2014	160.1	20.2	232.5	0.3	413.1
2015	161.2	20.8	254.2	0.3	436.5
2016	164.0	21.1	254.3	0.31	439.6
2017	165.2	21.6	257.5	0.33	444.6
2018	167.5	22.0	258.5	0.34	448.3

**Tabella 2.1:** Il traffico merci in Italia per livelli in miliardi di  $t\text{-km}$  - Elaborazioni Ufficio Studi Confcommercio su dati Eurostat, Istat, Conto Nazionale delle Infrastrutture e dei Trasporti, [1]

Il trasporto ferroviario, nonostante l'economicità energetica e i grandi vantaggi in termini di basso impatto ambientale per quanto riguarda il rapporto  $kg_{CO_2}/km$ , non riesce ad essere competitivo rispetto a quello su strada. Il servizio risulta spesso più lento rispetto a quello su gomma, con tempi di arrivo a destinazione inaffidabili. Sorge quindi un problema di logistica: il cliente non è in grado di sapere dove si trovi il suo carico e al tempo stesso questo condiziona l'operato dei gestori delle flotte di carri.



**Figura 2.1:** Emissioni di  $CO_2$  per tonnellata-chilometro nell'UE (2012) - Fonte: Cortei dei conti europea, sulla base dei dati dell'Agenzia europea dell'Ambiente, [2].

La produttività di una flotta di carri merce risulta pesantemente compromessa e le cause sono molteplici:

- la *tracciatura* della merce è *inefficiente* vista l'assenza di scambio di dati fra i diversi operatori sulla rete. Se presente, la *trasmissione dati manuale* tramite dispositivo mobile o fax sul campo risulta tuttavia *inefficace*;
- la *tracciatura* della merce è altresì *difficoltosa* in ambito di trasporto internazionale vista l'incompatibilità dei diversi sistemi logistici di gestione dei vari stati;
- sempre in ambito internazionale, vanno menzionate le *difficoltà linguistiche* fra gli operatori che parlano lingue differenti;
- situazioni di *sovra-disponibilità* di mezzi *in un luogo* e al tempo stesso di *insufficienza* di mezzi *su breve distanza* risultano altamente frequenti;
- *in caso di guasto* ad un elemento della flotta, il più delle volte questo viene restituito al proprietario con un lungo e costoso *viaggio a vuoto* invece di venire riparato in loco e quindi ritornare produttivo molto più rapidamente.

È chiaro come la volontà di ottimizzare la disposizione e la distribuzione geografica dei carri disponibili per il carico, in modo da massimizzare il livello di soddisfazione della

domanda di trasporto e minimizzare il numero di viaggi a vuoto, possa ritenersi un obiettivo ambizioso e cruciale in un settore altamente strategico come il trasporto di merci su rotaia. Le tecnologie ICT (*Information and Communication Technology*) negli ultimi anni ma anche nei successivi hanno cercato e cercheranno di colmare il deficit informativo al fine di migliorarne efficienza e produttività.

La necessità di conoscere la posizione dei carri, lo stato di salute di questi e della merce che trasportano risulta essere un fattore di competitività sul mercato per un operatore ferroviario. Sebbene, il dotare un carro merci di un dispositivo GPS in grado di comunicare la propria posizione autonomamente, risulti essere la soluzione più ovvia del problema, vi è un ostacolo di natura energetica ovvero il reperimento di alimentazione elettrica a bordo carro che quindi impedisce lo sfruttamento di dispositivi elettronici di localizzazione e monitoraggio che funzionano solo grazie all'elettricità come fonte primaria di alimentazione.

## 2.2 Tecnologie di recupero energetico

La difficoltà di avere a disposizione una fonte di alimentazione elettrica sul carro facilmente manutenibile e altamente affidabile è stata per anni l'ostacolo principale per l'adozione di sistemi tecnologici sui carri ferroviari destinati al trasporto delle merci.

Sebbene l'*utilizzo di comuni batterie* sia la soluzione più immediata e di facile adozione, lo *svantaggio principale* consiste nell'*intervento diretto dell'operatore in loco* al momento della sostituzione, che richiede tempi di intervento non indifferenti. Tale periodo di *fermo macchina* costituisce un vero e proprio *danno di natura economica*.

Oggi, tale difficoltà è stata ampiamente superata grazie all'evolversi di tecnologie e sistemi autonomi di recupero energetico disponibili sul mercato. Questo processo di conversione dell'energia inutilizzata in elettricità consumabile, comunemente noto come *energy harvesting* o *power scavenging*, potrebbe aiutare a fornire energia illimitata ai vari dispositivi elettronici montati, generando nuove categorie di sistemi *IOAT (Internet of Autonomous Things)*. Fra i più comuni vi sono:

- **Photovoltaic Energy Harvesting:** Tale tecnologia rappresenta una novità nel settore ferroviario (a bordo treno) e prevede l'installazione di pannelli fotovoltaici, al silicio amorfo, sull'imperiale di alcuni dei rotabili della flotta, siano essi carrozze passeggeri, carri merci o locomotive. L'**obiettivo** è quello di **mantenere in carica gli accumulatori** a bordo carro, soprattutto durante le soste, garantendo un **impatto ambientale nullo, riducendo** le emissioni di **gas serra** nell'atmosfera, al fine di contribuire efficacemente al problema del **risparmio energetico** nel rispetto dell'ambiente.

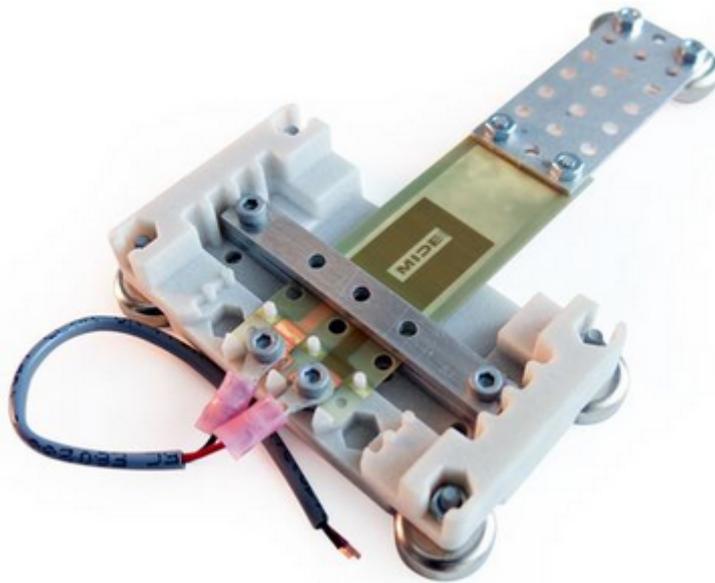


**Figura 2.2:** Prototipo di carro merci con pannello fotovoltaico nell'ambito del Progetto PVTRAIN - Photovoltaic Train di Trenitalia S.p.A., [3]

Occorre però tenere presente di alcuni limiti di tale applicazione:

- l'**energia fornita** dai pannelli ed assorbita dagli accumulatori **dipende** dall'effettivo **grado di carica** degli accumulatori;
- il convertitore presenta un proprio **rendimento elettrico** che **riduce** ulteriormente l'**energia fornita** agli accumulatori;
- i prototipi in movimento incontrano **gallerie** e **zone d'ombra** con conseguente **minore rendimento energetico** del sistema;
- bisogna verificare che non vi sia alcun **distacco dei pannelli** dall'imperiale del carro dovuto alle eccessive sollecitazioni **durante il moto** o ad **atti vandalici**;

- bisogna evitare un *eccessivo degrado* del pannello dovuto all'*invecchiamento* (misurando la potenza di picco generata) o all'influenza dell'*inquinamento ambientale* dovuto alla sporcizia, polvere ed altro.
- ***Piezoelectric Energy Harvesting***: Una fonte di energia che coinvolge ampiamente il settore ferroviario sono le *vibrazioni meccaniche* dei veicoli. Tali vibrazioni possono essere convertite in energia elettrica tramite un sistema costituito da un *harvester* di natura piezoelettrica, un circuito di rettifica e una batteria di accumulo. I materiali piezoelettrici che vengono solitamente impiegati (Monolithic PZT, Piezofiber composite, MFC composite etc.) generano carica elettrica quando viene applicato un carico meccanico. Il dispositivo di raccolta dell'energia che impiega il meccanismo di conversione piezoelettrico è tipicamente costituito da una trave a sbalzo rivestita con materiale piezoelettrico e una massa posta sulla punta di una trave. Tale massa all'estremità induce la deformazione di un componente piezoelettrico che produce una differenza di tensione tra i suoi elettrodi proporzionale alla deformazione meccanica. Dal punto di vista dinamico, questa tipologia di generatori può essere applicata a intervalli di frequenze moderatamente ampi (fino a poche centinaia di Hz).



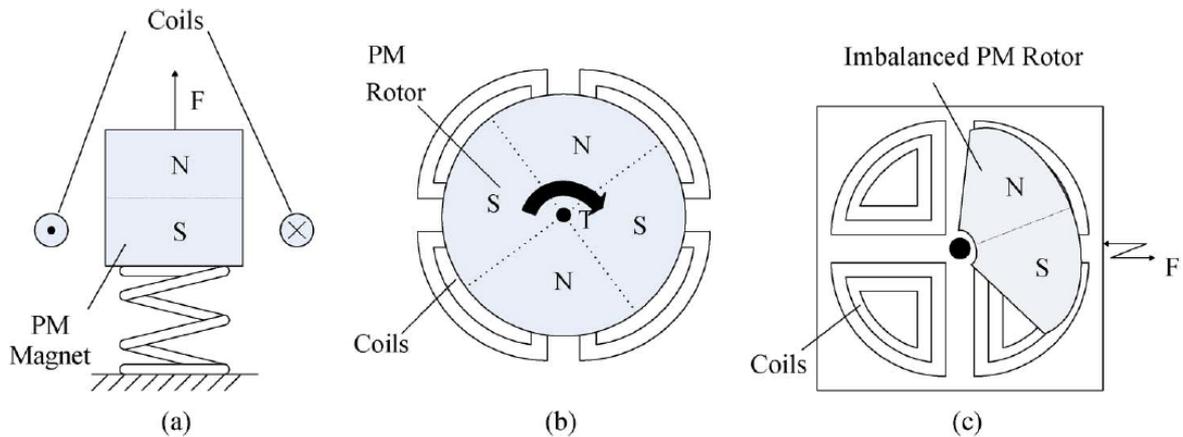
**Figura 2.3:** Modello PPA-1012

Sebbene la soluzione del generatore piezoelettrico sia una delle più comuni vista la

*grande disponibilità* dei componenti, la *facilità di assemblaggio*, la propensione del generatore a essere *sintonizzato sulla frequenza di eccitazione* e gli *accettabili valori* della *corrente di uscita*, occorre comunque tenere presenti alcuni limiti di applicazione:

- *ridotta affidabilità* a causa della *fragilità dei materiali* utilizzati, continuamente sottoposti a piegatura ripetitiva;
  - *inefficienza* dovuta alla forma del segnale di uscita sotto eccitazione di tipo sinusoidale;
  - *sfasamento* dovuto alla capacità intrinseca del materiale piezoelettrico fra onde di corrente e onde di tensione che provoca una *potenza effettiva* di uscita *minore* di quella teorica ed ottimizzata in caso di perfetta sincronizzazione fra fase di corrente e fase di tensione.
- ***Magnetic-Inductive Energy Harvesting:*** Nella recente letteratura scientifica, sono state descritte un ampio numero di soluzioni progettuali che includono un *magnete fisso* e una *bobina mobile* o, più frequentemente, una *bobina fissa* e un *magnete mobile*. Khaligh *et al.*<sup>[8]</sup> propongono una suddivisione dei generatori in tre categorie:
    1. **Generatori risonanti:** Hanno un *funzionamento oscillante*. Utilizzano gli spostamenti relativamente piccoli tra un magnete permanente e una bobina al fine di sfruttare il potere dalle vibrazioni ambientali. Operano a *frequenze elettriche* relativamente *basse* e, quindi, a *basse densità di potenza*. Il generatore è costituito da una massa montata su una molla, che oscilla rispetto all'alloggiamento quando è sottoposto ad una vibrazione esterna. L'energia meccanica sviluppata dal moto della massa si trasforma in energia elettrica. Per ottenere la *massima potenza* si preferisce lavorare con vibrazioni in ingresso la cui *frequenza* deve essere *prossima* a quella di *risonanza* del sistema.
    2. **Generatori rotazionali:** Rispetto ai precedenti possono contare su di una fonte costante di energia meccanica rotazionale. Hanno *dimensioni* relativamente più *piccole*, ma spesso *operano a più alte velocità* e, quindi, *frequenze elettriche più elevate* rispetto ai generatori risonanti. *Maggiore velocità* è sinonimo di *maggiore densità di potenza prodotta*.

**3. Soluzione ibrida fra le precedenti:** Questi dispositivi uniscono il funzionamento proprio dei generatori risonanti con i principi di generazione della potenza mediante macchine rotative.



**Figura 2.4:** (a) Generatore risonante in oscillazione mediante una forza di vibrazione. (b) Generatore rotazionale azionato da una coppia costante. (c) Soluzione ibrida per convertire il moto lineare in un moto rotatorio, [8].

Per questa tipologia di recupero energetico vi sono numerosi vantaggi fra cui:

- una *maggiore stabilità* delle prestazioni;
- un'*elevata affidabilità* sia dal punto di vista elettrico che dal punto di vista meccanico;
- un *elevato rapporto corrente/tensione* che rende questi generatori adatti ad una più semplice ricarica delle batterie;
- essendo la generazione di energia fortemente legata alla velocità del magnete mobile, con riferimento alla legge di Faraday, ne deriva che un'*elevata potenza* di uscita è ottenibile da *spostamenti elevati* del magnete;
- rispetto ai generatori piezoelettrici, la *corrente di uscita* è *apprezzabile* e il *tempo per caricare* una batteria è sensibilmente *più breve* per un dato livello di potenza in uscita.

A questo vanno aggiunti però un serie di svantaggi non trascurabili fra cui:

- il *rapporto tra la potenza generata* e il *volume del dispositivo non è particolarmente alto*. L'*output dipende* direttamente dal *numero di giri* della bobina e dallo *spostamento del magnete*;

- la *velocità* con cui il magnete scorre e il *materiale utilizzato influenzano* le *prestazioni* del sistema;
  - *limitata sincronizzazione* dovuta al dimensionamento elettrico che limita le possibilità di regolazione della massa in prova che è semplicemente costituita da solo magnete permanente in moto.
- **Capacitive Energy Harvesting:** Noto anche come *Electrostatic Capacitive Energy Harvesting*, tale tecnica di recupero energetico consiste fondamentalmente di *condensatori* con *armature mobili* separate da aria, vuoto o materiali dielettrici. Il movimento relativo tra le due armature, indotto da vibrazioni esterne, genera una variazione di tensione e quindi di cariche elettriche che può essere usata per caricare una batteria. La *potenza elettrica generata* è fortemente *dipendente dalla geometria* del condensatore.

L'*applicazione* degli accumulatori di energia capacitiva è *limitata su piccole scale* e trovano applicazione nel campo dei *Micro Electro-Mechanical Systems* (MEMS). Questi dispositivi possono essere suddivisi in due categorie:

- *Electret-free electrostatic converters* che sfruttano cicli di conversione costituiti da cariche e scariche di un condensatore. Questi necessitano di un circuito elettronico attivo per permettere la carica del condensatore e che si sincronizzi con la variazione di capacità di questo;
- *Electret-based electrostatic converters* che utilizzano gli elettroni e permettono una conversione diretta della potenza meccanica in potenza elettrica.

La maggior parte dei convertitori elettrostatici deriva la propria configurazione dagli accelerometri. Boisseau *et al.*<sup>[11]</sup> propongono di suddividere tali configurazioni in 4 classi principali:

- a) **In-plane gap closing converter:** struttura a pettine intrecciato con gap variabile tra le "dita" e l'elemento mobile in piano;
- b) **In-plane overlap converter:** struttura a pettine intrecciato con una sovrapposizione variabile delle "dita" e dell'elemento in moto nel piano;
- c) **Out-of-plane gap closing converter:** struttura planare con gap variabile tra le piastre e l'elemento mobile in direzione perpendicolare al piano;

d) *In-plane converter with variable surface*: struttura planare con una sovrapposizione variabile fra le piastre e la direzione del moto in piano dell'elemento mobile.

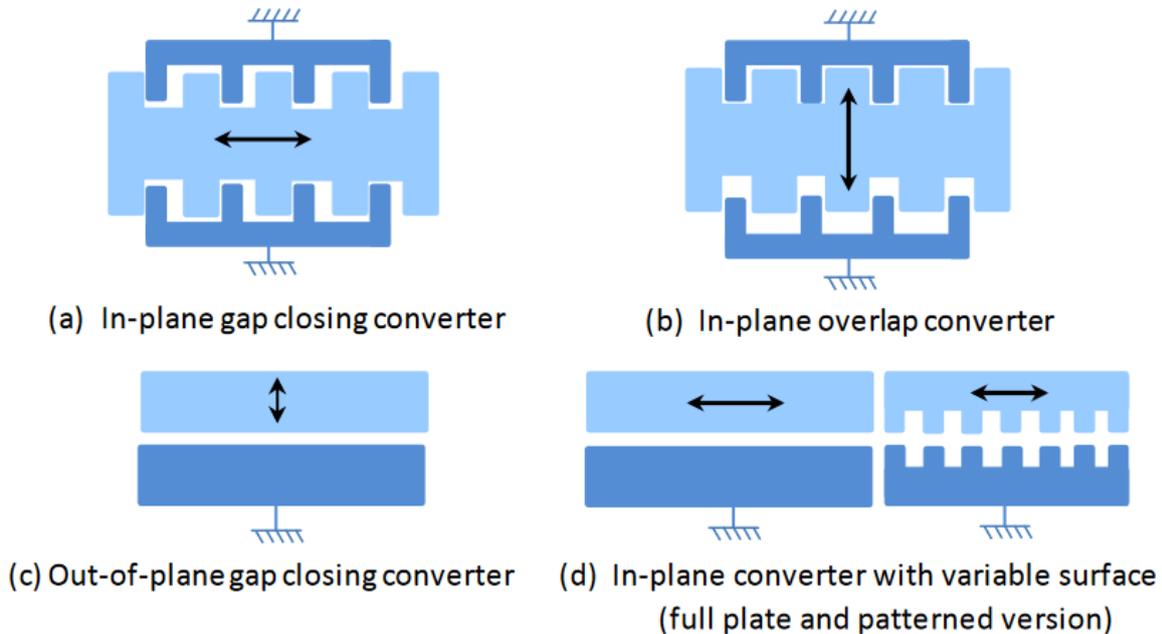


Figura 2.5: Configurazioni per i *capacitive harvesters*, [11]

Fra i vantaggi si ricordano:

- l'*alta tensione* di uscita;
- la possibilità di costruire *sistemi a basso costo*;
- la possibilità di *regolare semplicemente* il coefficiente di accoppiamento;
- gli *elevati coefficienti di accoppiamento* raggiungibili;
- la *riduzione delle dimensioni* e l'*aumento della capacità*.

Mentre fra gli svantaggi:

- è richiesto un *precarico elettrico* e questo rappresenta un *consumo energetico* che *limita l'efficienza* del generatore. Ecco perchè il campo di applicazione per tali generatori è legato alla microscala, dove le superfici sono più piccole e la potenza del precarico è quindi limitata;
- le piccole dimensioni del dispositivo provocano *alte frequenze di risonanza*, rendendo il generatore *non adatto agli spettri di vibrazione dei veicoli*

*tradizionali*, riducendone l'applicabilità per le alte frequenze (nell'ordine dei kHz).

## 2.3 L'Internet of Things applicato al Mercato dei Sistemi di Monitoraggio per Veicoli Ferroviari

L'*Internet of Things* può essere visto come un insieme di tecnologie **hardware** (sensoristica, elettronica e rete per connettere gli oggetti) e **software** che con i relativi servizi di gestione (soluzioni e piattaforme per gestire, analizzare e visualizzare i dati e le informazioni generate) una volta uniti ed integrati fra loro, permettono di trasformare e/o amplificare le funzionalità di oggetti comuni: l'*IoT* è pertanto definibile come un **paradigma tecnologico**. Focalizzandosi sul termine "*things*", questo può assumere diverse accezioni al di là di quella di semplice "oggetto", cioè non riguardanti solamente i singoli prodotti "finiti" (nella definizione di "oggetto intelligente" o "Smart Product") ma anche processi o infrastrutture (ad esempio processi logistici e impianti industriali).

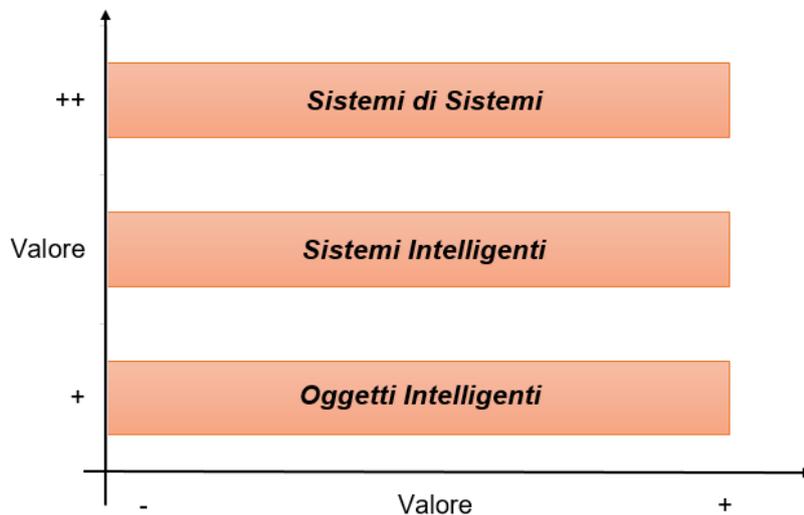
L'evoluzione delle tecnologie hardware ha permesso una **riduzione del costo medio dei sensori "a bordo"** e un **minore consumo energetico delle componenti** di elettronica, provocando anche un **aumento della sicurezza e dell'affidabilità delle reti e delle connessioni**. Dal punto di vista software, invece, si è assistito alla nascita e alla diffusione di soluzioni che hanno consentito di **raccogliere e gestire i dati in modo semplice e scalabile** (Cloud Computing), di **analizzarli** (Analytics) e di **renderli fruibili in maniera immediata e intuitiva** (Data Visualization).

Viene di seguito riportata la catena del valore dell'*Internet of Things* in cui si osservano le tre unità costituenti ovvero:

- la catena del valore degli **Oggetti Intelligenti** (1° livello): **un oggetto si definisce "intelligente" quando la componente fisica**, tramite la tecnologia, **è in grado di poter comunicare con il mondo esterno**, permettendo ad aziende ed individui di interagire con questo in maniera remota, interrogandolo sul suo funzionamento e cambiando eventualmente il suo stato. La catena del valore ha come

scopo quello di definire gli anelli che trasformano un oggetto da tradizionale in uno intelligente.

- la catena del valore dei **Sistemi Intelligenti** (2° livello): trattasi di *sistemi composti dall'insieme di più oggetti intelligenti*, le cui interazioni creano soluzioni più complesse e integrate. In particolare, la complessità del sistema risiede nelle interazioni che si possono generare tra gli oggetti all'interno del sistema stesso.
- la catena del valore dei **Sistemi di Sistemi** (3° livello): è il *livello in cui convergono e si integrano i singoli sistemi definiti nel livello precedente*. Si crea così una rete più estesa e diffusa che mette in relazione sistemi anche su piani differenti.



**Figura 2.6:** I livelli della catena del valore dell'IoT (Fonte: TIG, 2015), [14]

Ciascun livello avrà una complessità crescente, sia in termini di numero di oggetti e sistemi coinvolti, sia di loro interazione. Il valore generato cresce secondo due direzioni: da un lato, come nelle rappresentazioni "tradizionali", *il valore aumenta man mano che ci si sposta verso destra*; dall'altro, riprendendo la struttura gerarchica su tre piani, *il valore cresce lungo l'asse verticale*, passando dal livello più basso che riguarda gli oggetti intelligenti, a quello più alto che rimanda alla definizione di sistemi complessi originati dall'interazione dei singoli oggetti.

Il mercato della sensoristica ferroviaria propone numerose alternative, più o meno economiche, che nascono dall'integrazione dei tre livelli di cui prima, nell'intento di fornire

uno strumento efficace per i consumatori, atto a risolvere le problematiche relative al monitoraggio in real-time, alla previsione della manutenzione e all'abbattimento dei costi di quest'ultima.

## 2.4 Soluzioni competitive presenti sul mercato

### 2.4.1 Il Progetto del "Carro Intelligente"

Nel luglio del 2017, la *Combined European Management And Transportation S.p.A.*, nota come CEMAT, operatore leader in Italia ed Europa del trasporto combinato strada-rotaia, ha proposto il progetto del "*Carro Intelligente*" ovvero un'applicazione dell'IoT per quanto concerne il monitoraggio dei carri merci. L'investimento complessivo della CEMAT ha previsto l'introduzione di 250 nuovi carri, per un investimento complessivo di circa 27 milioni di euro.

La soluzione di recupero energetico adottata è stata quella del Rotore Magnetico, vista l'elevata potenza ricavabile (picchi di 5 kW), la robustezza della soluzione e la posizione comoda per l'esecuzione della manutenzione. L'alimentazione della centralina avviene mediante un cavo collegato direttamente alla boccola.

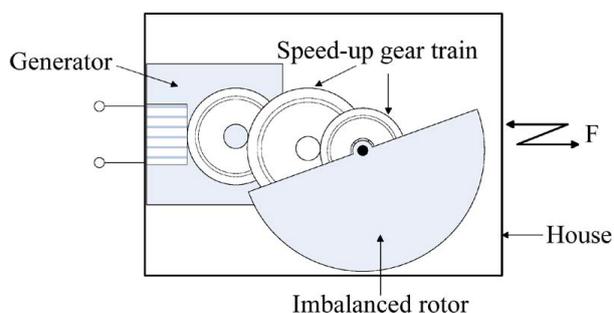


Figura 2.7: Rotore Magnetico



Figura 2.8: Il "Carro Intelligente"

Dotato di sistema GPS posizionato all'interno della centralina, il servizio fornito al cliente è un monitoraggio *real-time* della posizione del carro. Fra i parametri controllati vi è la percorrenza effettiva ed inoltre viene stabilito un legame *evento-posizione/ora/velocità* di marcia. L'energia elettrica recuperata viene pertanto sfruttata per alimentare vari sensori fra cui:

- **Estensimetri:** per rilevare le deformazioni dei carrelli, permettendo di: determinare il carico su ogni ruota del carro in tempo reale, impedire il verificarsi di sovraccarichi, rilevare sbilanciamenti di carico delle UTI, etc.;
- **Accelerometri** (uno per carrello): posizionati sul telaio in corrispondenza dei carrelli, permettono di rilevare le accelerazioni lungo gli assi longitudinale e verticale del carro. Essi permettono il rilevamento di urti in fase di carico/scarico delle UTI ma anche nelle fasi di manovra del carro, di correlare gli impatti subiti al peso caricato e alla velocità di marcia, *etc.* e quindi predisporre controlli manutentivi specifici in caso di evento;
- **Termometri** (uno per boccola): disposti sul carrello, sono a contatto con la boccola e protetti da materiale impermeabile ma non isolante. La temperatura rilevata va confrontata con quella delle altre boccole, per rilevare eventuali boccole surriscaldate e quindi programmare l'arresto e la sostituzione dei carri prima di eventuale escalation del problema. Inoltre è possibile anche definire l'andamento temperature ideale in base ai parametri del viaggio (carico, temperatura esterna, percorrenza).

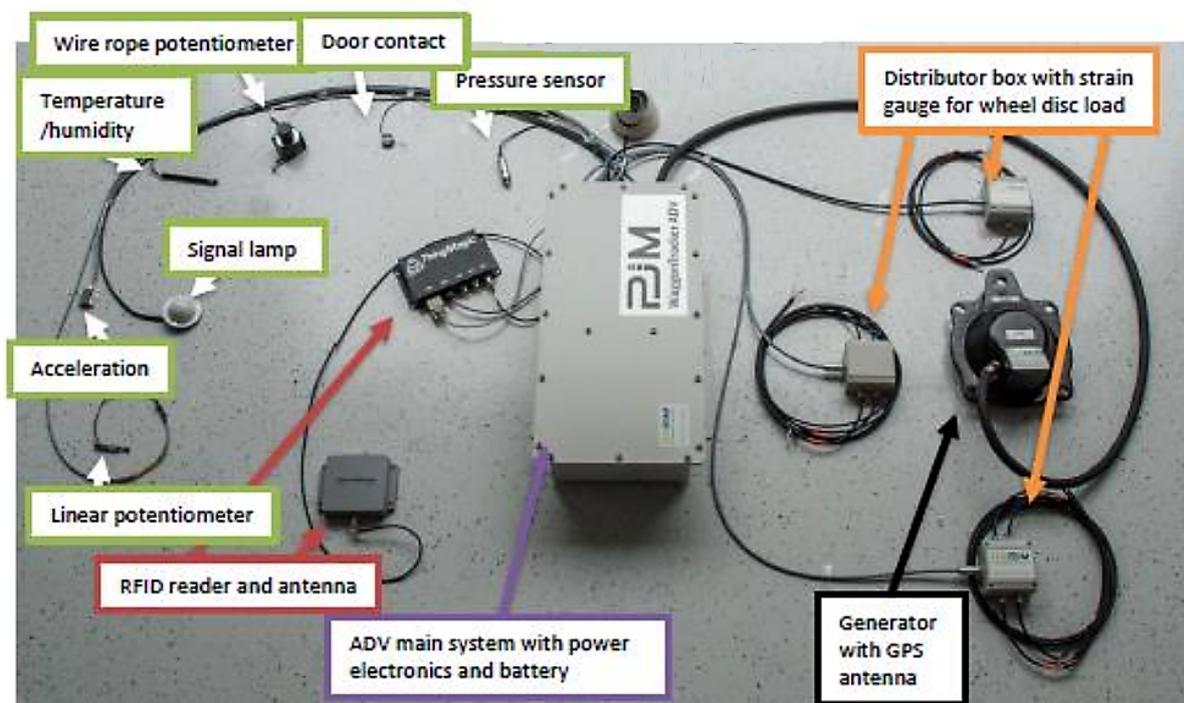


Figura 2.9: Rete di sensori CEMAT, [5]

I dati raccolti vengono trasmessi dai vari sensori alla centralina via cavo. Dalla centralina vengono trasmessi via rete ad un Cloud e successivamente integrati nei sistemi aziendali

di CEMAT. La frequenza di trasmissione dati è fissata pari ad 1 minuto durante la fase di carico/scarico delle UTI e 5 minuti durante il viaggio (frequenza modificabile secondo le esigenze).

### 2.4.2 L'AxleRing di Positrex

Una soluzione simile dal punto di vista del recupero di energia è rappresentata dall'"AxleRing" ideato e realizzato dalla Positrex, azienda ceca, leader nel settore del monitoraggio GPS di flotte cargo, disponibile sul mercato a partire dall'Ottobre del 2017.

Trattasi di un'unità per assili ferroviari che, oltre a identificarli univocamente tramite un ID, misura il numero di giri esatto del carro, fornisce il tracciamento GPS ad intervalli di 1 minuto e rileva i problemi dell'asse con identificazione RF e tramite lettura del sensore. È tuttavia un'invenzione attualmente sotto protezione brevettuale. Non è necessario caricare l'unità perché viene alimentata dalla potenza generata dal carro in movimento. La semplice installazione attorno all'asse del carro è un altro dei vantaggi, in quanto l'unità è costituita da due parti a forma di mezzaluna



**Figura 2.10:** AxleRing di Positrex

che si posizionano abbracciano l'asse. L'unità identifica l'asse e ne monitora lo stato nel corso della vita, controlla la temperatura dei cuscinetti, segnalando eventuali surriscaldamenti, rileva anche eventuali G-shock, vibrazioni, planarità delle ruote, blocchi e urti. Grazie alla sufficiente energia a disposizione, l'unità può essere impiegata come mezzo di comunicazione principale del veicolo. L'AxleRing è in grado di leggere i valori di altri sensori wireless sul carro come la pressione del sistema di frenata, la pressione del sensore, la temperatura, l'umidità, *etc.* e invia questi dati all'operatore. L'unità può essere dotata di comunicazione Bluetooth locale con dispositivi mobili a distanze massime di al più 100 m. Lo standard di comunicazione adottato è il GSM "Global System for Mobile Communications", la QuadBand può essere del tipo 2G con gamma di frequenze di

850/900/1800/1900 MHz, 3G con gamma di frequenze di 850/900/1800/1900/2100 MHz e 4G con gamma di frequenza di 800 MHz.

### 2.4.3 Perpetuum - Rail Applications

A partire dal 2015 Perpetuum, leader globali nella fornitura di informazioni per massimizzare la sicurezza, l'affidabilità e la riduzione i costi, ha proposto una tecnologia basata su accumulatori di energia per vibrazione senza batterie e su sensori wireless, la quale ha permesso a molti clienti di passare da un ambiente "*Fail and Fix*" a un sistema "*Predict and Prevent*". Questo ha portato a notevoli miglioramenti nella sicurezza ferroviaria e una riduzione dei costi manutentivi.

La tecnologia Perpetuum è facile e veloce da installare, non richiede cablaggio o manutenzione esterna. Questo implica che trattasi di una soluzione estremamente sicura, vista l'assenza di parti mobili (ad eccezione della vibrazione interna dell'Harvester), affidabile e robusta. Il monitoraggio costante fornisce all'operatore preziose informazioni sulla qualità delle risorse, sia esse nuove o rinnovate di recente.

Gli obiettivi che Perpetuum persegue sono:

- Il miglioramento dell'affidabilità e della sicurezza, riducendo drasticamente i costi operativi e di manutenzione;
- Garantire il migliore utilizzo delle unità quando queste sono ancora in servizio;
- Riduzione delle interruzioni;
- Riduzione della probabilità di costosi interventi in servizio.

Per quanto riguarda il settore del trasporto merci, il problema dell'alimentazione elettrica, come detto, è risolto tramite l'utilizzo di un accumulatore di energia vibrazionale che consente di implementare le funzioni di monitoraggio senza preoccuparsi dei problemi associati alle batterie.

Perpetuum fornisce accumulatori di energia con alti livelli di potenza adatti non solo per il monitoraggio del carro, ma anche per monitorare temperatura, pressione, *etc.*.

I dati vengono comunicati a lungo raggio tramite trasmissioni GPRS. In alternativa, la potenza può essere utilizzata per pilotare reti wireless che comunicano tutti i dati alla cabina della locomotiva, inclusi quelli relativi alle ruote e ai freni. Il tracciamento GPS, con aggiornamenti regolari trasmessi da trasmissioni GPRS, è anche una modalità per tracciare il moto dei carri.



Figura 2.11: L'Energy Harvester di Perpetuum, [6]

#### 2.4.4 AMRA wireless sensor technology (Bosch Engineering)

A partire dal Gennaio 2016, la Bosh Engineering ha presentato AMRA *Asset Monitoring for Railway Applications* ovvero un sistema di gestione della flotta intelligente che raccoglie i dati correnti durante il viaggio, come la posizione della flotta di carri merci (indipendentemente dal fatto che aderisca o meno alla rotta prevista), eventuali shock al carico o al carro durante le manovre, la temperatura nel vano di carico e il chilometraggio accumulato. I dati una volta raccolti vengono inviati ad un server per poter essere analizzati e raggruppati, aprendo nuove funzioni in termini di qualità delle operazioni commerciali.



**Figura 2.12:** AMRA wireless sensor technology

Il sistema di monitoraggio consiste in 3 elementi: un device, un portale web e una tecnologia di sensori wireless. L'*AMRA device* è un componente dell'hardware telematico dotato di modulo GPS, antenna GSM integrata e numerosi sensori (cablati e wireless). A differenza dei precedenti sistemi di monitoraggio, la Bosch propone ancora uno strumento a batteria però facile da mantenere. Il dispositivo AMRA è montato sul carro merci per fornire dati di posizione e di stato. Questi dati vengono inoltrati a un server per l'analisi e le informazioni vengono recapitate nel portale AMRA. Il sistema è stato sviluppato come soluzione per i carri merci esistenti, poiché questi non hanno il proprio approvvigionamento energetico: il modulo è autosufficiente e funziona utilizzando la propria batteria integrata.

Fra i vantaggi garantiti si ricordano:

- **Monitoraggio efficiente con geo-localizzazione:** I sensori GPS integrati consentono agli utenti di vedere dove sono i carri. Questi dati aiutano a prevenire perdite, semplificare la pianificazione dei carri e accelerare la circolazione degli stessi.
- **Migliore efficienza:** Le mappe della rete ferroviaria sono utilizzate per fornire precise informazioni delle operazioni in atto e dei percorsi compiuti dai carri. Questi dati possono essere utilizzati per ridurre gli intervalli manutentivi del carro e migliorarne la pianificazione della manutenzione stessa.

- **Trasparenza mediante monitoraggio degli shock:** Un sensore d'urto a 3 assi conduce un'analisi degli urti che si verificano durante lo smistamento e il caricamento. Questo consente agli utenti di individuare le cause del potenziale danno al carro merci e al suo carico, o per verificare le condizioni di trasporto.
- **Precisione nel controllo del "confine geografico":** avendo contrassegnato un'area tramite i sistemi di geo-informazione, gli utenti vengono informati via e-mail o messaggio di testo se i carri merci hanno operato oltre i limiti della loro area specificata. Questo può essere utilizzato per calcolare i costi di controstallia, accelerare i viaggi e migliorare l'efficienza della flotta.
- **Panoramica sul monitoraggio del carico:** I sensori installati nel vagone merci misurano dei parametri come temperatura o umidità del carico. I risultati sono visualizzati in una grafica chiara che fornisce un'indicazione dello stato corrente. Il portale può essere utilizzato per rivedere e analizzare i dati sulla condizione per orari specifici o per l'intero viaggio. Quando combinato con la notifica di arrivo, c'è anche la possibilità di fornire una fattura di consegna elettronica.

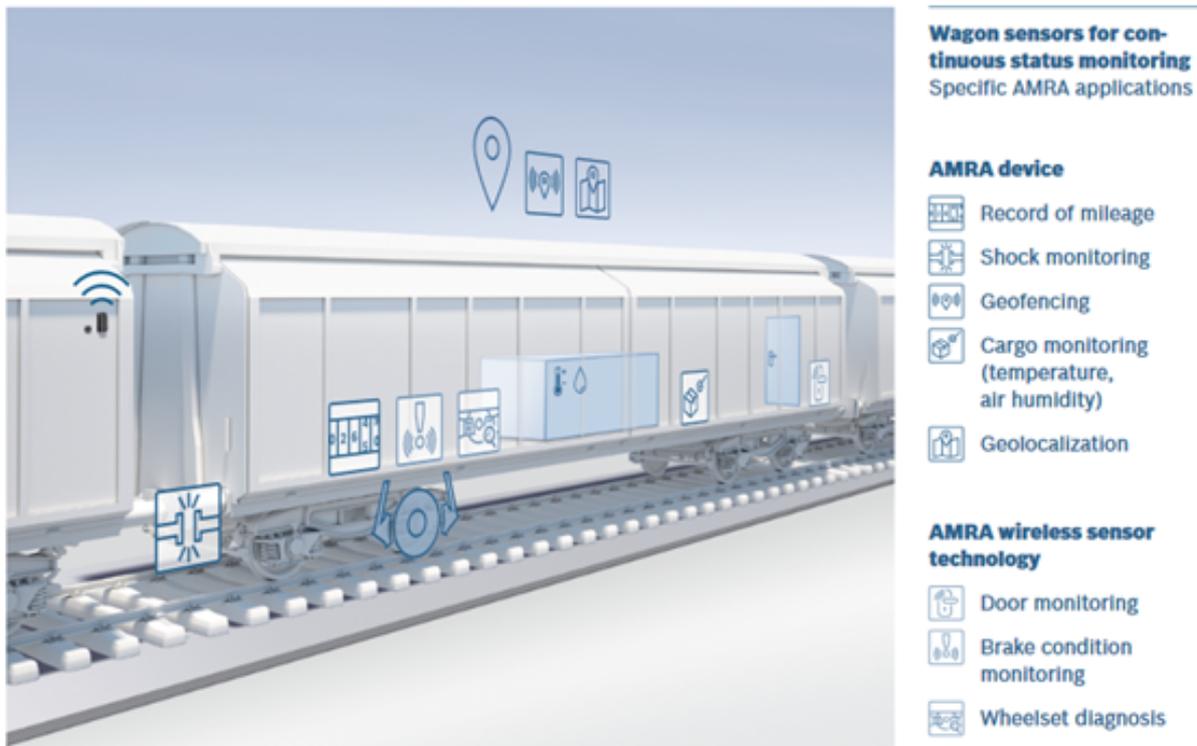


Figura 2.13: Dislocamento dei vari sensori su carro

### 2.4.5 SKF Insight Rail

L'Insight Rail, prodotto e commercializzato da SKF, è un sistema di monitoraggio wireless autoalimentato con associato servizio di analisi a distanza dei dati raccolti che fa la sua apparizione nel mercato più recentemente rispetto ai suoi concorrenti a partire dal Luglio 2017. Come AMRA, tale sistema risulta essere alimentato da un pacco batteria al litio-cloruro di tionile dalla durata certificata e garantita maggiore ai 3 anni in base al normale ciclo di lavoro.

Nonostante questo, trattasi di un dispositivo facile e veloce da installare, completamente wireless, posizionato direttamente su di un dado di una boccola senza alcuna installazione a bordo carrozza. Tale dispositivo di monitoraggio è stato certificato per applicazioni ferroviarie e fornisce all'utente un'interfaccia facile da usare e permette di valutare eventuali valori anomali legati a guasti in campo prima che si sviluppino dei



Figura 2.14: SKF Insight Rail

problemi di manutenzione non pianificati, ottimizzando quindi la pianificazione della stessa, riducendone il costo e il ciclo di vita (LCC). I dati raccolti vengono trasmessi mediante comunicazioni radio 3G - Bande 900/2100 UMTS - Europa o comunicazioni radio 2G - Bande UMTS 900/1800 - Europa con Scheda "SIM soft" pre-programmata con il servizio dati IoT e visualizzabili su portale web.

### 2.4.6 Il progetto S.W.A.M. Rail di Movimatica

Il progetto S.W.A.M. Rail, Sistema **W**ireless **A**utoalimento di **M**onitoraggio per la sicurezza di veicoli ferroviari, nasce dalla volontà di Movimatica, azienda leader nel monitoraggio remoto di macchine da lavoro e gestione flotte, di offrire ai clienti del settore trasporto merci su ferro uno strumento integrato in grado di monitorare le condizioni di

marcia del carro con la sua dinamica, al fine di individuare e segnalare al cliente anomalie riscontrate sul materiale rotabile in tempo reale attraverso lo studio dei dati raccolti in moto e visualizzabili attraverso un sistema Web/Cloud. A tal proposito, Movimatica in collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale del Politecnico di Torino, ha sviluppato e brevettato il **MoviRail** ovvero un sistema ICT service-oriented e internet-based di Tracking and Tracing (T&T) specificamente dedicato ai carri ferroviari. Partendo dalle richieste del mercato di avere un dispositivo che permettesse di conoscere in ogni momento la dislocazione del proprio mezzo in giro per il mondo e al tempo stesso che risolvesse la problematica relativa all'assenza di alimentazione elettrica a bordo carro, il MoviRail soddisfa tali esigenze mediante tecnologie innovative che lo rendono competitivo rispetto ai concorrenti. Il problema dell'alimentazione autonoma è risolto mediante l'utilizzo di specifici generatori brevettati, basati sulla tecnologia propria degli *energy harvesters*, che comunica in tempo reale con un sistema centrale di monitoraggio accessibile via Internet mediante Web Browser, se l'utente è una persona, o Web Services se l'utilizzatore è un sistema informatico. Questo fa sì che il sistema non necessiti di alcun cablaggio per l'alimentazione dei sensori, né della sostituzione periodica delle batterie di alimentazione. Inoltre tutti gli elementi del sistema si scambiano continuamente i dati campionati per il processamento degli stessi attraverso opportuni algoritmi di diagnosi in modalità wireless. Il dispositivo a bordo vagone integra un ricevitore satellitare GPS e un trasmettitore/ricevitore GPRS/GSM per la comunicazione bidirezionale col sistema remoto di controllo e prevede la connessione con vari sensori di vario tipo capaci di rilevare informazioni sullo stato del carro ed eventualmente anche di identificazione e controllo del carico trasportato. MoviRail rende quindi il comune carro merci su rotaia uno strumento del mondo Internet, soddisfacendo appieno il principio dell'IoT.

# Capitolo 3

## Le Moderne Tecniche di Monitoraggio

Nel seguente capitolo, viene fornita una panoramica generale delle tecniche di monitoraggio della dinamica dell'infrastruttura ferroviaria al fine di prevenire ed evitare guasti di ogni tipologia mediante l'utilizzo di metodi avanzati di filtraggio, di identificazione del sistema e di analisi del segnale. Tali approcci seppur teorici, non richiedono lo sviluppo di modelli matematici e algoritmi complessi per studiare il sistema e permettono di superare per quanto possibile le difficoltà legate a non linearità e variazioni dei parametri nel sistema. Nelle pagine seguenti vengono raccolte e valutate criticamente le moderne tecniche utilizzate per il monitoraggio presenti in letteratura, analizzandone i vantaggi e le carenze di questi metodi.

### **3.1 Una panoramica sulle moderne tecniche di monitoraggio a bordo dei veicoli**

Come mostrato nella figura seguente, un sistema di monitoraggio a bordo veicolo normalmente consiste di due fasi principali: acquisizione dati e analisi dei dati.

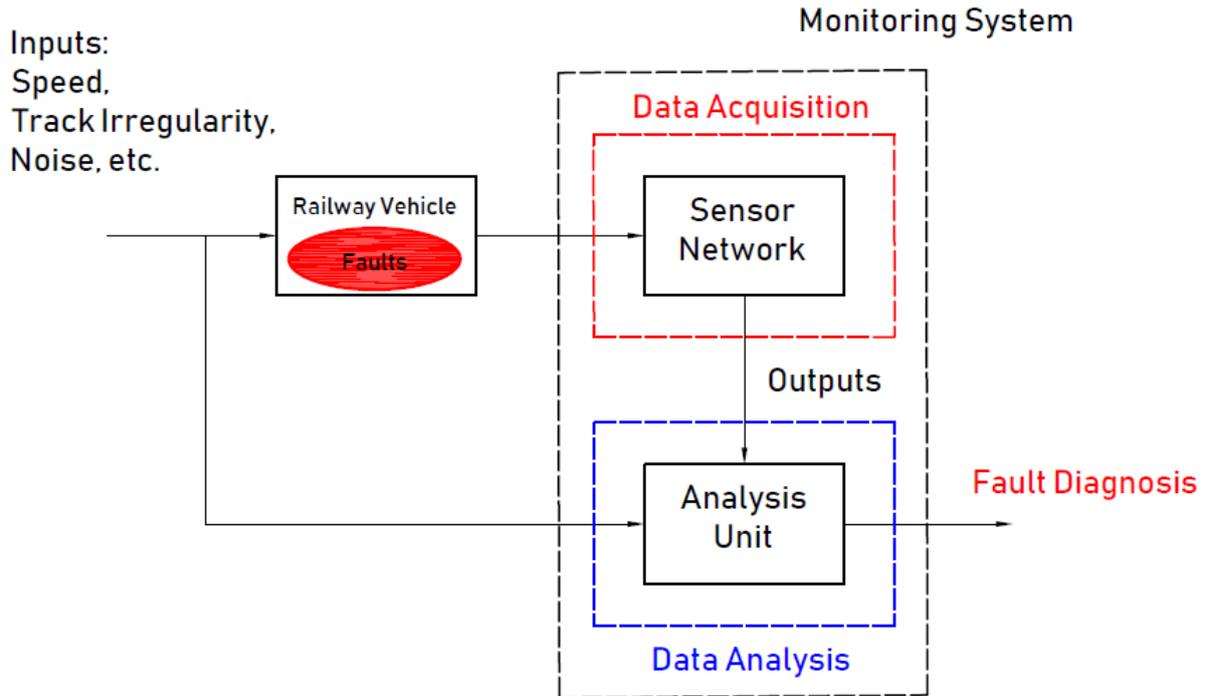


Figura 3.1: Schema a blocchi di un sistema di monitoraggio, [10]

I sensori montati a bordo macchina permettono di acquisire una serie di informazioni utili come l'accelerazione, la velocità di rotazione, lo spostamento, il rumore prodotto e la temperatura, al fine di fornire un quadro completo delle sollecitazioni a cui il carro è sottoposto durante le normali condizioni di lavoro e in caso di anomalie riscontrate nella fase di post-processamento dei dati acquisiti, individuare la natura del difetto rilevato. Generalmente durante la fase di *"Data Acquisition"* i sensori impiegati sono di tipo inerziale, di spostamento, di rumore e di calore. I dati che tali sensori forniscono all'operatore hanno un ruolo fondamentale nell'ottica del processo decisionale a seguito della fase di *"Data Analysis"*.

I sensori inerziali sono ampiamente utilizzati per le ridotte dimensioni, il basso costo, il limitato consumo energetico e la migliore robustezza che garantiscono. Vengono impiegati per acquisire segnali di vibrazione, per stimare l'interazione tra ruota e rotaia e rilevare guasti nei sistemi di sospensione. Lo studio dei segnali di accelerazione, combinati con i segnali di vibrazione, possono essere utilizzati per identificare le irregolarità del tracciato e nel sistema di sospensione del carrello. Per quanto concerne i sensori montati nel corpo boccola, hanno, rispetto ai precedenti generalmente montati sull'assile, un ciclo di vita molto limitato visto la difficoltà di conservazione. I sensori di distanza, tipicamen-

te basati su tecnologia laser garantiscono una maggiore precisione, vengono impiegati in maniera ridotta a causa del più alto costo e visto che l'ambiente di lavoro risulta essere molto "sporco".

### 3.2 Tecniche di Elaborazione dei Segnali

Come ricordato già in precedenza, i dati raccolti dai sensore dislocati a bordo carro, vengono inseriti nell'unità di "Data Analysis" del "Monitoring System". Tipicamente le strategie adottate sono classificabili come di seguito:

- **Model-based methods:** Tali metodi si basano sulla *definizione di un opportuno modello matematico* in grado di fornire un legame fra le sollecitazioni a cui il carro è sottoposto e la risposta che il veicolo fornisce. I dati raccolti dal sensore sono quindi utilizzati come input per il modello definito che andrà a fornire previsioni sul comportamento dinamico del sistema. Le uscite del modello verranno quindi confrontate con quelle misurate in tempo reale. Le differenze emergenti fra modello e dinamica reale, verranno utilizzati per identificare eventuali difetti nei veicoli ferroviari e per prevenirne i conseguenti guasti. I modelli matematici possono ritenersi un'approssimazione della realtà e pertanto la loro precisione sarà limitata dalla linearizzazione del modello (o da altri metodi di approssimazione), dall'influenza dei rumori di cui non è nota l'origine e dall'incertezza legata ai parametri non lineari adottati.

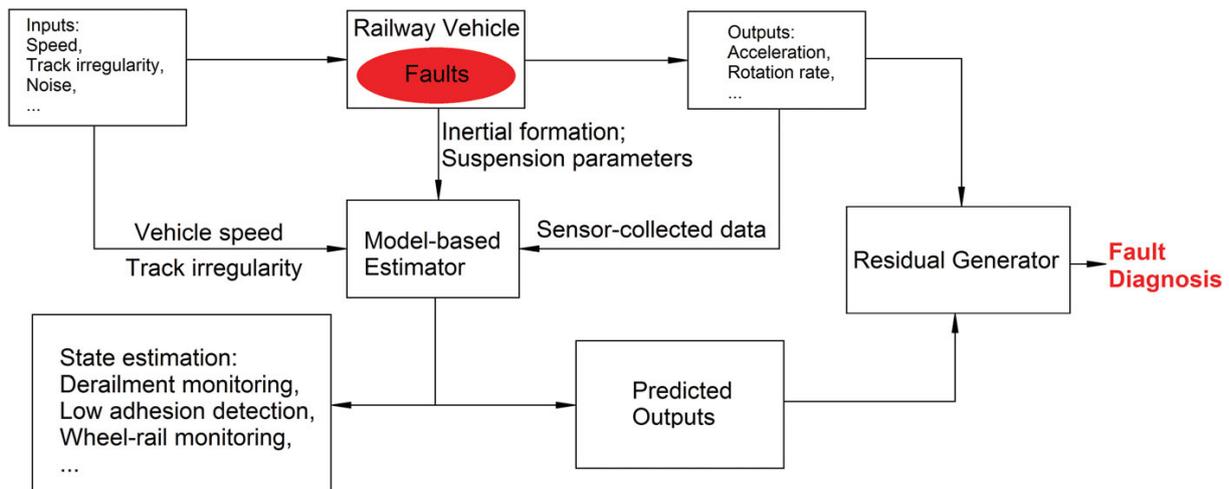


Figura 3.2: Schema a blocchi per i Model-based methods, [10]

- **Signal-based methods:** Tali metodi sono stati sviluppati per agire direttamente sui segnali tramite *analisi nel dominio del tempo o nel dominio delle frequenze*. I risultati ottenuti dall'analisi servono per definire una classificazione dei guasti, identificando tipologia e gravità.

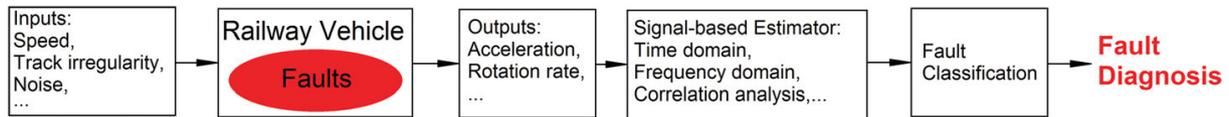


Figura 3.3: Schema a blocchi per i Signal-based methods, [10]

### 3.3 Wireless Sensor Networks: tipologie di sensori e grandezze monitorate

I *Wireless Sensor Networks* (WSNs) possono essere considerate come una delle tecnologie più importanti di questo secolo. Mediante i progressi crescenti nell'ambito dell'elettronica, delle nanotecnologie, delle comunicazioni wireless, dell'informatica, del networking e della robotica, è possibile progettare dei sensori o dei sistemi di sensori avanzati che possono essere utilizzati in vari campi di applicazione. Con il termine *Wireless Sensor Network* si indica quindi una determinata *tipologia di rete informatica* che, caratterizzata da una architettura distribuita, è *realizzata da un insieme di dispositivi elettronici autonomi in grado di prelevare dati dall'ambiente circostante e di comunicare tra loro*. Questi piccoli apparecchi, chiamati *nodi di sensori*, sensor node (in inglese) o motes (principalmente nell'America settentrionale), sono formati da componenti in grado di rilevare grandezze fisiche (sensori di posizione, temperatura, umidità ecc.), di elaborare dati e di comunicare tra loro. Un sensore è comunemente definito come un particolare trasduttore che si trova in diretta interazione con il sistema misurato. Un buon esempio di infrastruttura critica in cui è possibile applicare i WSNs sono le ferrovie. L'attuale tecnologia WSNs può essere utilizzata come sistema di monitoraggio permanente che permette di ridurre notevolmente i costi di installazione e manutenzione poiché non è richiesto alcun cablaggio. Tuttavia, si prevede che una piattaforma di sensori permanente abbia una lunga durata, specialmente se si tiene conto della redditività economica. In questo senso, è molto importante analizzare le caratteristiche dei singoli componenti del WSNs perché il loro comportamento determinerà la risposta dell'intero sistema.

Nella seguente tabella vi è una classificazione dettagliata dei dispositivi utilizzati per il monitoraggio dell'infrastruttura ferroviaria.

Sensori-Tipologia	Descrizione ed esempi di utilizzo
<i>Accelerometri</i>	Sono generalmente impiegati per misurare le vibrazioni legate all'infrastruttura ferroviaria (binari) ma possono anche essere utilizzati per valutare le accelerazioni laterali di componenti in moto quali le ruote. Sono robusti, affidabili, facili da calibrare ed economici. Vengono spesso installati in combinazione con gli estensimetri.
<i>Trasduttore di posizione</i>	Converte uno spostamento lineare o angolare in un segnale digitale adatto alla registrazione e memorizzazione.
<i>Sensori a fibre ottiche</i>	I sensori FBG detti anche <i>reticoli di Bragg</i> sono degli elementi in fibra ottica che possono essere utilizzati per misurare la temperatura, la deformazione o l'accelerazione. Nel caso di dilatazione della fibra, nella quale è stato impiantato il reticolo, dovuta ad una variazione di temperatura o ad una deformazione, la lunghezza d'onda filtrata varia. I sensori FBG hanno una lunga durata superiore ai 20 anni.
<i>Fibre interferometriche</i>	I sensori a fibra interferometrica rilevano la fase del segnale di potenza di tipo sinusoidale in uscita. La lunghezza d'onda della luce nei sensori ottici non è influenzata dai campi elettromagnetici. Questa immunità alle interferenze elettromagnetiche è un importante vantaggio specie in un ambiente elettromagneticamente rumoroso quale l'infrastruttura ferroviaria.
<i>Giroscopi</i>	I giroscopi misurano con precisione la velocità angolare di un veicolo attorno a determinati assi, le accelerazioni longitudinali, laterali e verticali, nonché il beccheggio, il rollio e l'imbardata. Questo fa sì che risultano essere ideali per l'analisi di carrelli e telaio.
<i>Inclinometri e Tiltmetri</i>	Gli inclinometri misurano l'inclinazione angolare rispetto ad un orizzonte generato artificialmente. Gli inclinometri possono rilevare la distorsione delle strutture ferroviarie rilevando le variazioni di inclinazione.
<i>A luce ultravioletta</i>	Il fototubo contiene un fotocatodo e una serie di elettrodi in un involucro di vetro sottovuoto, in grado di misurare la durata delle emissioni ultraviolette (nell'intervallo di lunghezze d'onda $175 \div 195 \text{ nm}$ ) dovute all'arco elettrico.

<p><i>I sensori piezoelettrici</i></p>	<p>I sensori piezoelettrici generano un segnale quando il materiale piezoelettrico (come tormalina o quarzo) viene compresso. Sono utilizzati per misurare lo sforzo, la pressione, le vibrazioni e gli urti. Trattasi di sensori robusti e stabili per l'uso ripetuto, quindi possono essere utilizzati sulle ruote del treno per monitorare qualsiasi spostamento sulla superficie della ruota per identificare gli eventuali difetti delle ruote. Sono più facili da fabbricare e meno costosi da gestire rispetto ai sensori ottici. In tale categoria rientrano: i sensori di pressione piezoresistivi, i sensori di emissione acustica ed i sensori SAW (Surface Acoustic Wave).</p> <p><b>1) I sensori di pressione piezoresistivi</b> hanno un diaframma in silicio microperforato con estensimetri piezoresistivi incorporati in esso, fusi su di una piastra posteriore in silicone o vetro. Producono un segnale più ampio rispetto ad altri tipi di sensori che offrono una migliore sensibilità. Sono utilizzati per misurare le variazioni di resistenza e possono monitorare i dadi e i bulloni sulle piastre di guida delle rotaie per garantire che non si allentino.</p> <p><b>2) I sensori di emissione acustica</b> sono trasduttori piezoelettrici passivi ad alta frequenza. Onde elastiche vengono generate quando c'è un improvviso rilascio di energia di deformazione all'interno di un materiale, ad esempio, l'energia rilasciata da cricche da fatica attiva quando viene applicata una forza esterna. I sensori rilevano queste onde sonore, filtrando il rumore ambientale. Pertanto, i sensori sono in grado di rilevare il danno all'interno delle strutture in cui le cricche stanno crescendo. Uno svantaggio è che i dati rilevati sono elevati e richiedono algoritmi accurati ed efficienti per elaborarli e interpretarli.</p> <p><b>3) I sensori SAW (Surface Acoustic Wave)</b> convertono i segnali di ingresso elettrici in onde meccaniche utilizzando un materiale piezoelettrico. Le onde meccaniche sono influenzate da fenomeni fisici come la temperatura, pertanto i sensori SAW vengono utilizzati per monitorare le variazioni di temperatura nel cuscinetto della boccola dei veicoli ferroviari. I sensori sono molto sensibili e stabili ma le onde sono distorte dai liquidi, quindi i sensori SAW devono essere posizionati in ambienti asciutti.</p>
--	--

<i>I sensori elettromagnetici</i>	Tali sensori inducono la polarizzazione elettrica in un materiale quando viene applicato un campo magnetico. Possono essere utilizzati per analizzare i campi magnetici nei cavi elettrici che trasportano corrente e, quindi, monitorare la corrente. Sono passivi quindi non richiedono un'alimentazione di energia (batteria) poiché sono alimentati per induzione.
<i>Trasduttore di pressione</i>	Producono un segnale collegato alla pressione agente sul sensore. I trasduttori di pressione possono monitorare lo spostamento verticale rispetto ad un dato riferimento di natura idraulica. Qualsiasi spostamento sarà dovuto a cambiamenti di pressione.
<i>Piezometri</i>	Sono utilizzati nelle ferrovie per misurare la pressione positiva dell'acqua nelle acque sotterranee dei letti ferroviari. Sono trasduttori di pressione idraulici in cui l'acqua esterna esercita una pressione sul fluido interno che a sua volta esercita una pressione su un trasduttore di pressione interno. Sono robusti e affidabili ma devono essere calibrati per tenere conto della pressione atmosferica.
<i>TDR</i>	Il Time Domain Reflectometer (TDR) converte la durata di un impulso elettromagnetico ad alta frequenza in un volume di acqua. Sono semplici da usare e facili da calibrare.
<i>Settlement Probes</i>	Sono sonde che misurano il dissesto a lungo termine dei binari ferroviari. Sono trasduttori di pressione idraulici con una sonda incorporata in grado di misurare grandi cedimenti. Quando la sonda cambia altitudine, la pressione cambia e viene misurata dal trasduttore di pressione. Sono sensibili alla pressione ambientale (atmosferica) e devono essere calibrati attentamente.
<i>Tensiometro</i>	Il tensiometro misura la pressione negativa dell'acqua nel terreno per quantificare lo stato di umidità del suolo. L'acqua esercita una pressione negativa sul fluido interno e quindi sul trasduttore di pressione interno del sensore. Richiedono una manutenzione regolare.
<i>Piezometri a corda vibrante</i>	Misurano i cambiamenti nella pressione dell'acqua di falda misurando la forza esercitata dall'acqua che agisce su un diaframma e monitorando le vibrazioni di un filo che tocca il diaframma. Sono durevoli, stabili e affidabili, ma i fili vibranti limitano la frequenza delle letture a diversi secondi per lettura (ad es. 0.1 Hz). Sono adatti per il monitoraggio a lungo termine.

<i>Strain Gauges</i>	Gli estensimetri misurano le sollecitazioni locali e generano un segnale che riflette lo sforzo applicato al sensore. Sono economici, semplici e precisi. Un estensimetro a resistenza contiene una lamina metallica che si deforma quando viene applicata una deformazione che ne modifica la resistenza elettrica. Un estensimetro a corda vibrante contiene un filo di acciaio tenuto in tensione. Il sensore genera un segnale che riflette la tensione sul sensore in funzione di quella nel filo. Gli estensimetri spesso misurano la forza verticale e laterale applicata alla rotaia tra due traversine al passaggio dei treni. Quando un treno è presente, la tensione aumenta sulla rotaia, che viene rilevata dai sensori.
<i>Sensori di temperatura</i>	Le termocoppie sono utilizzate per monitorare la temperatura dell'aria, del letto della rotaia o del telaio del treno e di altri componenti meccanici quali le boccole durante il moto.
<i>Estensimetri ultrasonici</i>	Gli estensimetri ultrasonici registrano le onde elastiche in una struttura a causa di vibrazioni causate, ad esempio, da un treno in corsa. Sono più facili da installare e sono più sensibili degli estensimetri standard e possono essere riposizionati a differenza di quelli piezoelettrici.

**Tabella 3.1:** Panoramica generale della sensoristica di monitoraggio dell'infrastruttura ferroviaria, [17]

Nella tabella seguente vengono incluse per tipologia di oggetto mobile da monitorare, le grandezze misurate e la rispettiva tipologia di sensore adottato.

Oggetto Monitorato	Grandezza Misurata	Tipologia Sensore
<i>Train Shell</i>	Deformazione	Sensori FBG per deformazione
	Temperatura	Sensori FBG per temperatura
		Termocoppie
	Vibrazioni	Accelerometri
	Accelerazione laterale	Accelerometri
	Accelerazione longitudinale	Giroscopi
Rollio, Beccheggio, Imbardata		
<i>Wagon</i>	Temperatura	Termocoppie
	Umidità	Sensori di umidità
	Vibrazioni e Accelerazioni	Accelerometri
	Luce	Sensori a luce ultravioletta
	Spostamento	Sensori di spostamento
<i>Bogies</i>	Temperatura	Termocoppie
		Onde acustiche di superficie
	Vibrazioni	Accelerometri
		Sensori inerziali
<i>Axles</i>	Stress	Estensimetri
	Temperatura	Termocoppie
		Sensori SAW
<i>Wheels</i>	Vibrazioni lungo una superficie	Piezoelectric
	Accelerazioni laterali	Accelerometer
	Accelerazione ruota	Accelerometer
	Forza di contatto laterale	Gap Sensors
	Forza di contatto verticale	Trasduttore Magnetostrittivo
	Imbardata	Giroscopi
<i>Brakes</i>	Pressione Aria	Sensori di pressione
<i>Pantograph</i>	Deformazione	FBG per deformazione
	Temperatura	FBG per temperatura
		Termocoppie
	Accelerazioni	Accelerometri
		FBG Accelerometri
	Spostamento	Trasduttori di posizione
	Forza di contatto	Cella di carico
	Flusso di corrente	Sensori Elettromagnetici
Lunghezza d'arco	Sensori UV or Fototubi	

Tabella 3.2: Oggetti mobili monitorati, grandezze misurate e dispositivi di misura, [17]

# Capitolo 4

## Studio delle cause di danneggiamento nell'infrastruttura ferroviaria

L'obiettivo di garantire un trasporto ferroviario più veloce e più sicuro passa anche dal richiedere un affidabile sistema di trasporto di passeggeri e/o di merci. Nelle normali condizioni di lavoro, gli assili ferroviari operano ininterrottamente sotto un carico avverso e in condizioni ambientali difficili. Le situazioni più comuni che si verificano durante la marcia sono ad esempio l'affaticamento delle ruote dovuto al contatto volvente con le rotaie, impatti accidentali ma comunque dannosi, forti variazioni termiche, umidità, *etc.*. Questo porta ad un graduale ma irreversibile deterioramento strutturale con una sempre minore integrità delle ruote e dei cuscinetti montati sull'asse che provoca rumori e vibrazioni eccessive con conseguente maggiore stress di contatto fra ruota e rotaia. In questo capitolo viene condotto uno studio statistico sulle cause principali che portano a danneggiamento l'infrastruttura ferroviaria, nell'ottica di fornire un database di informazioni utili al fine di garantire un migliore intervento preventivo di manutenzione che eviti guasti durante la marcia e prevenga incidenti ben più gravi quali deragliamenti.

### 4.1 Il progetto D-RAIL FP7

Utile allo scopo di tale sezione è una recente analisi condotta dalla "*Det Norske Veritas*" - *DNV GL*,<sup>[20, 21]</sup> azienda leader per il controllo qualità e la gestione dei rischi, facente parte del progetto *D-RAIL FP7*. "*D-RAIL*" è stato un progetto di ricerca finanziato e sviluppato nell'ottica dell' "*European Commission's 7th Framework Programme*". Ufficialmente partito nell'ottobre 2011 sotto il coordinamento dell' *International Union of Railways* UIC e dell' *University of Newcastle* ha impegnato ben 20 partner provenienti da 11 paesi differenti (Europa, Russia, Maghreb, Medio Oriente, Kazakhstan, India, Pakistan, Giappone, Cina, Korea, Sud Africa). Fra questi vi erano gestori dell'infrastruttura, operatori, industrie e università. Il progetto ha previsto lo sviluppo del sistema *Future Rail Freight*, mirato a ridurre i rischi e le conseguenze in un modo economicamente efficiente.

I deragliamenti dei treni merci sono influenzati da una gamma più ampia di parametri rispetto ai treni passeggeri (ad esempio i carichi elevati, la velocità e qualità di manutenzione, *etc.*). In tale progetto le tecniche principalmente affrontate sono state:

- l'impatto economico dei deragliamenti;
- le tecniche di analisi, modellazione e simulazione per l'indagine sul deragliamento;
- studio di tecniche di prevenzione del deragliamento;
- integrazione dei sistemi di monitoraggio e supervisione a livello europeo;
- valutazione tecnica ed economica dei risultati chiave ottenuti.

Secondo l'analisi condotta dalla DNV, è possibile classificare le cause del deragliamento in tre principali categorie:

1. *Derailments caused by Infrastructure failures* (provocati a livello di infrastruttura ferroviaria);
2. *Derailments caused by Rolling Stock failures* (provocati per cedimento delle parti mobili);
3. *Derailments caused by Operation failures..*

A queste tre categorie generalmente viene affiancata una quarta denominata comunemente "*Others*" poiché un gran numero di deragliamenti ha una causa ancora sconosciuta.

#### 4.1.1 Derailments caused by Infrastructure failures

I deragliamenti provocati a livello di infrastruttura vengono a loro volta classificati come di seguito:

1. *Failed substructure:*

- Cedimento;
- Valanghe e Crolli di gallerie;
- Cedimento della struttura dovuta a inondazioni, allagamenti, *etc.*;
- Cedimenti di ponti;

2. *Structural failure of the track superstructure:*

- **Difetti nei binari:** i deragliamenti collegati a tale sottocategoria sono generalmente da associare alla frattura del binario, di solito in condizioni di carico dinamico elevato. Questi tipi di guasti sono associati a difetti interni che, crescendo, riducono la resistenza della sezione della rotaia, rendendoli più suscettibili alle fratture. Fattori come le elevate tensioni di contatto, le elevate sollecitazioni di flessione, il supporto ferroviario inadeguato, la diminuzione della sezione della rotaia (solitamente dovuta all'usura eccessiva), le elevate tensioni di trazione termica, *etc.* rendono tale fenomeno abbastanza comune fra quelli citati. Inoltre, la diminuzione della sezione dei binari può essere riconosciuta mediante tecniche di ispezione

video e di misurazione del flusso magnetico o mediante misurazione della corrente parassita. Indipendente dall'approccio adottato, se viene rilevato tale difetto, il traffico su tale linea deve essere fermato immediatamente.

- **Rotture nei giunti;**
- **Cedimento nei sistemi di scambio:** I deragliamenti provocati da guasti nei sistemi di scambio dipendono da fattori quali l'elevato rapporto fra carichi dinamici verticali e laterali (o semplicemente elevati carichi verticali o bassi carichi laterali), bulloni allentati o mancanti, danneggiamento delle varie componenti del sistema di scambio, geometria inadeguata, *etc.*;
- **Cedimento nei sistemi di supporto e fissaggio della rotaia;**
- **Cedimenti per impossibilità del binario di riuscire a sopportare la sovrastruttura;**
- **Altri guasti di binari e sovrastrutture.**

3. **Track geometry failure:** I deragliamenti collegati alla geometria del tracciato sono generalmente di natura dinamica e dipendono dall'interazione fra veicolo e rotaia i cui difetti sono generati da un veicolo caricato in modo improprio o che si muove in maniera impropria. Fra i fattori più comuni vi sono un elevato rapporto fra i carichi verticali e quelli laterali (o semplicemente elevati carichi verticali o bassi carichi laterali), una grande deformazione della rotaia sottoposta a carichi dinamici elevati, deformazioni termiche (punti molto caldi quali le curve), forza inadeguata del dispositivo di fissaggio, carrelli o sospensioni inadeguate, velocità impropria, eccessiva curvatura del binario, *etc.* L'usura delle rotaie viene monitorata effettuando misurazioni tramite dispositivo laser e successivamente memorizzati in un apposito sistema di registrazione. Se i limiti consentiti vengono superati, i binari devono essere ricondizionati. Bisogna anche valutare se il sistema di fissaggio fra binario e traversine risulti essere adeguato o meno, in particolare questo viene effettuato con opportuni sistemi a bordo veicolo che valuta la forza agente direttamente sul binario. Se vengono identificate irregolarità, il dispositivo di fissaggio deve essere sostituito. Con la stessa tecnica precedente possono essere individuate eventuali crepe longitudinali o laterali nelle traversine in calcestruzzo che portano a una riduzione della capacità di assorbimento dei carichi laterali con conseguente possibile ribaltamento del convoglio. Ancora una volta se vengono identificate tali irregolarità, le traversine vanno sostituite. Infine se un veicolo viene sovraccaricato continuamente, i suoi componenti saranno altamente sollecitati. L'usura e l'affaticamento del materiale dei componenti interessati saranno notevolmente aumentati. Pertanto, è possibile rilevare carichi troppo elevati di assi o ruote in punti critici dell'asse. Se i carichi sono troppo elevati, il veicolo deve essere fermato nella più vicina stazione secondo le indicazioni fornite dal gestore dell'infrastruttura. Un notevole sovraccarico può essere monitorato anche da rilevatori di stress a bordo.

4. **Other infrastructure failures**

### 4.1.2 Derailments caused by Rolling Stock failures

I deragliamenti provocati per cedimenti negli organi mobili vengono a loro volta classificati come di seguito:

1. *Wheelset failures (wheels and axles)* :

- **Rotture nelle sale:** sono generalmente associati alla frattura dell'assile di un veicolo, solitamente sottoposto a condizioni di carico dinamico elevato verticale e laterale. Tra i fenomeni più comuni si ricordano:
  - Rotture dovute alla temperatura elevata delle boccole e dei fuselli dell'asse;
  - Rottura del semiasse;
  - Rotture non localizzate nell'asse.
- **Cedimenti nelle ruote:** sono generalmente associati alla frattura della ruota sotto carico dinamico elevato (elevati carichi verticali e laterali). I guasti connessi alla temperatura e al surriscaldamento provocano il cambiamento delle proprietà meccaniche della ruota e portano alla formazione di crepe indotte termicamente. I casi più comuni sono:
  - Rotture nelle ruote monoblocco;
  - Usura nel cerchione;
  - Errato profilo della ruota che provoca una eccessiva usura del battistrada e nella flangia.

2. *Bogie and suspension failures* : sono generalmente associati ad un carico inadeguato o ad un cedimento della molla e degli elementi di sospensione sotto carico. Fra le cause che portano a tale tipologia di danneggiamento si includono gli elevati livelli di carico dinamico laterale e verticale, il caricamento improprio del carrello, ispezioni e manutenzione improprie, *etc.* Tra i fenomeni più comuni si ricordano:

- **Cedimenti nel carrello e nei supporti;**
- **Cedimenti di molle e sospensioni;**
- **Altri cedimenti.**

3. *Twisted or broken wagon structure/frame*

4. *Wagon with too high twist stiffness in relation to length*

5. *Brake component failure*

6. *Other or unknown rolling stock derailment cause*

### 4.1.3 Derailments caused by Operation failures

In tale categoria, i deragliamenti possono essere classificati come di seguito:

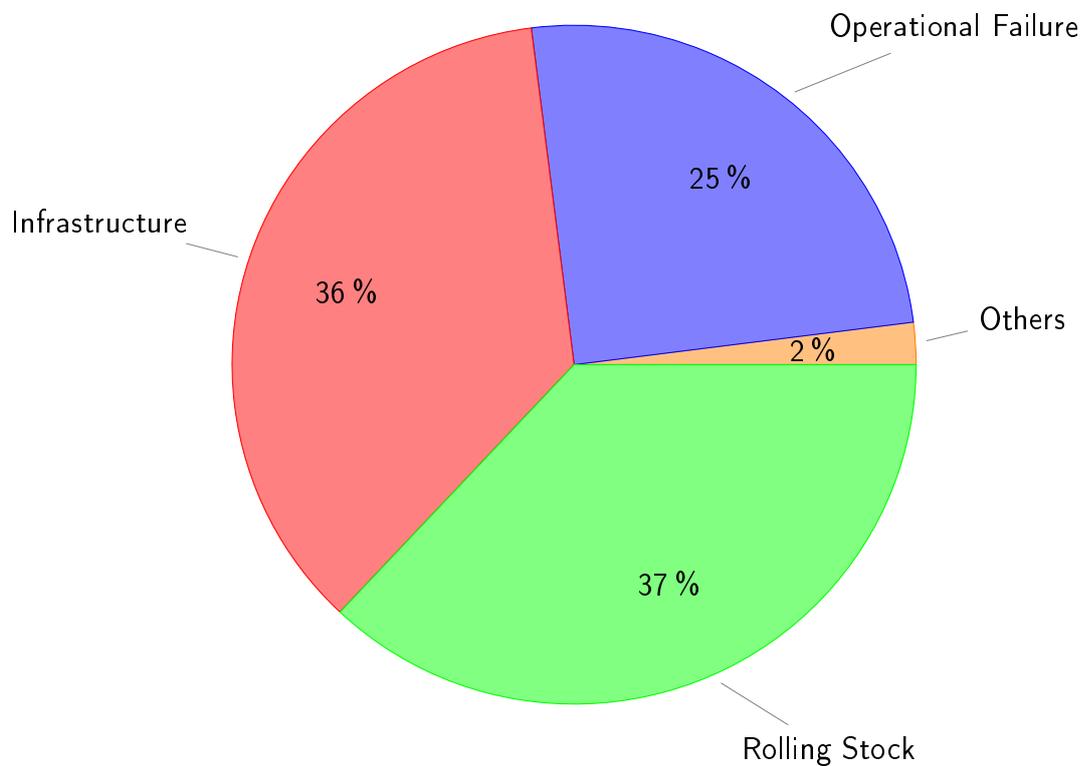
1. *Train composition failures:*

- **Composizione inadeguata dei treni** (vagoni vuoti precedono quelli carichi);
  - **Altro.**
2. ***Improper loading of wagon***: sono generalmente associati a carrelli caricati in modo inopportuno che provoca un comportamento dinamico indesiderato o che genera un carico eccessivo che può comportare il guasto di un componente strutturale del carro o di uno del binario. Il caricamento improprio può essere associato ad un carico non uniforme o semplicemente eccessivo che influenza negativamente la dinamica del carro stesso. Fra i fenomeni più comuni si ricordano:
- **Vagoni sovraccaricati;**
  - **Carichi inclinati;**
  - **Assenza del fissaggio del carico;**
  - **Altro.**
3. ***Train check and brake testing***:
- **Prestazioni del freno non adatte** alle caratteristiche del percorso;
  - **Freni non correttamente controllati o testati;**
  - **Sistema frenante non sono ideale** per il carico da trasportare o per una data applicazione.
4. ***Wrong setting of points/turnouts***:
- **Settaggio errato** in relazione del movimento da compiere;
  - **Punto di riferimento commutato in una nuova posizione già occupato dal treno.**
5. ***Mishandling of train en route***:
- **Eccesso di velocità nei punti di scambio;**
  - **Eccesso di velocità in altri punti del percorso;**
  - **Altro.**
6. ***Brake shoe or other object left under train***
7. ***Human factors***
8. ***Other operational failures***

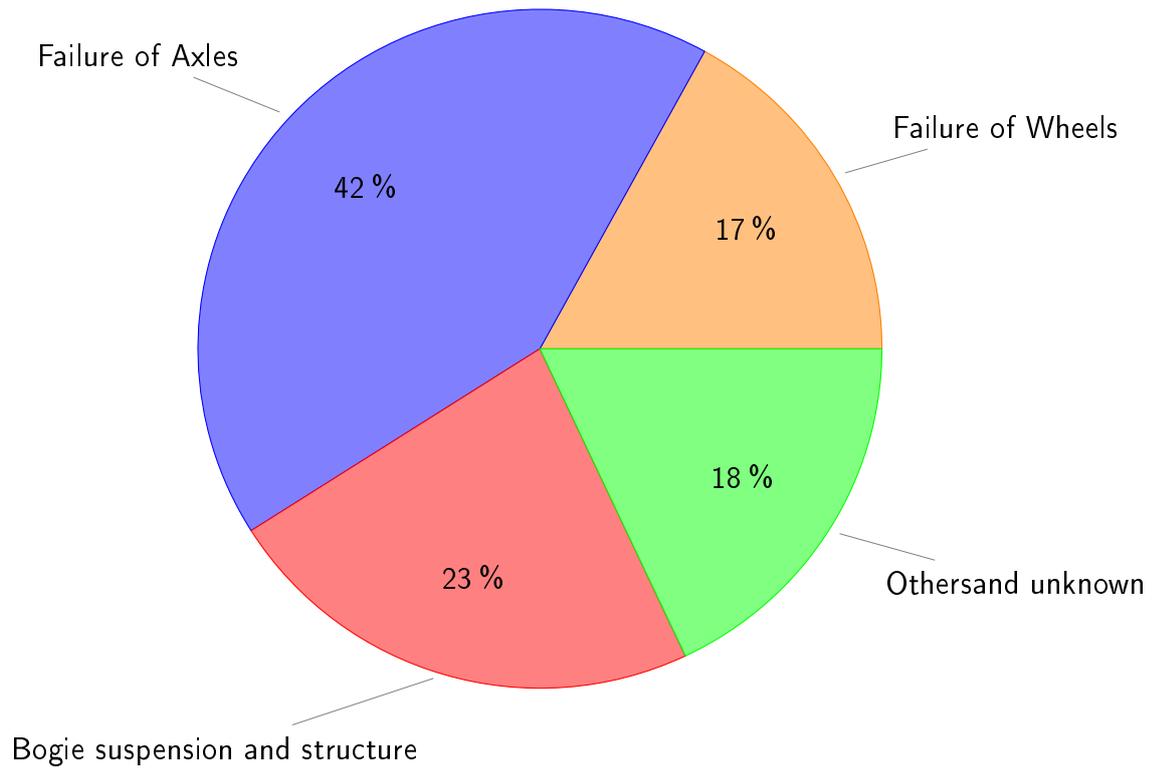
#### 4.1.4 I risultati ottenuti

L'analisi condotta ha rilevato che su 700 incidenti considerati, il 37% di questi rientra nella categoria "*stock faults*" ovvero provocati da dei difetti nel materiale delle parti in moto. Inoltre, l'82% di tutti gli incidenti relativi a difetti nel materiale delle parti rotabili viene collegato alle "*Failure of Axles*", "*Failure of Wheels*" o "*Bogie Suspension and Structure*".

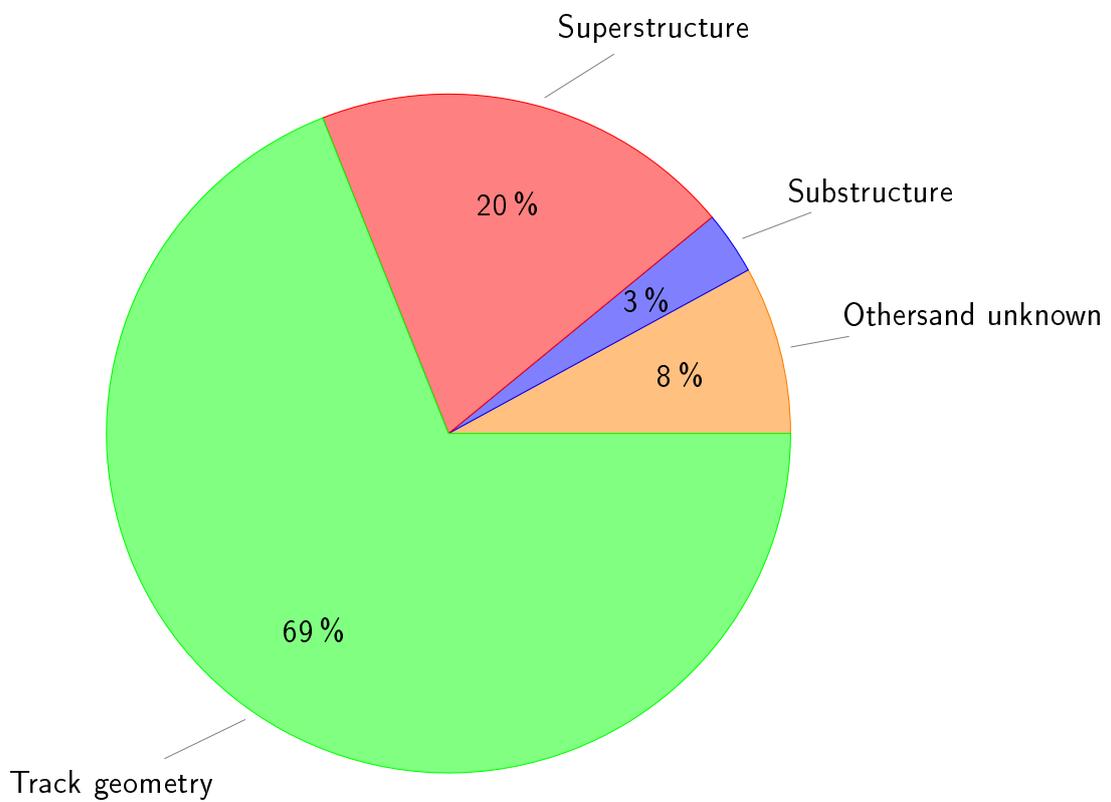
Secondo i risultati del progetto D-RAIL FP7, il 42% di tutti gli incidenti rientra nella categoria "*Failure of Axles (ruptures)*", che nella stragrande maggioranza dei casi è da associare ad un cuscinetto difettoso. Se un difetto del cuscinetto della ruota o dell'assile non viene tempestivamente rilevato, condurrà gradualmente a danni più gravi non solo sulle ruote ma anche sui binari. Una rapida individuazione dei guasti aiuta gli operatori a pianificare le attività di manutenzione in modo più efficiente senza compromettere la disponibilità minima della flotta richiesta. Una pianificazione inefficiente della manutenzione riduce il numero di treni disponibili, provocando il fermo macchina con annesso danno economico.



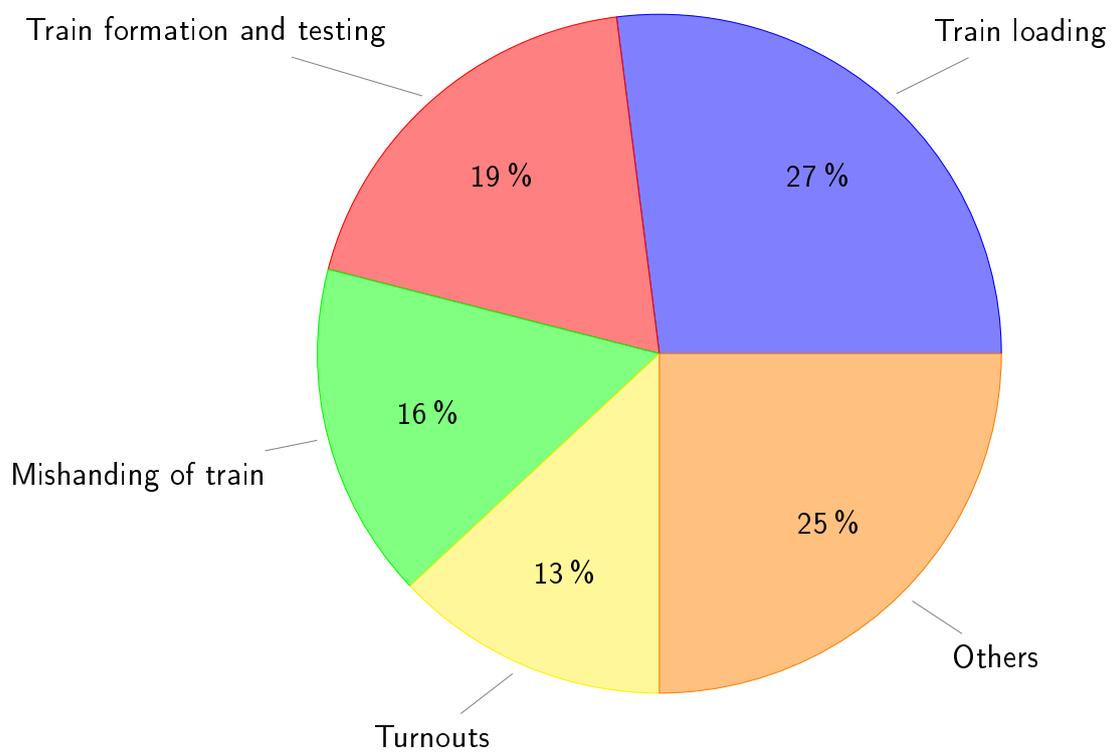
**Figura 4.1:** Incidenti ferroviari classificati per causa



**Figura 4.2:** Rolling stock-related accidents by cause



**Figura 4.3:** Infrastructure Failures-related accidents by cause



**Figura 4.4:** Operational Failures-related accidents by cause

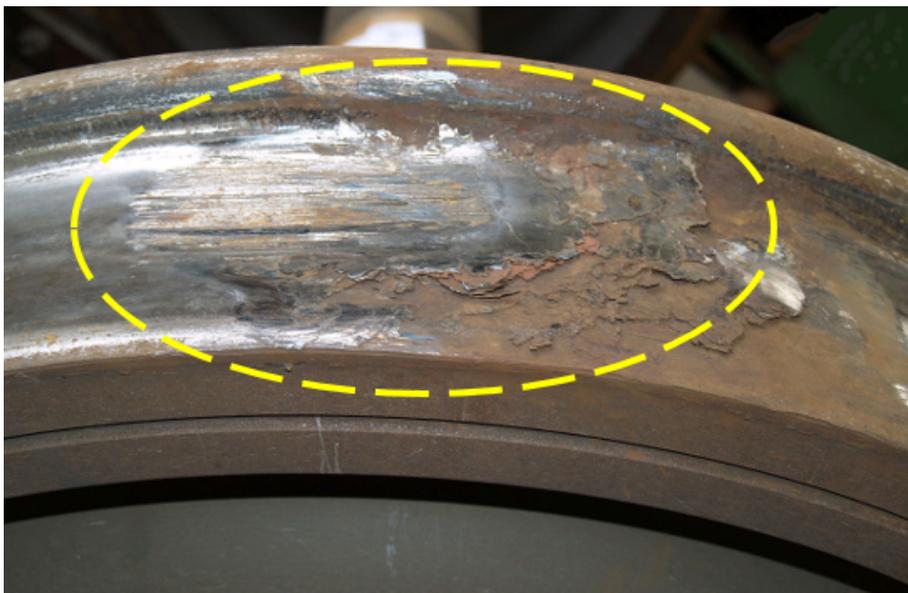
# Capitolo 5

## Wheel-Flat Detection: Definizione di un algoritmo

Fra gli innumerevoli difetti che interessano l'infrastruttura ferroviaria, è stato deciso di approfondire la tematica del "*wheel-flat*" o spiattellamento della ruota di un carro merci in moto. In particolare, a partire da uno studio prettamente teorico, si passerà alla definizione di un algoritmo che nella sua semplicità cerchi di essere uno strumento valido di valutazione del difetto nelle simulate condizioni di marcia.

### 5.1 Introduzione al *wheel-flat*

Il "*wheel-flat*" o spiattellamento della ruota è *uno dei danneggiamenti più comuni fra i difetti di superficie localizzati* che se ignorato o sottostimato può portare a consumo e a danneggiamento irreversibile dell'organo mobile.



**Figura 5.1:** Un caso di *wheel-flat*

Lo *spiattellamento* non è altro che una *superficie planare di rotolamento* della ruota dovuto proprio al moto di rotolamento stesso della ruota sui binari. Le *cause* che possono portare a tale danneggiamento sono molteplici: *il bloccaggio dovuto ad una errata frenata* per difetti già presenti negli organi frenanti mal regolati o *la scarsa aderenza ruota-rotaia* per avversità ambientali quali pioggia, ghiaccio, *etc.* o ancora *la presenza accidentale di grasso, olio, etc.* Per valutare l'entità del danneggiamento e quindi la gravità del difetto il parametro tenuto sotto controllo è la **lunghezza dello spiattellamento**, la cui entità potrebbe influenzare la circonferenza della ruota da poche decine a qualche centinaia di millimetri. Nel contatto fra ruota e rotaia le forze in gioco sono parecchio alte; pertanto, il danno e l'usura sono rilevanti, visto i grandi pesi coinvolti nel traffico ferroviario e la durezza dei materiali. Gli impatti ripetuti sulla rotaia, insieme alle elevate forze coinvolte, causano un rapido deterioramento dei vari componenti siano essi rotabili o fissi. I *tipi di danno* includono *eccessive temperature, assili, cuscinetti e boccole danneggiate, presenza di crepe* che penetrano nel materiale portando a rottura le rotaie con il rischio di deragliamento e *fessurazione delle traversine*. Oltre ai danni all'infrastruttura, le ruote producono un rumore eccessivo e livelli di vibrazione non indifferenti.

Il fenomeno del "*wheel-flat*" inizia con una forma geometrica definita e lunghezza limitata ( $2,5 \div 7,5 \text{ cm}$ ) e la sua evoluzione è tale da non farlo scomparire nel tempo, bensì si possono generare le "*long wave length wheel-flats*" dalle dimensioni tipiche di  $25 \div 75 \text{ cm}$  che hanno un effetto ancora più pericoloso poiché agiscono a più basse frequenze che sono meno compensate dalle forze di inerzia, a causa dei picchi generati dallo stesso *wheel-flat* nel profilo di accelerazione. Perciò, la diagnosi precoce dei *wheel-flats* è molto importante ed è per tale ragione che sono stati ideati in letteratura una serie di modelli e algoritmi tali da permettere una loro più rapida individuazione.

## 5.2 Dinamica del Wheel-Flat

Come ricordato in precedenza, la presenza di uno spiattellamento su di una ruota interrompe il continuo moto rotatorio di questa, vista la mancanza di materiale. Una volta superata la zona interessata dal *wheel-flat*, il sistema tornerà a muoversi di moto rotatorio. Pertanto, si è in presenza di un impatto periodico che si verifica ogni volta che la zona appiattita si avvicina al binario. L'elasticità della rotaia svolge un ruolo fondamentale nello studio di questo impatto. Nell'ipotesi di binario perfettamente rigido, la ruota "*cadrà*" fino a

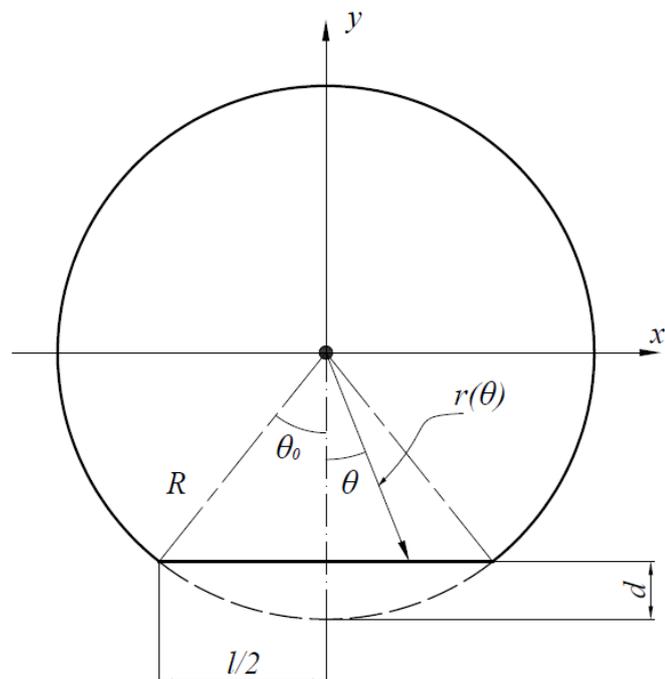


Figura 5.2: Grandezze geometriche di interesse per un *wheel-flat*

raggiungere la zona piatta.

In realtà, l'elasticità del binario garantisce, almeno, in una prima gamma di velocità, la propagazione di un'onda elastica che fa sì che la distanza del binario dalla ruota diminuisca, poiché il "fungo" della rotaia tende a muoversi verso l'alto, colmando la zona di materiale assente.

La letteratura propone che, a seconda della velocità con cui si muove il treno, il comportamento dinamico del sistema nel caso di contatto fra ruota spiattellata e binario possa essere qualitativamente diviso come segue:

- La forza d'impatto (quindi, il danno e la generazione di rumore) è proporzionale alla velocità del treno fino alla velocità critica;
- La forza d'impatto diventa più o meno costante, al passaggio della velocità critica.

In particolare il valore critico di velocità è pari a:

$$v_c = \gamma \left[ gR \left( 1 + \frac{m_{all}}{m_w} \right) \right]^{1/2} \quad (5.1)$$

dove  $g$  è l'accelerazione di gravità,  $R$  il raggio della ruota,  $m_w$  la massa della ruota,  $m_{all}$  porzione della massa totale che si scarica sulla ruota e  $\gamma$  una funzione dipendente dalla geometria del sistema, dalle proprietà del materiale e dalla rigidità dell'infrastruttura.

Lo spiattellamento di una ruota viene solitamente modellato come una corda di circonferenza di lunghezza  $l$  e perdita di materiale  $d$ , si veda Fig. 5.2. In questa fase, la superficie piatta della ruota è costituita da punti singolari, in cui la curvatura cambia dal raggio della ruota nominale  $R$  a  $\infty$ . Considerando la geometria mostrata in Fig. 5.2:

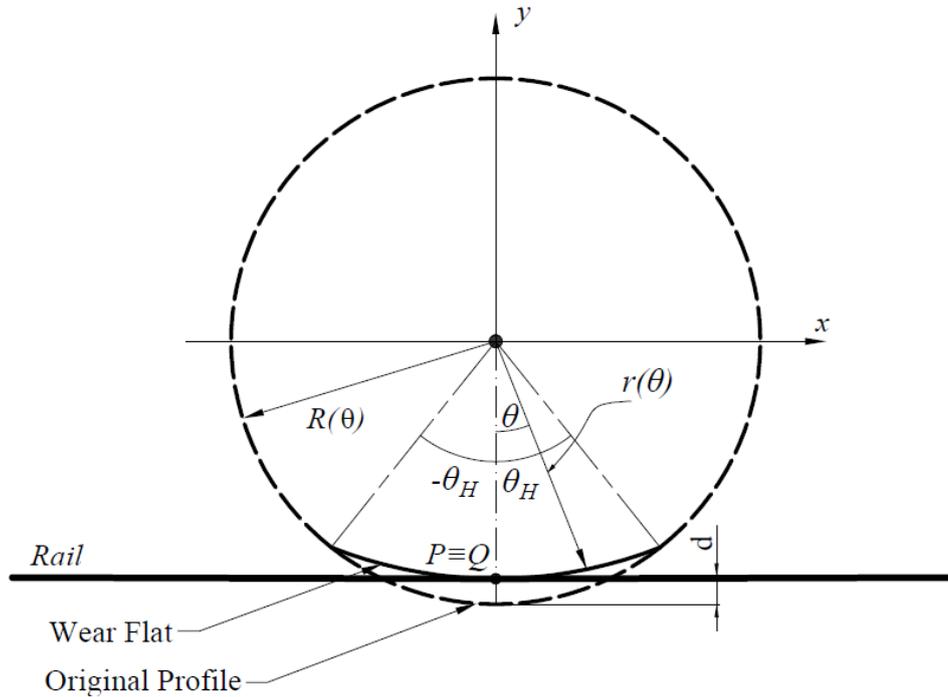
$$l = 2\sqrt{2Rd - d^2} \approx \sqrt{8Rd} \quad (5.2)$$

Come si nota dalla precedente formula, la lunghezza dello spiattellamento  $l$  può essere ottenuta misurando proprio la perdita di materiale  $d$ . Tuttavia, mentre la ruota continua a muoversi, la superficie piatta tende progressivamente ad arrotondarsi a causa della deformazione plastica fino a scomparire del tutto. Il profilo ritornerà ad essere una curva continua, ma con una lunghezza maggiore di  $l$  ed una profondità  $d$  costante, generando il così detto "*degenerated flat*". L'usura delle ruote può essere una causa principale dell'aumento della lunghezza dello spiattellamento ma, poiché questo processo è piuttosto lento e uniforme, è giusto ritenere costante la perdita di materiale. Inoltre, un "*degenerated flat*" può essere assunto stabile, se soddisfa i seguenti criteri:

1. la regione chiusa delimitata da  $r(\theta)$  è convessa;
2.  $r(\theta)$  è una funzione continua senza singolarità, quindi anche  $\dot{r}(\theta)$  sarà continua.

Nello sviluppo successivo dell'algoritmo si supporrà che lo spiattellamento sia simmetrico attorno a  $\theta = 0$ , dove  $r(0) = R - d$ .

Si consideri un *degenerated wheel-flat* che soddisfi i criteri di stabilità di cui sopra, definito da una funzione  $r(\theta)$  nell'intervallo  $(-\theta_H, \theta_H)$  e  $r = R$  per  $|\theta| \geq \theta_H$ .



**Figura 5.3:** Caso di *degenerated wheel-flat* che soddisfa i criteri di stabilità

Si noti che, a  $\theta = 0$ , la proiezione del centro della ruota  $P$  sulla rotaia coincide con il punto di contatto ruota-rotaia  $Q$ . Questa situazione ( $P = Q$ ) si verifica anche quando la ruota scorre su una regione circolare dove il raggio è normale alla tangente in  $Q$ . Tuttavia, quando la ruota scorre su una regione che non sia quella precedente nominata, il vettore  $\overline{OQ}$  non è normale alla rotaia (la rotaia è sempre tangente alla ruota nel punto di contatto  $Q$ ) e, quindi, vi è una distanza  $s$  tra  $Q$  e  $P$ . Indicando con  $\varphi$  l'angolo descritto dalla rotazione della ruota attorno al suo asse in  $O$  in un dato istante e da  $\theta$  la coordinata polare del punto di contatto per ogni  $\varphi$ , quando la ruota descrive un angolo  $\varphi$  nell'intervallo  $(-\theta_H, \theta_H)$  si hanno le seguenti configurazioni:

- (a)  $\theta < \varphi$  e  $P$  conduce  $Q$  per  $-\theta_H < \varphi < 0$ ;
- (b)  $\theta > \varphi$  e  $Q$  conduce  $P$  per  $0 < \varphi < \theta_H$ .

La figura seguente mostra una situazione con  $\varphi > 0$  dove il punto di contatto è avanti rispetto alla proiezione centrale della ruota (la ruota si sposta verso di  $+x$ ).

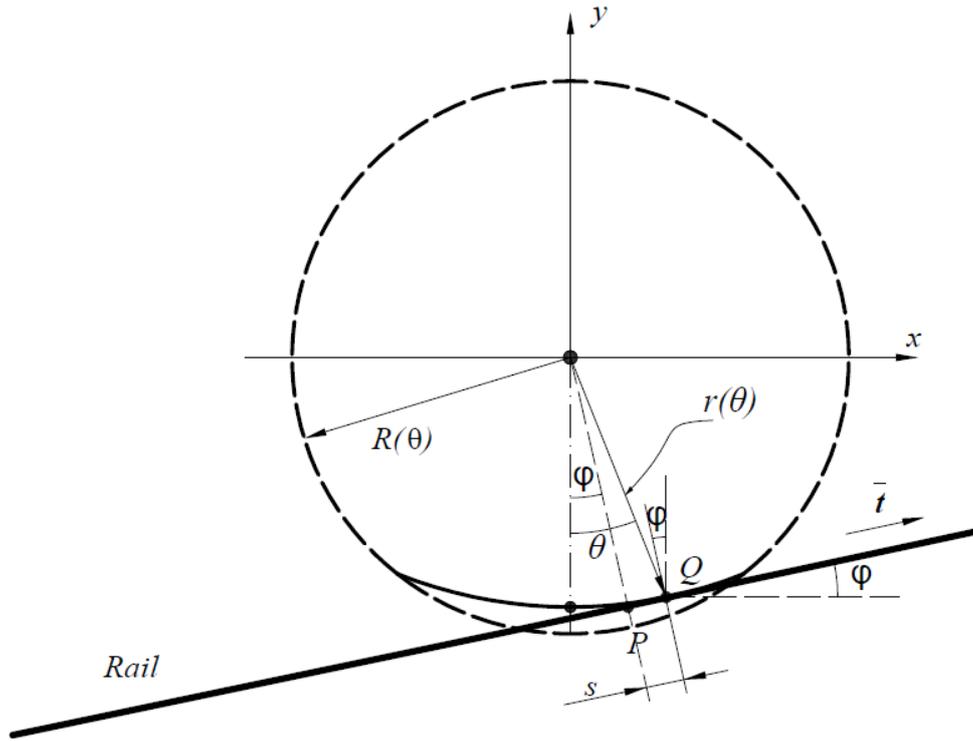


Figura 5.4: Caso  $\varphi > 0$

La distanza  $s = PQ$  è data dal prodotto scalare fra il vettore  $\vec{OQ} = \vec{r}(\theta)$  e il versore  $\vec{t}(\theta)$  tangente all'irregolarità. Tale versore è dato da:

$$\vec{t}(\theta) = \frac{\vec{r}'(\theta)}{\|\vec{r}'(\theta)\|} \quad (5.3)$$

$$s(\theta) = \vec{OQ} \cdot \vec{t} = \vec{r}(\theta) \cdot \frac{\vec{r}'(\theta)}{\|\vec{r}'(\theta)\|} = \frac{r(\theta)\dot{r}(\theta)}{\sqrt{r(\theta)^2 + \dot{r}(\theta)^2}} \quad (5.4)$$

Nel caso in cui  $\dot{r}(\theta) \ll r(\theta)$  nel range  $(-\theta_H, \theta_H)$ , l'equazione precedente diventa approssimabile a:

$$s(\theta) \approx \dot{r}(\theta) \quad (5.5)$$

Dal punto di vista geometrico vale anche:

$$s(\theta) = r(\theta) \sin(\theta - \varphi) \quad (5.6)$$

Ai bordi dello spiattellamento, la condizione di continuità richiede che  $s(\theta_H) = 0$ , cioè la proiezione P deve coincidere con Q dato che la ruota sta rotolando su una parte circolare. Per  $r(\theta_H) = R$ , l'angolo di rotazione deve essere  $\varphi_H = \theta_H$  per soddisfare la 5.6. Inoltre  $r(\theta)$  è continua con valori decrescenti da  $-\theta_H$  a 0 e crescente da 0 a  $\theta_H$ , la sua derivata  $\dot{r}(\theta)$  mostrerà un ciclo negativo seguito da uno positivo quando  $\theta$  varia da  $-\theta_H$  a  $\theta_H$ . Valori negativi di  $s$  indicano che Q ritarda P e viceversa. Ovviamente, le deviazioni positive devono compensare tutte quelle negative, essendo la ruota un corpo solido. Tuttavia, in un'applicazione reale, la funzione  $r(\theta)$  è sconosciuta. Supponendo però che esista un metodo per ottenere  $s(\varphi)$ , l'area sottesa da  $s(\varphi)$  nell'intervallo  $(0, \varphi_H)$  che rappresenta metà dell'intervallo dell'irregolarità,

con  $\varphi_H = \theta_H$ , risulta pari a:

$$A = \int_0^{\varphi_H} s(\varphi) d\varphi = \int_0^{\theta_H} s(\theta) d\theta \approx \int_0^{\theta_H} \dot{r}(\theta) d\theta = r(\theta_H) - r(0) \quad (5.7)$$

Essendo per definizione  $r(\theta_H) = R$  e  $r(0) = R - d$ . Perciò vale:

$$d = \int_0^{\varphi_H} s(\varphi) d\varphi \quad (5.8)$$

fornisce la perdita di materiale  $d$  in funzione dello spostamento misurato  $s(\varphi)$ . D'altra parte, essendo  $s(\varphi)$  una funzione continua anche se sono presenti dei punti singolari, il risultato 5.8 è valido per qualsiasi tipo di *wheel-flat* (nuovo, parzialmente arrotondato o degenerato con qualsiasi grado di usura). Lo stesso risultato si ottiene per  $-s(\varphi)$  se l'integrale è esteso all'intervallo  $(-\varphi_H, 0)$ . Questo porta alla seguente proprietà:

*Per piccole irregolarità, l'area sottesa da  $|s(\varphi)|$  è approssimativamente pari a due volte la perdita di materiale  $d$ .*

Di conseguenza, qualunque sia l'usura della ruota rispetto alla geometria originale, la 5.8 fornirà comunque la perdita di materiale  $d$ . Inoltre, poiché  $s(\varphi) = 0$  nella parte tonda della ruota ( $|\varphi| > \varphi_H$ ), per singoli o isolati spiattellamenti l'integrale può essere esteso a qualsiasi angolo  $\varphi_A \geq \varphi_H$ . Introducendo il parametro  $\alpha$  per coprire un giro completo della ruota,  $0 \leq \alpha \leq 2\pi - \varphi_A$ , la 5.8 può essere scritta come segue:

$$d(\alpha) = \int_{\alpha}^{\alpha + \varphi_A} s(\varphi) d\varphi, \quad 0 \leq \alpha \leq 2\pi - \varphi_A \quad (5.9)$$

Questa formulazione consente la valutazione di  $d$  come funzione di  $\alpha$  per una rivoluzione completa, purché  $\varphi_A \geq \varphi_H$ .

### 5.3 Tipologie di Wheel-flat

Come ricordato in precedenza la presenza di uno spiattellamento su di una ruota in movimento può essere studiata considerando due parametri principali ovvero l'assenza di materiale  $d$  e la lunghezza dello spiattellamento stesso  $l$ . Nell'ipotesi di lavorare con un "*wheel-flat*" ideale che non presenti arrotondamenti e usura all'estremità le due grandezze precedenti sono correlate dalla relazione 5.2. Si consideri pertanto una ruota come corpo rigido che presenti tale tipologia di spiattellamento e che rotoli su una guida anch'essa rigida senza perdita di contatto. Si osserva come questa ruoterà di un angolo  $\varphi \leq \theta/2$  finché lo spiattellamento non sarà orizzontale. Una volta orizzontale la ruota continuerà a ruotare di un angolo  $\theta/2 < \varphi \leq \theta$  finché non raggiungerà la parte che non presenta il difetto.

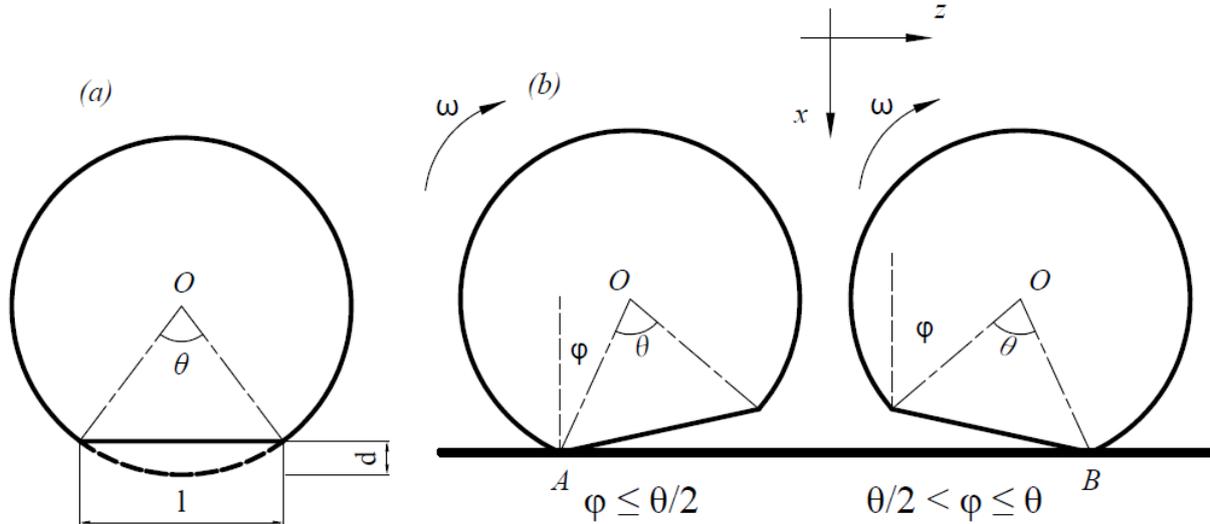


Figura 5.5: Rotazione di una ruota con uno spiattellamento ideale

Dal punto di vista geometrico, si evince che il movimento verticale del centro della ruota  $x_0$  (positivo verso il basso) è pari a:

$$x_0 = \begin{cases} r(1 - \cos\varphi) & 0 \leq \varphi \leq \theta/2 \\ r[1 - \cos(\theta - \varphi)] & \theta/2 < \varphi \leq \theta \end{cases} \quad (5.10)$$

Dove

$$\theta = 2\cos^{-1}\left(\frac{r-d}{r}\right) \quad (5.11)$$

è l'angolo descritto dalla rotazione della ruota attorno al suo asse e dipendente dalle dimensioni dello spiattellamento. In particolare, nell'ipotesi di  $d \ll r$  e di  $\theta$  piccolo,  $x_0$  può essere espresso in termini spostamento longitudinale del centro della ruota,  $z_0 = r\varphi$ :

$$x_0 = \begin{cases} z_0^2/2r & 0 \leq z_0 \leq l/2 \\ (l - z_0)^2/2r & l/2 < z_0 \leq l \end{cases} \quad (5.12)$$

Questo movimento verticale del centro ruota corrisponde ad una vibrazione transitoria, provocata dal difetto nella ruota stessa.

L'altezza del profilo della ruota con spiattellamento può essere uno strumento ottimale per la definizione del difetto, secondo la formula:

$$x_p(z) \approx \frac{1}{2r} \left( \frac{l^2}{4} - \left( z - \frac{l}{2} \right)^2 \right) = d - \frac{1}{2r} \left( z - \frac{l}{2} \right)^2, \quad 0 \leq z \leq l \quad (5.13)$$

Sebbene questo modello dia un'idea approssimativa del movimento della ruota, la realtà è più complicata rispetto a quella descritta dall'equazione proposta. Un "fresh flat" è pertanto una soluzione teorica e non

reale visto che viene nella pratica sostituito da un "rounded flat".

A causa del moto continuo della ruota a seguito della formazione dello spiattellamento, il profilo diventa arrotondato all'estremità del piano, mentre la parte centrale rimane invariata. La lunghezza complessiva del *rounded flat*,  $l$ , sarà maggiore di quella del *fresh flat*,  $l_0$  pur avendo stessa profondità,  $d$ . La funzione quadratica che li descrive è la seguente:

$$x_0 \approx \begin{cases} 4d \left(\frac{z_0}{l}\right)^2 & 0 \leq z_0 \leq l/2 \\ 4d \left(\frac{l-z_0}{l}\right)^2 & l/2 < z_0 \leq l \end{cases} \quad (5.14)$$

Questa funzione soddisfa le richieste di  $x_0 = 0$  per  $z_0 = 0$  e  $z_0 = l$  oltre a  $x_0 = d$  e  $z_0 = l/2$ . A tal proposito, l'equazione 4.12 è un caso particolare della 4.14 per  $d = \frac{l^2}{8r}$ . Le equazioni necessarie a definire l'altezza del profilo nel caso di *rounded flat* sono:

$$x_p(z) = \frac{d}{2} \left(1 - \cos \frac{2\pi z}{l}\right) \quad (5.15)$$

$$x_0(z_0) = x_p(z) + r(1 - \cos\varphi) \quad (5.16)$$

$$z_0 = z + r \sin\varphi \quad (5.17)$$

$$\varphi \approx \tan\varphi = x'_p(z) = \frac{\pi d}{l} \sin \frac{2\pi z}{l} \quad (5.18)$$

## 5.4 Modello del contatto fra ruota e rotaia

Il modello di interazione fra ruota e binario è mostrato schematicamente nella figura seguente.

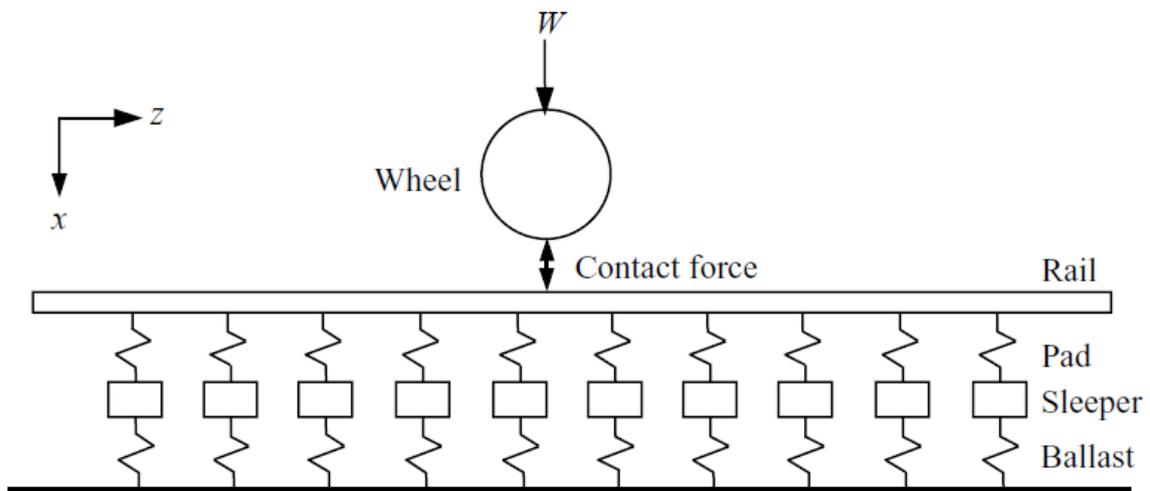


Figura 5.6: Modello del contatto fra ruota e rotaia

Per semplicità di trattazione tutto ciò che è al di sopra della sospensione primaria è semplificato con un

semplice carico statico  $W$ . In letteratura, questa ipotesi è giustificata poichè la frequenza di vibrazione di interesse dell'intero sistema è all'interno della gamma di frequenza audio, per esempio 50-5000 Hz, mentre la frequenza naturale del sistema di sospensione del veicolo è di solo pochi Hertz, e quindi la vibrazione a bassa frequenza del corpo del veicolo e del carrello è isolata dalla vibrazione ad alta frequenza della ruota e della rotaia. Il modello di pista è composto da una trave di Timoshenko che poggia su infiniti sistemi *molla-massa-molla* che rappresentano rispettivamente le piastrine di fissaggio, le traversine e la massicciata. Lo smorzamento è introdotto aggiungendo dei fattori di perdita di rigidità nelle piastrine e nella massicciata. Il contatto fra ruota e binario è di tipo Hertziano non lineare. Poiché la velocità del treno è molto inferiore rispetto alla velocità di propagazione delle onde di flessione nel binario nel range di frequenza di interesse, un modello di irregolarità in movimento può essere utilizzato per simulare l'interazione ruota/rotaia. In tale modello, la ruota rimane ferma sul binario e l'irregolarità si muove alla velocità del treno. La vibrazione è dovuta ad una ruota con spiattellamento e il suo moto è rappresentato dalla traiettoria del centro della ruota, come detto in precedenza. Essendo il contatto non lineare, può verificarsi una perdita di interazione: è necessario pertanto valutare con un modello dinamico l'interazione ruota/rotaia nel dominio del tempo.

### 5.4.1 Modello semplificato della rotaia

Il moto vibratorio della trave di Timoshenko, continuamente supportata da un susseguirsi continuo di sistemi molla-massa-molla, è paragonabile ad un sistema a due gradi di libertà a bassa frequenza, essendo il moto della trave dipendente fortemente dalla rigidità dell'infrastruttura. Ad alte frequenze, tuttavia, la vibrazione della trave è molto più debole rispetto a quella del binario e assume un comportamento simile al caso di trave libera di oscillare. Detto questo, è possibile approssimare il contatto fra ruota e rotaia con un sistema descritto dalla seguente funzione di trasferimento:

$$H(s) = \frac{X(s)}{F(s)} = \frac{b_1 s^3 + b_2 s^2 + b_3 s + b_4}{s^4 + a_1 s^3 + a_2 s^2 + a_3 s + a_4} \quad (5.19)$$

dove  $X(s)$  e  $F(s)$  sono le trasformate di Laplace dello spostamento (output del sistema) e della forza (input al sistema) nel punto di contatto. I valori delle costanti sono riportati nella seguente tabella:

Coefficiente	Valore
$b_1$	$3.28 \times 10^{-6}$
$b_2$	$1.87 \times 10^{-2}$
$b_3$	23.6
$b_4$	$3.97 \times 10^4$
$a_1$	$1.77 \times 10^3$
$a_2$	$1.26 \times 10^7$
$a_3$	$7.87 \times 10^9$
$a_4$	$3.93 \times 10^{12}$

Tabella 5.1: Coefficienti funzione di trasferimento

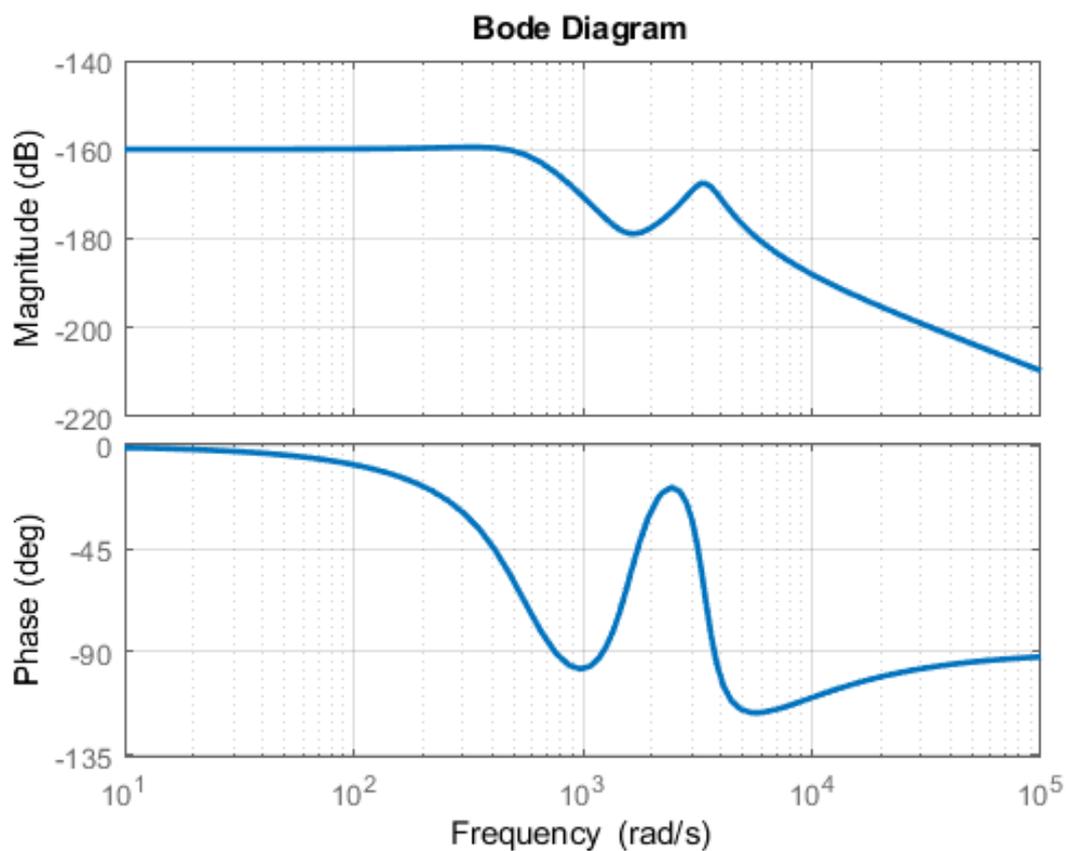


Figura 5.7: Diagramma di Bode del Modello

Le equazioni di riferimento che simulano il comportamento della ruota in moto sono:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \frac{W - k_w(x_1 - x_3) - c_w(x_2 - x_4)}{M_w} \\ \dot{x}_3 = x_4 \\ \dot{x}_4 = \frac{k_w(x_1 - x_3) + c_w(x_2 - x_4) - f}{m_w} \end{cases} \quad (5.20)$$

dove  $x_3$  è lo spostamento della ruota coincidente con quello della massa più piccola  $m_w$ ,  $x_1$  è lo spostamento della massa superiore,  $W$  è il carico statico dovuto al peso del mezzo ferroviario ed  $f$  è la forza di contatto ruota/rotaia non lineare. Le equazioni che rappresentano il moto del binario sono:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \\ \dot{x}_7 \\ \dot{x}_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a_1 & 1 & 0 & 0 \\ -a_2 & 0 & 1 & 0 \\ -a_3 & 0 & 0 & 1 \\ -a_4 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix} f$$

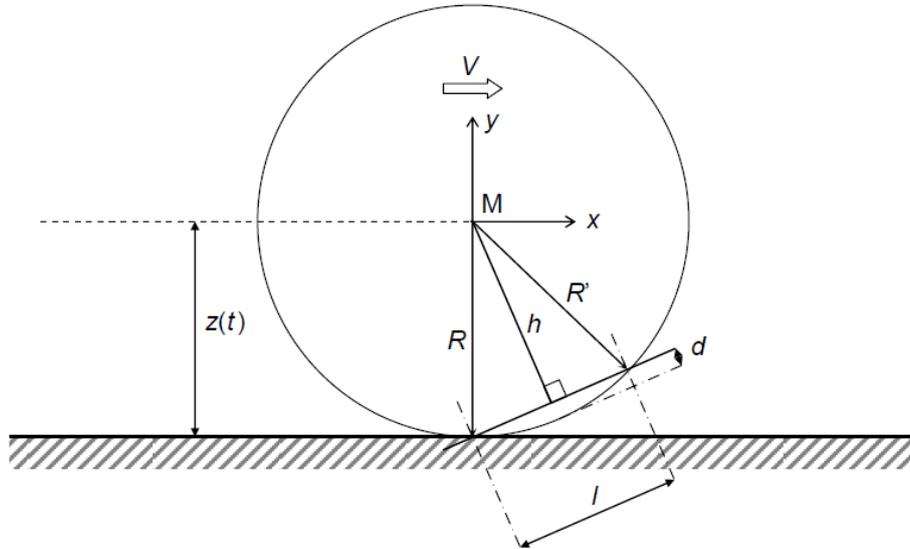
dove  $x_5$  è lo spostamento del binario e la forza di interazione è data da:

$$f = \begin{cases} C_H (x_3 - x_5 - x_0)^{3/2} & x_3 - x_5 - x_0 > 0 \\ 0 & x_3 - x_5 - x_0 \leq 0 \end{cases} \quad (5.21)$$

dove  $x_0$  è lo spostamento relativo provocato dallo spiattellamento, dipendente dalla velocità del treno.

## 5.5 Studio del moto nel dominio del tempo

Si consideri il caso di una ruota che presenti uno spiattellamento di lunghezza definita  $l$  e con profondità  $d$  che si muova di moto rotatorio su di una superficie che per ipotesi è ritenuta infinitamente rigida.



**Figura 5.8:** Grandezze geometriche necessarie per descrivere il moto

É possibile individuare due posizioni di riferimento:

- **Posizione A:** è la posizione in cui il raggio  $R$  della ruota risulta essere normale alla superficie di contatto e corrisponde all'istante in cui lo spiattellamento entra in contatto con il binario;
- **Posizione B:** è la posizione in cui il contatto fra ruota e binario è descritto dal raggio  $R'$ , corrispondente all'istante in cui termina il contatto.

Nella seguente immagine è riportato in dettaglio il moto della ruota compreso fra le due posizioni di riferimento di cui prima.

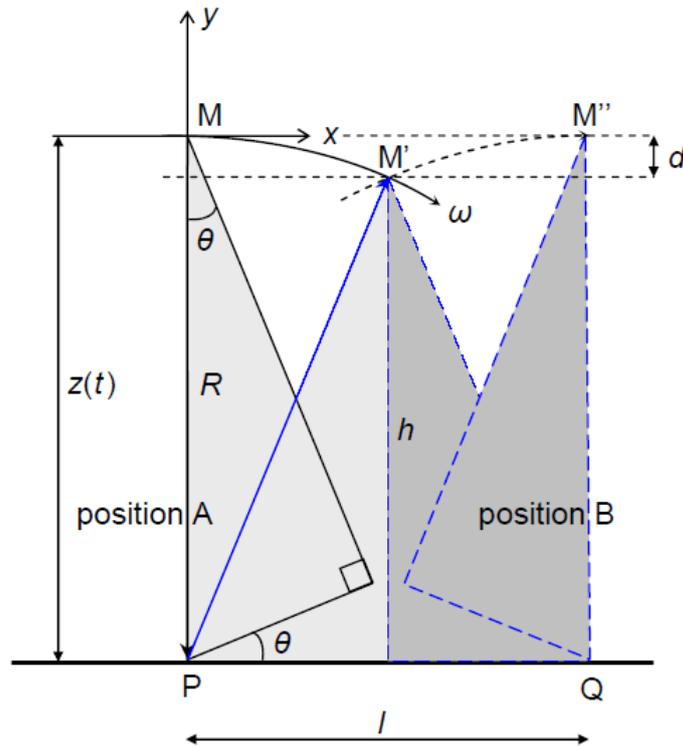
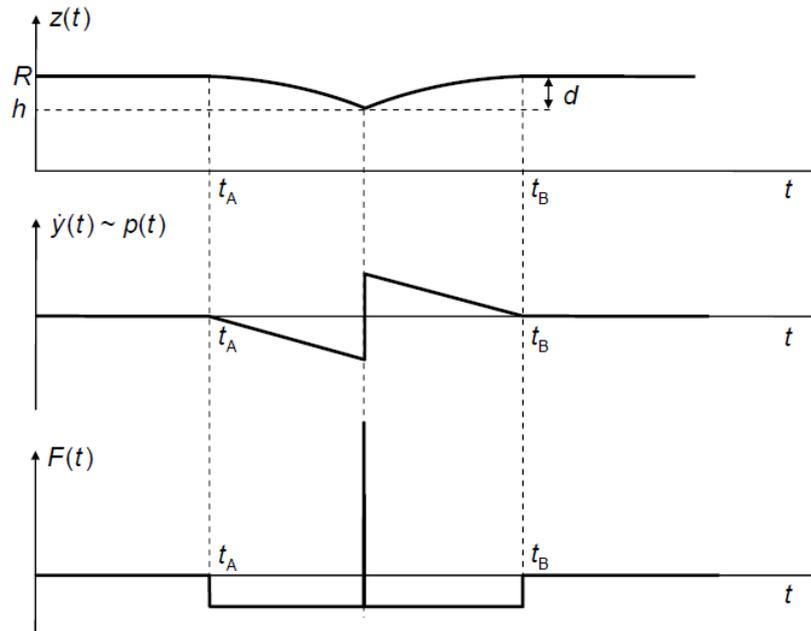


Figura 5.9: Dettaglio del contatto fra ruota con difetto e binario

Nel seguito, si assumerà che la velocità angolare  $\omega$  della ruota sia costante e lo stesso vale per la velocità del treno  $v$ , che è anche considerata relativamente piccola. Nella posizione di riferimento A, il centro di rotazione passa dal centro della ruota (punto  $M$ ) al punto di contatto  $P$  con la rotaia. Il baricentro della ruota  $M$  descriverà quindi una traiettoria circolare fino a raggiungere il punto  $M'$ . In  $M'$  la distanza tra il centro della ruota e il binario è minima ed è data dalla differenza del raggio ruota  $R$  e della profondità  $d$ . Il centro di istantanea rotazione cambia bruscamente da  $P$  a  $Q$  e il baricentro della ruota descriverà ancora una volta una traiettoria circolare di raggio  $R$ , fino a raggiungere  $M''$ .



**Figura 5.10:** Traiettoria del baricentro della ruota, velocità verticale e forza di contatto

In Fig. 5.10, vengono riportati gli andamenti attesi per la traiettoria seguita dal centro di massa della ruota, della velocità e della forza di contatto e quindi conseguentemente dell'accelerazione verticale. La funzione  $z(t)$  può essere espressa come  $z(t) = y(t) + R$  e si osservi come vi sia una transizione graduale tra una linea retta e un segmento di cerchio (contangente orizzontale in A).  $z(t)$  raggiungerà il minimo  $R-d$  all'istante  $\frac{t_A + t_B}{2}$  e la funzione sarà simmetrica rispetto al suddetto istante temporale. La derivata temporale di  $z(t)$  ovvero  $\dot{z}(t) = \dot{y}(t)$  rappresenta la velocità verticale della ruota. La traiettoria circolare in  $z(t)$  può essere approssimata da un polinomio di secondo ordine con i rispettivi assi di simmetria in A e B. Questo implica che la sua derivata è data da funzioni lineari. Inoltre come si nota è presente una discontinuità nell'istante  $\frac{t_A + t_B}{2}$ . La quantità di moto  $p(t)$  della ruota è proporzionale alla massa di questa e alla sua velocità, in particolare sarà data dal prodotto fra queste due grandezze. La componente verticale della forza di contatto tra la ruota e la rotaia è essere ottenuta per differenziazione della quantità di moto nel tempo, secondo la seguente relazione  $F(t) = \dot{p}(t) = m\ddot{y}(t)$ . In particolare tale forza è data da un valore negativo costante tra  $t_A$  e  $t_B$ . La funzione delta di Dirac all'istante  $\frac{t_A + t_B}{2}$  indica che il valore della forza tende ad infinito in un periodo di tempo infinitamente breve, segnalando così l'impatto fra ruota piatta e piano.

## 5.6 Modello Teorico

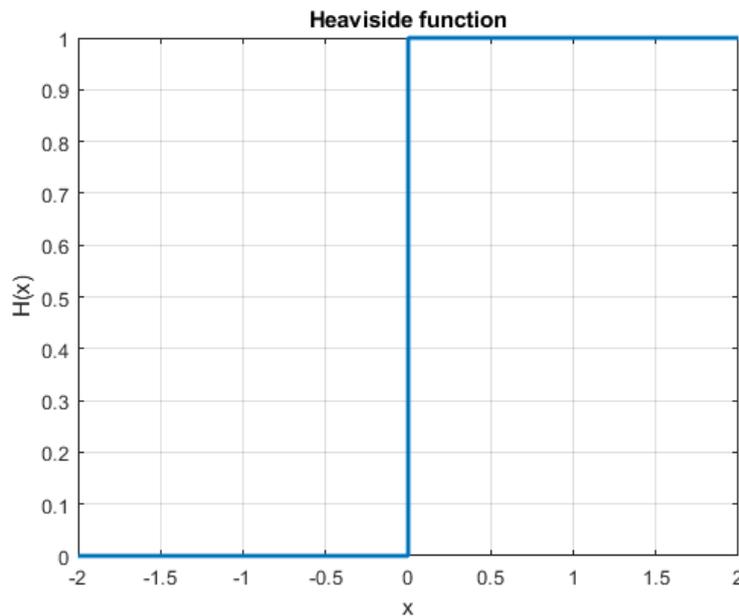
Nel seguente paragrafo viene proposta la formulazione teorica del problema matematico per l'individuazione di uno spiattellamento di una ruota di un carro ferroviario, nell'ipotesi di lavorare con un corpo rigido in moto. In particolare, verranno riportare le espressioni ricavate per la traiettoria seguita dal centro della ruota, per la sua velocità verticale e per l'accelerazione. La scelta del sistema di riferimento è ricaduta su di un sistema di coordinate cartesiane  $(x,y)$  con origine coincidente con il centro di massa

della ruota. Per  $x \geq 0$  la traiettoria può essere scritta come di seguito, laddove con  $H$  viene indicata la funzione di Heaviside:

$$y(x) = \left(\sqrt{R^2 - x^2} - R\right) H\left(-x + \frac{l}{2}\right) + \left(\sqrt{R^2 - (x-l)^2} - R\right) \left(H\left(-x + \frac{l}{2}\right) - H(x-l)\right) \quad (5.22)$$

con  $R$  si indica il raggio della ruota mentre con  $l$  la lunghezza dello spiattellamento.

Prima di procedere è necessario fornire dei cenni in merito alla funzione gradino di Heaviside o funzione a gradino unitaria, il cui nome si deve a Oliver Heaviside. Trattasi di una funzione discontinua che ha valore 0 per argomenti negativi e 1 per argomenti positivi. Può essere definita sia come una funzione continua a tratti o come una distribuzione.



**Figura 5.11:** La funzione di Heaviside

La derivata distribuzionale della funzione di Heaviside  $H$  è il delta di Dirac  $\delta(x)$ :

$$\frac{d}{dx}H(x) = \delta(x) \quad (5.23)$$

mentre la funzione rampa  $R$  ne è la primitiva:

$$R(x) = \int_{-\infty}^x H(\xi)d\xi = xH(x) \quad (5.24)$$

La funzione di Heaviside è definita:

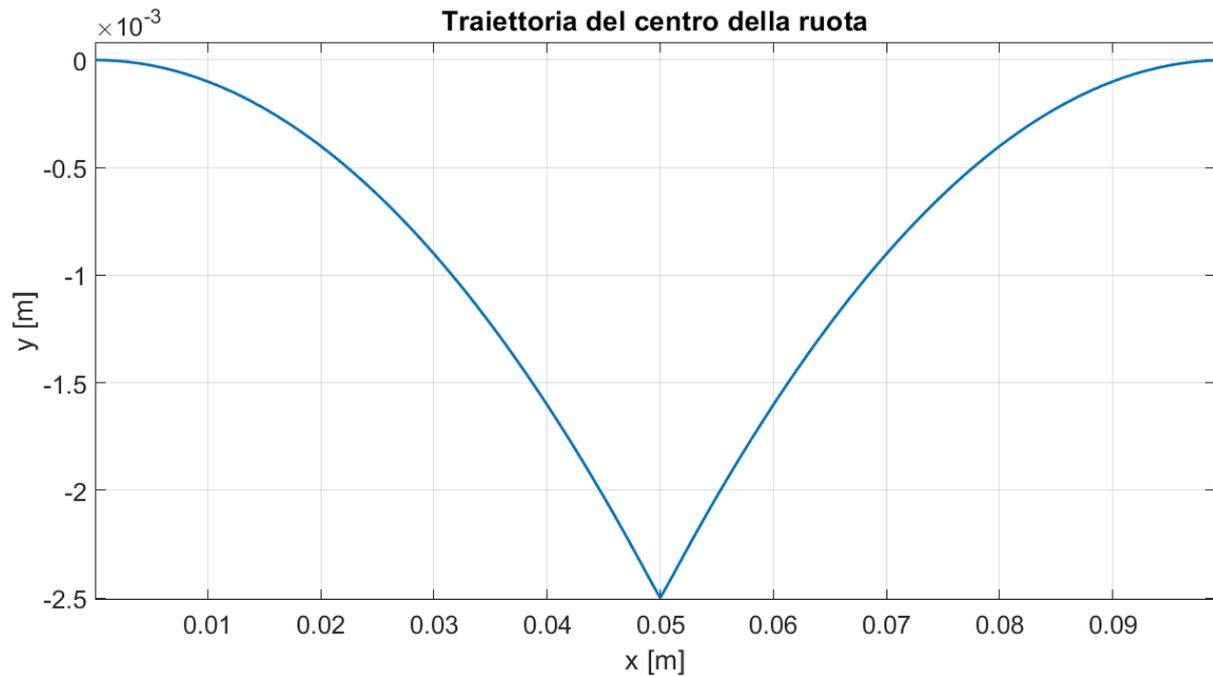
$$H(x) = \begin{cases} 0 & x < 0 \\ 1 & x \geq 0 \end{cases} \quad (5.25)$$

oppure sfruttando la *Full Width at Half Maximum* (FWHM) ovvero la "larghezza a metà altezza", viene

fornita una definizione più generale:

$$H(x) = \begin{cases} 0 & x < 0 \\ 1/2 & x = 0 \\ 1 & x > 0 \end{cases} \quad (5.26)$$

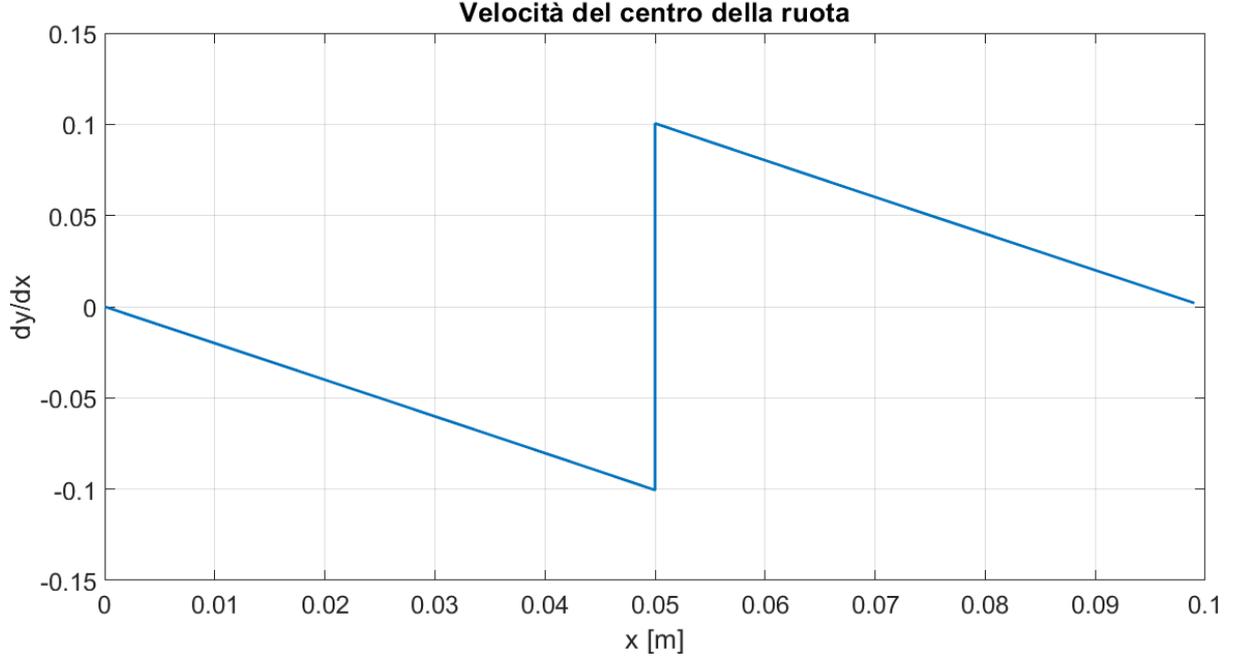
Definita la funzione di Heaviside, si riporta un esempio che sfrutta l'equazione (5.22) con in input i seguenti dati  $R = 0.5 \text{ m}$  e  $l = 0.1 \text{ m}$ .



**Figura 5.12:** Traiettoria del centro della ruota per  $R = 0.5 \text{ m}$  e  $l = 0.1 \text{ m}$

Nota la definizione della traiettoria dalla (5.22), si procede a definire la derivata spaziale e quindi la velocità con cui il centro della ruota si muove:

$$\frac{dy(x)}{dx} = \left( \frac{-x}{\sqrt{R^2 - x^2}} \right) H\left(-x + \frac{l}{2}\right) + \left( \frac{-x + l}{\sqrt{R^2 - (x - l)^2}} \right) \left( H\left(x - \frac{l}{2}\right) - H(x - l) \right) \quad (5.27)$$



**Figura 5.13:** Velocità del centro della ruota per  $R = 0.5 \text{ m}$  e  $l = 0.1 \text{ m}$

Ricordando la relazione  $x = vt$  è possibile passare al dominio del tempo:

$$y(t) = \left( \sqrt{R^2 - v^2 t^2} - R \right) H\left(-t + \frac{l}{2v}\right) + \left( \sqrt{R^2 - (vt - l)^2} - R \right) \left( H\left(t - \frac{l}{2v}\right) - H\left(t - \frac{l}{v}\right) \right) \quad (5.28)$$

$$\frac{dy(t)}{dt} = \left( \frac{-v^2 t}{\sqrt{R^2 - v^2 t^2}} \right) H\left(-t + \frac{l}{2v}\right) - \left( \frac{v(vt - l)}{\sqrt{R^2 - (vt - l)^2}} \right) \left( H\left(t - \frac{l}{2v}\right) - H\left(t - \frac{l}{v}\right) \right) \quad (5.29)$$

La quantità di moto della ruota è data dalla seguente relazione:

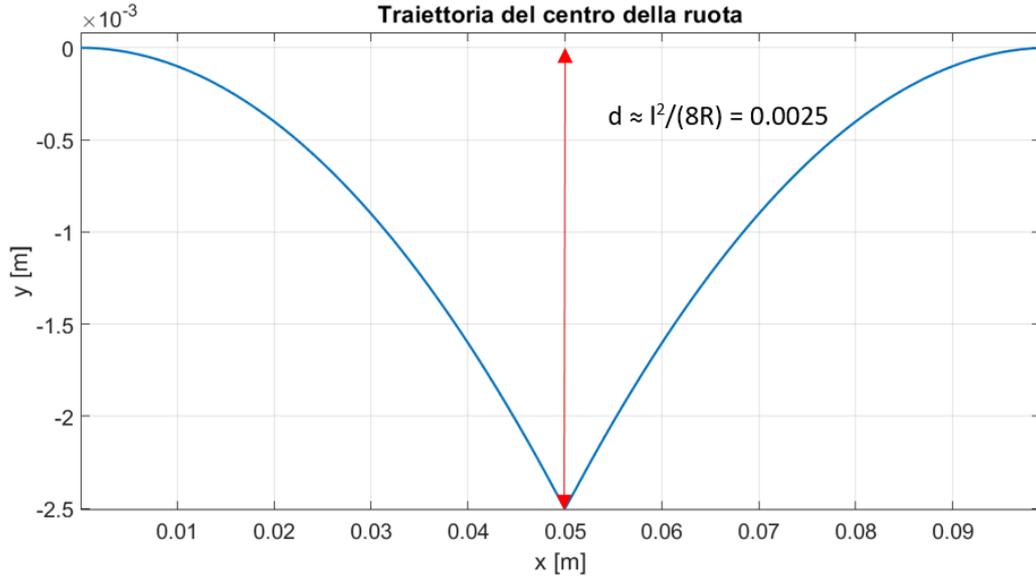
$$p(t) = m\dot{y}(t) = \left( \frac{-mv^2 t}{\sqrt{R^2 - v^2 t^2}} \right) H\left(-t + \frac{l}{2v}\right) - \left( \frac{mv(vt - l)}{\sqrt{R^2 - (vt - l)^2}} \right) \left( H\left(t - \frac{l}{2v}\right) - H\left(t - \frac{l}{v}\right) \right) \quad (5.30)$$

L'esatta espressione del *wheel-flat* può essere espressa in termini di  $l$  e  $d$  come di seguito:

$$R^2 = \left(\frac{l}{2}\right)^2 + (R - d)^2 \quad (5.31)$$

Se  $d \ll l$ ,  $R$  questo implica che  $d^2$  essendo un secondo ordine può essere trascurato. Quindi ne consegue:

$$R = \frac{l^2}{8d} \quad (5.32)$$

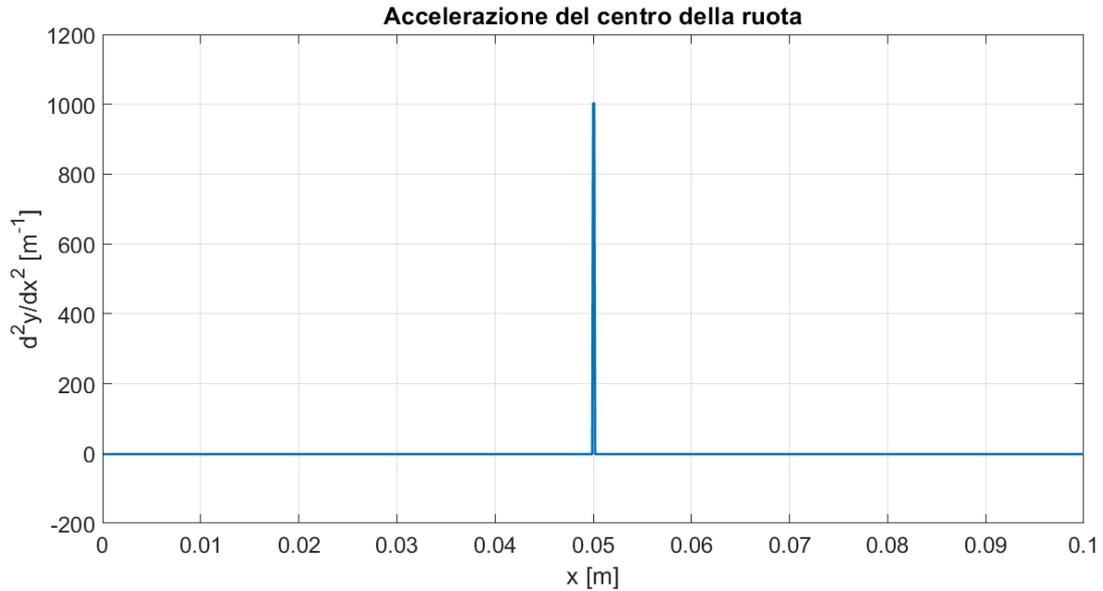


**Figura 5.14:** Individuazione matematica del wheel-flat sulla traiettoria

La forza di contatto fra la ruota ed il binario si ottiene differenziando la 5.30, ottenendo così:

$$F(t) = \left( \frac{-mv^2 R^2}{\sqrt{(R^2 - v^2 t^2)^3}} \right) H\left(-t + \frac{l}{2v}\right) + \delta\left(t - \frac{l}{2v}\right) + \left( - \frac{mv^2 R^2}{\sqrt{(R^2 - (vt - l)^2)^3}} \left( H\left(t - \frac{l}{2v}\right) - H\left(t - \frac{l}{v}\right) \right) \right) \quad (5.33)$$

All'istante temporale  $t = \frac{l}{2v}$  la forza è data dal Delta di Dirac. La forza è simmetrica rispetto all'istante  $t = \frac{l}{2v}$ . In particolare è possibile ottenere la derivata spaziale  $\frac{d^2 y}{dx^2}$ , ricordando che l'andamento è pari a quello della forza a meno di una costante, ovvero la massa  $m$ .



**Figura 5.15:** Accelerazione del centro della ruota per  $R = 0.5 \text{ m}$  e  $l = 0.1 \text{ m}$

## 5.7 Definizione dell'algoritmo

Nella definizione dell'algoritmo, si è cercato di implementare le equazioni di riferimento esplicitate in precedenza in un modello Matlab funzionale e coerente con lo scopo dell'analisi.

Come punto di partenza, si è ipotizzato che la ruota con spiattellamento si trovi nella posizione iniziale (A) riportata nella seguente figura nell'istante in cui comincia il proprio moto.

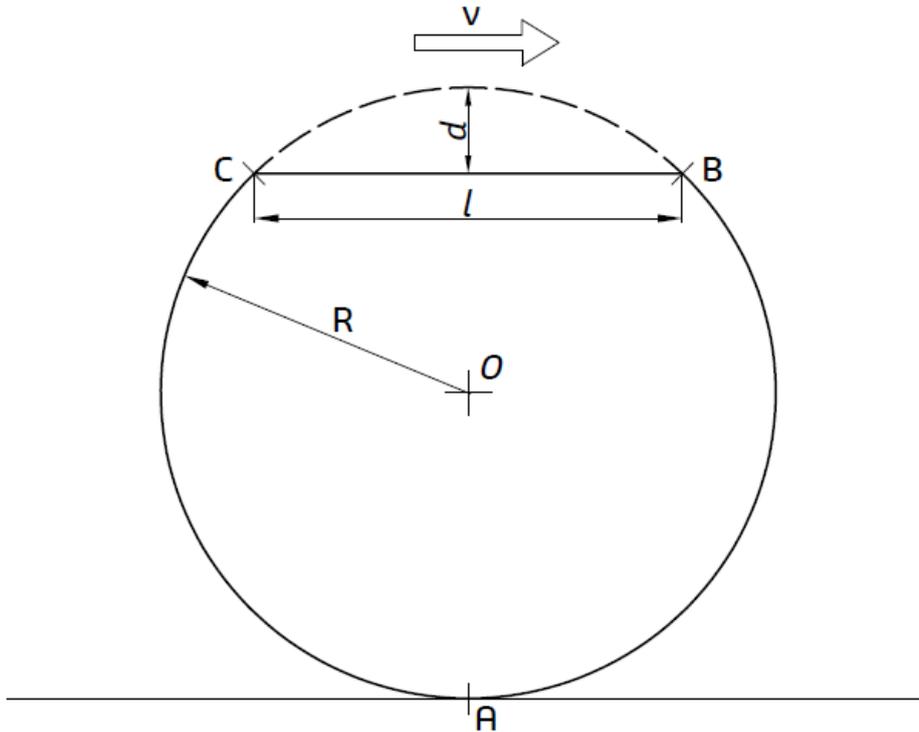


Figura 5.16: Condizioni iniziali

Si consideri una singola rivoluzione della ruota: definiti i parametri geometrici  $R$ ,  $l$  e  $d$  e la velocità con cui si muove il treno  $v$ , il moto del sistema è stato scomposto come di seguito:

- **Tratto  $\widehat{AB}$ :** Nella prima parte del moto, quella che precede il difetto, non si incontra alcun spiattellamento pertanto la traiettoria seguita, la velocità e l'accelerazione verticale assunta sono valori costanti e rispettivamente pari a:

$$\begin{cases} y = R, [m] \\ \dot{y} = 0, [m/s] \\ \ddot{y} = 0, [m/s^2] \end{cases} \quad (5.34)$$

- **Tratto  $\widehat{BC}$ :** Si consideri ora la parte in presenza di difetto. Noto  $l$ , è stata valutata l'altezza del

triangolo  $\triangle C\hat{O}B$  tramite il teorema di Pitagora:

$$h = \sqrt{R^2 - \left(\frac{l}{2}\right)^2} \quad (5.35)$$

Noto  $h$ , si è valutato il valore dell'angolo  $C\hat{O}B$ :

$$C\hat{O}B = 2 \arccos\left(\frac{h}{R}\right) \quad (5.36)$$

per poter infine conoscere la lunghezza dell'arco che sottende il difetto pari a:

$$\widehat{BC} = C\hat{O}B \cdot R \quad (5.37)$$

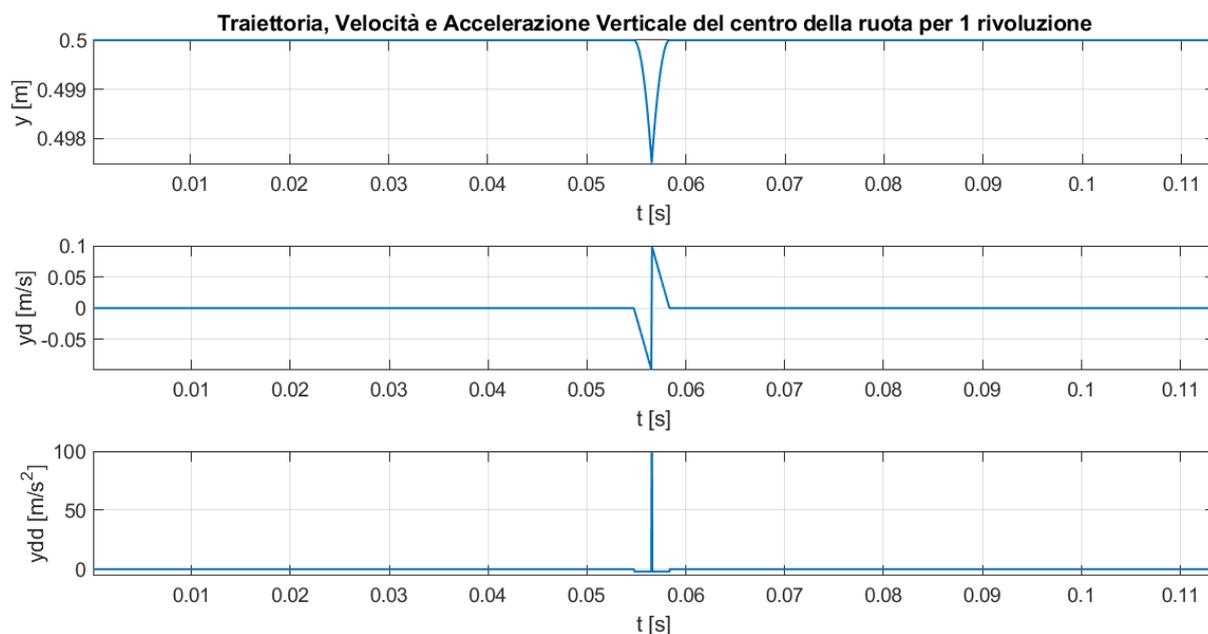
L'importanza di conoscere il valore della lunghezza dell'arco  $\widehat{BC}$  è necessaria dal punto di vista computazionale, poichè ha permesso di valutare non solo le dimensioni degli altri due archi di circonferenza che per simmetria rispetto al punto A saranno uguali ma anche conseguentemente i domini di validità delle equazioni del moto.

Per il tratto interessato da difetto, valgono le equazioni 5.28, 5.29 e 5.33, precedentemente descritte.

- **Tratto  $\widehat{CA}$ :** Nella seconda parte del moto, quella che segue al difetto, non si incontra nessun altro spiattellamento pertanto la traiettoria seguita, la velocità e l'accelerazione verticale assunta sono valori costanti e analogamente al tratto  $\widehat{AB}$ , sono rispettivamente pari a:

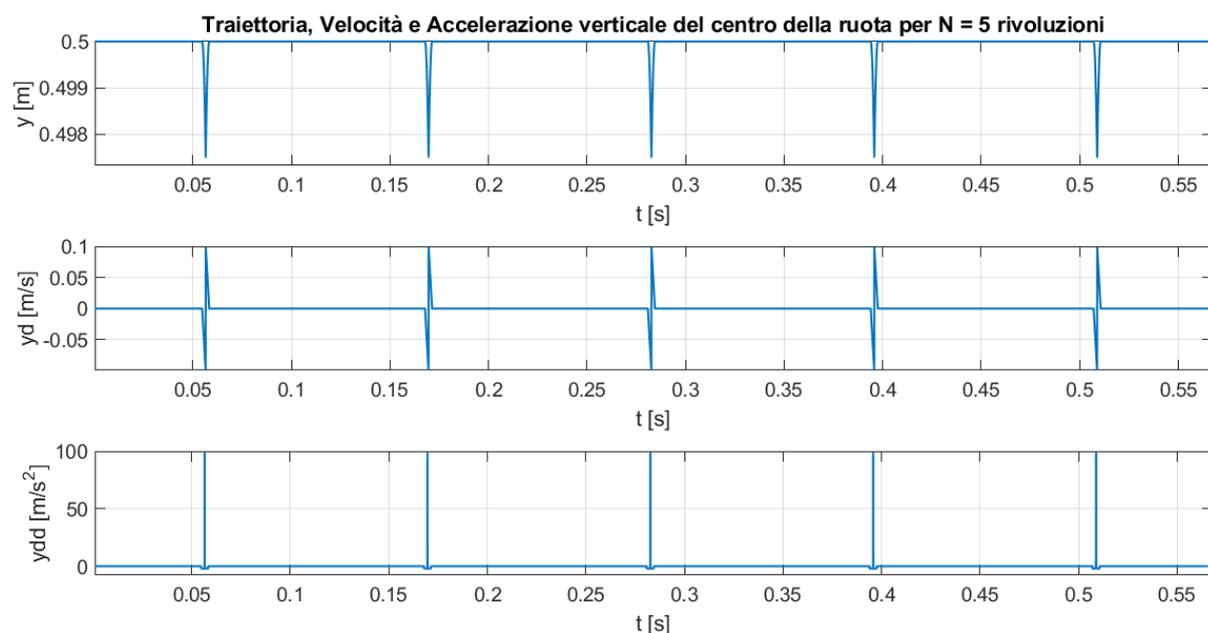
$$\begin{cases} y = R, [m] \\ \dot{y} = 0, [m/s] \\ \ddot{y} = 0, [m/s^2] \end{cases} \quad (5.38)$$

Nella seguente immagine viene mostrata l'evoluzione simulata delle grandezze cinematiche per una singola rivoluzione.



**Figura 5.17:** Traiettoria, Velocità e Accelerazione verticale del centro della ruota per una singola rivoluzione.

Il passo successivo compiuto è stato quello di simulare l'andamento delle grandezze cinematiche per un determinato numero di rivoluzioni della ruota. Per far ciò è stata creata un'opportuna base tempi ottenuta dal prodotto fra il numero di rivoluzioni scelto  $N$  e il periodo di rivoluzione, dipendente ovviamente dalla velocità con cui si muove il treno.



**Figura 5.18:** Traiettoria, Velocità e Accelerazione verticale del centro della ruota per 5 rivoluzioni.

Ottenuti gli andamenti, lo studio è proseguito considerando come al variare delle grandezze geometriche  $D$  e  $l$  e della velocità del treno  $v$  le curve precedentemente ottenute possano modificarsi. Di seguito

vengono riportati i range dei dati utilizzati, ottenuti dalla letteratura.

Grandezza Geometrica	Range di Variazione
<i>Lunghezza del difetto - <math>l</math></i>	0.05 ÷ 0.4 [m]
<i>Diametro della ruota - <math>D</math></i>	Per carro trainato: 0.8 ÷ 0.9 [m]
	Per locomotiva: 1.0 ÷ 1.3 [m]
Grandezza Cinematica	Range di Variazione
<i>Velocità del treno - <math>v</math></i>	5 ÷ 150 [km/h]

Tabella 5.2: Range di variazione delle grandezze di riferimento

## 5.8 Simulazione e Risultati ottenuti

### 5.8.1 Analisi delle grandezze cinematiche simulate per $D$ variabile

La seguente simulazione è stata condotta mantenendo costanti la lunghezza del difetto  $l = 0.1$  m e la velocità del treno  $v = 10$  m/s.

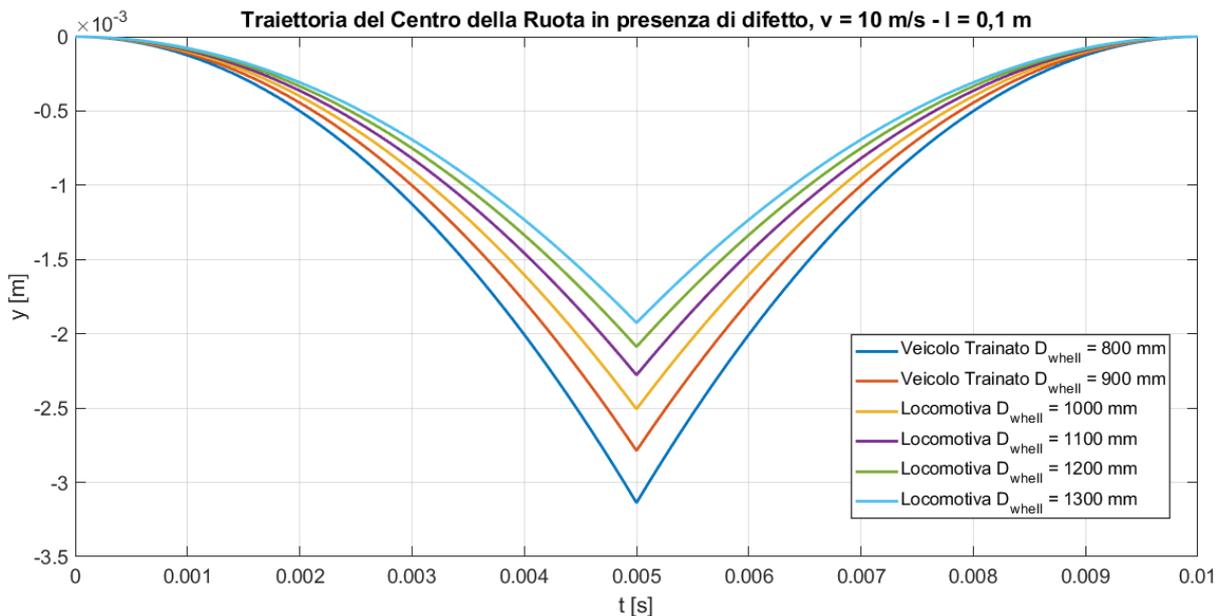


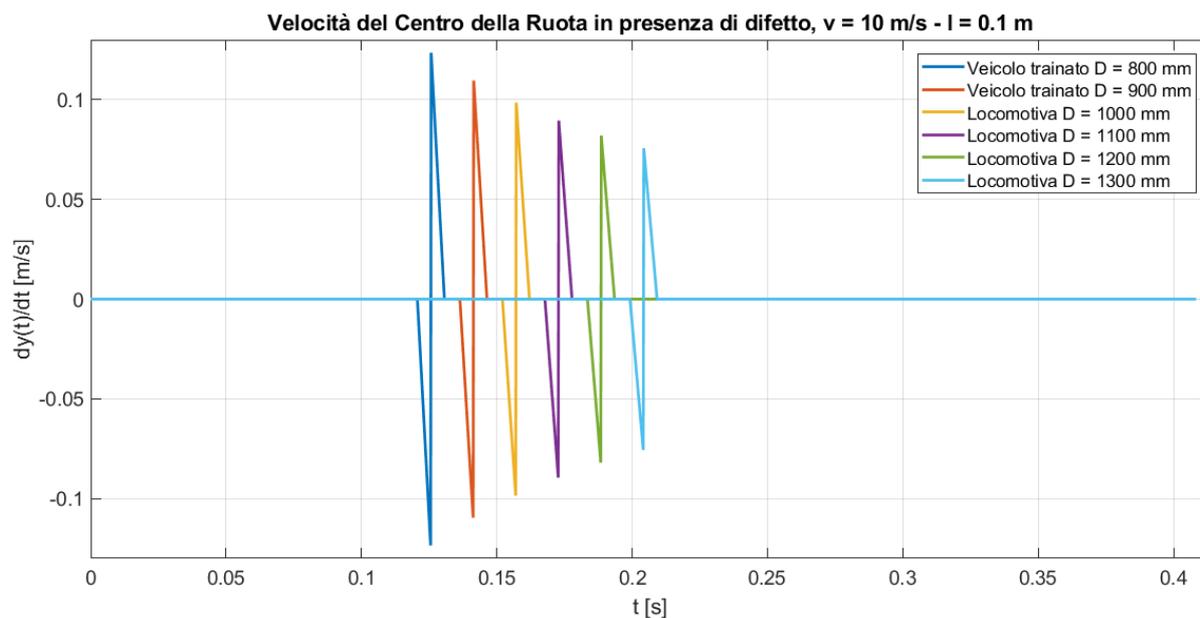
Figura 5.19: Traiettoria del centro della ruota mantenendo costanti  $l$  e  $v$

Dall'immagine 5.19 si evince come a parità di difetto e di velocità, la traiettoria seguita dal centro della ruota sia identica nella forma ma diversa per quanto concerne il punto di minimo raggiunto, corrispondente alla profondità del difetto  $d$ . In particolare, al diminuire del diametro  $D$ ,  $d$  aumenta in accordo con la relazione  $d \approx \frac{l^2}{8R}$ .

Diametro della Ruota - $D$ [mm]	Profondità del difetto - $d$ [mm]
800	3.1
900	2.8
1000	2.5
1100	2.3
1200	2.1
1300	1.9

**Tabella 5.3:** Variazione della profondità  $d$  in funzione della variazione di  $D$

Come si osserva dall'immagine seguente, le curve di velocità risultano essere più spostate a sinistra verso tempi minore man mano che  $D$  diminuisce, poichè diminuisce lo spazio da percorrere dalla ruota a parità di  $v$  e inoltre le discontinuità raggiungono picchi maggiori in accordo con la 5.29.



**Figura 5.20:** Velocità verticale del centro della ruota mantenendo costanti  $l$  e  $v$

Lo stesso ragionamento fatto per le velocità vale anche per le accelerazioni.

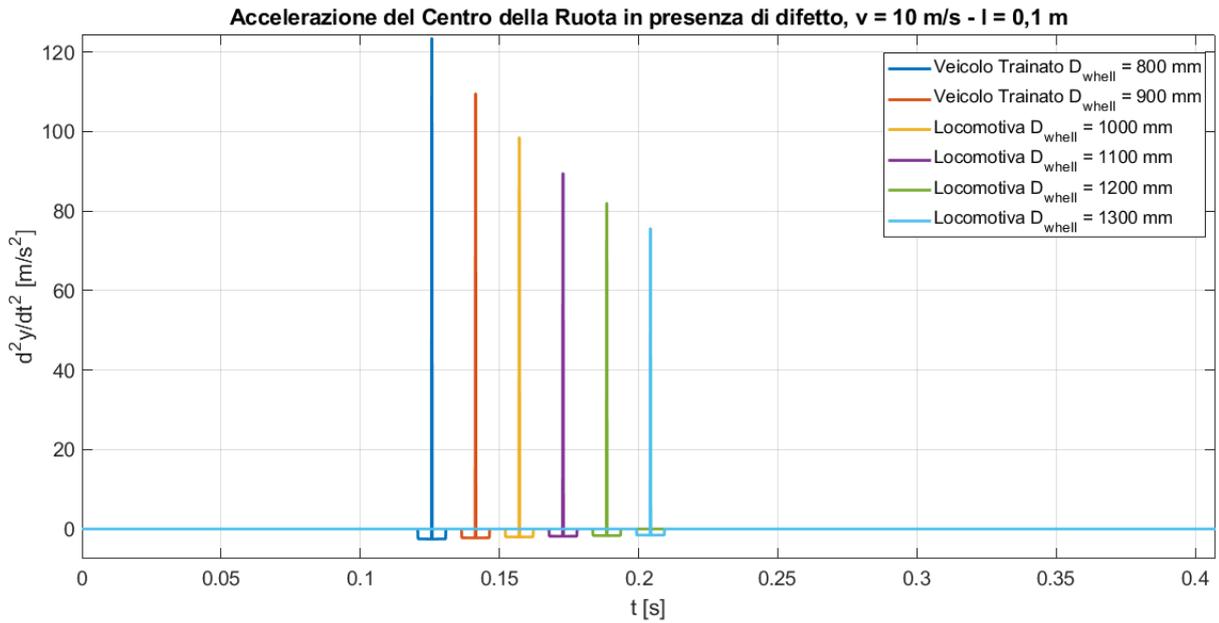


Figura 5.21: Accelerazione verticale del centro della ruota mantenendo costanti  $l$  e  $v$

### 5.8.2 Analisi delle grandezze cinematiche simulate per $v$ variabile

La seguente simulazione è stata condotta mantenendo costanti la lunghezza del difetto  $l = 0.1 \text{ m}$  e il diametro della ruota  $D = 1.0 \text{ m}$ .

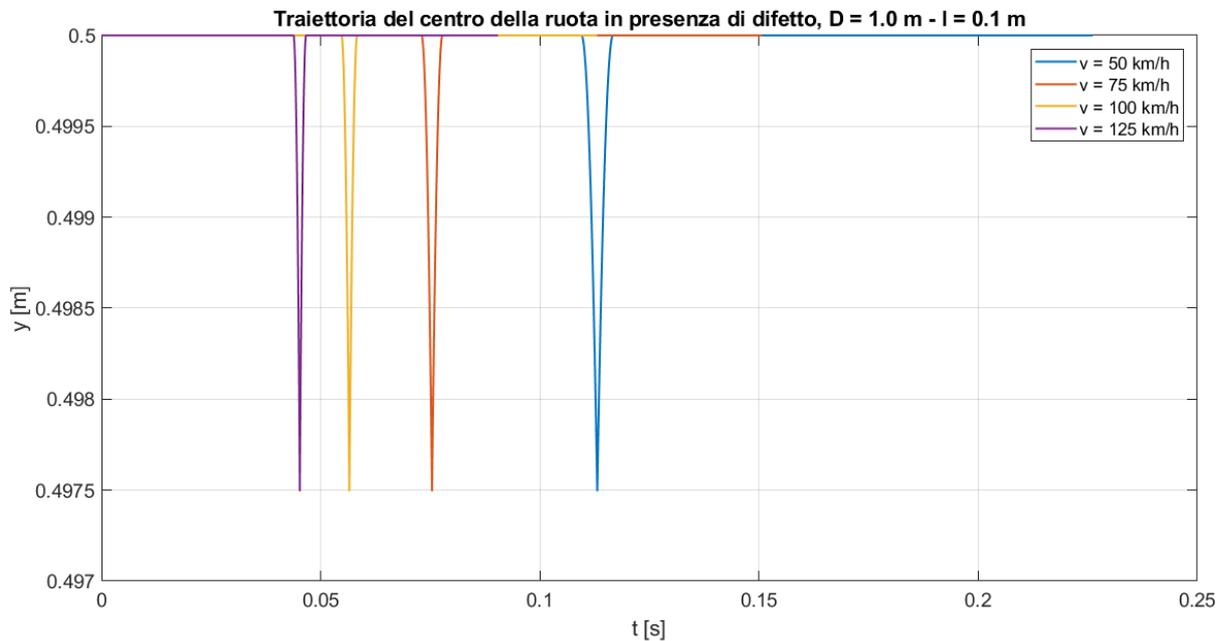
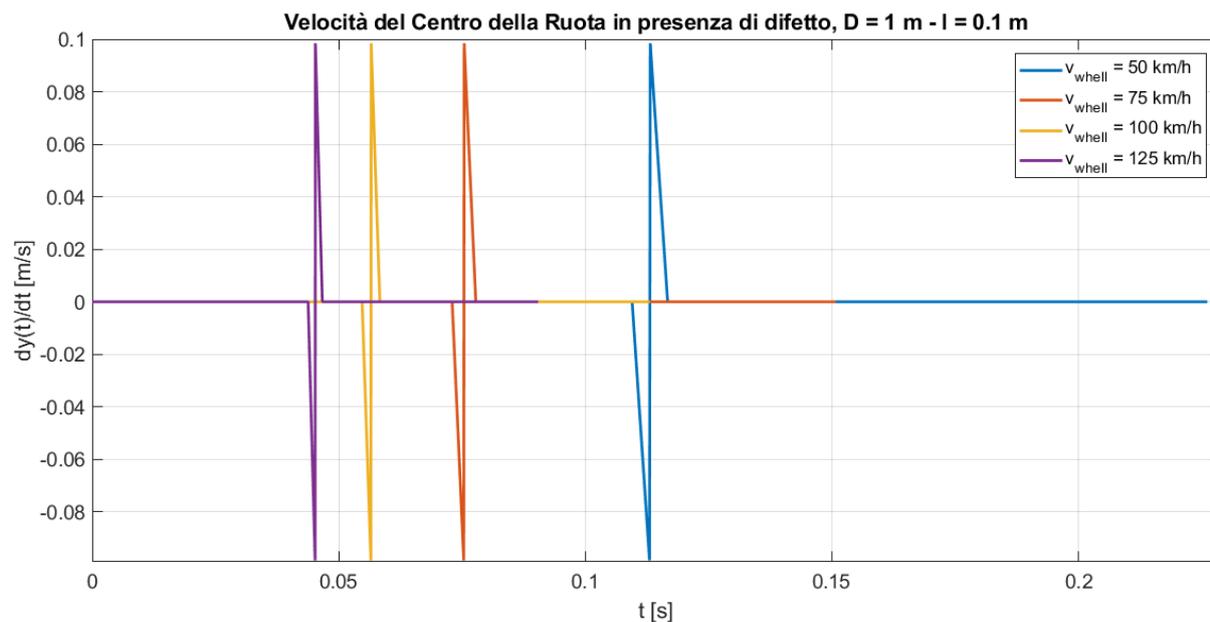


Figura 5.22: Traiettoria del centro della ruota mantenendo costanti  $l$  e  $D$

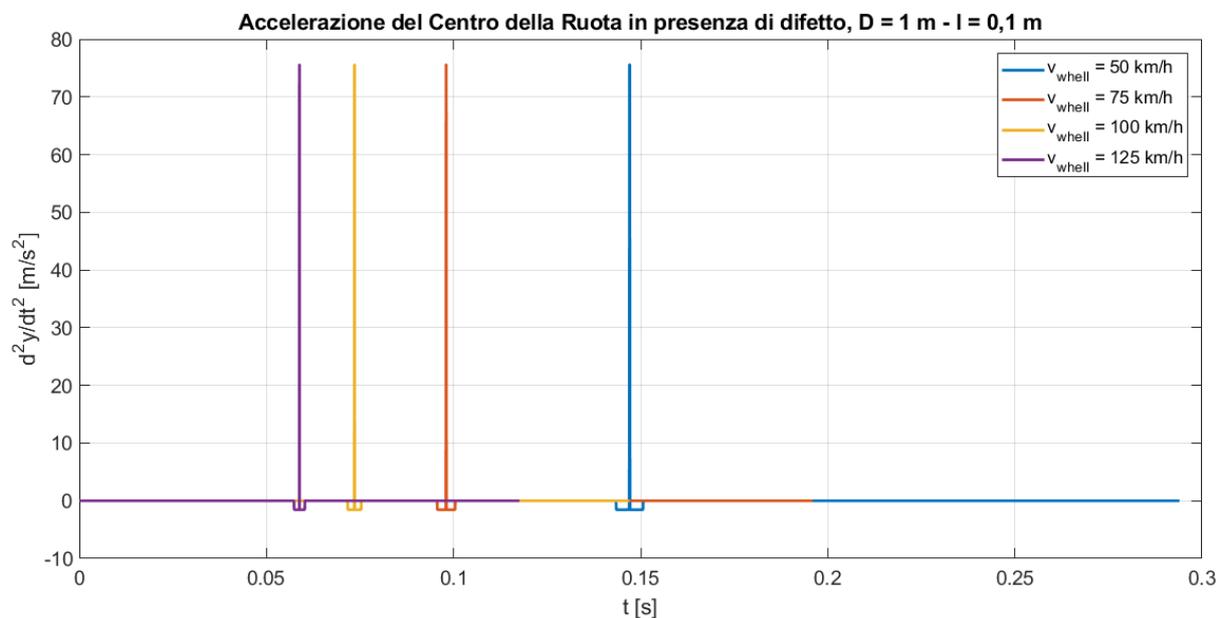
Come si osserva dall'immagine precedente, a velocità maggiori, le curve sono spostate verso tempi inferiori, riducendosi il periodo. Inoltre il punto di minimo raggiunto è identico per tutte le curve essendo  $d$  indipendente dalla velocità con cui si muove il treno.



**Figura 5.23:** Velocità verticale del centro della ruota mantenendo costanti  $l$  e  $D$

In figura 5.23 si noti come ancora una volta le curve risultano essere spostate verso tempi inferiori al crescere della velocità del treno. Tutte le curve mantengono lo stesso valore di discontinuità. Essendo quest'ultima approssimabile a  $\frac{8d}{l}$ , la variazione della velocità del treno non ne influenza il valore.

I discorsi fatti fino ad ora trovano ancora validità anche per quanto concerne l'accelerazione.

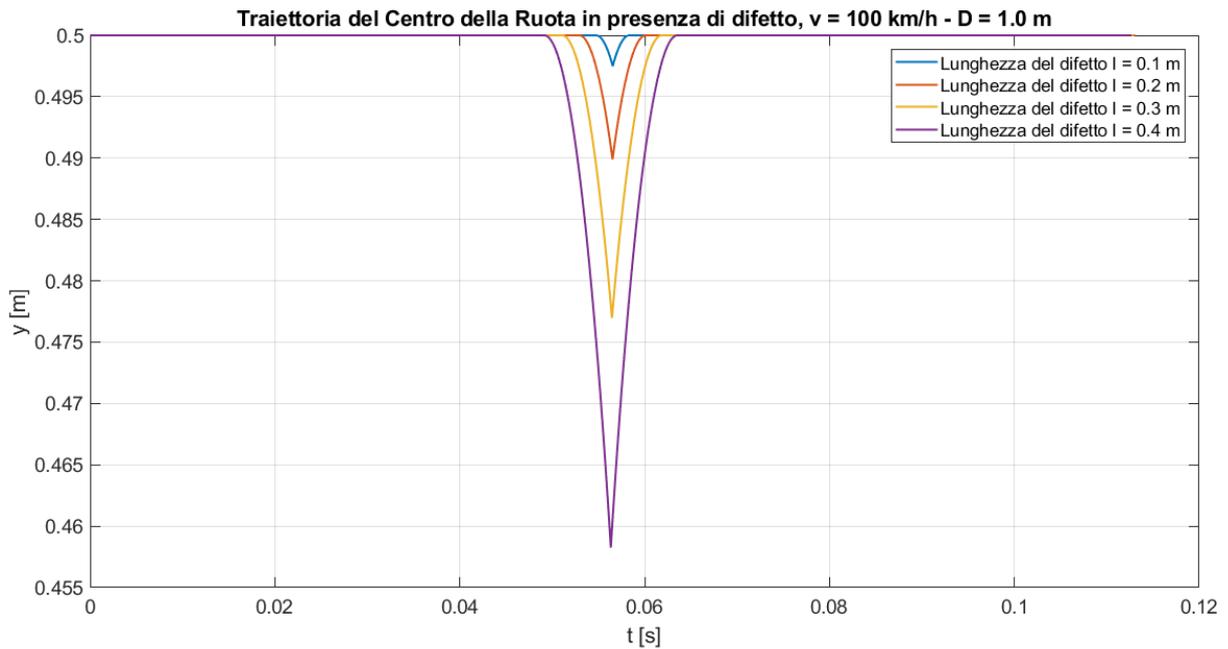


**Figura 5.24:** Accelerazione verticale del centro della ruota mantenendo costanti  $l$  e  $D$

### 5.8.3 Analisi delle grandezze cinematiche simulate per $l$ variabile

La seguente simulazione è stata condotta mantenendo costanti il diametro della ruota  $D = 1 \text{ m}$  e la velocità del treno  $v = 100 \text{ km/h}$ .

Dall'immagine 5.25 si evince come a parità di diametro e di velocità, la traiettoria seguita dal centro della ruota sia identica nella forma ma diversa per quanto concerne il punto di minimo raggiunto, corrisponde alla profondità del difetto  $d$ . In particolare, all'aumentare della lunghezza del difetto  $l$ ,  $d$  aumenta in accordo con la relazione  $d \approx \frac{l^2}{8R}$ , come si osserva anche dalla tabella ??.

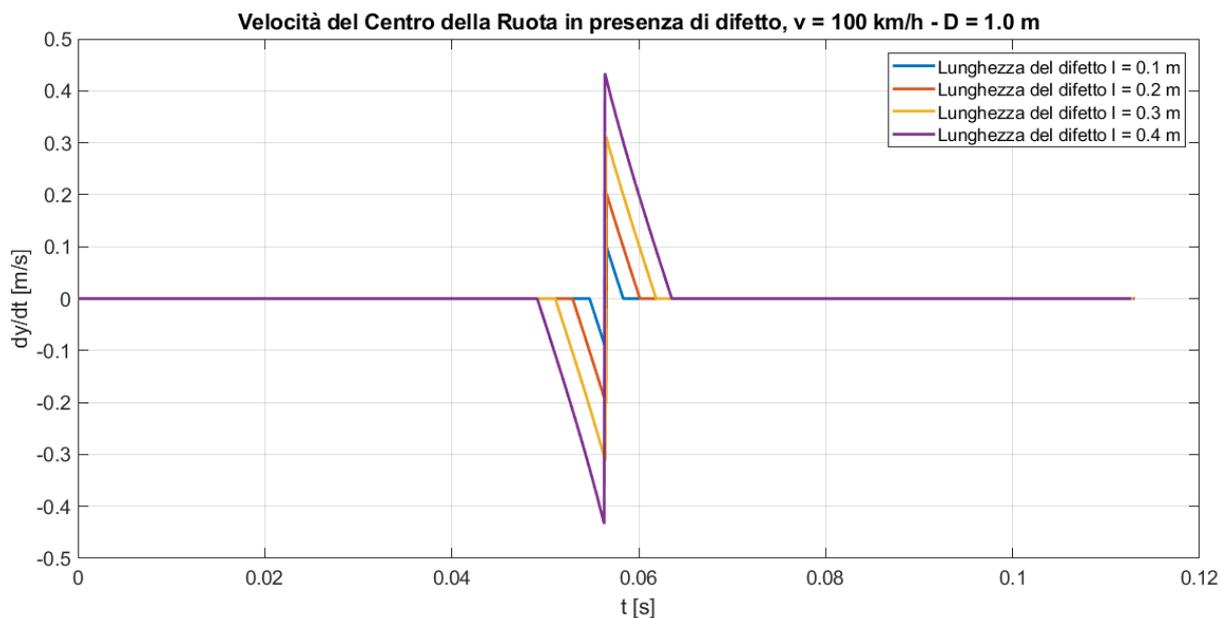


**Figura 5.25:** Traiettoria del centro della ruota mantenendo costanti  $v$  e  $D$

Lunghezza del difetto - $l$ [m]	Profondità del difetto - $d$ [mm]
0.1	9.9
0.2	10.1
0.3	23.0
0.4	41.7

**Tabella 5.4:** Profondità del difetto  $d$  in funzione della lunghezza del difetto  $l$

In figura 5.26 si noti come la discontinuità aumenti al crescere della lunghezza del difetto.

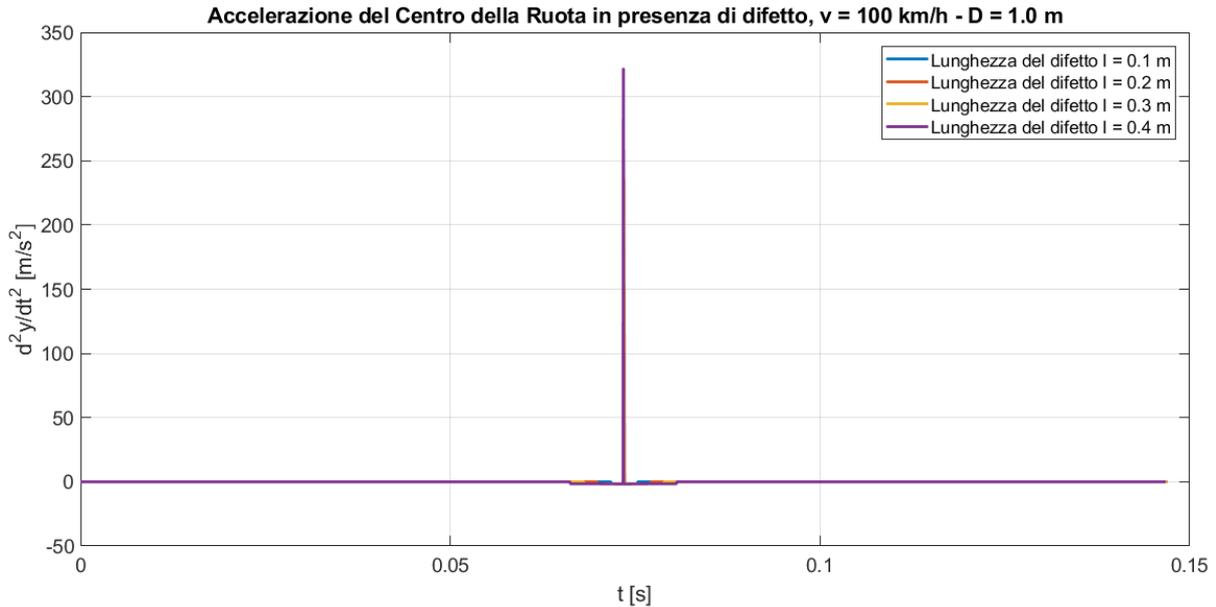


**Figura 5.26:** Velocità verticale del centro della ruota mantenendo costanti  $v$  e  $D$

$l$ [m]	$d$ [mm]	$v_{\min}$ [m/s]	$v_{\max}$ [m/s]
0.1	9.9	-0.0985	0.0985
0.2	10.1	-0.2020	0.2020
0.3	23.0	-0.3122	0.3122
0.4	41.7	-0.4338	0.4338

**Tabella 5.5:** Valori minimi e massimi di velocità al variare di  $l$

Come per le velocità anche per le accelerazioni le curve sono sovrapposte nello stesso istante temporale ma raggiungono picchi differenti i cui valori crescono al crescere di  $l$ , come riportato anche in tabella seguente.



**Figura 5.27:** Accelerazione verticale del centro della ruota mantenendo costanti  $v$  e  $D$

Lunghezza del difetto - $l$ [m]	Picco accelerazione $a_{\max}$ [m/s <sup>2</sup> ]
0.1	75.6
0.2	154.1
0.3	235.5
0.4	321.6

**Tabella 5.6:** Valori minimi e massimi di velocità al variare di  $l$

## 5.9 Esempio di Monitoraggio

Una volta noti gli andamenti della traiettoria, della velocità e dell'accelerazione verticale del centro della ruota e valutata la dipendenza di questi dalle grandezze geometriche  $D$  e  $l$  e da quella cinematica  $v$ , l'attenzione viene ora focalizzata su un esempio di monitoraggio simile ad un caso reale, caratterizzato da una frequenza di campionamento  $f = 200 \text{ Hz}$ .

Fra le curve precedentemente simulate, in ambito di monitoraggio riscuotono particolare importanza i segnali di accelerazione. Strumenti quali gli accelerometri vengono utilizzati proprio per misurare l'entità di vibrazioni e di oscillazioni che si possono sviluppare sui macchinari, come anche su una flotta ferroviaria. Il segnale che l'accelerometro riceve è analogico e ha la caratteristica di essere continuo nel tempo ed assumere valori continui all'interno di un certo intervallo. Un comune calcolatore impiegherebbe un certo intervallo di tempo per elaborare i segnali in ingresso, e quindi non può seguire l'evolversi continuo del segnale analogico, ma dovrà necessariamente acquisire alcuni campioni del segnale analogico ad istanti discreti di tempo. Questa operazione viene detta appunto campionamento del segnale.

Prima di procedere è necessario definire il concetto di *valore efficace*. **Si definisce valore efficace di una funzione continua  $x(t)$ , la radice della media quadratica** (ovvero la "radice della media dei quadrati" detta anche valore quadratico medio, in inglese *Root Mean Square*, da cui la sigla RMS), sul periodo della funzione stessa:

$$x_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [x(t)]^2 dt} \quad (5.39)$$

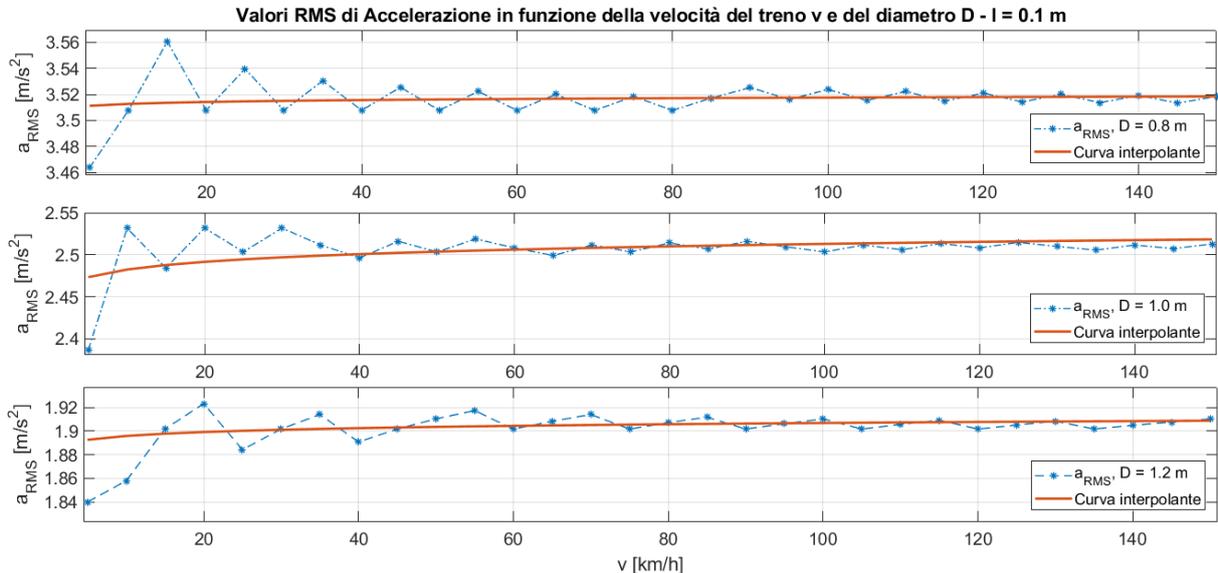
Corrispondentemente per un segnale discreto  $x_i$  si ha:

$$x_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2} \quad (5.40)$$

Il procedimento implementato nell'algoritmo prevede, una volta impostata la frequenza di campionamento a 200 Hz (200 punti discreti prelevati ogni secondo), di valutare il valore RMS di tali punti così da poter costruire delle curve tempo dipendenti che mostrino l'andamento dell'accelerazione RMS e la sua sensibilità rispetto alla variazione delle grandezze geometriche  $l$  e  $D$  e della velocità del treno  $v$ .

### 5.9.1 Studio dell'accelerazione in funzione della velocità $v$ per diametri differenti

Nel seguente paragrafo viene analizzato l'andamento dell'accelerazione RMS in funzione della velocità del treno, assunta variabile nel range  $[5 \div 150] \text{ km/h}$ , per differenti diametri della ruota del treno, in tal caso pari a  $0.8 \text{ m}$ ,  $1.0 \text{ m}$  e  $1.2 \text{ m}$ .



**Figura 5.28:** Studio dell'accelerazione RMS in funzione della velocità del treno per differenti diametri della ruota:  $D = 0.8 \text{ m}$  (sopra),  $D = 1.0 \text{ m}$  (al centro),  $D = 1.2 \text{ m}$  (sotto).

Nella tabella di seguito sono riportati i singoli valori di accelerazione RMS valutati per la rispettiva velocità impostata e il diametro stabilito.

$D = 0.8 \text{ m} - l = 0.1 \text{ m}$		$D = 1.0 \text{ m} - l = 0.1 \text{ m}$		$D = 1.2 \text{ m} - l = 0.1 \text{ m}$	
$v$ [km/h]	$a_{\text{RMS}}$ [m/s <sup>2</sup> ]	$v$ [km/h]	$a_{\text{RMS}}$ [m/s <sup>2</sup> ]	$v$ [km/h]	$a_{\text{RMS}}$ [m/s <sup>2</sup> ]
<b>5</b>	3.464	<b>5</b>	2.387	<b>5</b>	1.840
<b>10</b>	3.508	<b>10</b>	2.532	<b>10</b>	1.858
<b>15</b>	3.561	<b>15</b>	2.484	<b>15</b>	1.902
<b>20</b>	3.508	<b>20</b>	2.532	<b>20</b>	1.923
<b>25</b>	3.540	<b>25</b>	2.503	<b>25</b>	1.884
<b>30</b>	3.508	<b>30</b>	2.532	<b>30</b>	1.902
<b>35</b>	3.530	<b>35</b>	2.511	<b>35</b>	1.914
<b>40</b>	3.508	<b>40</b>	2.496	<b>40</b>	1.891
<b>45</b>	3.526	<b>45</b>	2.516	<b>45</b>	1.902
<b>50</b>	3.508	<b>50</b>	2.503	<b>50</b>	1.910
<b>55</b>	3.522	<b>55</b>	2.519	<b>55</b>	1.917
<b>60</b>	3.508	<b>60</b>	2.508	<b>60</b>	1.902
<b>65</b>	3.520	<b>65</b>	2.499	<b>65</b>	1.908
<b>70</b>	3.508	<b>70</b>	2.511	<b>70</b>	1.914
<b>75</b>	3.518	<b>75</b>	2.503	<b>75</b>	1.902
<b>80</b>	3.508	<b>80</b>	2.514	<b>80</b>	1.907
<b>85</b>	3.517	<b>85</b>	2.507	<b>85</b>	1.912
<b>90</b>	3.525	<b>90</b>	2.516	<b>90</b>	1.902
<b>95</b>	3.516	<b>95</b>	2.509	<b>95</b>	1.906
<b>100</b>	3.524	<b>100</b>	2.503	<b>100</b>	1.910
<b>105</b>	3.515	<b>105</b>	2.511	<b>105</b>	1.902
<b>110</b>	3.522	<b>110</b>	2.506	<b>110</b>	1.906
<b>115</b>	3.515	<b>115</b>	2.513	<b>115</b>	1.909
<b>120</b>	3.521	<b>120</b>	2.508	<b>120</b>	1.902
<b>125</b>	3.514	<b>125</b>	2.515	<b>125</b>	1.905
<b>130</b>	3.520	<b>130</b>	2.510	<b>130</b>	1.908
<b>135</b>	3.514	<b>135</b>	2.506	<b>135</b>	1.902
<b>140</b>	3.519	<b>140</b>	2.511	<b>140</b>	1.905
<b>145</b>	3.513	<b>145</b>	2.507	<b>145</b>	1.908
<b>150</b>	3.518	<b>150</b>	2.513	<b>150</b>	1.910

Tabella 5.7: Valori di accelerazione RMS per ogni velocità  $v$  del treno

$D = 0.8 \text{ m} - l = 0.1 \text{ m}$	$D = 1.0 \text{ m} - l = 0.1 \text{ m}$	$D = 1.2 \text{ m} - l = 0.1 \text{ m}$
$a_{RMS,mean} = 3.517 \text{ [m/s}^2\text{]}$	$a_{RMS,mean} = 2.506 \text{ [m/s}^2\text{]}$	$a_{RMS,mean} = 1.902 \text{ [m/s}^2\text{]}$
$\sigma_{STD} = 0.0149 \text{ [m/s}^2\text{]}$	$\sigma_{STD} = 0.0246 \text{ [m/s}^2\text{]}$	$\sigma_{STD} = 0.0163 \text{ [m/s}^2\text{]}$
$CoV = 0.424 \%$	$CoV = 0.982 \%$	$CoV = 0.857 \%$

**Tabella 5.8:** Tabella riassuntiva

Come si osserva dall'immagine 5.28 e dalla tabella 5.7, gli andamenti delle curve simulate e di quelle interpolanti sono molto simili nella forma e sono caratterizzate dall'essere inizialmente crescenti per poi tendere asintoticamente, per valori di velocità più elevati, ad un valore costante e prossimo a quello medio calcolato. Non tutti i punti considerati però possono essere considerati validi ai fini dell'analisi condotta.

Il ragionamento adottato nello sviluppo dell'algoritmo è consistito nel supporre di aver a che fare con una variabile statistica quantitativa quale  $a_{RMS}$  che si distribuisce nella popolazione di riferimento con media  $a_{RMS,mean}$  e varianza  $\sigma_{STD}$ . Si è pertanto deciso di costruire un intervallo di confidenza per  $a_{RMS}$  al livello  $1 - \alpha = 0.99$  sull'insieme di campioni riportati in tabella. Ricordando la definizione di intervallo di confidenza ovvero come quell'intervallo di valori entro i quali si stima che cada, con un livello di probabilità scelto, il valore vero della popolazione, vale:

$$\left( \mu - z_{\alpha/2} \sqrt{\frac{\sigma^2}{n}}, \mu + z_{\alpha/2} \sqrt{\frac{\sigma^2}{n}} \right) \quad (5.41)$$

dove  $\mu$  è la media campionaria,  $z_{\alpha/2}$  il quantile della normale di ordine  $1 - \alpha/2$ ,  $\sigma^2$  la varianza e  $n$  il numero di campioni, per le tre curve costruite i rispettivi intervalli di confidenza sono:

$$I_1 = (3.510, 3.524)$$

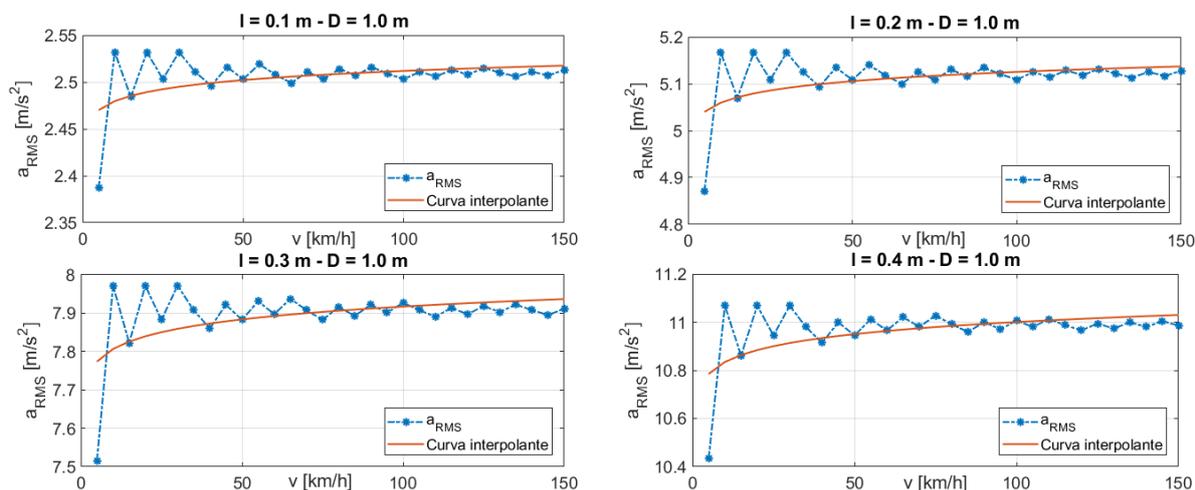
$$I_2 = (2.494, 2.518)$$

$$I_3 = (1.894, 1.910)$$

Si consideri ad esempio la seconda curva: noto l'intervallo di confidenza  $I_2$  restano esclusi da questo i punti corrispondenti alle velocità comprese fra i  $5 \div 30 \text{ km/h}$ . Come anche per le altre curve, la simulazione per bassi valori di velocità del treno risulta essere pertanto non ottimale.

## 5.9.2 Studio dell'accelerazione in funzione della velocità $v$ per differenti lunghezze del difetto

Nel seguente paragrafo viene analizzato l'andamento dell'accelerazione RMS in funzione della velocità del treno, assunta variabile nel range  $[5 \div 150]$  km/h, per differenti lunghezze del difetto, in tal caso pari a  $0.1$  m,  $0.2$  m,  $0.3$  m e  $0.4$  m.



**Figura 5.29:** Studio dell'accelerazione RMS in funzione della velocità del treno e per differenti lunghezze del difetto:  $l = 0.1$  m (alto sx),  $l = 0.2$  m (alto dx),  $l = 0.3$  m (basso sx),  $l = 0.4$  m (basso dx)

Nella tabella di seguito sono riportati i singoli valori di accelerazione RMS valutati per la rispettiva velocità impostata e lunghezza del difetto stabilita.

$v$ [km/h]	$l = 0.1$ m	$l = 0.2$ m	$l = 0.3$ m	$l = 0.4$ m
	$a_{RMS}$ [m/s <sup>2</sup> ]			
<b>5</b>	2.387	4.871	7.516	10.435
<b>10</b>	2.532	5.166	7.971	11.068
<b>15</b>	2.484	5.070	7.822	10.861
<b>20</b>	2.532	5.166	7.971	11.068
<b>25</b>	2.503	5.109	7.882	10.944
<b>30</b>	2.532	5.166	7.972	11.068
<b>35</b>	2.511	5.125	7.908	10.980
<b>40</b>	2.496	5.094	7.860	10.914
<b>45</b>	2.516	5.134	7.922	10.999
<b>50</b>	2.503	5.109	7.882	10.944
<b>55</b>	2.519	5.140	7.931	11.012
<b>60</b>	2.508	5.118	7.897	10.965

<b>65</b>	2.499	5.100	7.937	11.021
<b>70</b>	2.511	5.125	7.908	10.980
<b>75</b>	2.503	5.109	7.882	11.027
<b>80</b>	2.514	5.130	7.916	10.991
<b>85</b>	2.507	5.115	7.893	10.959
<b>90</b>	2.516	5.134	7.922	10.999
<b>95</b>	2.509	5.121	7.901	10.971
<b>100</b>	2.503	5.109	7.927	11.007
<b>105</b>	2.511	5.125	7.908	10.980
<b>110</b>	2.506	5.114	7.891	11.012
<b>115</b>	2.513	5.129	7.914	10.988
<b>120</b>	2.508	5.118	7.897	10.965
<b>125</b>	2.515	5.132	7.918	10.994
<b>130</b>	2.510	5.122	7.903	10.973
<b>135</b>	2.506	5.113	7.922	10.999
<b>140</b>	2.511	5.125	7.908	10.980
<b>145</b>	2.507	5.117	7.895	11.004
<b>150</b>	2.513	5.128	7.912	10.986

**Tabella 5.9:** Valori RMS di accelerazione per ogni velocità  $v$  del treno

$v$ [km/h]	$l = 0.1$ m	$l = 0.2$ m	$l = 0.3$ m	$l = 0.4$ m
	$a_{RMS}$ [m/s <sup>2</sup> ]			
$a_{RMS,mean}$ [m/s <sup>2</sup> ]	2.506	5.115	7.896	10.970
$\sigma_{STD}$ [m/s <sup>2</sup> ]	0.0246	0.0502	0.0782	0.1096
CoV	0.982 %	0.981 %	0.857 %	0.999 %

**Tabella 5.10:** Tabella riassuntiva

Come si osserva dall'immagine 5.29 e dalla tabella 5.9, gli andamenti delle curve simulate e di quelle interpolanti sono molto simili nella forma a quelle viste nel paragrafo precedente e ancora una volta sono caratterizzate dall'essere inizialmente crescenti per poi tendere asintoticamente, per valori di velocità più elevati, ad un valore costante e prossimo a quello medio calcolato. Anche qui, non tutti i punti considerati però possono essere considerati validi ai fini dell'analisi condotta.

Supponendo di lavorare con un livello di confidenza del 99%, i 4 intervalli per le curve risultano essere:

$$I_1 = (2.494, 2.518)$$

$$I_2 = (5.090, 5.140)$$

$$I_3 = (7.857, 7.935)$$

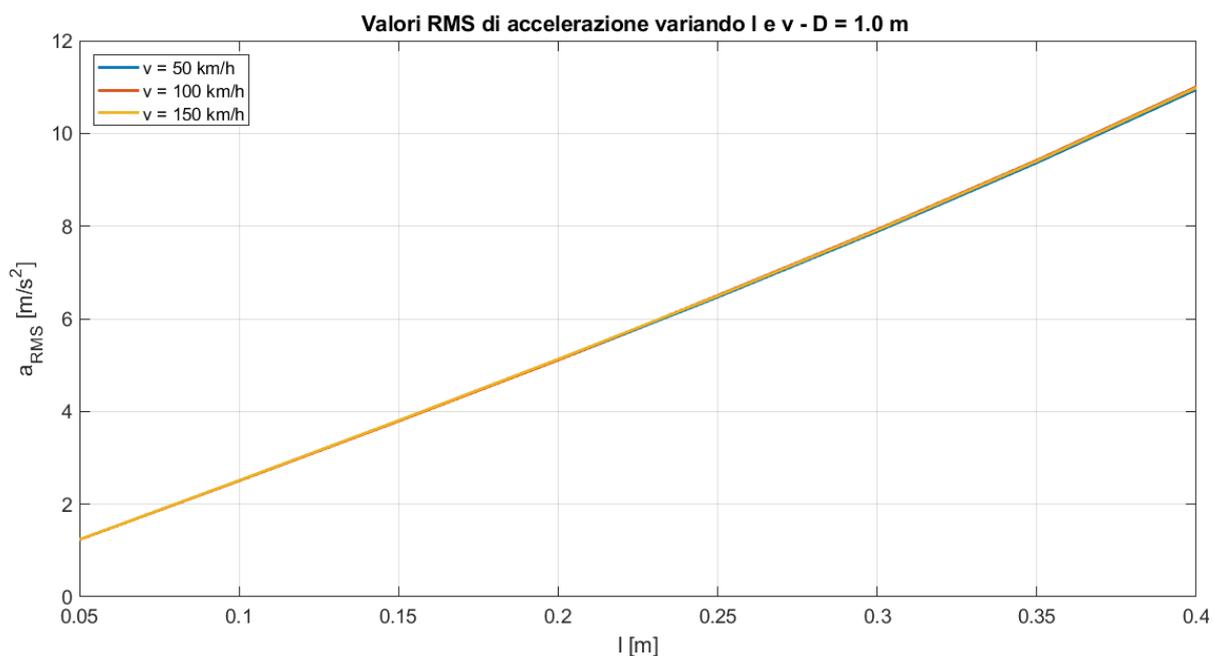
$$I_4 = (10.914, 11.025)$$

Come già notato in precedenza, ancora una volta la simulazione condotta per valori bassi di velocità del treno non risulta essere ottimale.

### 5.9.3 Studio dell'accelerazione variando la lunghezza del difetto $l$ per differenti velocità del treno

Nel seguente paragrafo viene analizzato l'andamento dell'accelerazione RMS in funzione della lunghezza del difetto, assunta variabile nel range  $[0.05 \div 0.4] m$ , per differenti velocità del treno, in tal caso pari a  $50 km/h$ ,  $100 km/h$  e  $150 km/h$ .

Ciò che emerge dall'immagine e dalla tabella seguenti è l'andamento quasi perfettamente rettilineo delle curve, a loro volta sovrapposte nell'intero campo di variazione della lunghezza del difetto. Si può concludere come l'accelerazione RMS sia praticamente indipendente dalla velocità del treno impostata.



**Figura 5.30:** Andamento dell'accelerazione RMS in funzione della lunghezza del difetto per differenti velocità del treno

$l$ [m]	$v = 50 \text{ km/h}$	$v = 100 \text{ km/h}$	$v = 150 \text{ km/h}$
	$a_{\text{RMS}}$ [m/s <sup>2</sup> ]	$a_{\text{RMS}}$ [m/s <sup>2</sup> ]	$a_{\text{RMS}}$ [m/s <sup>2</sup> ]
0.05	1.234	1.234	1.239
0.10	2.503	2.503	2.513
0.15	3.791	3.791	3.806
0.20	5.109	5.109	5.128
0.25	6.468	6.505	6.493
0.30	7.882	7.927	7.912
0.35	9.368	9.421	9.403
0.40	10.944	11.007	10.986

Tabella 5.11: Tabella riassuntiva

### 5.9.4 Studio dell'accelerazione in funzione della lunghezza del difetto $l$ per differenti diametri

Nel seguente paragrafo viene analizzato l'andamento dell'accelerazione RMS in funzione della lunghezza del difetto, assunta variabile nel range  $[0.05 \div 0.4] \text{ m}$ , per differenti diametri della ruota, in tal caso pari a  $0.8 \text{ m}$ ,  $0.9 \text{ m}$ ,  $1.0 \text{ m}$ ,  $1.1 \text{ m}$ ,  $1.2 \text{ m}$  e  $1.3 \text{ m}$ .

Dall'immagine seguente emerge come, a parità di velocità del treno impostata, le curve, con andamento quasi rettilineo, hanno una pendenza inferiore al crescere del diametro. In altre parole questo significa che per ruote più grandi, la presenza del difetto è meno pericolosa rispetto a quelle con diametro più piccolo.

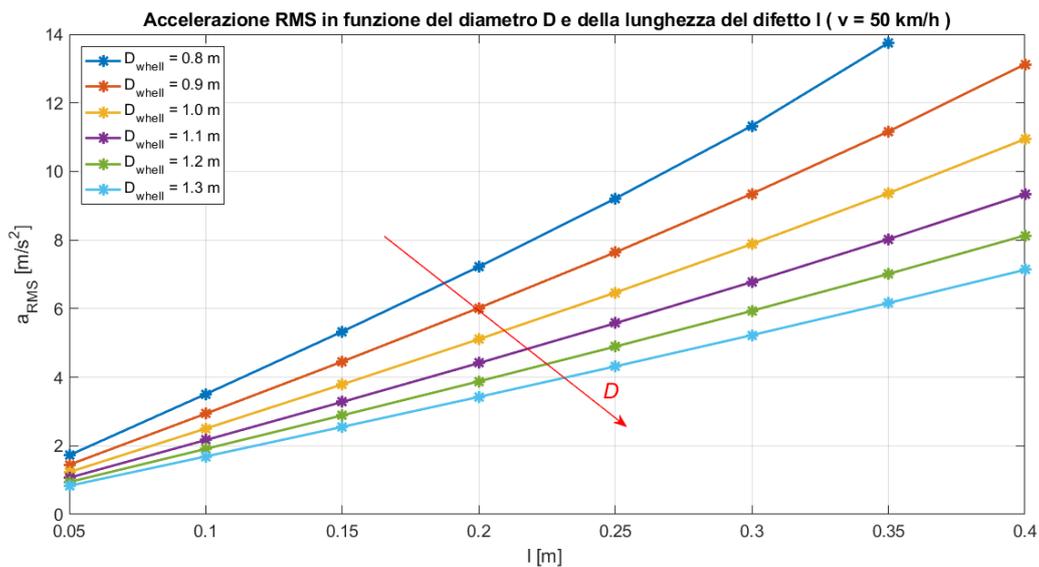


Figura 5.31: Studio dell'accelerazione in funzione di  $l$  per differenti diametri

$v = 50 \text{ km/h}$	$D = 0.8 \text{ m}$	$D = 0.9 \text{ m}$	$D = 1.0 \text{ m}$
$l \text{ [m]}$	$a_{\text{RMS}} \text{ [m/s}^2\text{]}$	$a_{\text{RMS}} \text{ [m/s}^2\text{]}$	$a_{\text{RMS}} \text{ [m/s}^2\text{]}$
<i>0.05</i>	1.726	1.448	1.234
<i>0.10</i>	3.508	2.938	2.503
<i>0.15</i>	5.332	4.457	3.791
<i>0.20</i>	7.223	6.020	5.109
<i>0.25</i>	9.210	7.642	6.468
<i>0.30</i>	11.330	9.350	7.883
<i>0.35</i>	13.750	11.170	9.368
<i>0.40</i>	----	13.130	10.940
$v = 50 \text{ km/h}$	$D = 1.1 \text{ m}$	$D = 1.2 \text{ m}$	$D = 1.3 \text{ m}$
$l \text{ [m]}$	$a_{\text{RMS}} \text{ [m/s}^2\text{]}$	$a_{\text{RMS}} \text{ [m/s}^2\text{]}$	$a_{\text{RMS}} \text{ [m/s}^2\text{]}$
<i>0.05</i>	1.070	0.943	0.834
<i>0.10</i>	2.168	1.910	1.690
<i>0.15</i>	3.280	2.888	2.552
<i>0.20</i>	4.413	3.880	3.426
<i>0.25</i>	5.575	4.894	4.316
<i>0.30</i>	6.776	5.936	5.228
<i>0.35</i>	8.025	7.013	6.164
<i>0.40</i>	9.336	8.133	7.133

Tabella 5.12: Tabella riassuntiva

### 5.9.5 Studio del segnale campionato

I segnali con cui si ha normalmente a che fare durante un monitoraggio sono di natura analogica e hanno la caratteristica di essere continui, come già ricordato. Al fine di ridurre il costo computazionale pertanto si ricorre alla tecnica del campionamento consistente nell'acquisire campioni dal segnale analogico ad istanti discreti di tempo. Questa operazione, detta appunto campionamento del segnale, oltre a comportare una riduzione dei tempi, ha insito il vantaggio di una più semplice manipolazione dei segnali in ingresso ed il fatto di poter gestire i segnali stessi via software in modo sicuramente più economico e preciso rispetto all'applicazione di filtri direttamente sul segnale analogico. Lo svantaggio principale nel campionamento dei segnali risiede nel fatto che, in realtà, abbiamo a che fare con un'approssimazione (tanto migliore quanto il tempo di campionamento è piccolo, ma pur sempre un'approssimazione) di quello che è l'ingresso da studiare, quindi si perde necessariamente qualche informazione.

La frequenza di campionamento adottata è stata quella tipica di un comune strumento di monitoraggio, ovvero  $f = 200 \text{ Hz}$  (dal segnale in ingresso sono stati prelevati 200 punti ogni  $s$ ). Di tali campioni è stato valutato il valore RMS dell'accelerazione. L'obiettivo in questa fase dello studio è stato quello di valutare se dal segnale di accelerazione campionato fosse possibile o meno, individuare la presenza o meno di un *wheel-flat* noto l'andamento ideale dell'accelerazione di figura 5.18.

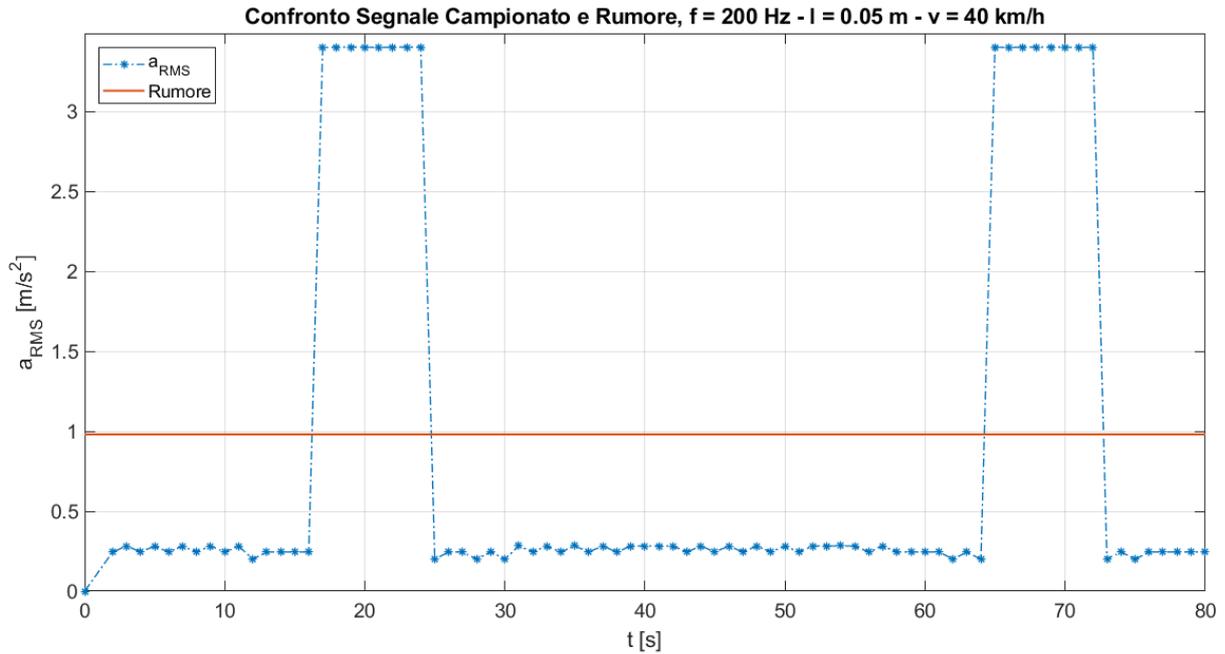


Figura 5.32: Segnale campionato e Soglia di rumore,  $f = 200 \text{ Hz}$ ,  $l = 0.05 \text{ m}$ ,  $v = 40 \text{ km/h}$

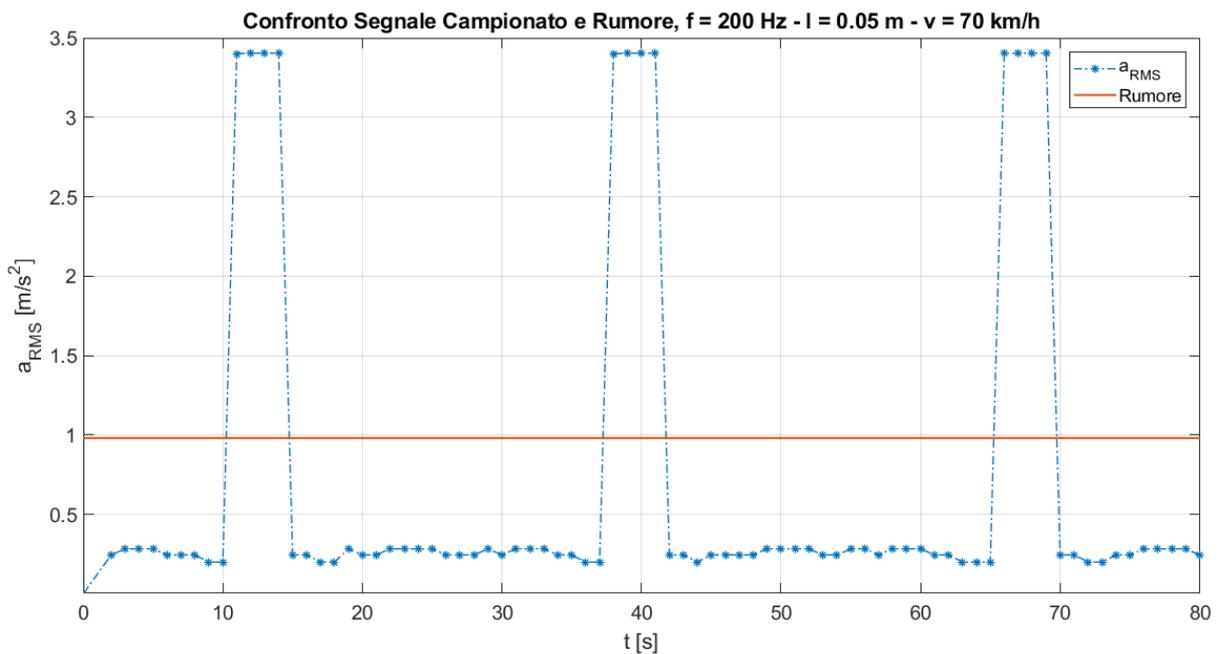
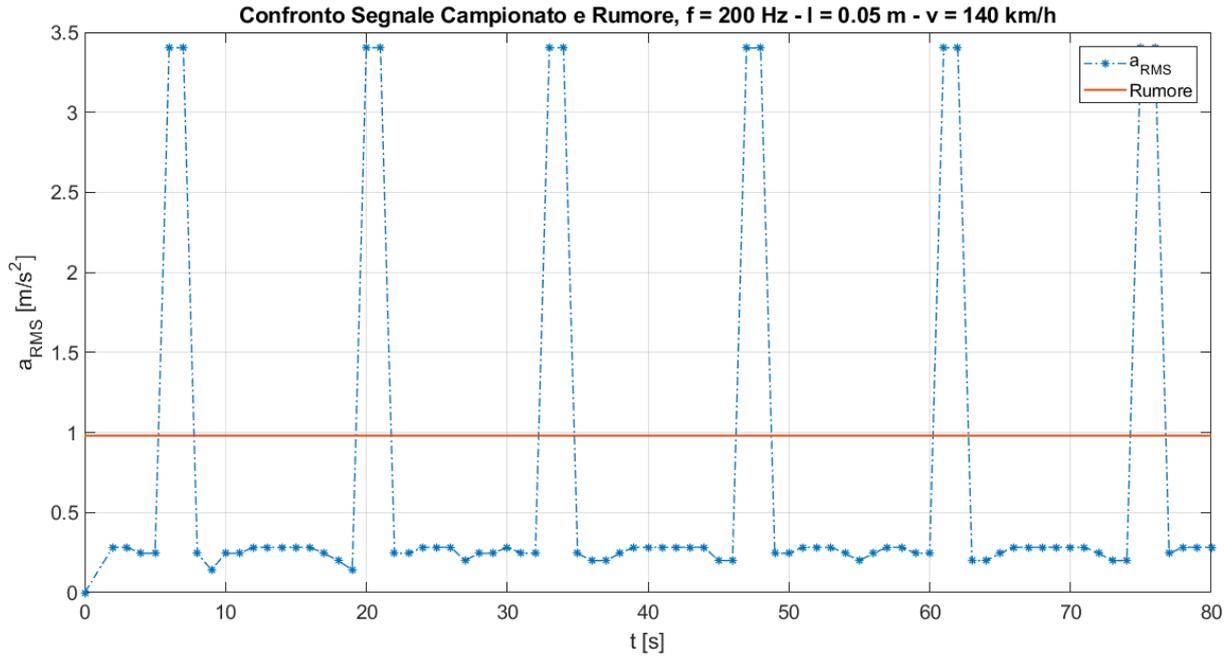


Figura 5.33: Segnale campionato e Soglia di rumore,  $f = 200 \text{ Hz}$ ,  $l = 0.05 \text{ m}$ ,  $v = 70 \text{ km/h}$



**Figura 5.34:** Segnale campionato e Soglia di rumore,  $f = 200 \text{ Hz}$ ,  $l = 0.05 \text{ m}$ ,  $v = 140 \text{ km/h}$

Lo studio condotto ha previsto un campionamento a  $200 \text{ Hz}$ , mantenendo costante la lunghezza del difetto pari a  $l = 0.05 \text{ m}$  e variando la velocità con cui si muove il treno in tal caso assunta  $40 \text{ km/h}$ ,  $70 \text{ km/h}$  e  $140 \text{ km/h}$ . Come si osserva dalle immagini precedenti, i valori massimi di accelerazione per le tre curve costruite coincidono e sono pari a  $3.404 \text{ m/s}^2$ . In ogni immagine è stata stabilita una determinata soglia di rumore dal valore di  $0.1g$ . Si noti come con un campionamento a  $200 \text{ Hz}$  si è in grado di osservare la presenza di picchi che si susseguono con una certa periodicità (dipendente dalla velocità  $v$ ), segnalando la presenza di un'anomalia nel sistema, non essendo tali punti rientranti nella fascia di rumore.

Un'ulteriore analisi è stata condotta, questa volta fissando la velocità del treno a  $v = 20 \text{ km/h}$  variando invece la lunghezza del difetto  $l$  assunta di volta in volta pari a  $0.05 \text{ m}$ ,  $0.04 \text{ m}$ ,  $0.03 \text{ m}$ ,  $0.02 \text{ m}$  e  $0.015 \text{ m}$ . Lo scopo di questo studio è rivolto a valutare un valore di soglia minimo per il parametro  $l$  al di sotto del quale non si osserva la presenza di picchi, essendo questi rientranti nella fascia di rumore.

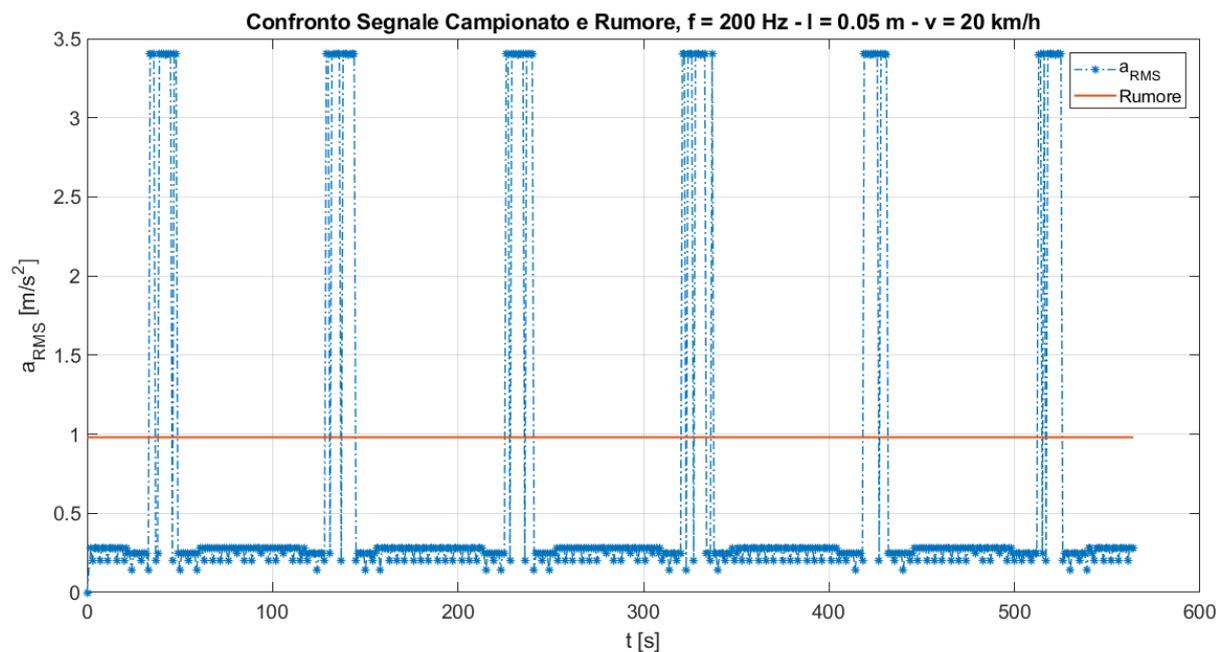


Figura 5.35: Segnale campionato e Soglia di rumore,  $f = 200 \text{ Hz}$ ,  $l = 0.05 \text{ m}$ ,  $v = 20 \text{ km/h}$

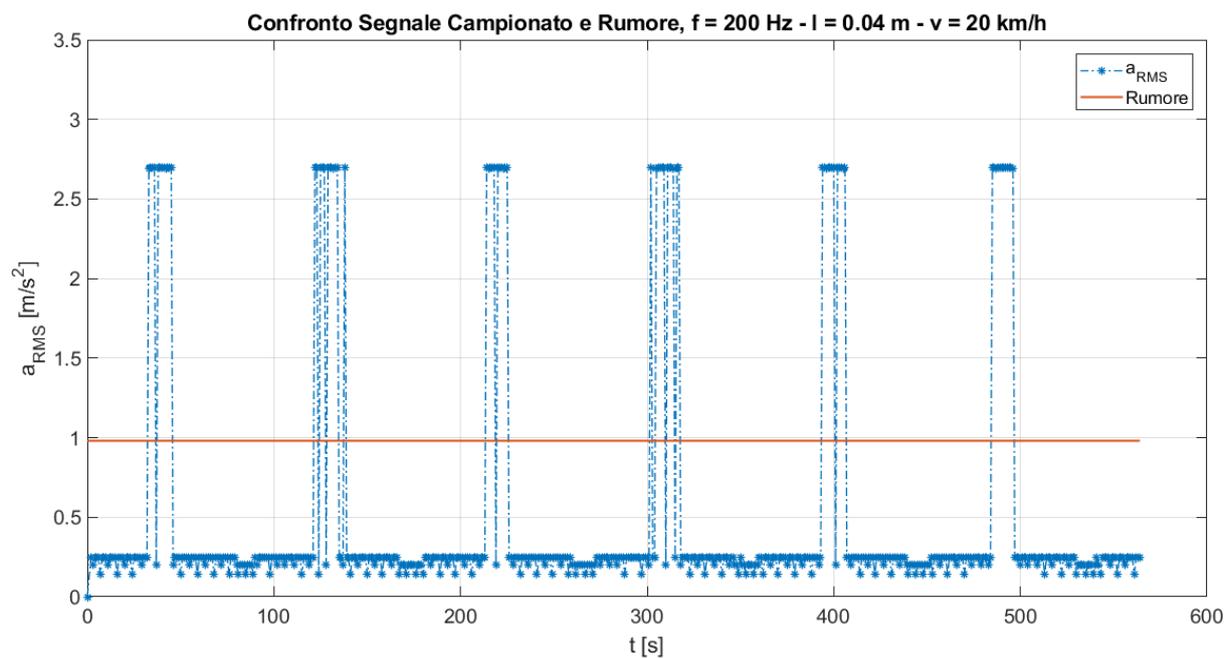


Figura 5.36: Segnale campionato e Soglia di rumore,  $f = 200 \text{ Hz}$ ,  $l = 0.04 \text{ m}$ ,  $v = 20 \text{ km/h}$

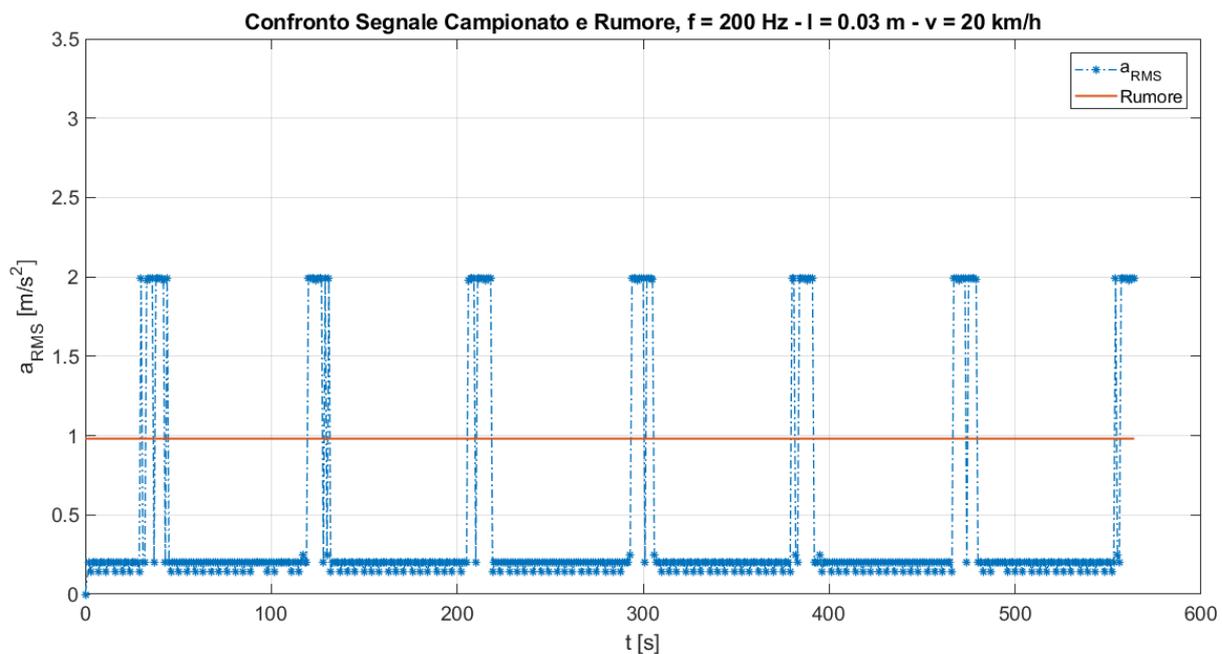


Figura 5.37: Segnale campionato e Soglia di rumore,  $f = 200 \text{ Hz}$ ,  $l = 0.03 \text{ m}$ ,  $v = 20 \text{ km/h}$

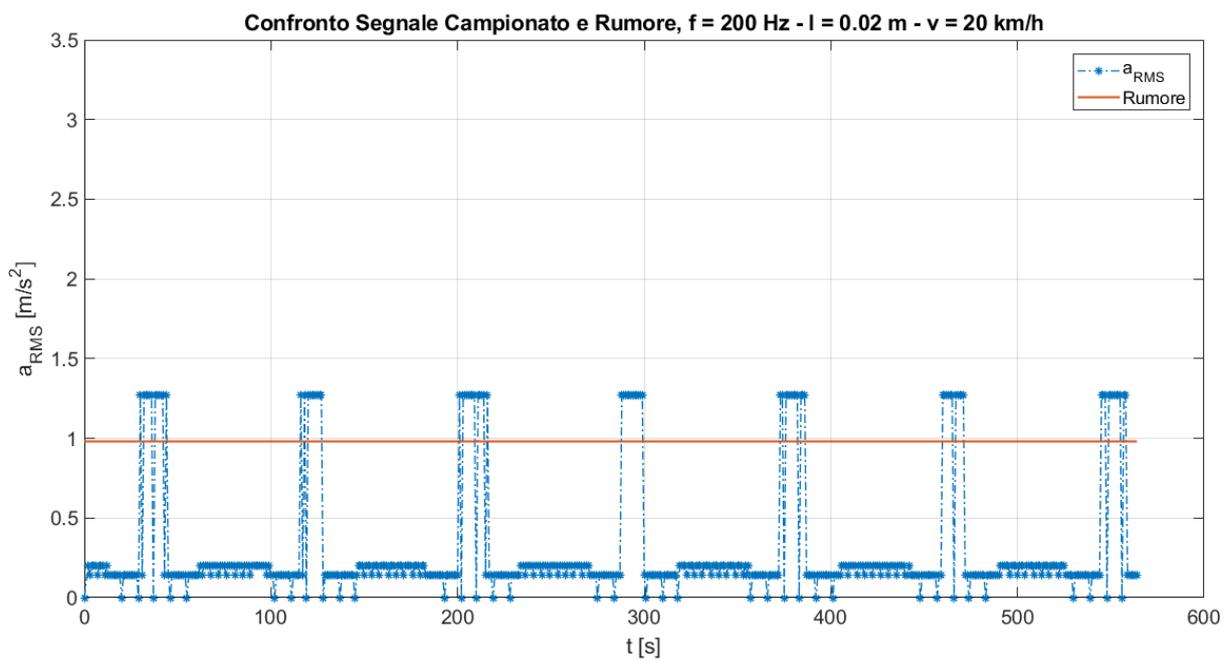
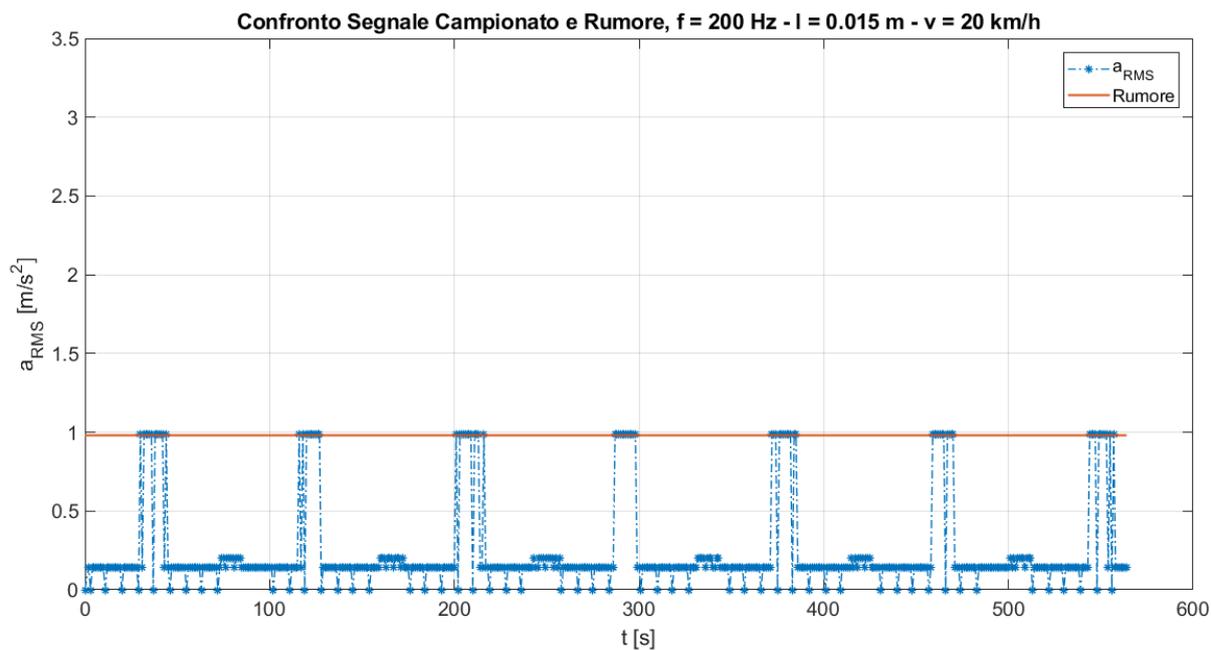


Figura 5.38: Segnale campionato e Soglia di rumore,  $f = 200 \text{ Hz}$ ,  $l = 0.02 \text{ m}$ ,  $v = 20 \text{ km/h}$



**Figura 5.39:** Segnale campionato e Soglia di rumore,  $f = 200 \text{ Hz}$ ,  $l = 0.015 \text{ m}$ ,  $v = 20 \text{ km/h}$

Lunghezza del difetto - $l$ [m]	$a_{\text{RMS,max}} [\text{m/s}^2]$
0.05	3.404
0.04	2.696
0.03	1.991
0.02	1.273
0.015	0.990

**Tabella 5.13:** Tabella riassuntiva

Come si può osservare dalla tabella riassuntiva 5.13 e dall'immagine seguente, avendo supposto a priori un rumore di  $0.1g$ , è possibile affermare che per valori di lunghezza del difetto  $l \leq 0.015 \text{ m}$ , non è possibile individuare dall'algoritmo la presenza di alcun difetto. Essendo i valori massimi di accelerazione raggiunti indipendenti dalla variazione della velocità con cui si muove il treno, come da figura 5.24, si può affermare che il valore di soglia precedentemente individuato è quello minimo detectabile per ogni  $v$ .

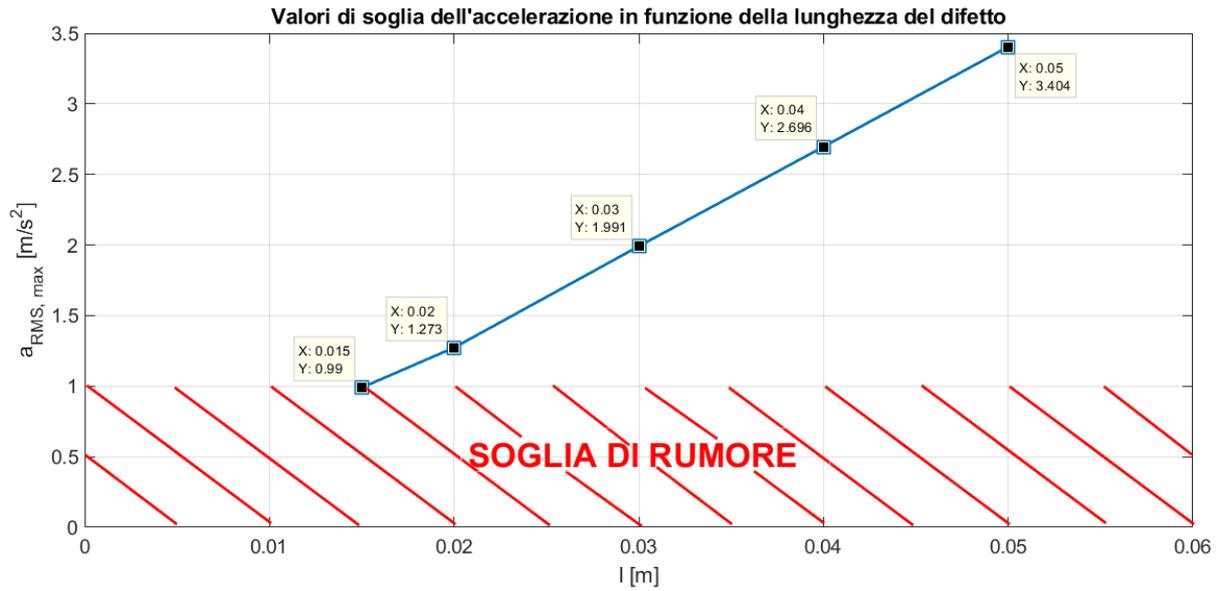


Figura 5.40: Individuazione del valore di soglia per l'accelerazione in funzione di  $l$

# Capitolo 6

## Conclusione e Sviluppi Futuri

Il lavoro condotto ha avuto come obiettivo principe quello di fornire una panoramica completa dei sistemi di monitoraggio per veicoli ferroviari merci al fine di creare un *benchmark* in cui fosse possibile valutarne criticamente vantaggi e svantaggi e definire quale delle soluzioni proposte dal mercato fosse più idonea ed efficace in funzione di un dato problema da risolvere. In particolare, si è osservato come fra le varie opportunità non fosse richiesto uno sviluppo di modelli matematici ed algoritmi di difficile elaborazione, permettendo quindi di superare le non linearità e le singole variazioni dei parametri caratterizzanti il sistema. Noto questo, si è pertanto deciso di provare a realizzare un modello ex novo, tramite la definizione di un semplice algoritmo che permettesse di studiare come le grandezze cinematiche del suddetto modello venissero a modificarsi in funzione della variazione dei parametri geometrici e cinematici stessi.

Nell'attività di ricerca condotta, è emerso come la produttività di una flotta di carri merce fosse pesantemente compromessa rispetto ad altre tipologie di trasporto quali ad esempio quello su strada e le cause riscontrate sono molteplici: partendo dall'inefficacia e dall'inefficienza della tracciatura della merce per l'obsolescenza dei mezzi di trasmissione dei dati e per l'incompatibilità dei diversi sistemi logistici internazionali, passando per le difficoltà di comunicazioni fra operatori di paesi diversi, arrivando infine ai danni economici per le compagnie legati a guasti non immediatamente individuati visto l'assenza di componente sensoristica a bordo carro. Nasce da qui la necessità di natura logistica e di gestione di rendere smart un comune cargo.

La complessità individuata nel rendere smart un carro merci sta nel recuperare una fonte primaria di alimentazione, nota l'assenza di energia elettrica a bordo che rende inutilizzabile qualsiasi dispositivo elettronico di localizzazione e monitoraggio. La soluzione tuttavia esiste ed è stata individuata nei sistemi autonomi di recupero energetico comunemente noti come energy harvesters, applicazioni del principio dell' IOAT (Internet of Autonomous Things). Tra le più comuni: photovoltaic harvesting, piezoelectric energy harvesting, magnetic-inductive energy harvesting e capacitive energy harvesting. Tutte queste tecniche hanno dato origine ad una serie di applicazioni che hanno alzato il livello di competitività delle aziende nel mercato del monitoraggio ferroviario.

Le varie applicazioni studiate hanno come unico obiettivo quello di garantire un trasporto ferroviario più veloce e più sicuro. È altresì vero che nelle normali condizioni di lavoro, l'infrastruttura ferroviaria opera ininterrottamente sotto un carico avverso e in condizioni ambientali difficili. Pertanto si è resa necessaria in tale fase, un'analisi delle situazioni più comuni che si verificano durante la marcia che potrebbero portare ad un graduale ma irreversibile deterioramento strutturale, nell'ottica di fornire un database di informazioni utili al fine di garantire un migliore intervento preventivo di manutenzione che eviti guasti durante la marcia e prevenga incidenti ben più gravi quali deragliamenti.

Fra le cause di danneggiamento all'infrastruttura ferroviaria, si è focalizzata l'attenzione su di un fenomeno molto comune fra i difetti di superficie localizzati che se ignorato o sottostimato potrebbe portare a consumo e a danneggiamento irreversibile dell'organo mobile ovvero il "*wheel-flat*" o spiattellamento della ruota. Definite le cause che possono originare tale fenomeno come il bloccaggio dovuto ad una errata frenata per difetti già presenti negli organi frenanti mal regolati o la scarsa aderenza ruota-rotaia per avversità ambientali quali pioggia, ghiaccio, *etc.* o ancora presenza accidentale di grasso, olio, *etc.*, il passo preliminare compiuto è stato studiarne la geometria, andando a individuare dei parametri geometrici utili per la definizione successiva dell'algoritmo. Lo spiattellamento di una ruota è stato pertanto modellato come una corda di circonferenza di lunghezza  $l$  e perdita di materiale  $d$ . Nota la geometria e le grandezze di riferimento, la definizione dell'algoritmo ha previsto la conduzione di un'analisi prettamente parametrica funzione delle grandezze geometriche di cui prima e di quella cinematica  $v$ , velocità con cui si muove il treno.

Dalle simulazioni condotte emerge come le grandezze cinematiche del sistema ferroviario fossero strettamente dipendenti dalla modifica dei parametri geometrici. In particolare si osserva come la profondità del difetto cresca al diminuire del diametro della ruota e lo stesso vale per velocità e accelerazione verticale del centro della ruota con difetto. Al variare della lunghezza del difetto, supposta variabile in un range sovradimensionato rispetto a quello reale, la profondità del difetto aumenta al crescere di  $l$ . Anche qui vale l'analogo ragionamento fatto in precedenza per la velocità e l'accelerazione verticale. Infine, al variare della velocità con cui si muove il treno, emerge come il periodo per compiere una rivoluzione completa da parte dell'organo mobile diminuisca al crescere di  $v$ , mentre la profondità del difetto rimane costante. I diagrammi di velocità e accelerazione verticale rimangono identici nella forma ma cambia come ricordato il periodo.

Conclusa l'analisi parametrica, l'ultimo studio effettuato trattasi di un esempio di monitoraggio che simulasse un caso reale nota una certa frequenza di campionamento. In particolare, si è mostrato come fosse possibile effettuare una simulazione fedele del segnale di accelerazione reale, noti i valori RMS, per un definito intervallo di velocità sia al variare del diametro della ruota che in funzione della lunghezza del difetto. Inoltre, lo studio condotto sull'andamento dell'accelerazione RMS funzione della velocità del treno per differenti lunghezze del difetto, ha mostrato come questo fosse di natura lineare e indipendente da  $v$  e variabile invece al variare di  $D$ . Infine, sempre per rendere l'analisi la più fedele possibile alla realtà

è stato ritenuto necessario aggiungere una soglia di rumore di una certa magnitudine, al fine di poter valutare se fosse possibile o meno individuare la presenza effettiva del difetto a seguito del processo di campionamento, ricostruendo il segnale originario.

Il lavoro di tesi apre nuovi scenari possibili di lavoro: risulta per il futuro necessario affiancare all'analisi teorica e alla parte simulativa una controprova pratica, in modo tale da poter effettivamente confrontare e valutare la bontà dei risultati raggiunti direttamente con prove sul campo. Così facendo si può essere effettivamente certi di aver creato uno strumento utile in ottica monitoraggio che tramite la sua implementazione su di una architettura hardware leggera garantisca un miglioramento della sicurezza dell'intera infrastruttura ferroviaria ed in particolare del settore trasporto merci.

# Appendice A

## Script Matlab

---

```
1 %% Parte 1: definizione delle grandezze geometriche di interesse

3 % inizializzazione
  clc
5 clear all
  close all
7
  % diametri tipici
9
  %   Diam = 0.8;           % [m], veicoli trainati
11 %   Diam = 0.9;           % [m], veicoli trainati
  Diam = 1.0;           % [m], locomotive
13 %   Diam = 1.1;           % [m], locomotive
  %   Diam = 1.2;           % [m], locomotive
15 %   Diam = 1.3;           % [m], locomotive
  R = Diam/2;           % [m], raggio della ruota
17
  % lunghezza del difetto tipica 0.05 <= l <= 0.4 [m]
19
  % l = 0.1;               % [m], lunghezza dello spiattellamento
21 % l = 0.2;               % [m], lunghezza dello spiattellamento
  % l = 0.3;               % [m], lunghezza dello spiattellamento
23 l = 0.05;               % [m], lunghezza dello spiattellamento
```

```

25 % definizione delle grandezze geometriche

27 Circ          = 2*pi*R;                % [m], lunghezza della
    circonferenza della ruota
h                = sqrt(R^2 - (l/2)^2);   % [m], altezza del
    triangolo con base l
29 alpha         = acos(h/R)*360/(2*pi);  % [°], semiampiezza
    dell'angolo che sottende lo spiattellamento
Alpha           = 2*alpha;                % [°], ampiezza dell'
    angolo che sottende l'intero spiattellamento
31 arco          = Alpha*(2*pi/360) * R;  % [m], lunghezza dell'
    arco che sottende lo spiattellamento
Circ_no_defect  = Circ - arco;            % [m], lunghezza dell'
    arco di circonferenza esente da difetti

33

    % Range di velocità per treno merci, conversione da km/h a m/s

35
    % v = 50/3.6;                % [m/s]
37 % v = 75/3.6;                % [m/s]
    v = 20/3.6;                  % [m/s]
39 %v = 125/3.6;                % [m/s]

41 % Parte 2: Definizione della cinematica, costruzione del moto
    seguito dal centro della ruota

43 % 1^ intervallo: zona interessata dalla presenza del difetto: 0 <=
    x <= l

45 x=0:0.001:1;                  % [m]
    for i = 1:length(x)
47 % Traiettoria del centro della ruota
y(i) = (sqrt(R.^2-x(i).^2)-R).*heaviside(-x(i)+l/2)+(sqrt(R.^2-(x(i)
    )-l).^2)-R).(heaviside(x(i)-l/2)-heaviside(x(i)-l));

```

```

49 % Velocità verticale del centro della ruota
yd(i) = (-x(i)/sqrt(R^2 - x(i).^2)).*heaviside(-x(i)+1/2) + ((-x(i)
    +1)./sqrt(R^2 - (x(i)-1).^2))*(heaviside(x(i)-1/2)-heaviside(x(i)
    -1));
51 end

53 % Grafica

55 figure
plot(x./v,y, 'linewidth',2)
57 grid on
xlabel('t [s]')
59 ylabel('y [m]')
title('Traiettoria del centro della ruota')
61
figure
63 plot(x./v,yd, 'linewidth',2)
grid on
65 xlabel('t [s]')
ylabel('yd [m/s]')
67 title('Velocità del centro della ruota')

69 % Valutazione dell'accelerazione verticale della ruota: derivazione
    della velocità

71 dYd = diff(yd);
dX = diff(x);
73 Ydd = dYd./dX; % [m/s^2]
Ydd = [Ydd(1) Ydd]; % Aggiunta di un valore al vettore, mi
    riporto alla stessa lunghezza dei vettori posizione e velocità
75
% Grafica
77 figure
plot(x./v,Ydd, 'linewidth',2)

```

```

79 grid on
   xlabel('t [s]')
81 ylabel('ydd [m/s]')
   title('Accelerazione verticale del centro della ruota')
83
   % 2^ intervallo: tratto che precede il difetto
85
   x1 = 0:0.001:Circ_no_defect/2;    %[m]
87 for ii = 1:length(x1)
   % Traiettoria del centro della ruota
89 y_no_defect_1(ii) = R;
   % Velocità verticale del centro della ruota
91 yd_no_defect_1(ii) = 0;
   end
93
   % 3^ intervallo: Tratto che segue al difetto
95
   x2 = Circ_no_defect/2+l+0.001:0.001:Circ_no_defect+l;    %[m]
97 for ii = 1:length(x2)
   % Traiettoria del centro della ruota
99 y_no_defect_2(ii) = R;
   % Velocità verticale del centro della ruota
101 yd_no_defect_2(ii) = 0;
   end
103
   % Unione dei singoli tratti = Giro completo
105
   X = [x1  Circ_no_defect/2+x  x2];    % [m]
107 Y = [y_no_defect_1  y+R  y_no_defect_2];    % [m]
   Yd = [yd_no_defect_1  yd  yd_no_defect_2];    % [m/s]
109
   % Costruzione del vettore accelerazione
111
   dYd = diff(Yd);

```

```

113 dX = diff(X);
    Ydd = dYd./dX;           % [m/s^2]
115 Ydd = [Ydd(1) Ydd];     % Aggiunta di un valore al vettore, mi
    riporto alla stessa lunghezza dei vettori posizione e velocità

117 % Grafica

119 figure
    plot(X./v,Y,'linewidth',1.5)
121 grid on
    xlabel('t [s]')
123 ylabel('y [m]')

125 figure
    plot(X./v,Yd,'linewidth',1.5)
127 grid on
    xlabel('t [s]')
129 ylabel('yd [m/s]')

131 figure
    plot(X./v,Ydd,'linewidth',1.5)
133 grid on
    xlabel('t [s]')
135 ylabel('ydd [m/s^2]')

137 figure
    subplot(311)
139 plot(X./v,Y,'linewidth',1.5)
    grid on
141 xlabel('t [s]')
    ylabel('y [m]')
143 subplot(312)
    plot(X./v,Yd,'linewidth',1.5)
145 grid on

```

```

xlabel('t [s]')
147 ylabel('yd [m/s]')
    subplot(313)
149 plot(X./v,Ydd,'linewidth',1.5)
    grid on
151 xlabel('t [s]')
    ylabel('ydd [m/s^2]')
153 %%
    % Considero un numero definito di rivoluzioni = Considero il treno
        in moto
155
    N = 1000;                % Numero di rivoluzioni delle ruote
157 t = X(end)./v;          % [s], tempo necessario per
        compiere 1 rivoluzione
    T = N.*t;                % [s], tempo totale per le N
        rivoluzioni
159 val = T./(length(X)*N);  % [s], definisco gli step temporali
    tt = 0:val:X(end)*N/v;  % [s], definizione della base tempi
161 YY = repmat(Y,1,N);     % [m], tramite repmat ripeto N
        volte il vettore Y delle posizioni
    YYd = repmat(Yd,1,N);   % [m/s], tramite repmat ripeto N
        volte il vettore Yd delle velocità
163 YYdd = repmat(Ydd,1,N); % [m/s^2], tramite repmat ripeto N
        volte il vettore Ydd delle accelerazioni
    tt= tt(1:end-1);
165
    % Grafica
167
    figure
169 plot(tt,YY,'linewidth',1.5)
    grid on
171 xlabel('t [s]')
    ylabel('y [m]')
173

```

```

figure
175 plot(tt,YYd,'linewidth',1.5)
    grid on
177 xlabel('t [s]')
    ylabel('yd [m/s]')
179
figure
181 plot(tt,YYdd,'linewidth',1.5)
    grid on
183 xlabel('t [s]')
    ylabel('ydd [m/s^2]')
185
figure
187 subplot(311)
    plot(tt,YY,'linewidth',1.5)
189 grid on
    xlabel('t [s]')
191 ylabel('y [m]')
    subplot(312)
193 plot(tt,YYd,'linewidth',1.5)
    grid on
195 xlabel('t [s]')
    ylabel('yd [m/s]')
197 subplot(313)
    plot(tt,YYdd,'linewidth',1.5)
199 grid on
    xlabel('t [s]')
201 ylabel('ydd [m/s^2]')

203 %%
IND = find(tt>10-val & tt<=10);           % Valutazione dell'indice
    corrispondente ad un certo istante temporale
205 acc_rms = rms(YYdd(1:IND))             % Valutazione dell'RMS dei
    valori di accelerazione fino a quel dato indice

```

```

207 val2= round(length(tt)/find(tt>1-val & tt<=1 ));      %
      Individuazione dell'indice corrispondente all'istante temporale
      t=1s

209 % Valutazione dell'RMS ogni 1s per 200 punti scelti nell'intervallo
      temporale di 1 s

211 for j = 2:val2-1
      acc(j,1) = rms(YYdd(round(linspace(find(tt>(1*(j-1)-val) & tt<=1*(j
          -1)),find(tt>(1*j-val) & tt<=(1*j )),200))));
213 time(j,1) = round(tt(find(tt>1-val & tt<=1 )*j));
      end

215 acc1=round(linspace(0,(find(tt>1-val & tt<=1 )),200));
      acc1 = acc1(2:end);
217 acc1= rms(YYdd(acc1))

219 % Valore RMS complessivo sull'intero insieme di accelerazioni
      mean_acc = mean(acc)
221 y_rms = 0.1*9.81 * ones(length(time),1);

223 %Grafica
      figure
225 plot(time,acc, '-.*', 'linewidth',1)
      grid on
227 xlabel('t [s]')
      ylabel('a_{RMS} [m/s^2]')
229 axis([0 600 0 3.5])
      title ('Confronto Segnale campionato e valore RMS di accelerazione'
          )
231 hold on
      plot(time,y_rms, 'linewidth',1.5)

```

---

# Bibliografia

- [1] Ufficio Studi Confcommercio - Isfort (October 2017) *Analisi e previsioni per il trasporto merci in Italia*
- [2] Corte dei conti europea (2016) *Il trasporto delle merci su rotaia nell'UE non è ancora sul giusto binario*, Relazione speciale n.8
- [3] A. Basili (June 17, 2006) *Il progetto PVTRAIN - Trenitalia S.p.A.*, I progetti sulle energie rinnovabili tra gli impegni di sostenibilità delle Ferrovie dello Stato
- [4] A. Bracciali (April 2012) *Wayside Train Monitoring Systems: A State-of-the-Art and Running Safety Implications*, Dipartimento di Meccanica e Tecnologie Industriali Università degli Studi di Firenze, Italy
- [5] M. Cipelletti (July 3, 2017) *La Digital Transformation a supporto della sicurezza nel trasporto merci su rotaia*, CEMAT Gruppo FS italiane
- [6] M. Jones, J. Southcombe (November 24, 2015) *Track Condition Monitoring using Service Trains*, Perpetuum Ltd AusRAIL PLUS 2015
- [7] R. W. Ngigi, C. Pislaru, A. Ball, F. Gu (2012) *Modern techniques for condition monitoring of railway vehicle dynamics*, 25th International Congress on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering - The Centre for Diagnostic Engineering, University of Huddersfield, Queensgate, Huddersfield, HD1 3DH, UK
- [8] A. Khaligh, P. Zeng, C. Zheng (March 3, 2010) *Kinetic Energy Harvesting Using Piezoelectric and Electromagnetic Technologies?State of the Art*, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 57, NO. 3
- [9] E. Bischur, N. Schwesinger (May 19, 2015) *Electret properties of PVDF film material: Flexible and lightweight energy harvesting device*, Technische Universitaet Muenchen, Arcisstr. 21, Munich, Germany
- [10] C. Li, S. Luo, C. Cole, M. Spiriyagin (March 1, 2017) *An overview: modern techniques for railway vehicle on-board health monitoring systems*, Vehicle System Dynamics International - Journal of Vehicle Mechanics and Mobility
- [11] S. Boisseau, G. Despesse, B. A. Seddik (October 31, 2012) *Electrostatic Conversion for Vibration Energy Harvesting*, LETI, CEA, Minatec Campus, Grenoble, France

- [12] G. De Pasquale, A. Somà, F. Fraccarollo (July 6, 2011) *Piezoelectric energy harvesting for autonomous sensors network on safety-improved railway vehicles*, Department of Mechanics, Politecnico di Torino, Torino, Italy
- [13] G. De Pasquale, N. Zampieri (September 2011) *Progettazione di generatori elettro-meccanici con recupero di energia cinetica vibrazionale a bordo di treni merci*, Politecnico di Torino, Dipartimento di Meccanica, AIAS - ASSOCIAZIONE ITALIANA PER L'ANALISI DELLE SOLLECITAZIONI
- [14] C. Bellini (January 2016) *IoT ANNUAL REPORT - Analisi di un mercato complesso*, The Innovation Group
- [15] X. Liu, M. Rapik Saat, C. P. L. Barkan (2012) *Analysis of Causes of Major Train Derailment and Their Effect on Accident Rates*, Journal of the Transportation Research Board, No. 2289, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2012, pp. 154?163.
- [16] E. Cañete, J. Chen, M. Díaz, L. Llopis, B. Rubio (February 27, 2015) *Sensor4PRI: A Sensor Platform for the Protection of Railway Infrastructures*, ISSN 1424-8220
- [17] V. J. Hodge, S. O'Keefe, M. Weeks, A. Moulds (November 20, 2014) *Wireless Sensor Networks for Condition Monitoring in the Railway Industry: A Survey*, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems (Volume: 16, Issue: 3, June 2015)
- [18] G. Astin (July 21, 2011), *Assessment of freight train derailment risk reduction measures: Part A Final Report*, Report for European Railway Agency, Report No: BA000777/01, Rev: 01
- [19] G. Astin (October 20, 2011), *Assessment of freight train derailment risk reduction measures: Part B Final Report*, Report for European Railway Agency, Report No: BA000777/09, Rev: 02
- [20] A. Schöbel, A. Zarembski, J. Palese, T. Maly (May 30, 2013) *Report on analysis of derailment causes, impact and prevention assessment - Development of the Future Rail Freight System to Reduce the Occurrences and Impact of Derailment D-RAIL*
- [21] M. Robinson, P. Scott, B. Lafaix, G. Kozyr, A. Zarembski, G. Vasic, F. Franklin, B. Gilmartin, A. Schöbel, B. Ripke (April 5, 2012) *Summary report and database of derailments incidents - Development of the Future Rail Freight System to Reduce the Occurrences and Impact of Derailment D-RAIL*
- [22] M. Papaalias, A. Amini, Z. Huang, P. Vallely, D. Cardoso Dias, S. Kerkyras (October 20, 2014) *Online condition monitoring of rolling stock wheels and axle bearings* Birmingham Centre for Railway Research and Education
- [23] Michaël Jozef Matthatias Maria Steenbergen (June 5, 2008) *Online condition monitoring of rolling stock wheels and axle bearings* Delft University of Technology
- [24] J. Brizuela, C. Fritsch, A. Ibáñez (April 20, 2011) *Railway wheel-flat detection and measurement by ultrasound* Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), La Poveda (Arganda del Rey)

- [25] A. Bracciali, G. Cascini (1997) *Detection of corrugation and wheelflats of railway wheels using energy and cepstrum analysis of rail acceleration* Dipartimento di Meccanica e Tecnologie Industriali, University of Florence, Italy
- [26] V. Belotti, F. Crenna, R. C. Michelini, G. B. Rossi (March 9, 2006) *Wheel-flat diagnostic tool via wavelet transform* PMARLab Laboratory of Design and Measurement for Automation and Robotics, DIMEC-Department of Mechanics and Machines Design, University of Genova, Italy
- [27] L. Baeza, A. Roda, J. Carballera, E. Giner (November 7, 2005) *Railway Train-Track Dynamics for Wheelflats with Improved Contact Models* Dpto. Ingenieria Mecanica y Materiales, Universidad Politécnic de Valencia
- [28] T. X. Wu, D. J. Thompson (August 14, 2001) *A hybrid model for the noise generation due to railway wheel flats* Institute of Sound and Vibration Research, University of Southampton, Southampton SO17 1BJ, England.
- [29] V. C. Nagesh (December 2, 2014) *Wheel flat monitoring on freight trains with wireless energy autonomous sensor networks* Master Thesis - Technische Universitat Darmstadt

# Ringraziamenti

A conclusione del percorso di studi effettuato e arrivato a questo ennesimo traguardo fondamentale della mia vita, mi sento in dovere di ringraziare:

- Il Chiar.mo Prof. Ing. Aurelio Somà per la pazienza, i consigli, le motivazioni e gli stimoli fornitomi fin dall'inizio della nostra dapprima conoscenza personale e successiva collaborazione e per lo stage curriculare e per il lavoro di tesi;
- Il Chiar.mo Ing. Marco Mattioli per la disponibilità mostratami nell'accogliermi nella famiglia della Movimatica S.r.l.;
- Il Chiar.mo Ing. Federico Fraccarollo, tutor e responsabile dello stage effettuato presso Movimatica S.r.l., per la dedizione al lavoro, la lealtà e franchezza mostratami nel nostro rapporto di amicizia e collaborazione;
- Mia madre Patrizia e mio padre Andrea che mi hanno permesso di coronare questo sogno, garantendomi il sostegno economico necessario per poter affrontare la vita universitaria al meglio, ma soprattutto quello morale, non smettendo mai di incitarmi e di credere in me;
- Nunzia, ragazza che è riuscita a superare nonostante le grandi difficoltà il peso della lontananza, per il suo affetto, le consolazioni e la sua allegria;
- I miei cari coinquilini Dario, Fabio e Pierluigi per le innumerevoli esperienze provate e vissute insieme. Per la loro fedele amicizia e comprensione nelle difficoltà della vita e del percorso universitario riscontrate e sempre insieme affrontate;
- Gli amici di una vita Adriano, Alessia, Benedetto, Davide, Marco e Nicola presenti in ogni momento e sui quali ho potuto sempre contare in ogni momento;
- Il gruppo studio e la combriccola tutta, in particolare Adina, Riccardo, Vincenzo, Giuseppe, Daniele B., Daniele D., Davide e Bruno, ottimi colleghi nonché grandi amici;
- Tutti quei ragazzi conosciuti durante le ore di lezioni, di esame e di vita all'interno delle aule con cui ho potuto scambiare una parola e confrontarmi.
- Amici, parenti e conoscenti tutti con i quali ho condiviso le gioie di ogni successo e le preoccupazioni e le ansie della carriera universitaria.

**Passione, impegno e determinazione le armi vincenti per raggiungere i propri obiettivi.**