POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria Meccanica, Aerospaziale, dell'Autoveicolo e della Produzione

Corso di Laurea Magistrale in
Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea Magistrale

Analisi Dinamica di una Locomotiva con Carrelli a Tre Assi Mediante Simulazione Multibody

Relatore
Prof. Aurelio Somá
Correlatore
Prof. Nicola Bosso
Tutor Aziendale
Ing. Marco Borlo

Candidato
Davide Vargiu
Matricola
S274010

A.A. 2022/2023

Indice

Introduzione **1**

1 Il Sistema di Trasporto Ferroviario **2**
1.1 Cenni Storici 2
1.1.1 Le Origini 2
1.1.2 In Italia 4
1.2 L'Infrastruttura 7
1.2.1 Rotaia 7
1.2.2 Binario 9
1.2.3 Traversa 9
1.2.4 Organi di attacco 9
1.2.5 Armamento 11
1.2.6 Apparecchi di Deviazione 11
1.2.7 Giunzioni delle Rotaie 12
1.2.8 Massicciata (Ballast) 12
1.2.9 Sovrastruttura Ferroviaria 13
1.2.10 Sottoballast (Sub-ballast) 13
1.2.11 Piattaforma di Posa 13
1.2.12 Banchina 14
1.2.13 Corpo Stradale 14
1.2.14 Scartamento 15
1.2.15 Intervia 16
1.2.16 Sovralzo 16

2 Il Veicolo Ferroviario **17**
2.1 Tipologie 17
2.1.1 Materiale Motore 17
2.1.2 Materiale Rimorchiato 20
2.1.3 Elettrotreni (ETR) 23
2.2 Schemi di Rodiggio 24
2.3 Il Carrello 25

2.3.1 Funzione 25
2.3.2 Tipologie 25
2.3.3 Architettura 28
2.4 La Meccanica della Locomozione 35
2.4.1 Fenomeno dell'Aderenza 35
2.4.2 Equazione 36
2.4.3 Resistenze al Moto 37
2.4.4 Potenza Trasferita alle Ruote Motrici ed Erogata dal Motore 39
2.5 Le Problematiche della Dinamica Ferroviaria 39
2.5.1 Difetti di Linea 39
2.5.2 Serpeggiamento 40
2.5.3 Velocitá Critica 41
2.5.4 Cabraggio 42
2.5.5 Svio 43
2.5.6 Comfort di Marcia 44
2.5.7 Usura di Ruota e Rotaia 47

3 Benchmark sulle Locomotive Odierne 52
3.1 Introduzione 52
3.2 Raccolta Dati 52

4 Simulazione Multibody in Simpack 73
4.1 Descrizione del Modello 73
4.1.1 Locomotiva 73
4.1.2 Carrello 75
4.1.3 Rimorchiate 78
4.1.4 Accoppiatore 79
4.1.5 Rotaie 80
4.1.6 Coefficiente di Attrito Ruota-Rotaia 81
4.1.7 Contatto Ruota-Rotaia 81
4.1.8 Coppia Motrice 83
4.1.9 Resistenza al Moto 83
4.2 Verifica del Comportamento Dinamico della Locomotiva 84
4.2.1 Normative di Riferimento 84
4.2.2 Tracciati di Prova 84
4.2.3 Irregolaritá del Tracciato 88
4.2.4 Velocitá del Convoglio 89

5 Risultati 90
5.1 Introduzione 90
5.2 Comportamento Dinamico della Locomotiva: Analisi 91
5.3 Effetto delle Irregolaritá del Tracciato 95
5.4 Effetto del Convoglio e dell'Accoppiatore 99
5.5 Effetto del Trascinamento Singolo e Doppio 106

Conclusioni 107

Bibliografia **108**

Sitografia **109**

Ringraziamenti **114**

Introduzione

La tesi, "Analisi Dinamica di una Locomotiva con Carrelli a Tre Assi Mediante Simulazione Multibody", si pone come scopo quello di:

- realizzare il modello di una locomotiva (le cui caratteristiche costruttive sono note da una pubblicazione scientifica), con l'ausilio del software per la modellazione multibody "Simpack";
- verificare il comportamento dinamico della stessa, in termini di tendenza al deragliamento;

I contenuti dell'elaborato sono strutturati come segue:

- inizialmente, é stata presentata una panoramica, sul mondo del settore ferroviario, con la descrizione dei suoi aspetti salienti, quali:
  - la storia di questa tipologia di trasporto;
  - l'infrastruttura che lo caratterizza;
- successivamente, nella descrizione, ci si é concentrati su:
  - la tipologia di veicoli esistenti, gli schemi di rodiggio tipici ed il componente carrello;
  - la meccanica della locomozione e quindi la fisica alla base della tematica trattata;
  - le problematiche tipiche di questo settore, a livello dinamico;
- inoltre, é stato svolto un benchmark sulle locomotive attuali con cui si é voluto mettere in evidenza gli standard costruttivi delle stesse;
- in seguito, é stato descritto il lavoro di simulazione svolto, nei suoi passi fondamentali, ovvero:
  - la descrizione del modello sviluppato;
  - la presentazione delle verifiche effettuate;
- infine, sono stati presentati i risultati ottenuti dalla simulazione e la loro relativa analisi.

A valle di questa tesi, sono state esposte le conclusioni, con considerazioni finali.
La tesi in oggetto é stata svolta presso l'azienda Blue Engineering, avente sede a Rivoli.

Capitolo 1

Il Sistema di Trasporto Ferroviario

1.1 Cenni Storici

1.1.1 Le Origini

Le origini della strada ferrata sono da ricercare nel cosiddetto "solco carraio", ideato a Pompei dai Romani intorno al 50 d.C. per assicurare il traffico sulla Via Magna.
Tale solco, mantenendo le ruote dei veicoli entro apposite guide o scanalature realizzate sulla pavimentazione stradale in lastre di pietra, permetteva di migliorare lo scorrimento dei carri e di ridurre lo sforzo dei cavalli.
Guide analoghe comparvero ben presto anche in altre parti dell'impero romano, come attestano le tracce ritrovate in Svizzera, sulla via d'Etraz.
Verso la metà del sedicesimo secolo gli Inglesi, seguiti dai Tedeschi, ripresero il sistema romano nelle loro miniere di carbone fossile.
Ai solchi erano stati sostituiti, in un primo tempo, semplici piste di legno, le quali vennero poi ricoperte con lastre metalliche per rallentarne il logorio, quindi fiancheggiate con tavole per impedire alle ruote di scostarsi dal piano di scorrimento.
Nelle Miniere di New Castle, attorno al 1738, le ruote dei carrelli furono presto provviste di un risalto, il bordino, che aveva lo scopo di guidare la ruota e mantenere il carrrello sulla rotaia anche in presenza di sforzi trasversali notevoli.

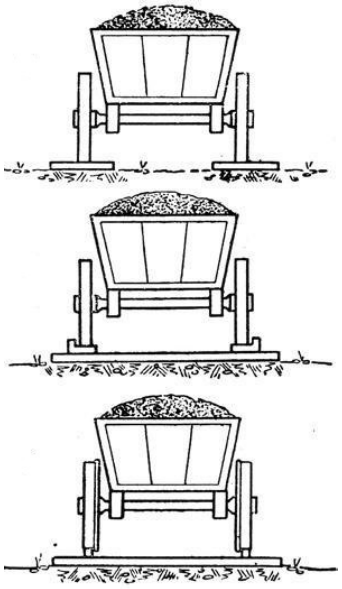

Figura 1.1: Evoluzione del Carrello Ferroviario

É interessante notare che la distanza di circa 1440 mm fra i solchi carrai romani di Pompei differisce di soli 5 mm dallo scartamento di 1435 mm tra le due file di rotaie d'una linea ferro viaria odierna.
Intorno al 1760 l'industria siderurgica inglese subisce una grave crisi di sovrapproduzione, il prezzo del ferro si riduce notevolmente accelerando la sostituzione delle rotaie in legno con quelle in ferro, inizialmente si trattava spesso di piastre di ferro montate sopra rotaie di legno.
L'adozione della rotaia consente di risolvere il problema degli elevati pesi per asse del veicolo e della scarsa guidabilitá dello stesso.
Inoltre ció consente anche di ridurre sensibilmente le resistenze di rotolamento, in questo modo si possono raggiungere velocità maggiori a paritá di potenza installata sulla macchina.
Sulla nascente idea della ferrovia si concentrano interessi industriali per l'epoca enormi: nel 1825 viene costruito un primo tratto di ferrovia tra Stoctkon e Darlinghton e nel 1829 viene bandita una gara per la costruzione delle locomotive per la prima vera e propria ferrovia commerciale tra Manchester e Liverpoll.
A vincerla é George Stephenson con il suo "Rocket" che sbaraglia gli avversari.

Figura 1.2: Locomotiva Rocket

La Rocket era una locomotiva che per prima all'epoca adottava un nuovo sistema caldaia-scappamento.
La caldaia era di tipo tubolare con venticinque tubi surriscaldati dal focolare, con forno e griglia separati, che permettevano alla macchina di fornire maggiore potenza e soprattutto miglior rendimento.
L'Inghilterra, all'avanguardia nel campo ferroviario, vide superare per la prima volta la velocitá di 100 km/h nel 1835, sulla linea Manchester-Liverpool.
Lo scartamento di quattro piedi e otto pollici e mezzo, ovvero 1435 mm, scelto da George Stephenson quando costruì la prima linea ferroviaria fra le due piccole città inglesi di Darlington e Stoctkon, era stato dettato dalla larghezza dei carrelli a mano utilizzati allora nelle miniere di carbone.
La ferrovia e la macchina a vapore si diffondono rapidamente in tutta Europa facilitando il trasporto di beni e persone e lo sviluppo di nuove iniziative industriali.

1.1.2 In Italia

Giá nel 1839 viene inaugurata in Italia la prima linea ferroviaria: la Napoli-Portici.
La costruzione della Napoli-Portici prende le mosse nel 1836, su proposta della societá francese Bayard, intesa a realizzare un collegamento da Napoli a Nocera, con diramazione da Torre Annunziata per Castellammare di Stabia, per una lunghezza di circa 40 km.
Il progetto della societá francese, costituita dall'Ingegnere Armando Giuseppe Bayard, si propose l'obiettivo di compiere i lavori in sei anni, con i capitali di una costituenda società per azioni, utilizzando la manodopera locale.
Il progetto proposto trovó il consenso di Ferdinando II ed il 5 ottobre del 1836 fu firmata la convenzione definitiva mentre, il 5 luglio 1838, dopo aver reperito i capitali necessari, iniziarono i lavori del primo tratto Napoli-Torre del Greco.
La linea, tra Napoli e Torre del Greco, incontrava nel suo percorso la stazione del

Granatello di Portici, per poi proseguire per il Forte Colostro, ove fu aperta una fermata provvisoria, e giungere infine a Torre del Greco.
Nel corso degli anni grazie allo sviluppo tecnologico vengono introdotte numerose innovazioni e migliorie nella locomotive a vapore.
Lo sviluppo delle ferrovie italiane dopo il 1839 é strettamente legato alle vicende politiche della Nazione.
Dalla costruzione della Napoli-Portici e fino al 1885 furono circa una ventina le società ferroviarie che ottennero la concessione per la realizzazione di una strada ferrata, situazione che comportava notevoli disagi per i passeggeri e le merci a causa delle complicazioni tariffarie, degli orari e delle coincidenze.
Sin dai primi anni dall'Unità d'Italia nacque così l'esigenza di ridurre il numero delle concessioni e di accorpare la gestione delle linee ed in virtù di ció si costiuirono le societá SFAI (Strade Ferrate dell'Alta Italia), SFR (Strade Ferrate Romane) e la Societá delle Strade Ferrate Vittorio Emanuele che comprendeva anche la Rete Sicula e la Calabra.
Successivamente, nel 1885, con un ulteriore riordino, furono accorpate anche le societá rimaste escluse in precedenza e l'esercizio ferroviario italiano fu tale da risultare ripartito fra tre grandi societá: la RM (Rete Mediterranea), la RA (Rete Adriatica) e la già citata SFR.
L'1 luglio 1905, dopo lunghi anni di ricerche e dibattiti parlamentari e in uno stato di salute sempre più precario per le societá esercenti, lo Stato abbandonava le convenzioni con le società private che gestivano le reti Mediterranea, Adriatica e Sicula ed assumeva la titolarità delle ferrovie.
Nascevano cosí le Ferrovie dello Stato e con la nazionalizzazione delle ferrovie prendeva il via un imponente programma di rinnovamento, volto al miglioramento della tecnologia e del comfort di viaggio, nel quale furono coinvolte anche le aziende italiane Ansaldo e Breda.

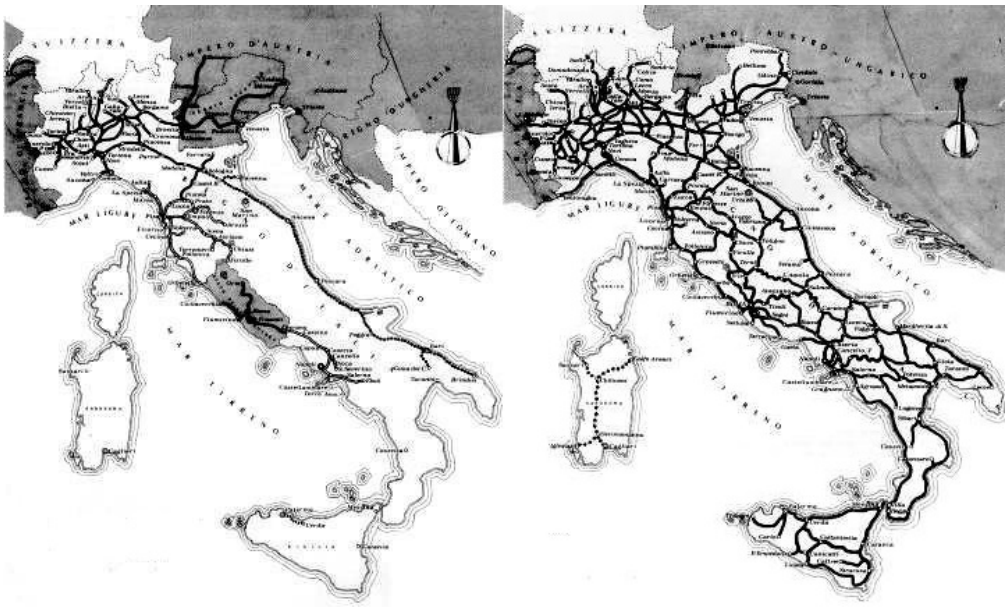

Figura 1.3: Evoluzione della Rete Ferroviaria Italiana tra il 1855 e il 1905

L'aspetto di gran lunga più rilevante del periodo, peró, fu il vasto piano di elettrificazione della rete, che pose l'Italia all'avanguardia europea in questo campo. I numerosi problemi determinati dalla trazione a vapore indussero a ricercare un tipo diverso di energia.
Si svilupparono ricerche sull'elettrificazione delle linee giá nel 1899, realizzando esperimenti con i sistemi ad accumulatori e a terza rotaia in corrente continua.
Sulla linea della Valtellina venne realizzato un intervento che si dimostrò subito molto vantaggioso: la linea venne elettrificata usando corrente alternata trifase a 3000 V.
Si decise di elettrificare allo stesso modo anche la linea dei Giovi, dove venivano affrontate pendenze del 35 ‰ provvedendo nel contempo a progettare una motrice elettrica, la FS E550.

Figura 1.4: La Motrice Elettrica FS-E550

Con il programma di elettrificazione, inoltre, si passó dai 450 chilometri elettrificati della fine della Prima Guerra Mondiale ai 1200 km del 1928, fino a raggiungere, nel 1940, un totale di 5170 km.
Il programma di elettrificazione aveva privilegiato i collegamenti internazionali con Francia, Austria e Svizzera, tagliando fuori quasi del tutto il Sud del Paese.
Prima della guerra, nel 1940, la rete ferroviaria statale era di oltre 17000 km, venivano trasportati 194 milioni di passeggeri e circa 60 milioni di tonnellate di merci, dati destinati ad aumentare nei primi anni di conflitto per la progressiva scomparsa dei carburanti per auto e camion.
All'inizio degli anni Ottanta, il forte squilibrio a favore della gomma aveva segnato per l'Italia un poco invidiabile record: per andare da una cittá all'altra, 85 persone su 100 si spostavano in auto, mentre solo 12 prendevano il treno.
All'estero, intanto, e soprattutto in Francia e Germania l'Alta Velocità diventava una realtà.

1.2 L'Infrastruttura

Il trasporto su rotaia é a guida vincolata.
É impiegato su distanze brevi (trasporto urbano e metropolitano), medie (trasporto pubblico locale e regionale) e medio-lunghe (intercity, eurostar e treni ad alta velocità).
La regolazione della marcia non é "a vista", come per il trasporto stradale, ma su sistemi di segnalamento, che consentono un'elevata sicurezza della marcia.
Lo sforzo di trazione nel contatto ruota-rotaia, in pianura, su ferro, é circa 1/5 rispetto a quello su gomma, essendo l'aderenza tra ruota e rotaia molto minore rispetto a quella tra ruota gommata e strada.
La bassa aderenza ruota-rotaia impedisce di ottenere in ferrovia lo stesso sforzo di frenatura raggiungibile su strada.
Per questo motivo, nelle ferrovie, le distanze per l'arresto risultano sempre molto maggiori di quelle stradali, ad esempio a 100 km/h oltre 600 m contro 150 m e, normalmente, maggiori dello spazio di visuale libera.
Ciononostante, la ferrovia é un sistema di trasporto caratterizzato da bassi valori delle resistenze all'avanzamento.
Esso é quindi un sistema a elevato rendimento perché permette il trasporto di notevoli quantitá di carico utile per unità di sforzo di trazione.
Si riportano, a seguire, gli elementi caratteristici dell'infrastruttura ferroviaria.

1.2.1 Rotaia

É l'elemento d'acciaio che costituisce il supporto e la guida del veicolo; la sua parte superiore, sulla quale avviene il moto delle ruote, prende il nome di superficie di rotolamento.
Per realizzare una maggiore aderenza, le rotaie sono montate inclinate sul piano di appoggio di 1/20 (Italia e Francia) o 1/40 (Germania) di radiante, in modo da avere una maggiore superficie di contatto fra rotaia e ruota.

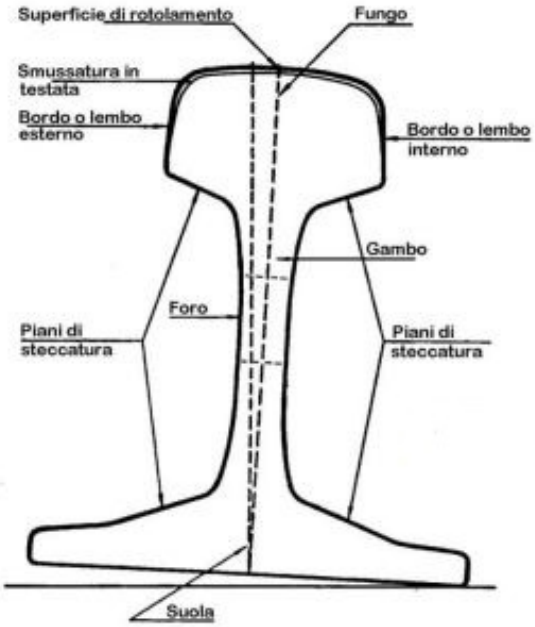

Figura 1.5: Elementi Caratteristici di una Rotaia

Esistono differenti tipologie di rotaie tra cui, la piú impiegata, quella con profilo Vignole, denominata UIC-50 (5 tonnellate al metro lineare, equivalente alla denominazione UNI-50) o UIC-60 (6 tonnellate al metro lineare, equivalente alla denominazione UNI-60).
Sono prodotte mediante un processo di colata continua che origina un blumo rettangolare in seguito laminato a caldo e trattato termicamente.
La rotaia é in seguito raddrizzata e finita mediante operazioni meccaniche.
L'acciaio impiegato é ad alto tenore di carbonio (tipicamente 0.6%-0.8%) con elevati tenori di Manganese (0.8%-1.2%), Silicio (0.15%-1%) e talvolta Cromo (1%-1.2%) per ridurre l'usura.
La caratteristica forma a doppio "T" permette di resistere efficacemente agli sforzi di flessione.

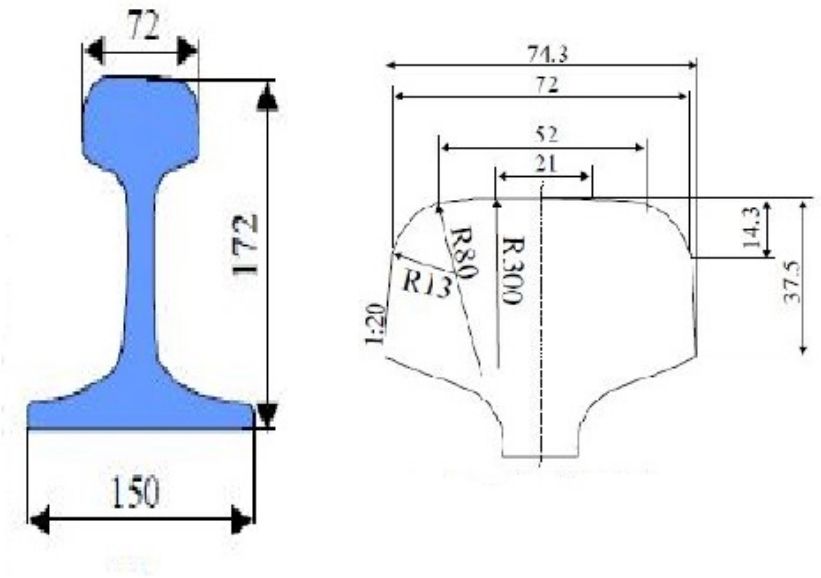

Figura 1.6: Rotaia Vignole UIC-60

1.2.2 Binario

É l'insieme delle due rotaie ed il piano tangente alla sommitá di esse prende il nome di piano del ferro (p.d.f.).

1.2.3 Traversa

É l'elemento su cui sono fissate le rotaie; possono essere in acciaio, in legno e in cemento armato semplice o precompresso.
Le traverse sono tra loro distanziate di una quantità da cui dipende la capacità di carico della linea.

1.2.4 Organi di attacco

Sono i dispositivi che consentono il collegamento delle rotaie alle traverse.
Il fissaggio puó essere:

- rigido, avviene mediante speciali viti dette caviglie e a sua volta é classificabile in:
  - diretto, senza interposizione di piastra intermedia;

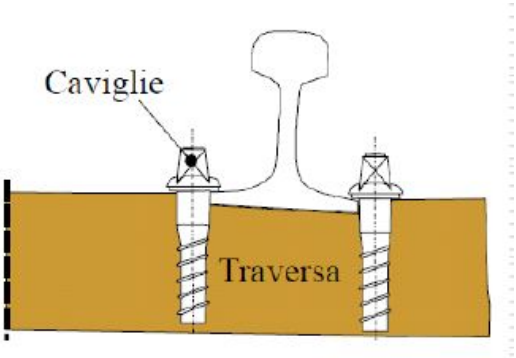

Figura 1.7: Fissaggio Rigido Diretto

– indiretto, mediante una piastra intermedia cui la rotaia é fissata con delle piastrine intermedie.

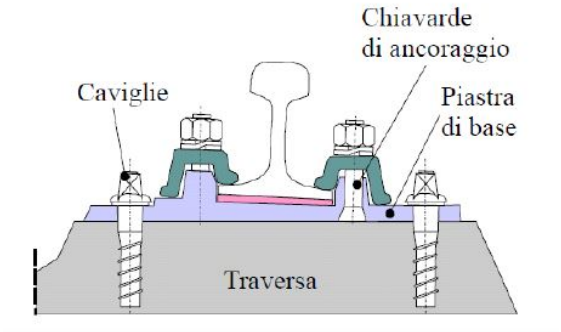

Figura 1.8: Fissaggio Rigido Indiretto

- elastico, con lo sviluppo delle traverse in cemento, che presentano migliori prestazioni in termini di massa, stabilitá e rigidezza, si sono però incontrati problemi legati alla fragilità del materiale specialmente nei punti di attacco delle caviglie.
  Si sono riscontrate rotture per via dei carichi impulsivi in corrispondenza degli attacchi e della superficie di appoggio.
  Per risolvere il problema sono stati sviluppati degli attacchi elastici in grado di compensare con la loro flessibilità la rigidezza della traversa.
  Sotto la piastra di base si inserisce, inoltre, uno spessore di materiale polimerico.

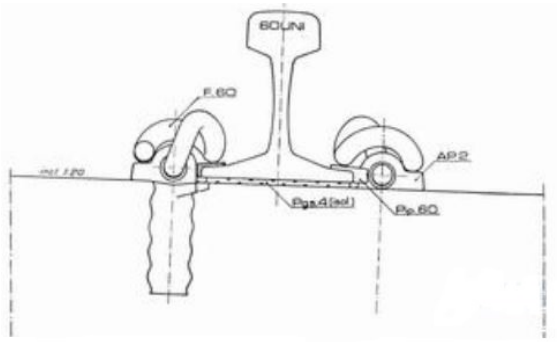

Figura 1.9: Fissaggio Elastico con Attacchi di Tipo Pandrol

1.2.5 Armamento

É l'insieme di rotaie, traverse ed organi di attacco.

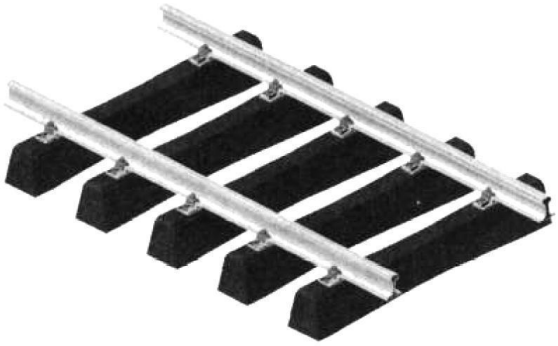

Figura 1.10: Armamento

1.2.6 Apparecchi di Deviazione

Sono dispositivi di armamento che consentono di variare la direzione del moto, con conseguente sviluppo di itinerari.

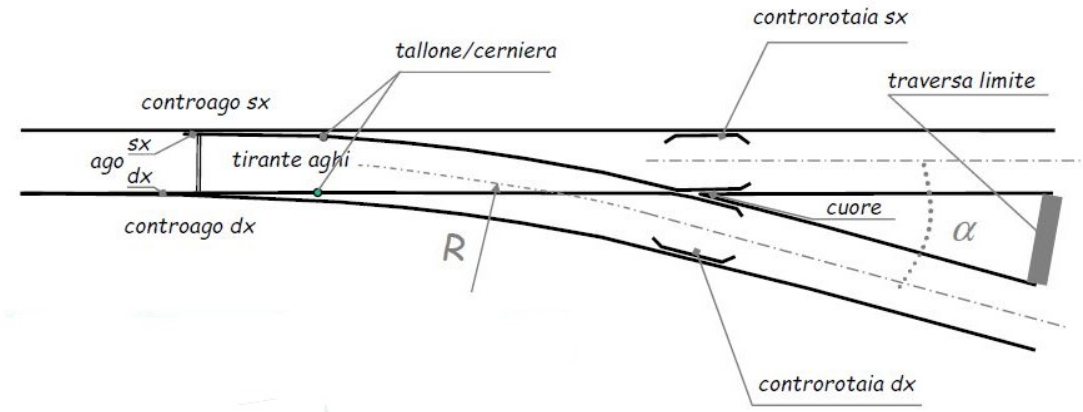

Figura 1.11: Apparecchi di Deviazione

1.2.7 Giunzioni delle Rotaie

Le rotaie un tempo venivano fissate in testa con sistemi smontabili.
Attualmente sono saldate in testa in modo continuo e pretensionate per evitare fenomeni di buckling.
Talvolta le rotaie sono disgiunte per mezzo di giunti che ne mantengono l'isolamento reciproco per interposizione di un elemento isolante.
Ciò é necessario per realizzare i sistemi di segnalamento e localizzazione del veicolo.

Figura 1.12: Giunzioni delle Rotaie

1.2.8 Massicciata (Ballast)

É lo strato di pietrisco sul quale poggiano le traverse ed ha il compito di:

- distribuire i carichi verticali sul piano di regolamento del corpo stradale;
- assicurare al binario le condizioni geometriche di progetto;
- assorbire gli sforzi indotti nel binario dalla circolazione dei treni;
- assorbire gli sforzi indotti nel binario dalle variazioni di temperatura;
- costituire un drenaggio delle acque meteoriche;
- conferire al binario elasticitá;
- realizzare un filtro tra binario ed ambiente nei confronti dei fenomeni vibrazionali.

La presenza della massicciata, permeabile, insieme alla conformazione a schiena d'asino del piano di regolamento, garantisce che le traverse vengano a trovarsi in ambiente asciutto, il che prolunga la loro durata in opera (soprattutto se in legno).
La sezione di una massicciata ha forma trapezoidale ed é costituita dalle seguenti parti:

- cassonetto (in rosso), che é la parte in cui sono annegate le traverse;
- unghiatura (in giallo), che é la parte a sezione triangolare della massicciata;

- ciglio della massicciata, l'uno o l'altro degli spigoli superiori;
- piede dell'unghiatura, l'uno o l'altro degli spigoli tra unghiatura e banchina pedonale.

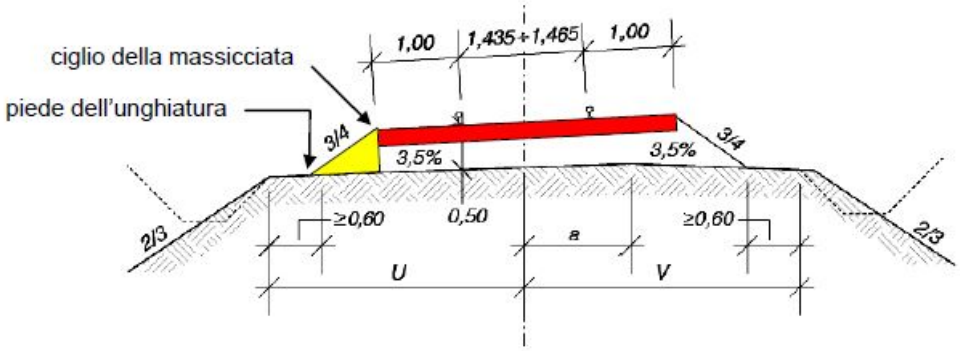

Figura 1.13: Massicciata di una Ferrovia a Scartamento Normale

In relazione allo spessore h della massicciata, misurato sotto la rotaia più bassa, si distinguono due tipi di linee denominate "A" quando h=50 cm e "B" quando h=35cm.
Le linee di tipo "A" sono quelle di grande comunicazione, mentre le "B" sono riservate alla rete secondaria.

1.2.9 Sovrastruttura Ferroviaria

É l'insieme di massicciata e armamento.

1.2.10 Sottoballast (Sub-ballast)

Sono strati di fondazione, in genere formati da materiali legati al bitume o a cemento, interposti tra la massicciata e la piattaforma di posa; sono sempre presenti nelle nuove linee ad alta velocità.
L'inserimento dello strato di sub-ballast aumenta la rigidezza dell'intera sovrastruttura, garantisce una minore deformabilità e in definitiva una maggiore durata.

1.2.11 Piattaforma di Posa

É detta anche piattaforma stradale, piano di regolamento o piano di formazione e rappresenta il terreno su cui poggia la sovrastruttura ferroviaria, per lo spessore entro cui sono misurabili gli effetti prodotti dal passaggio dei veicoli (variabile, in genere, fra 30 cm e 1 metro).
La piattaforma é costituita da due piani inclinati, spioventi verso l'esterno, per facilitare lo scolo delle acque; l'inclinazione delle falde è del 3,5 % o del 3 % se esiste uno strato di sub-ballast.

In rettifilo l'intersezione delle falde (monta della piattaforma) avviene in asse al corpo stradale; in curva, invece, la monta è spostata verso l'esterno della curva se la linea é a semplice binario e verso l'interno se la linea é a doppio binario: in tal modo si realizza un risparmio di materiali nella formazione degli strati superiori. La larghezza della piattaforma é funzione dello scartamento, dell'intervia, del numero dei binari, del sovralzo e dello spessore degli strati superiori.

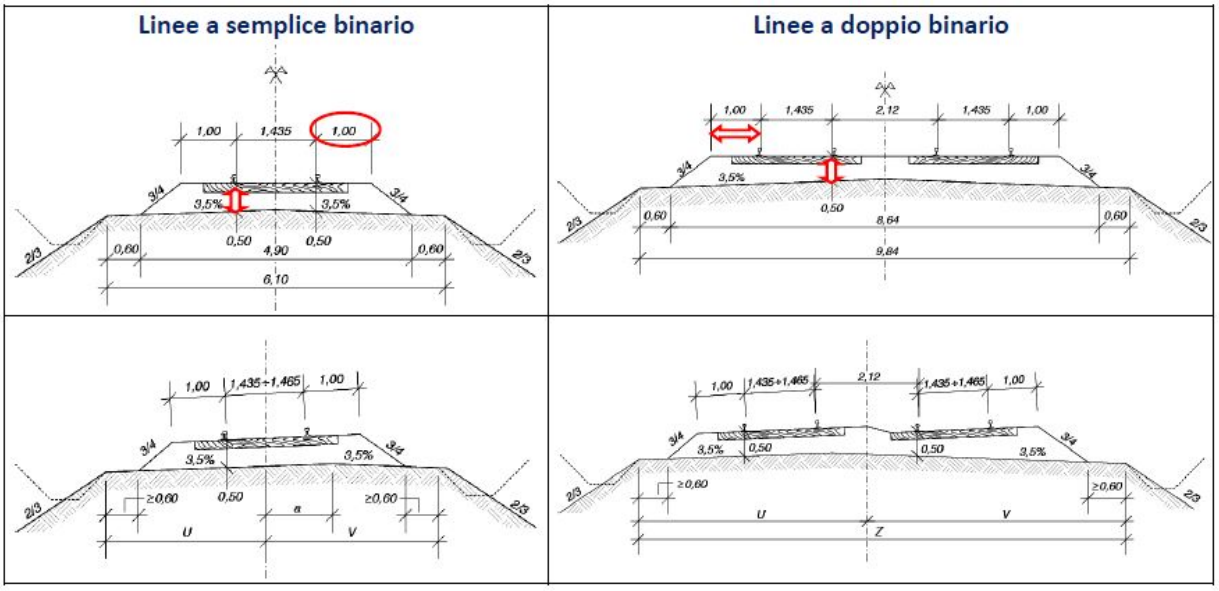

Figura 1.14: Sezioni Ferroviarie a Semplice e Doppio Binario, in Rettifilo e in Curva, Relative ad una Ferrovia a Scartamento Normale

1.2.12 Banchina

Sono le parti estreme della piattaforma di posa, destinate al transito pedonale di servizio.

1.2.13 Corpo Stradale

É il solido geometrico delimitato dalla piattaforma di posa, dalle scarpate dei rilevati o delle trincee (o da eventuali muri di sostegno), dalla superficie del terreno e dalle sezioni trasversali terminali del tronco che si considera.

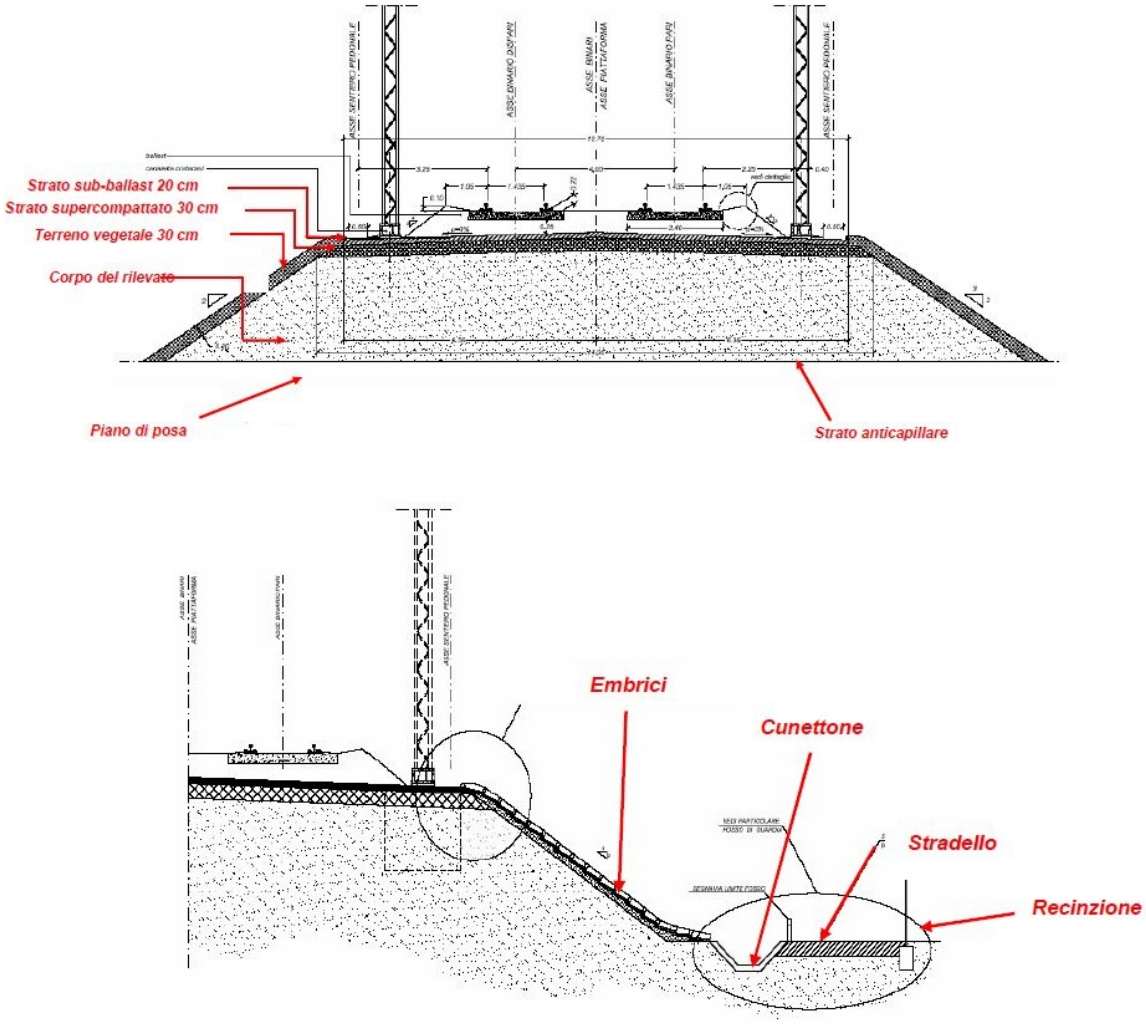

Figura 1.15: Corpo Stradale

1.2.14 Scartamento

É la a distanza tra le due rotaie del binario, misurata tra le facce interne delle rotaie a 14 mm dal p.d.f.
Gli scartamenti usati dalle varie amministrazioni ferroviarie sono numerosi e diversi tra loro, sono variabili da 0,60 m a circa 1,70 m.
In Italia il valore dello scartamento è di 1,435 m ed è comunemente chiamato scartamento ordinario o normale; tale misura vale per i rettifili e per le curve di grande raggio ($R > 485$ m, per le F.S.), in quelle di piccolo raggio si provvede ad un leggero aumento dello scartamento che viene portato fino ad un massimo di 1,465 m ($R < 300$ m, per le F.S.).
Per le ferrovie secondarie è comunemente adottato uno scartamento ridotto pari a 0,95 m, in rettifilo.

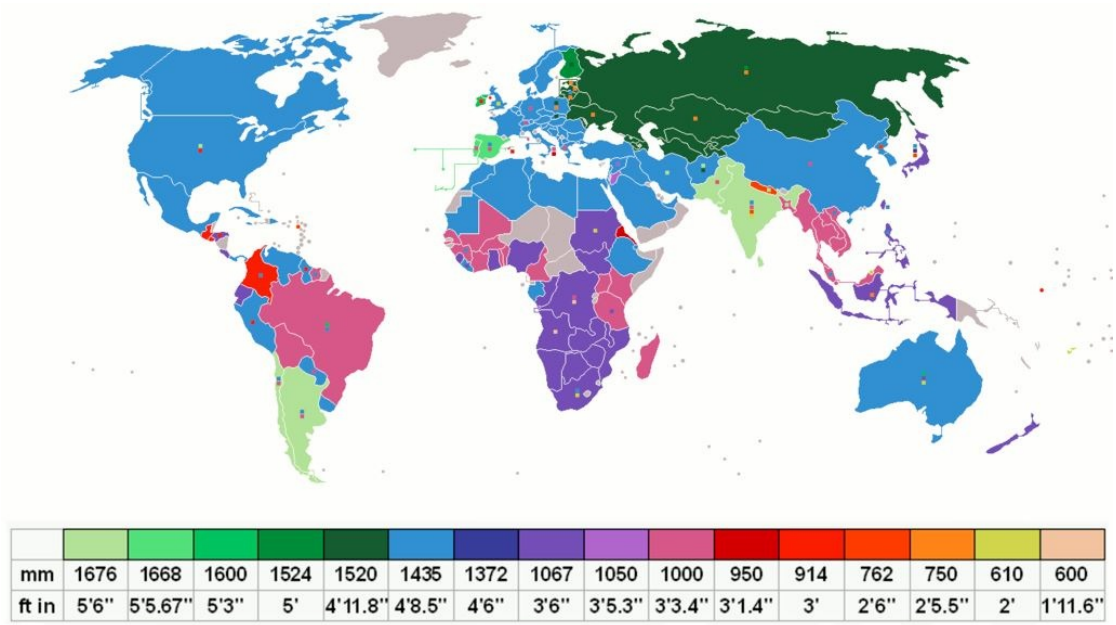

Figura 1.16: Mappa degli Scartamenti Diffusi nel Mondo

1.2.15 Intervia

É la distanza tra i bordi interni di due rotaie appartenenti a due distinti binari.
Relativamente alle F.S., l'intervia é fissato a 2,12 m in rettifilo, con maggiorazioni in curve di piccolo raggio;
nelle stazioni l'intervia minimo è di 2,50 m per permettere il passaggio di una persona tra due convogli affiancati;
per le nuove linee ad alta velocità il valore dell'intervia è stato portato a 2,567 m, per contenere entro limiti accettabili le sovrapressioni che si manifestano al passaggio dei convogli.

1.2.16 Sovralzo

É la sopraelevazione della rotaia esterna, rispetto all'interna, che si realizza in corrispondenza delle curve per ridurre gli effetti della forza centrifuga ed i pericoli di svio di una ruota o di ribaltamento del veicolo.
Il suo valore massimo ammissibile, per uno scartamento normale, é fissato a 16 mm

Capitolo 2

Il Veicolo Ferroviario

2.1 Tipologie

I veicoli ferroviari o materiale rotabile sono suddivisi in tre macrocategorie:

- materiale motore, in grado di muoversi da se;
- materiale rimorchiato, il quale viene trainato;
- elettrotreni (ETR).

2.1.1 Materiale Motore

Esso comprende locomotive e automotrici.

Locomotiva

É l'elemento che pone in movimento il convoglio ed in base al tipo di alimentazione sono classificabili in:

- a vapore (non piú usate);
- elettriche;
- Diesel;
- "Dual", con alimentazione sia elettrica che Diesel.

In base alla funzione, invece, sono classificabili in:

- di linea;
  - per servizi veloci;
  - per servizi pesanti;
  - universali;
- di manovra.

Figura 2.1: Locomotiva Elettrica/Diesel Stadler Euro9000

La locomotiva "ideale" deve poter fornire, in entrambi i sensi di marcia, dall'arresto alla velocitá massima consentita, uno sforzo di trazione non inferiore rispetto a quello consentito dall'aderenza; essa deve avere, quindi, un sistema di regolazione che le consenta anche di funzionare con velocitá e sforzi di trazione inferiori ai massimi.

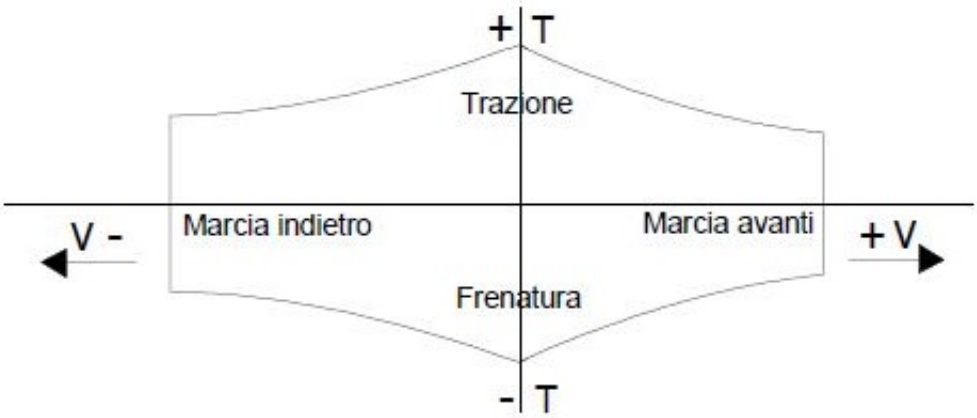

Figura 2.2: Caratteristica Meccanica di una Locomotiva "Ideale"

Nella realtá, invece, la caratteristica meccanica della locomotiva assume un andamento del tipo:

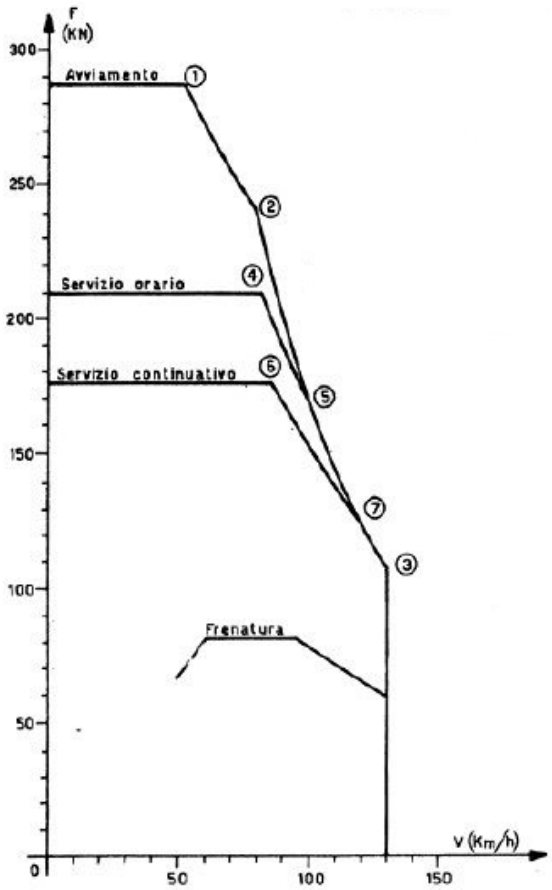

Figura 2.3: Caratteristica Meccanica Reale di una Locomotiva

- Un primo fattore che limita la velocitá é la potenza massima W che, in caso di locomotive elettriche che captano energia da una linea di contatto, dipende da: organi di presa di corrente, sezione dei cavi, elementi di elettronica di potenza e limiti termici dati dalla dissipazione di calore.
  Il calore sviluppato in parte viene disperso all'esterno e in parte aumenta la temperatura della macchina.
  Quando la temperatura di una parte della locomotiva ha raggiunto la temperatura limite oltre cui si avrebbe pericolo di danneggiamenti, il calore prodotto deve essere tutto dissipato all'esterno.

- La potenza a regime, corrispondente a una produzione di calore che puó essere evacuata col massimo salto di temperatura ammesso tra motore e ambiente esterno, si definisce potenza continuativa.
  Se la macchina non ha raggiunto la temperatura limite, il motore puó sviluppare una potenza maggiore delle potenza continuativa in quanto una parte del calore prodotto puó essere assorbito dalla massa termica della macchina.

- La potenza che una macchina a temperatura ambiente puó sviluppare fino a raggiungere, dopo un'ora, la temperatura limite si definisce potenza oraria.

- Analoga é la definizione di potenza semioraria e di potenza istantanea.

Automotrice

Si tratta di veicoli adatti al trasporto passeggeri, dotati di impianto motore.
L'estensione del trasporto con automotrice é locale poiché esse hanno caratteristiche non idonee al servizio internazionale.
In Italia furono sperimentate automotrici a vapore, a benzina (ALb), Diesel (ALn) ed elettriche (ALe); tali motrici sono state usate in convogli ridotti (max 6 veicoli), normalmente costituiti da una automotrice, una rimorchiata e una rimorchiata pilota.

Figura 2.4: Automotrice "Vulcano", della F.C.E.

2.1.2 Materiale Rimorchiato

Esso comprende carrozze, carri e rimorchi.

Carrozza

É un veicolo ferroviario non indipendente adibito al trasporto dei viaggiatori, inserito in numero variabile nella composizione dei treni.
Oltre agli ambienti destinati alla permanenza dei viaggiatori (generalmente seduti ma in certi treni é previsto che possano effettuare tutto il viaggio in piedi), puó comprendere una serie di servizi come le toilette, gli impianti di climatizzazione, aree bagagli e ristoro.
Tra le carrozze è presente una passerella, detta "intercomunicante", che permette il passaggio dei viaggiatori e del personale ferroviario da una carrozza all'altra, proteggendoli dagli agenti atmosferici e dalla possibilità di caduta all'esterno mediante mantici a soffietto sulle carrozze più antiquate e di tipo tubolare su quelle più moderne.

Carro

Si indicano quei veicoli ferroviari (chiamati anche vagoni) trainati da una locomotiva e destinati al trasporto delle merci o a usi di servizio.
Realizzati nel corso dei decenni, in vari tipi, a seconda delle merci trasportate, i carri merci sono generalmente di proprietà di detentori, aziende specializzate nel noleggio di questo tipo di rotabili, dei clienti finali del trasporto o delle imprese ferroviarie.
Possono essere costruiti con struttura più o meno rigida a seconda della tipologia, quelli con struttura più rigida sono i carri serbatoio ed i carri tramoggia.
In base alla struttura, sono classificabili in:

- semplici;
- articolati, con uno snodo centrale;
- accoppiati o complessi, composti dall'unione di due semicarri.

Quelli destinati al trasporto di merci, in base alla funzione, sono classificabili in:

- carro per merce varia, chiuso, con porte laterali di carico e scarico; recentemente hanno cominciato a diffondersi anche i vagoni con pareti laterali scorrevoli in sostituzione delle porte centrali fisse, migliorando la capacitá di carico e scarico delle merci su pallet;
- carro per merce lunga, aperto in alto, eventualmente accessoriato con sponde di varia altezza o con piantoni fermacarico.
  Viene usato per il trasporto di materiali caricabili dall'alto (es. tronchi d'albero e barre di acciaio).
  Puó essere fornito di teli semirigidi per la protezione del materiale trasportato;
- carro a temperatura controllata, tipo "interfrigo".
  É fornito di appositi compressori e grazie alle pareti coibentate consente di controllare la temperatura interna durante il trasporto, evitando di interrompere la catena del freddo nel caso di trasporti alimentari, oppure di evitare il gelo ai materiali a esso sensibili durante i mesi più freddi dell'anno;
- carro a tramoggia, consente il carico di merci sfuse dall'alto e il loro scarico tramite ribaltamento laterale del vagone stesso.
  Viene utilizzato per il trasporto di materie prime come ad esempio il carbone;
- carro cisterna, o carro serbatoio, adatto al trasporto di merci liquide, il cui esempio più classico è quello relativo ai derivati del petrolio; é fornito di appositi bocchettoni per il carico nella parte superiore e di uno o più scomparti divisori interni;
- carro silo, come per il precedente ma per merci polverose e granulari;

- carro bisarca, per trasporto di auto.
  È in genere formato da due livelli di carico, accessoriato con rampe alle estremità per consentire un agevole carico e scarico;

- carro porta-container, é un vagone fornito di semplice piano di appoggio ma con agganci specifici per i container;

- carro ultrabasso, utilizzato per il trasporto di autosnodati o autotreni con rimorchio; ha ruote di diametro ridotto onde ottenere un piano di carico molto più basso rispetto agli altri tipi di vagoni il che permette di trasportare gli autocarri rientrando nei limiti di sagoma prescritti;

- carro siluro o carro siviera, contenitori a forma allungata rivestiti internamente di materiale refrattario, all'interno dei quali viene colata la ghisa fusa per il trasferimento in acciaieria.

Quelli destinati ad uso di servizio, in base alla funzione, sono classificabili in:

- carro riscaldo, é un particolare vagone ferroviario che viene agganciato ad una locomotiva al fine di ottenere il riscaldamento invernale delle carrozze ferroviarie di un treno;

- carro soccorso, é un particolare vagone ferroviario attrezzato, classificato tra i carri di servizio, che in genere viene agganciato ad altri carri soccorso e ad una locomotiva al fine di ottenere un treno di pronto intervento atto a risolvere inconvenienti di esercizio come guasti in linea, deragliamenti o incidenti ferroviari;

- carro scudo, é un carro ferroviario interposto tra la motrice ed il carico trainato.
  È obbligatoriamente previsto, in alcuni casi, dalla normativa per sicurezza.
  Per le merci di alcuni tipi, quali esplosivi ed infiammabili liquidi, solidi o gassosi vi é l'obbligo di distanziamento dei carri che le trasportano dalla motrice, per evitare che le scintille generate dal pantografo possano finire sui carri.
  Per analoga ragione, il carro scudo é usato tra il locomotore ed i carri per il trasporto delle automobili (nuove), per evitare il danneggiamento delle carrozzerie dei veicoli trasportati.
  Un ulteriore utilizzo é quello di interporre, tra motrice e i carri con carichi impegnativi, dei carri pianale vuoti come "distanziatori", per permettere di percorrere ponti ferroviari che non ammetterebbero il carico complessivo di motrice e carri pesanti.
  Una diversa funzione dei carri-scudo é quella di permettere, ad una motrice, di trainare un convoglio dotato di diverso sistema di accoppiamento.

Figura 2.5: Carro per Trasporto Merce, della Mercitalia Rail

Rimorchio

I rimorchi, adibiti al trasporto merci, sono veicoli del tipo raffigurato come segue.

Figura 2.6: Rimorchio Portabobbine della GCF

2.1.3 Elettrotreni (ETR)

L'elettrotreno è un treno a propulsione elettrica con trazione distribuita, generalmente a marcia reversibile, a composizione bloccata, eventualmente articolata.
Solitamente un elettrotreno é in grado di comporre convogli di più unitá dello stesso tipo collegate tra loro per le funzioni di marcia, apertura porte, etc. e pilotate dalla cabina dell'unità di testa.
La trazione distribuita, elemento discriminante di questo tipo di treno rispetto a un normale treno a trazione anteriore o posteriore tramite locomotiva elettrica, viene solitamente realizzata tramite un numero variabile di assi motorizzati ripar-

titi lungo il convoglio.
Talvolta vengono classificati "elettrotreni" anche i convogli che utilizzano due locomotive elettriche, poste una in testa e l'altra in coda, simultaneamente attive nel trainare e spingere le carrozze non motrici tra esse interposte; in questo caso, simile più a un treno convenzionale, si parla di doppia trazione simmetrica (DTS), che però è poco efficace nella riduzione del carico assiale massimo.

Figura 2.7: Elettrotreno della F.S.E.

2.2 Schemi di Rodiggio

La disposizione degli assi dei rotabili é indicata come rodiggio; il loro numero dipende dal peso totale: le carrozze hanno peso per asse dell'ordine di 10 ton/asse; i carri merci e le locomotive raggiungono valori di 20 ton/asse.
L'identificazione del rodiggio è diversa a seconda della normativa usata (UIC/AAR).

- si usano numeri per assi portanti e lettere per gli assi motori (A=1 asse, B=2 assi, C=3 assi);
- é presente un carrello per ogni lettera maiuscola;
- se gli assi di un carrello ruotano in modo indipendente si aggiunge una "o" altrimenti se sono vincolati si aggiunge una "o' ".

A seguire, vengono presentati gli schemi di rodiggio tipici di una locomotiva (secondo la classificazione UIC):

- B-B, due carrelli a due assi, ogni carrello é collegato ad un motore;
- B0-B0, due carrelli a due assi, ogni asse é collegato ad un motore;
- 2-B-0, due carrelli a due assi, uno portante e l'altro con gli assi collegati ognuno ad un motore;
- B-B-B, tre carrelli a due assi, ogni carrello é collegato ad un motore;

- B0-B0-B0, tre carrelli a due assi, ogni asse é collegato ad un motore;
- C-C, due carrelli a tre assi, ogni carrello é collegato ad un motore;
- C0-C0, due carrelli a tre assi, ogni asse é collegato ad un motore.

2.3 Il Carrello

2.3.1 Funzione

Il carrello é quel componente di un veicolo ferroviario che comprende il rodiggio e la struttura portante ad esso connessa.
Il carrello deve:

- trasmettere al rotabile gli sforzi di trazione e frenatura che si sviluppano nel contatto ruota-rotaia;
- lasciare libertá di movimento alla cassa, ed in particolare la rotazione relativa all'asse verticale;

L'impiego dei carrelli nei rotabili permette tre grandi vantaggi:

- nessun limite teorico alla lunghezza di carrozze e locomotive;
- buon comfort di marcia per macchinista e passeggeri;
- ridotte sollecitazioni al binario.

2.3.2 Tipologie

Numero di Assi

I carrelli vengono distinti, principalmente, in base al numero di assi, in:

- carrelli a due assi;

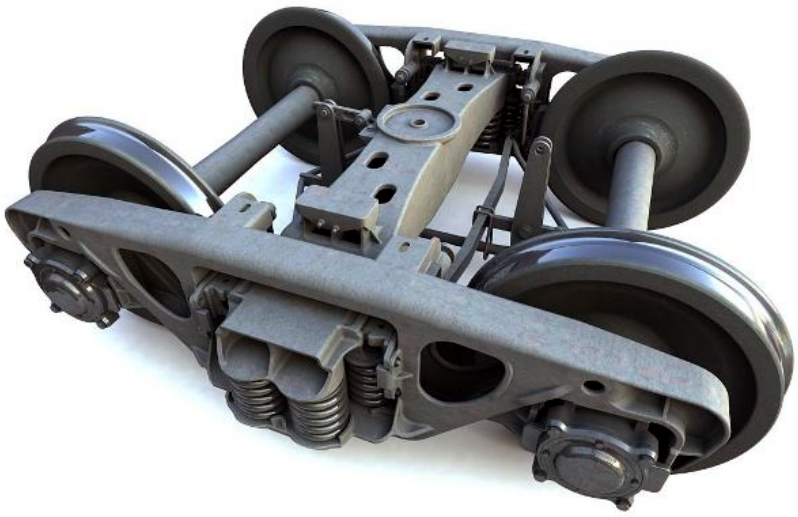

Figura 2.8: Carrello a Due Assi, modello Y25

- carrelli a tre assi.

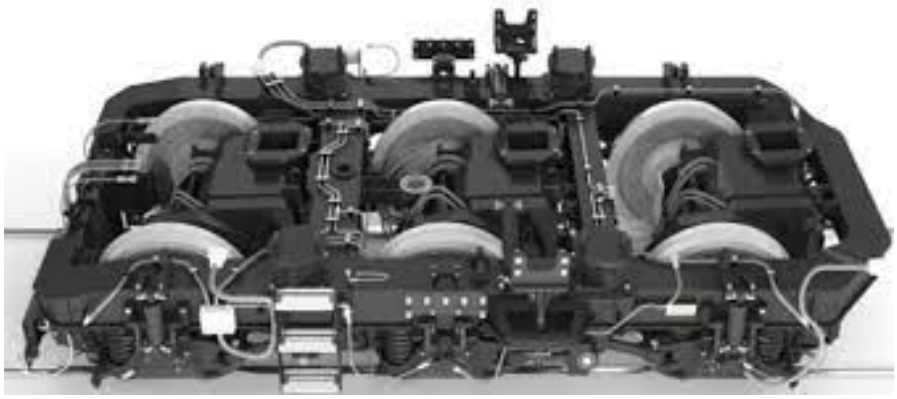

Figura 2.9: Carrello a Tre Assi della Locomotiva Stadler Euro Dual

Presenza di Motorizzazione

Inoltre, in base alla capacitá o meno di fornire sforzi di trazione, si distinguono in:

- carrelli motori, che sostengono il peso della cassa e sviluppano sforzi di trazione (essendo motorizzati);
- carrelli portanti, che sostengono esclusivamente il peso della cassa.

Capacitá di Sterzata

Infine, in base alla capacitá di sterzare o meno in curva, si distinguono in:

- carrelli a passo rigido; non sterzanti, pertanto, le sale ed il binario (identificato con la tangente al tracciato, nel caso di traiettorie curve) hanno differenti orientamenti, come dimostra la presenza dell'angolo di attacco.

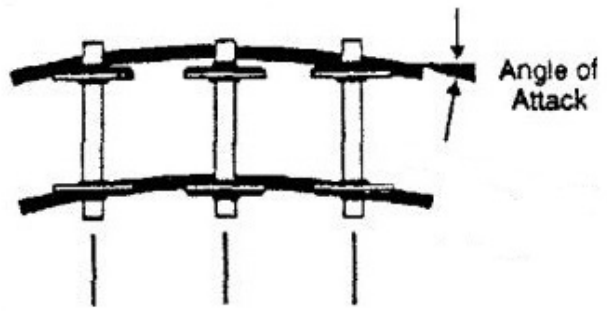

Figura 2.10: Carrello a Passo Rigido

Nel caso di carrelli a passo rigido, risulta rilevante la determinazione del raggio minimo di curva, come si puó osservare nella figura in basso.

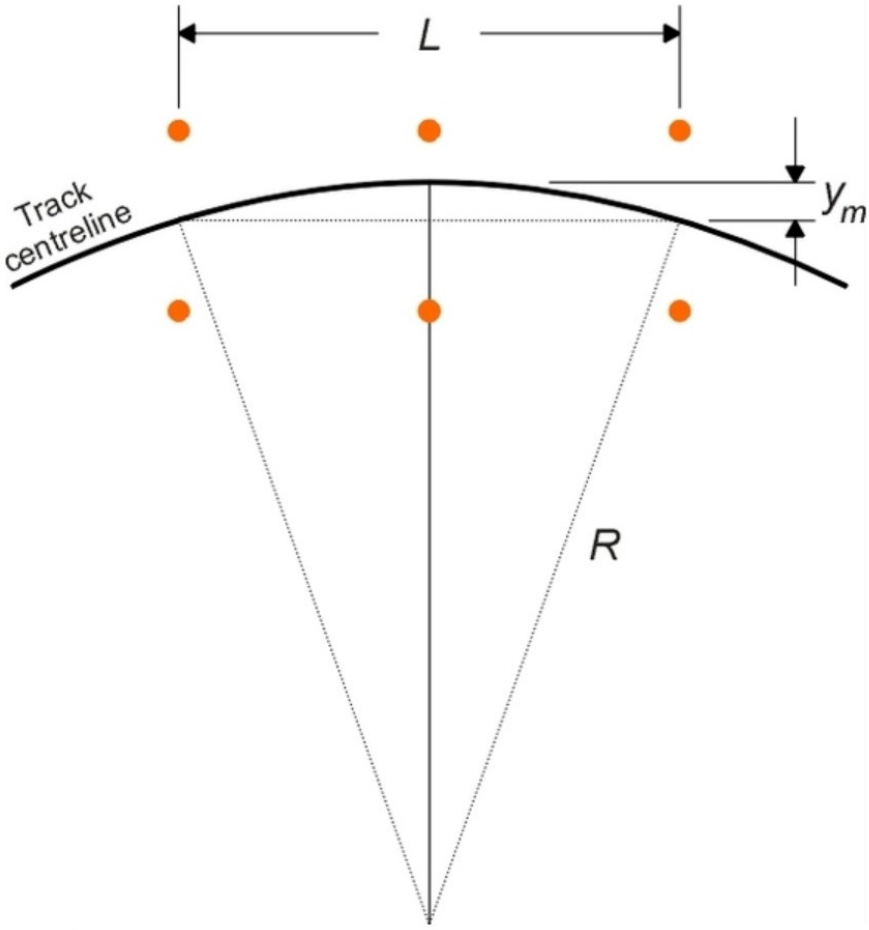

Figura 2.11: Raggio Minimo di Curva per un Carrello a Tre Assi con Passo Rigido

Posto il massimo spostamento laterale ammissibile y_m della sala centrale (solitamente 25 mm) e la distanza tra gli assi esterni del carrello L (in genere

é il doppio del passo), il raggio minimo di curva risulta (applicando il teorema della corda) pari a:

$$R = \frac{L^2}{8 * y_m} + \frac{y_m}{2} \tag{2.3.2.1}$$

Ne segue che: un carrello avente un passo piú corto di un altro puó percorrere una curva piú stretta e a paritá di curva percorsa il carrello con passo piú corto si inscrive in essa con un minore angolo di attacco e quindi usura di meno il binario.

- carrelli a passo flessibile; sterzanti, pertanto, le sale si dispongono sulla tangente alla traiettoria curva, come dimostra l'assenza dell'angolo di attacco.

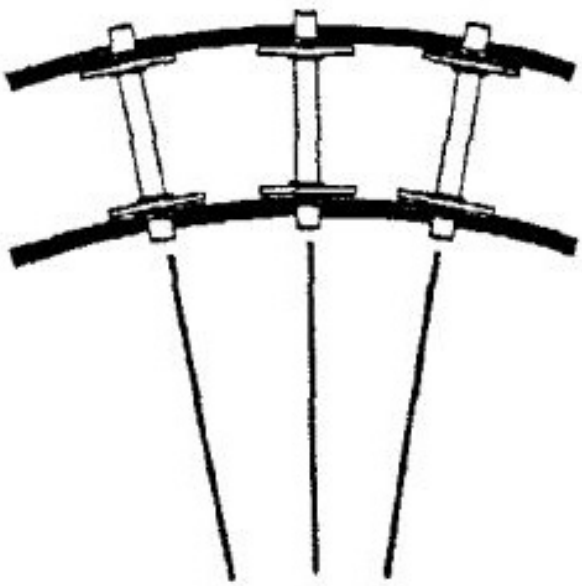

Figura 2.12: Carrello a Passo Flessibile

2.3.3 Architettura

A seguire, vengono presentati gli elementi essenziali dell'architettura di un carrello.

Telaio

Consiste nella struttura portante del carrello stesso.

Figura 2.13: Telaio di un Carrello a Tre Assi

Sala Montata

Chiamata piú semplicemente sala, é l'insieme di albero (o asse ferroviario o assile) e delle due ruote su di esso calettate.

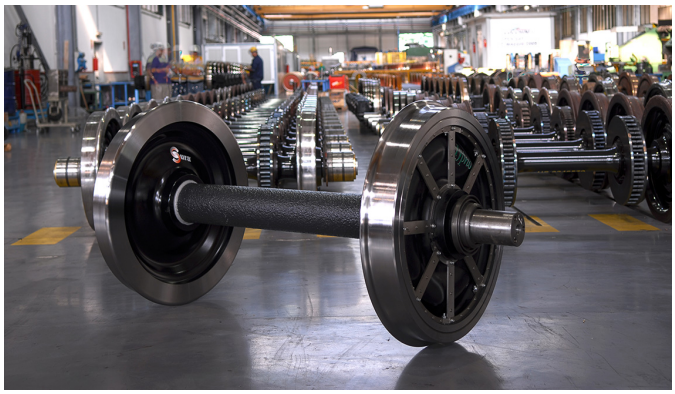

Figura 2.14: Sala Montata

Fusello

É la parte esterna dell'assile; su di esso poggia, tramite le boccole e le sospensioni primarie, la cassa del veicolo ferroviario.

Figura 2.15: Fusello

Ruote

Hanno una forma troncoconica per limitare gli strisciamenti, la quale garantisce anche un richiamo gravitazione della sala verso la mezzeria del binario.
Nella guida libera la stabilitá in curva é assicurata dall'aderenza trasversale, come nel caso del pneumatico stradale.
Nella guida vincolata la stabilitá in curva é assicurata dall'azione della via sulla ruota ed in particolare sul bordino della ruota stessa.
Uno dei profili maggiormente impiegati, per le ruote ferroviarie, é l'S1002.
Gli elementi caratteristici di un profilo ruota sono:

- altezza, larghezza e angolo della flangia o bordino (flange);
- schiena della flangia (flange back);
- superficie di rotolamento (tread);
- punto di rotolamento (tread datum);
- parete verticale (field side);
- diametro (diameter);

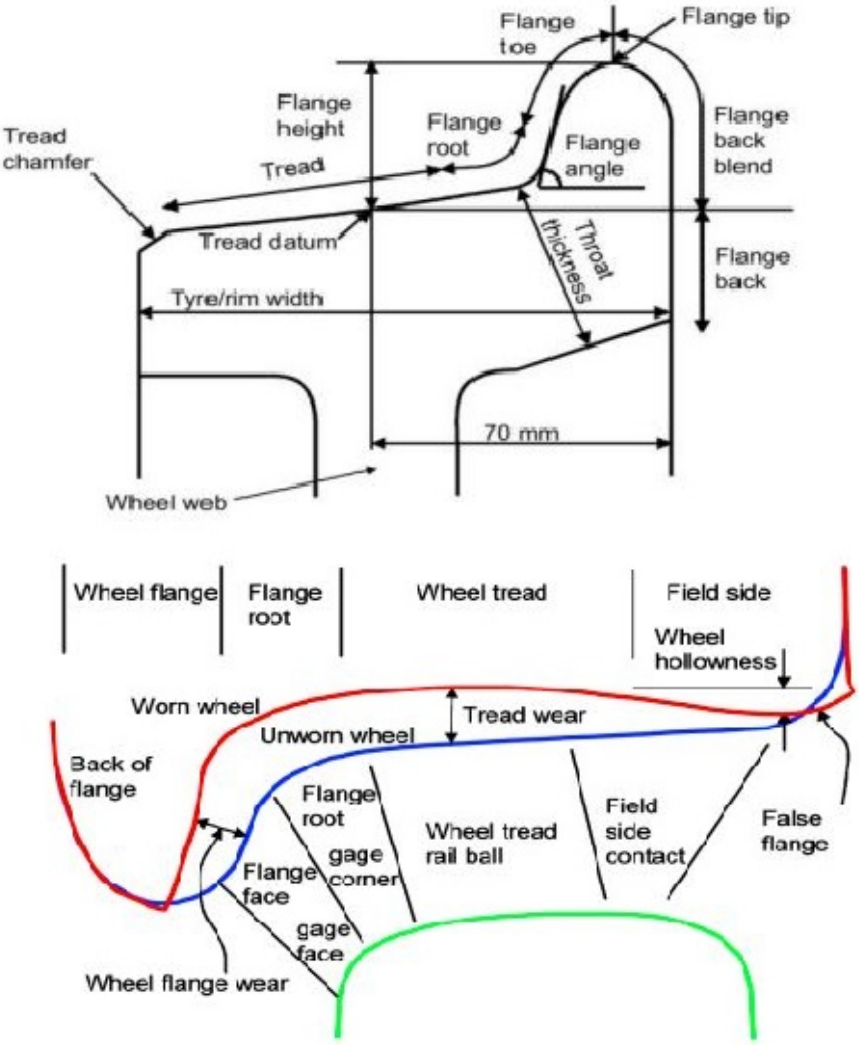

Figura 2.16: Profilo Ruota ed Elementi Caratteristici

Le ruote hanno la funzione di:

- supportare il peso del veicolo;
- fornire forze longitudinali di trazione e di frenatura;
- fornire forze trasversali per il controllo della traiettoria del veicolo.

Possono essere:

- monoblocco, se costituite da un solo pezzo fuso.
  Sono impiegate, solitamente, su qualsiasi tipo di veicolo.

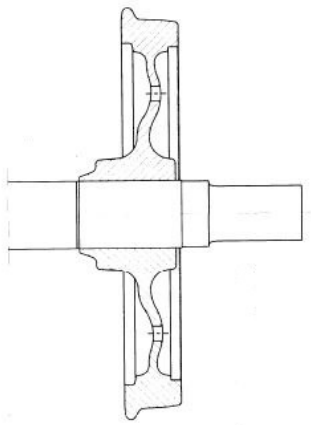

Figura 2.17: Ruota Monoblocco

- biblocco, se aventi parte esterna (cerchione) e parte interna (corpo) collegate attraverso il procedimento di calettamento.
  Sono impiegate, solitamete, in treni merci e locomotive.
  Nel caso della ruota biblocco, una volta consumatosi, puó essere sostituito solo il cerchione ma subentra il pericolo dello scalettamento.

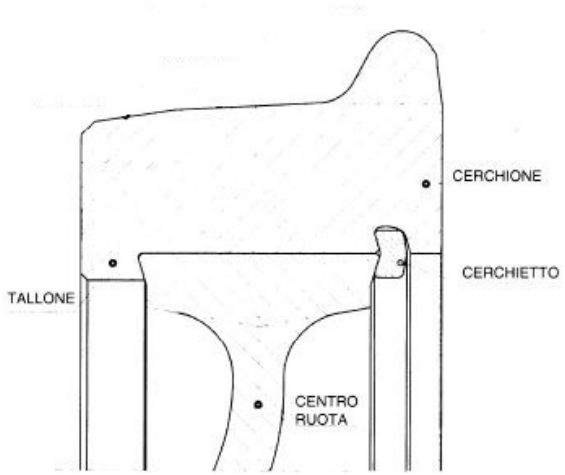

Figura 2.18: Ruota Biblocco

Boccole

Supportano il fusello dell'assile e, grazie al corpo boccola, sostengono le sospensioni primarie del veicolo.

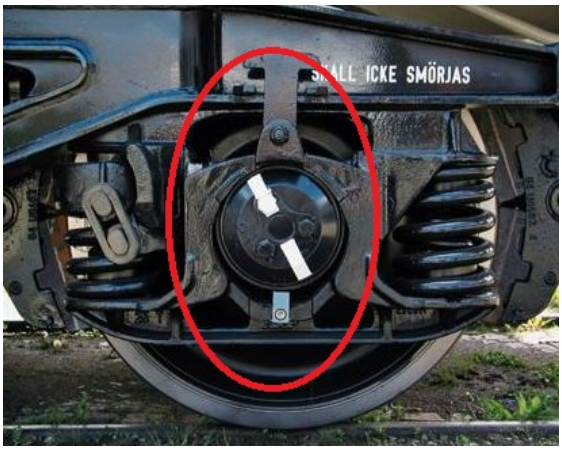

Figura 2.19: Boccola SKF di una carrello Y25

Sospensioni Primarie e Secondarie

Nei veicoli ferroviari vi sono due livelli (o campi o ordini) di sospensione:

- le sospensioni primarie, collocate tra telaio del carrello e sala, su di esse grava tutta la massa del veicolo ad eccezione della massa non sospesa (sale, ruote e boccole), tipicamente sono molle elicoidali;
- le sospensioni secondarie, collocate sul telaio del carrello, su di esse grava la massa della cassa del veicolo, tipicamente sono molle elicoidali, a balestra ad aria o tasselli in gomma.

La loro funzione é quella di sostenere le masse e attenuare le oscillazioni che si verificano durante il moto del veicolo.

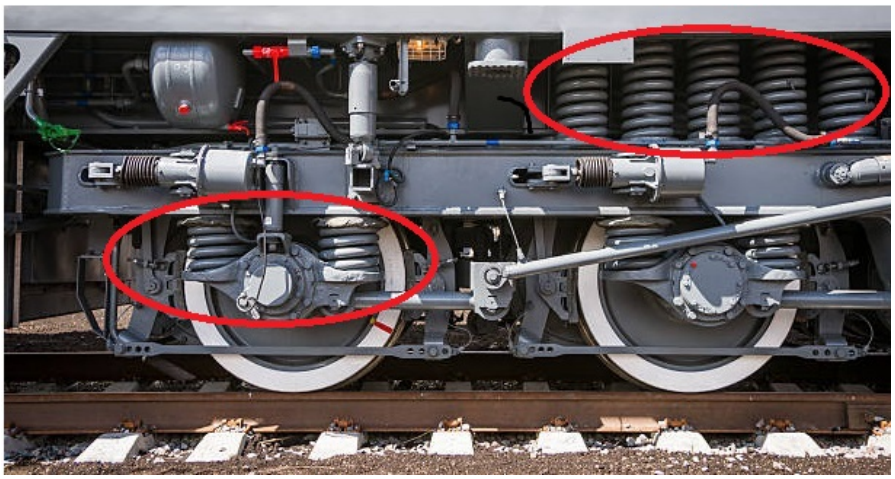

Figura 2.20: Sospensioni Primarie (in Basso) e Secondarie (in Alto), del Tipo Molla Elicoidale, di un Carrello

Smorzatori

Presenti sia a livello primario che secondario, sono quei componenti il cui compito é quello di assorbire le eventuali vibrazioni nel veicolo e di contenerne spostamenti e oscillazioni.
Possono essere:

- verticali, presenti in genere a livello primario e anche secondario, agiscono sullo spostamento verticale del veicolo;
- laterali, presenti in genere a livello secondario, agiscono sullo spostamento laterale del veicolo;
- antiserpeggio (anti-yaw), presenti in genere a livello secondario, sono disposti nella direzione longitudinale del veicolo e agiscono sul moto di serpeggiamento dello stesso.

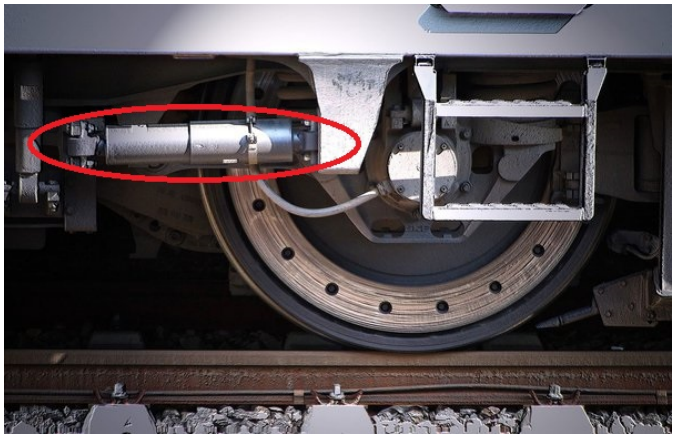

Figura 2.21: Smorzatore Antiserpeggio

Trascinamento

É un componente, assimilabile ad un asta, che puó essere presente sia nello stadio primario che secondario del veicolo ed é atto a trasmettere lo sforzo di trazione, che si sviluppa nel contatto ruota-rotaia.
A livello primario, lo sforzo é trasmesso dalle ruote al telaio del carrello, sono collegati, dunque, le boccole ed il telaio carrello; a livello secondario, invece, é trasmesso dal telaio del carrello alla cassa del veicolo.

Trasmissione

La trasmissione, solitamente, puó essere:

- tranviaria (o sospensione per il naso); é un metodo di sospensione dei motori elettrici di trazione tipico delle motrici tranviarie, adottato anche su locomotive ferroviarie.
  Il motore appoggia da un lato sulla sala, per mezzo di due cuscinetti a olio,

mentre dall'altro é fissato a una traversa del carrello mediante una sporgenza detta "naso", con l'interposizione di due o più molle che sostengono elasticamente il peso del motore e contrastano la reazione della coppia motrice.
La trasmissione del moto é diretta e viene attuata usualmente tramite ingranaggi; il pignone é calettato all'estremitá dell'albero motore e ingrana su di una ruota dentata fissata alla sala montata.
Con questo tipo di sospensione il peso del motore rimane sospeso elasticamente solo per metà; l'altra metà grava direttamente sulla sala generando, durante la marcia, notevoli sollecitazioni sia al motore che all'armamento dovute all'inerzia del sistema.

- ad asse cavo; il sistema prevede che il motore elettrico venga montato direttamente sulla sala, in posizione concentrica ad essa, in maniera tale che il suo albero abbia la forma di un cilindro cavo entro il quale viene montato l'asse della sala montata permettendo, in tal modo, la sospensione elastica del motore stesso dalla parte opposta.
  Ciò permette di ridurre le vibrazioni trasmesse durante il funzionamento del motore.

Sistema Frenante

Tipicamente il sistema frenante puó essere di due tipologie:

- elettrico, per il quale si possono utilizzare i motori elettrici di trazione facendoli lavorare in frenatura elettrica.
  É possibile recuperare l'energia ributtandola in rete o più semplicemente dissiparla mediante reostati;

- pneumatico, il quale puó essere realizzato in diversi modi:

  - a ceppi;
  - a dischi;
  - integrato (dischi + ceppi).

  Il sistema frenante, quindi, é comandato da un circuito pneumatico che agisce su un certo numero di cilindri freno, i quali mediante cinematismi operano l'azione frenante sui dischi o sui ceppi.

2.4 La Meccanica della Locomozione

2.4.1 Fenomeno dell'Aderenza

Lo sforzo di trazione é fornito per mezzo degli assi motorizzati della locomotiva grazie all'attrito ruota-rotaia; la trazione, poi, é trasmessa al convoglio mediante elementi meccanici di collegamento.
Si definisce "aderenza" il valore massimo della sollecitazione tangenziale trasmessa,

attraverso il sistema ruota-rotaia, in condizioni di puro rotolamento; essa rappresenta il limite superiore a cui tende la forza di trazione.
Alcuni elementi che intervengono a modificare le condizioni di aderenza sono:

- stato delle superfici a contatto, queste non sono quasi mai pulite: vi può essere polvere, olio, umiditá, e ancora una leggera pellicola di ossido di ferro;
- variazioni di carico istantaneo, causa molleggio degli ammortizzatori, possono verificarsi grosse variazioni di carico sulle ruote.
  Il rapporto tra la forza di trazione applicata a un asse e il carico gravante su di esso può superare il limite di aderenza, dando luogo allo slittamento; Quando le condizioni del binario sono critiche sotto il profilo dell'aderenza si effettua la cosiddetta sabbiatura che consiste per l'appunto nell'operazione di insabbiare il binario.

In base alle condizioni di contatto ruota-rotaia, si distinguono differenti situazioni possibili:

- aderenza al punto fisso, il punto di contatto ruota-superficie rimane fisso e nessuno dei due organi muta la superficie di contatto.
  Non si ha né rotazione né traslazione (sforzo di primo distacco);
- slittamento puro, il punto di contatto sulla superficie rimane fisso, mentre la ruota nel suo moto di rotazione cambia continuamente la superficie di contatto;
- pattinamento puro, il punto di contatto sulla ruota cambia continuamente per effetto della traslazione della ruota, che invece non cambia la superficie di contatto perché priva di moto di rotazione;
- rotolamento, entrambi gli organi mutano le superfici a contatto reciproco.
  La forza trasmissibile dipende dal coefficiente di aderenza.

2.4.2 Equazione

L'equazione che descrive il moto di un veicolo su rotaia é la seguente:

$$R <= T < f * P_a \tag{2.4.2.1}$$

Dove:

- R é la resistenza al moto del veicolo;
- T é lo sforzo di trazione o "tiro" della locomotiva;
- f é il coefficiente d'aderenza ed è funzione della velocitá del veicolo (decresce con la velocità) e di altri parametri (ambientali, di contaminazione, legati alla rugosità ed alle vibrazioni);

- P_a é il peso aderente (é la quota-parte del peso della locomotiva che si scarica sugli assi motorizzati).

A seconda della relazione tra R e T si identificano tre situazioni possibili:

- se $T < R$, il veicolo decelera o resta fermo;
- se $T = R$, la sua velocitá resta costante;
- se $T > R$, il veicolo accelera.

2.4.3 Resistenze al Moto

Il rapporto tra la resistenza R, espressa convenzionalmente in kg-forza, ed il peso P del convoglio, espresso in tonnellate-forza, prende il nome di resistenza specifica r (in seguito ci si riferirá a questo tipo di resistenza).

Resistenze Ordinarie

Si oppongono sempre all'avanzamento del veicolo nel suo moto uniforme (v=cost), sono dovute a:

- attrito perno ruota-cuscinetto;
- ruota-ferrovia;
- treno-aria (oltre i 300 km/h rappresenta il 95 % delle resistenze ordinarie).

Nel caso ferroviario, l'espressione più comune per calcolare le resistenze ordinarie è del tipo:

$$r_{ord} = a + b * V^2 \tag{2.4.3.1}$$

Dove:
-a=2,5;
-b=0,00025, per vetture passeggeri a carrelli;
-b=0,00033, per vetture passeggeri a due assi;
-b=0,0004,per carri merci carichi;
-b=0,0001,per carri merci scarichi;
-V é la velocitá del convoglio.
Per le locomotive elettriche, invece, si adottano formulazioni differenti:

$$r_{ord} = \frac{24}{\sqrt{L}} + 0,01 * V + 0,0035 * \frac{S * V^2}{L} \tag{2.4.3.2}$$

$$r_{ord} = 2,5 + 0,0003 * V^2 \tag{2.4.3.3}$$

$$r_{ord} = 3,5 + 0,005 * \frac{S * V^2}{L} \tag{2.4.3.4}$$

$$r_{ord} = 3,5 + 0,6 * \frac{S}{L} * (\frac{V + 12}{10})^2 \tag{2.4.3.5}$$

Dove:
-S é la sezione frontale della locomotiva;
-L é il peso delle masse aderenti e non aderenti;
-V é la velocitá del convoglio.

Resistenze Accidentali

Si aggiungono algebricamente alle resistenze ordinarie e sono dovute a:

- fasi di accelerazione o decelerazione del veicolo;

$$r_a = \frac{1000}{g} * a * k_a \tag{2.4.3.6}$$

  dove:
  -a é l'accelerazione del veicolo;
  -g é l'accelerazione di gravitá;
  -$k_a = 1 + \frac{Q}{P} * \frac{\rho_i^2}{r^2}$ é il coefficiente di inerzia e Q, P, ρ_i e r sono rispettivamente: peso delle ruote, peso del convoglio, raggio d'inerzia delle ruote rispetto al loro asse di rotazione e raggio delle ruote;questo coefficiente vale 1,1/1,3 per locomotori elettrici;

- presenza di una pendenza (o livelletta) della via;

$$r_i = tan(\alpha) = 1000 * i \tag{2.4.3.7}$$

  dove:
  -α é l'angolo di inclinazione della livelletta;
  -i é la pendenza della livelletta espressa in ‰;

- curva del veicolo (si oppone sempre al moto).

$$r_c = f * \frac{c}{R} \tag{2.4.3.8}$$

  dove:
  -f é il coefficiente di attrito;
  -c é la distanza tra i punti di contatto ruota-rotaia ed é paria a 1,5 m per scartamenti di 1,435 m;
  -R é il raggio della curva.

Quindi:

$$r_{acc} = r_a + r_i + r_c \tag{2.4.3.9}$$

Resistenza Totale

La resistenza totale é ottenuta come somma delle precedenti:

$$r_{tot} = r_{ord} + r_{acc} \tag{2.4.3.10}$$

2.4.4 Potenza Trasferita alle Ruote Motrici ed Erogata dal Motore

Potenza Trasferita alle Ruote Motrici

Note le resistenze al moto, la potenza necessaria che deve essere trasferita dal motore alle ruote motrici vale:

$$N_r = r_{tot} * P * g * V \tag{2.4.4.1}$$

dove:
-P é il peso del convoglio;
-g é l'accelerazione di gravitá;
-V é la velocitá del convoglio.

Potenza Erogata dal Motore

La potenza erogata dal motore sarà, ovviamente, maggiore di quella trasferita alle ruote motrici ed è legata ad essa attraverso i rendimenti degli organi della trasmissione motore-ruote:

$$N_m = \frac{N_r}{\eta_t} \tag{2.4.4.2}$$

2.5 Le Problematiche della Dinamica Ferroviaria

2.5.1 Difetti di Linea

La linea ferroviaria presenta tipicamente dei difetti che rendono il tracciato diverso da quello teorico.
I veicoli devono essere progettati non solo per il tracciato ideale, ma anche per il tracciato "difettoso".
I difetti si presentano come scostamenti della misura di una grandezza (es. posizione verticale della rotaia) rispetto alla posizione teorica e sono un fenomeno disperso statisticamente, che, per quanto riguarda i fenomeni di interesse per la dinamica del veicolo, possono essere rappresentati come sovrapposizione sul valore teorico, di una serie di sinusoidi con ampiezza e frequenza spaziale differente.
Tali difetti possono sintetizzarsi in, difetti:

- di scartamento;
- altimetrici della linea media del tracciato;
- di rollio;
- laterali;
- di posa;
- della forma dei profili.

I difetti possono avere influenza sulla:

- stabilitá di marcia;
- sicurezza di marcia;
- comfort.

Sulla base di una serie di misure su diverse tratte Europee, l'ente di ricerca europeo (ORE) ha definito degli spettri "medi" caratteristici di linee con:

- grandi difetti;
- piccoli difetti.

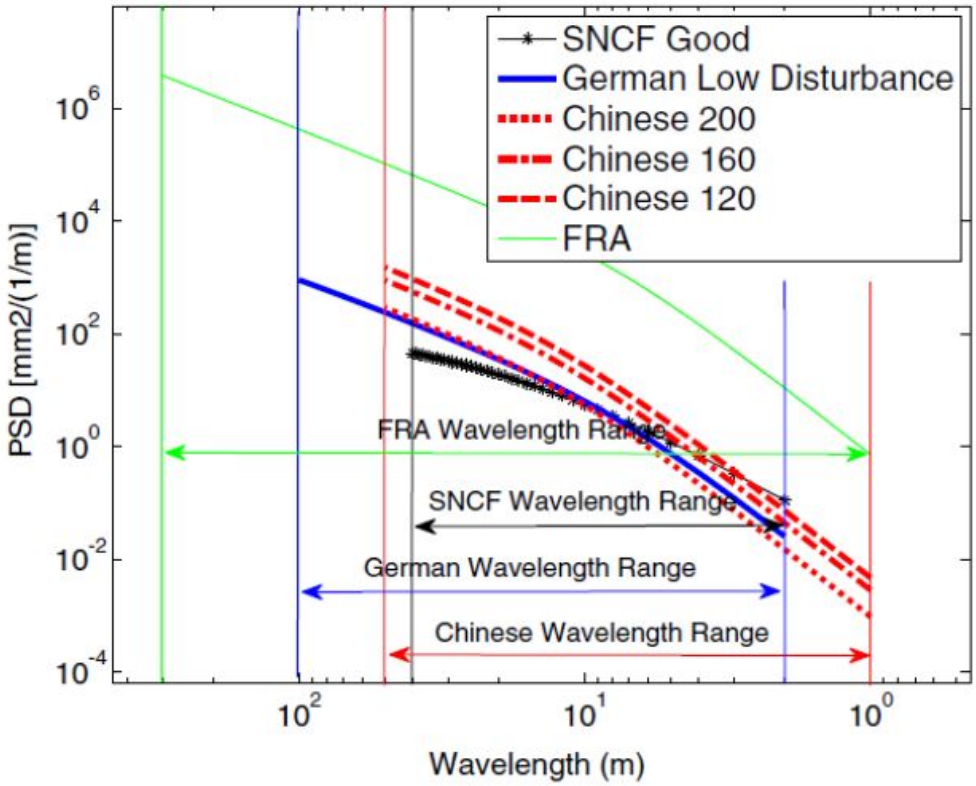

Figura 2.22: Diagramma Riportante le Tipologie di Difetti di Linea

Tali spettri possono essere utilizzati per generare dei tracciati "simulati" con difettosità tipica da impiegare per studi di comfort o sollecitazione.

2.5.2 Serpeggiamento

Il moto dei veicoli ferroviari sul binario non é perfettamente rettilineo.
I veicoli, principalmente a causa della conicità dei cerchioni e delle inevitabili piccole irregolarità del piano di rotolamento e della posa del binario, procedono con

un moto di serpeggiamento che manda i bordini delle ruote ad urtare alternativamente contro le rotaie.
Esistono particolari smorzatori che mirano ad annullare il movimento di serpeggio.
Vi sono diversi modelli cinematici per descrivere il moto di serpeggiamento degli assili; il movimento risulta oscillatorio limitato da flangia e conicitá.
Il modello di Kingel dá come risultato un moto oscillatorio con una lunghezza d'onda:

$$L_k = 2\pi * \sqrt{\frac{r * s}{2\gamma}} \tag{2.5.2.1}$$

Dove:

- r é il raggio della ruota;
- s é lo scartamento dei binari;
- γ é la conicitá della ruota nell'intorno della sua circonferenza di rotolamento;

Il moto, più realmente, é a zig-zag con lunghezza d'onda inferiore.
Conicitá della ruota inferiori riducono l'effetto, dando origine ad onde piú lunghe ed accelerazioni laterali inferiori.

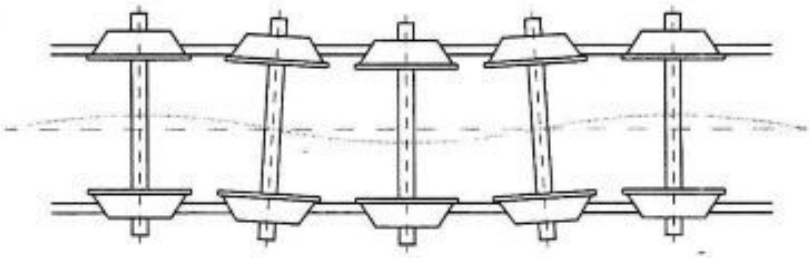

Figura 2.23: Serpeggiamento della Sala

2.5.3 Velocitá Critica

La velocitá critica dei rotabili ferroviari rappresenta la soglia oltre la quale un veicolo ferroviario passa dalla marcia regolare ad una marcia in stato di instabilità.
Una limitazione importantissima all'innalzamento della velocità dei rotabili ferroviari é rappresentata dai moti oscillatori, non piú sufficientemente smorzati, che si instaurano in alcuni organi meccanici al di sopra di una certa velocitá, creando situazioni dannose sia per il binario che per il veicolo stesso.
I fenomeni oscillatori che determinano la condizione di instabilitá si manifestano generalmente con un moto di serpeggio accentuato, accompagnato da spostamenti laterali importanti del carrello che provocano urti tra il bordino della ruota e la rotaia.

2.5.4 Cabraggio

Cabraggio della Locomotiva

Lo sviluppo di soluzioni costruttive più recenti, quali i carrelli biasse, ha evidenziato un problema noto come "cabraggio" delle locomotive.
Tale problema si manifesta come uno "scaricamento" di alcune ruote in fase di tiro con riduzione della massa aderente e conseguente slittamento delle stesse.
Un modo semplice per ridurre questo effetto é quello di attuare una trazione bassa, cioé ridurre la quota di trascinamento h.
Inoltre é possibile anche adottare dei dispositivi elettronici anticabraggio che fanno in modo di ridurre la trazione sulle sale piú scariche e di aumentarla su quelle piú cariche.
Questa problematica é dovuta al momento che si genera sia sul corpo locomotiva che sui carrelli, per effetto della trasmissione di forza, che avviene alla quota del gancio, cioé a 1060 mm dal p.d.f.
La figura evidenzia come il tiro che si sviluppa ad una quota H sia trasferito ai carrelli alla quota dei trascinamenti h.

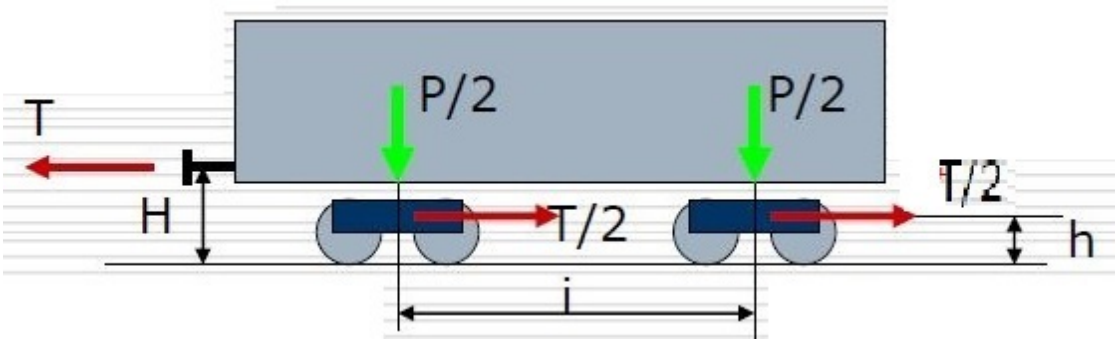

Figura 2.24: Cabraggio della Locomotiva

$$M = T * (H - h) = f * P * (H - h) \tag{2.5.4.1}$$

Bilanciato da una variazione del carico sui centri carrello pari a:

$$M = \Delta_Q * i \tag{2.5.4.2}$$

Quindi:

$$\Delta_Q = T * \frac{(H - h)}{i} = f * P * \frac{(H - h)}{i} \tag{2.5.4.3}$$

Cabraggio del Carrello

Un problema analogo ma più grave si ha sul carrello, in questo caso il tiro trasmesso alla quota h genera un momento con le forze di tiro scambiate dalle ruote.

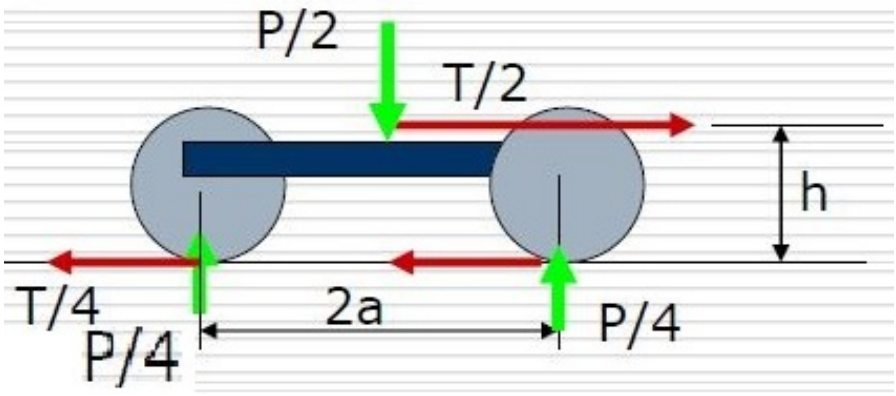

Figura 2.25: Cabraggio del Carrello

$$M_1 = \frac{T}{2} * h = f * \frac{P}{2} * h \tag{2.5.4.4}$$

Ed é bilanciato da una variazione del carico sulle ruote pari a:

$$M_1 = \Delta_{Qs} * 2a \tag{2.5.4.5}$$

Da cui si ottiene:

$$\Delta_{Qs} = \frac{T}{2} * \frac{h}{2a} = T * \frac{h}{4a} = f * P * \frac{h}{4a} \tag{2.5.4.6}$$

2.5.5 Svio

In presenza di elevati sforzi laterali, causati dall'accelerazione centrifuga, é il contatto del bordino con il fungo della rotaia ad assicurare il corretto allineamento della ruota.
In queste condizioni si verificano elevati strisciamenti tra le superfici e possono essere scambiate forze rilevanti.
Tali forze possono essere tali da provocare la risalita del bordino sulla rotaia fino a provocare lo svio, cioè la perdita del corretto allineamento tra ruota e rotaia e quindi il deragliamento del treno.

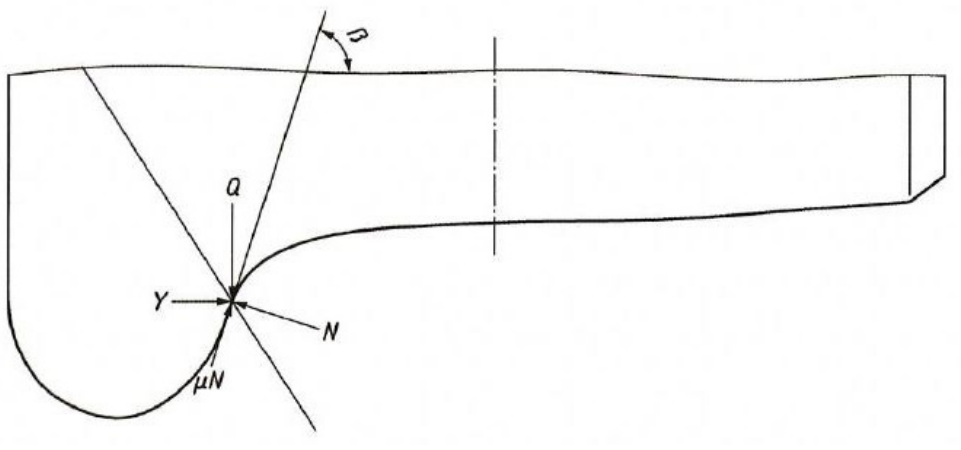

Figura 2.26: Dettaglio del Bordino della Ruota e Forze di Contatto

Nella pratica costruttiva, il rischio di svio é valutato attraverso il rapporto tra la forza laterale che agisce sulla singola ruota, Y, ed il peso che si scarica sulla stessa, Q, come evidenziato dalla formula di Nadal.

$$\frac{Y}{Q} = \frac{tan\beta - \mu}{1 + \mu * tan\beta} \tag{2.5.5.1}$$

Dove:

- β é l'angolo di flangia;
- μ é il coefficiente d'attrito.

Ed Y e Q sono valutati come segue:

$$Y = N * sen\beta - \mu * N * cos\beta \tag{2.5.5.2}$$

$$Q = N * cos\beta + \mu * N * sen\beta \tag{2.5.5.3}$$

2.5.6 Comfort di Marcia

Curva Non Sopraelevata

L'accelerazione centrifuga, tra i diversi effetti, puó determinare anche un discomfort per i passeggeri, se si eccede il limite di $0,1 * g$ (circa $1\frac{m}{s^2}$);

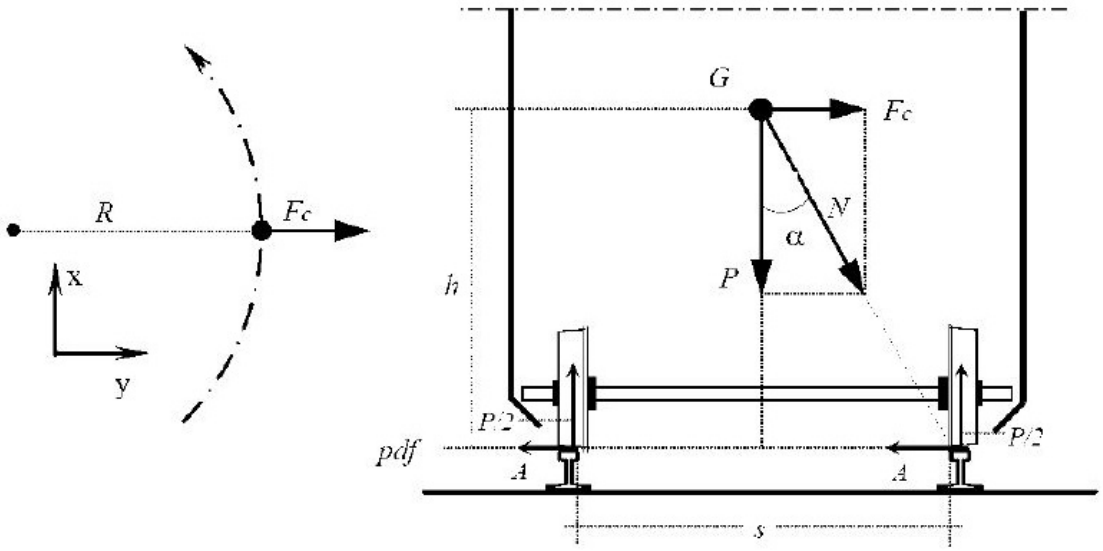

Figura 2.27: Schema di Marcia in Curva di un Veicolo Ferroviario (senza sopraelevazione)

Pertanto, l'accelerazione centrifuga deve essere limitata, da cui deriva:

$$a_c = \frac{V^2}{R} <= a_{max} \tag{2.5.6.1}$$

Ne risulta, quindi, un limite del veicolo sulla massima velocitá ammissibile in una determinata curva:

$$V_{max} <= \sqrt{R * a_{max}} \tag{2.5.6.2}$$

E la forza centrifuga alla quale é sottoposto il veicolo, di massa m, risulta essere:

$$F_c = m * a_c = m * \frac{V^2}{R} \tag{2.5.6.3}$$

Curva Sopraelevata

Inoltre, allo scopo di non limitare eccessivamente la velocità in curva, si adotta la tecnica di inclinare il piano del binario, in modo da produrre una forza gravitazionale opposta alla forza centrifuga.
L'inclinazione a del piano delle rotaie viene ottenuta sopraelevando la rotaia esterna curva di una quota h.
Nel raccordo tra rettilineo e curva, anche la quota della rotaia esterna deve essere raccordata, con una variazione lineare di quota.
Ció, evidentemente, produce una inclinazione della rotaia esterna rispetto a quella interna nel raccordo, cioè uno sghembo di binario.
Per ridurre effetti sulle sospensioni del veicolo, lo sghembo deve essere limitato ($< 2/3$ ‰).
Ció determina, di fatto, la lunghezza minima del tratto di raccordo tra rettilineo e curva.

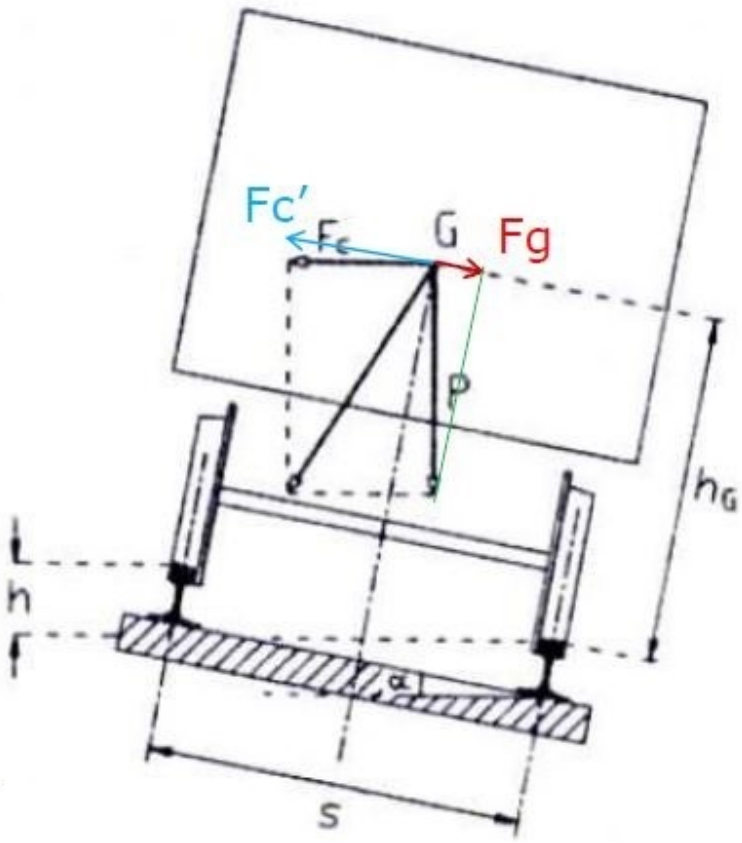

Figura 2.28: Schema di Marcia in Curva di un Veicolo Ferroviario (con sopraelevazione)

La forza F_g é una componente della forza peso che compensa la forza centrifuga; se $F_g = F_{c'}$ il veicolo non risente di accelerazione centrifuga.

$$F_g = P * sen(\alpha) = m * g * \frac{h}{s} \tag{2.5.6.4}$$

L'accelerazione centrifuga compensata vale, dunque:

$$a_{c,comp} = \frac{F_g}{m} = g * \frac{h}{s} \tag{2.5.6.5}$$

E quella residua o non compensata:

$$a_{c,noncomp} = a_c - a_{c,comp} = \frac{V^2}{R} * cos(\alpha) - g * \frac{h}{s} \tag{2.5.6.6}$$

Ne segue che la velocitá ammissibile del veicolo risulta essere maggiore rispetto al caso senza sopraelevazione:

$$V_{max} <= \sqrt{\frac{R * a_{max}}{cos\alpha} + \frac{R * g * h}{cos\alpha * s}} \tag{2.5.6.7}$$

I veicoli tiltanti, come il pendolino, possono compensare una ulteriore quota parte di accelerazione.

2.5.7 Usura di Ruota e Rotaia

Il contatto ruota-rotaia puó originare differenti meccanismi di usura/danneggiamento, quali:

- microscorrimento, che causa l'asportazione di materiale (o usura);
- RCF (Rolling Contact Fatigue/Fatica da Contatto Rotante), che causa un accumulo di deformazione plastica (ratcheting);
- forze laterali, che causano lo spostamento della linea (oltre che il fenomeno, giá visto, dello svio).

Microscorrimento

Il microscorrimento é la causa principale di sostituzione di quasi tutte le linee ferroviarie; é dovuto allo scorrimento tra ruota e rotaia e determina l'asportazione di materiale da entrambe le superfici a contatto.
É maggiormente concentrato nei tratti in curva sulla parte interna del binario esterno, dove c'é contatto col bordino della ruota.
In tratti rettilinei o per curve ad ampio raggio la parte maggiormente usurata é la testa del binario.
La situazione per le ruote é diversa, in quanto esse vengono ritornite quando sono troppo usurate, cioé quando il bordino é troppo sottile o troppo alto; inoltre, spesso la ritornitura avviene quando il profilo della ruota usurata riduce la capacitá di sterzata della sala; quando lo strato di metallo rimosso é troppo alto, la ruota viene sostituita.
Esistono due metodi per valutare quantitativamente questo tipo di usura sulla rotaia:

- metodo dell'energia dissipata durante il contatto;

$$T_\gamma = T_x * \gamma_x + T_y * \gamma_y + T_z * \Omega_z \tag{2.5.7.1}$$

$$W_n = \frac{T_\gamma}{A} \tag{2.5.7.2}$$

  dove il rateo di usura, W_n, é funzione di T_γ, che é la somma tra i prodotti di forze e microscorrimenti ed A, che é l'area di contatto ruota-rotaia.
  Esperimenti fatti dalla BR Research hanno anche studiato l'influenza del parametro T_γ sull'usura, usando una relazione non lineare a due stadi in cui si verifica usura lieve per bassi valori di T_γ e usura alta per valori di T_γ attorno a 200 N;

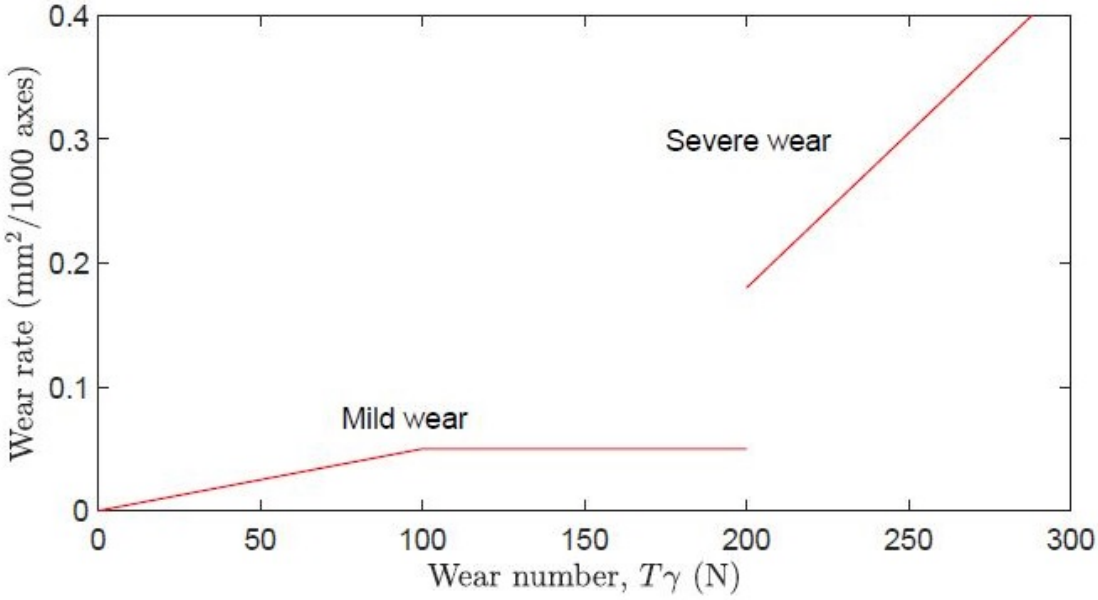

Figura 2.29: Livello di Usura in Funzione del Parametro T_γ

- metodo di Archard;

$$V_w = k * \frac{N * s}{H} \tag{2.5.7.3}$$

  dove il volume di materiale rimosso, V_w, dipende dalla forza normale di contatto N, distanza di scorrimento s e durezza del materiale H; k é un coefficiente di proporzionalitá ottenuto sperimentalmente, funzione della velocitá di scorrimento e della pressione di contatto.

RCF

La RCF descrive il fenomeno della crescita di cricche nei binari, causata da un carico ripetuto ed assume maggiore importanza con l'incremento del carico per asse.
La risposta di un materiale a una sollecitazione ciclica é diversa a seconda dell'entitá del carico.
Per carichi bassi, la risposta é completamente elastica e in queste condizioni non ci sono ne tensioni ne deformazioni residue dopo ogni sollecitazione; incrementando il carico la risposta del materiale diviene elasto-plastica e in questo caso ci possono essere tensioni e deformazioni permanenti piú o meno alte.
Diversamente dall'usura, che é presente sia sulla ruota che sulla linea, si é visto che l'RCF ha una probabilitá molto maggiore di far innescare cricche sulla superficie della rotaia.
Anche in questo caso esistono due metodi per prevedere l'innesco di cricche:

- metodo dello shakedown; che si basa sulla Shakedown Map, un grafico in cui:

- sulle ordinate c'é il fattore di carico, dato dal rapporto $\frac{p_0}{k_e}$, tra la massima pressione di contatto ruota-rotaia e la resistenza a snervamento a taglio del materiale della ruota-rotaia;
- sulle ascisse c'é il coefficiente di aderenza.

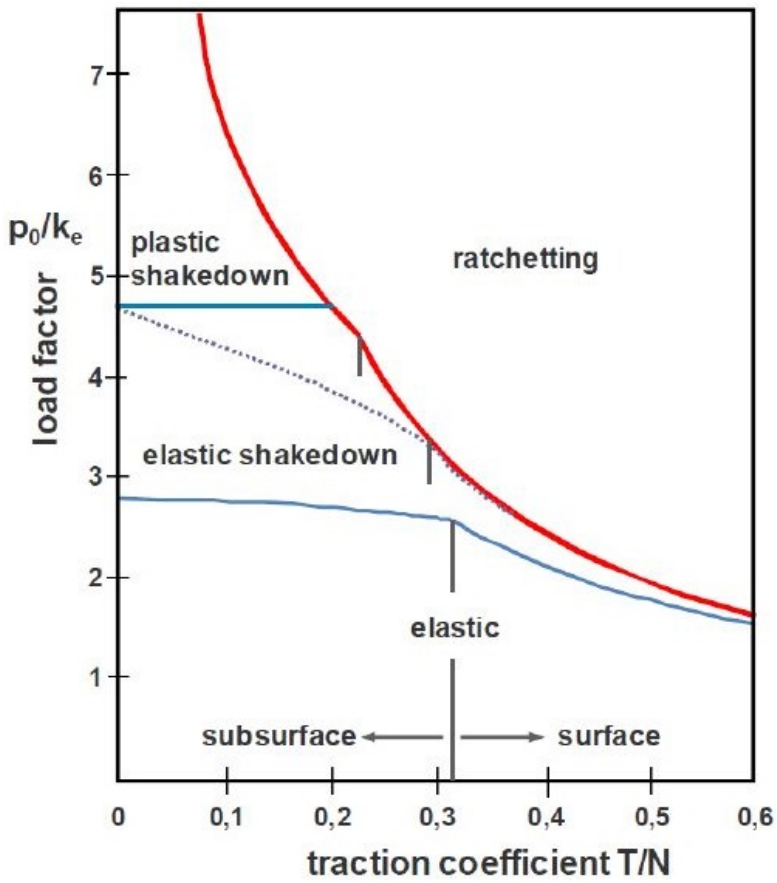

Figura 2.30: Shakedown Map

Sul grafico sono indicati i differenti meccanismi di come i materiali possano rispondere al carico ciclico:

- quando le tensioni non superano il limite di snervamento, il comportamento é globalmente elastico;
- superato il limite di snervamento, anche si é al di sotto del limite di shakedown elastico, la risposta del materiale é plastica per i primi cicli, ma poi si stabilizza con un comportamento globalmente elastico;
- se la massima tensione é compresa tra il limite di shakedown elastico e plastico, a regime, la risposta del materiale sará data da un ciclo di isteresi chiuso;
- superato il limite di shakedown plastico si ha ratcheting, che consiste in un accumulo di deformazione plastica con conseguente rottura dopo un certo numero di cicli.

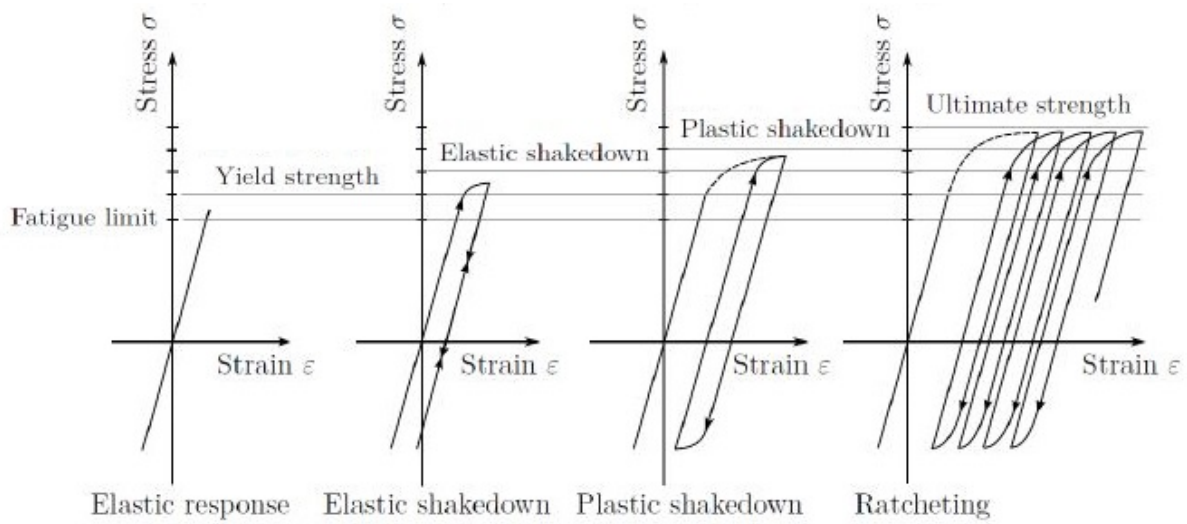

Figura 2.31: Meccanismi di Danneggiamento da RCF

- metodo dell'energia dissipata durante il contatto; che si basa su un grafico in cui é evidenziata la tipologia di danneggiamento in funzione dell'energia dissipata.

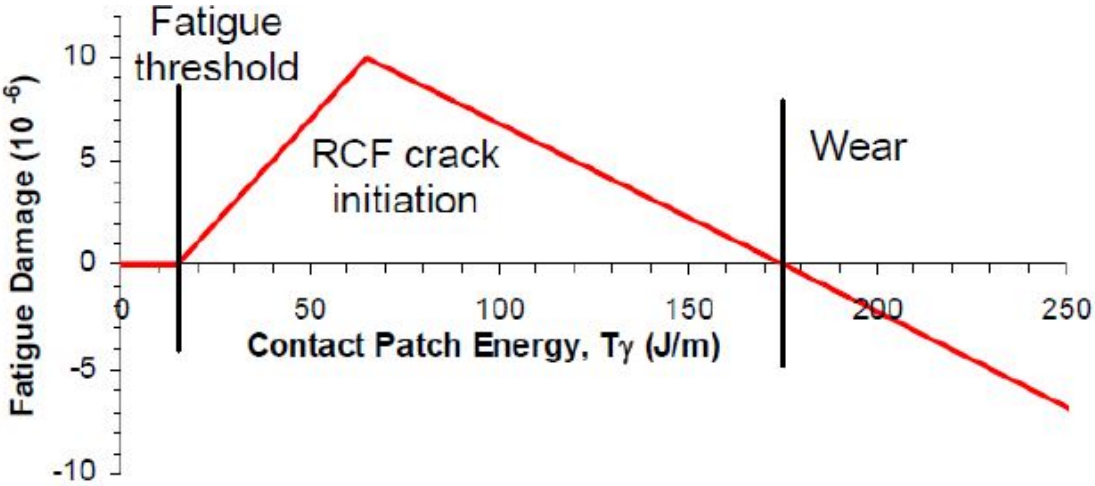

Figura 2.32: Tipologie di Danneggiamento in Funzione dell'Energia Dissipata

C'é un limite energetico oltre il quale si verifica la possibilitá che si inneschino cricche e al di sotto di esso non c'é energia sufficiente per provocarle.
Per alti valori di energia, invece, l'usura diviene la forma di danneggiamento predominante, in quanto rimuove qualsiasi cricca incipiente causata dall'RCF.
Evidenze sperimentali hanno dimostrato che le cricche da RCF si innescano solo se lo sforzo di taglio, sviluppato nel contatto ruota-rotaia, agisce sulla rotaia nella direzione della trazione (cioé la forza subita dalla rotaia é in direzione opposta alla direzione di rotazione della ruota).
Se ció accade, il materiale della rotaia si deforma in direzione contraria al moto,

permettendo al lubrificante di essere intrappolato all'interno della cricca incipiente; sotto carico di compressione, causato dalla ruota, il lubrificante pressurizza la cricca innescata, tendendo ad aprirla e ne causa la crescita per fatica.
In curva, sulla rotaia interna, le forze di interazione ruota-rotaia sono molto simili a quelle sulla rotaia esterna ma il loro verso di azione é opposto, la deformazione del materiale avviene in direzione contraria a quanto descritto precedentemente ed il lubrificante non puó essere intrappolato nella stessa maniera, quindi le cricche non possono formarsi.
Questo é il motivo per cui le cricche da RCF tendono a formarsi, in curva, sulla rotaia esterna e non su quella interna.

Capitolo 3

Benchmark sulle Locomotive Odierne

3.1 Introduzione

Prima di sviluppare il lavoro in esame, é stato condotto, in via preliminare, un benchmark in cui si é raccolto quanti piú dati tecnici possibile relativamente ad un campione di dieci locomotive; in questo modo si é voluto mettere in evidenza quali fossero gli standard costruttivi delle stesse, a livello di:

- dimensioni;
- peso;
- prestazioni;
- architettura/equipaggiamento/tecnologie impiegate.

3.2 Raccolta Dati

Nelle tabelle in basso, sono riportati i dati raccolti relativamente alle locomotive prese in esame.

BOMBARDIER - TRAXX BR 186

Caratteristica	
Casa Costruttrice	Bombardier
Nome del Modello	Traxx Br 186
Tipologia di Alimentazione	Elettrica
Anno di Messa in Servizio	2007
Operatori	Varie
Tipologia di Treno	Merci, passeggeri
Profilo Cinematico	UIC 505-1
Scartamento	1435 mm
Curva Minima di Linea	100 m
Rodiggio	B0'-B0'
Norme Applicabili	EN
Aree di Circolazione	Germania, Olanda, Belgio, Austria, Polonia, Francia
Temperatura di Lavoro	EN50125, -30ºC +40ºC
Lunghezza (con Accoppiatori)	18.9 m
Larghezza	2.977 m
Altezza	4.27 m
Numero di Autisti nella Cabina di Guida	2
Tipologia di Freno	Elettrico (rigenerativo, reostatico)
Protocolli di Sicurezza Usati	PZB, LZB, SHP, KVB, TBL1+, ETCS, Memor
Peso	86 ton
Carico per Asse	21.25 ton/asse
Tensione alla Catenaria	15 kV, 16.7 Hz, ac
	25 kV, 50 Hz, ac
	1.5 kV, cc
	3 kV, cc
Pantografi	4
Motori Elettrici	4 asincroni
Velocitá di Servizio Massima	160 km/h in Germania, Olanda, Belgio
	140 km/h in Austria, Polonia, Francia
Forza di Trazione allo Spunto	300 kN
Forza di Trazione Continuativa	252 kN
Forza Frenante	240 kN
Potenza Erogata in Trazione	5600 kW
Potenza Dissipata in Frenata	2600 kW
Passo del Carrello	2.7 m
Diametro Ruota (a Nuovo)	1.25 m
Diametro Ruota (Usurata)	1.17 m

Tabella 3.1: Caratteristiche della Locomotiva BOMBARDIER - TRAXX BR 186

Figura 3.1: Locomotiva BOMBARDIER - TRAXX BR 186

BOMBARDIER - TRAXX BR 185.1

Caratteristica	
Casa Costruttrice	Bombardier
Nome del Modello	Traxx Br 185.1
Tipologia di Alimentazione	Elettrica
Anno di Messa in Servizio	2001/2004
Operatori	Varie
Tipologia di Treno	Merci, passeggeri
Profilo Cinematico	UIC 505-1
Scartamento	1435 mm
Curva Minima di Linea	80 m
Rodiggio	B0'-B0'
Norme Applicabili	EN
Aree di Circolazione	Germania, Repubblica Ceca, Belgio, Austria
Lunghezza (con Accoppiatori)	18.9 m
Larghezza	2.978 m
Altezza	4.238 m
Protocolli di Sicurezza	PZB, LZB, ZUB262ct, Integra, ETCS
Peso	84 ton
Carico per Asse	21 ton/asse
Tensione alla Catenaria	15 kV, 16.7 Hz, ac
	25 kV, 50 Hz, ac
Motori Elettrici	4
Velocitá di Servizio Massima	140 km/h
Forza di Trazione allo Spunto	300 kN
Forza di Trazione Continuativa	265 kN
Forza Frenante	240 kN
Potenza Erogata in Trazione	5600 kW
Potenza Dissipata in Frenata	2600 kW
Passo del Carrello	2.7 m
Diametro Ruota (a Nuovo)	1.25 m

Tabella 3.2: Caratteristiche della Locomotiva BOMBARDIER - TRAXX BR 185.1

Figura 3.2: Locomotiva BOMBARDIER - TRAXX BR 185.1

SIEMENS - VECTRON AC

Caratteristica	
Casa Costruttrice	Siemens
Nome del Modello	Vectron AC
Tipologia di Alimentazione	Elettrica
Anno di Messa in Servizio	2010
Operatori	Varie
Tipologia di Treno	Merci
Profilo Cinematico	UIC 505-1
Scartamento	1435 mm
	1520 mm
	1668 mm
Curva Minima di Linea	80 m
Rodiggio	B0'-B0'
Norme Applicabili	EN
Aree di Circolazione	Austria, Germania, Danimarca, Svezia, Norvegia
Lunghezza (con Accoppiatori)	18.98 m
Larghezza	3.012 m
Altezza	3.86 m
Tipologia di Freno	Elettrico
Protocolli di Sicurezza Usati	PZB, LZB, ETCS, DK-STM, ATC2-STM
Peso	90 ton
Carico per Asse	22.5 ton/asse
Tensione alla Catenaria	15 kV, 16.7 Hz, ac
	25 kV, 50 Hz, ac
Motori Elettrici	4
Velocitá di Servizio Massima	160-200 km/h
Forza di Trazione allo Spunto	300-320 kN
Forza Frenante	240 kN
Potenza Erogata in Trazione	6400 kW
Potenza Dissipata in Frenata	2600 kW
Diametro Ruota (a Nuovo)	1.25 m
Diametro Ruota (Usurata)	1.16 m

Tabella 3.3: Caratteristiche della Locomotiva SIEMENS - VECTRON AC

Figura 3.3: Locomotiva SIEMENS - VECTRON AC

SIEMENS - VECTRON DUAL MODE

Caratteristica	
Casa Costruttrice	Siemens
Nome del Modello	Vectron Dual Mode
Tipologia di Alimentazione	Elettrica-Diesel
Anno di Messa in Servizio	2018
Operatori	Varie
Tipologia di Treno	Merci
Profilo Cinematico	UIC 505-1
Scartamento	1435 mm
Curva Minima di Linea	80 m
Rodiggio	B0'-B0'
Norme Applicabili	EN
Aree di Circolazione	Germania
Lunghezza (con Accoppiatori)	19.975 m
Larghezza	3.024 m
Altezza	4.22 m
Tipologia di Freno	Elettrico
Protocolli di Sicurezza Usati	PZB, ETCS
Peso	90 ton
Carico per Asse	22.5 ton/asse
Tensione alla Catenaria	15 kV, 16.7 Hz, ac
Motore Diesel	1, MTU 16V 4000 R84
Capacitá del Serbatoio	2600 l
Motori Elettrici	4 asincroni
Velocitá di Servizio Massima	160 km/h
Forza di Trazione allo Spunto	300 kN
Forza Frenante	150 kN
Potenza Erogata in Trazione	2400 kW, ac 2000 kW, diesel
Potenza Dissipata in Frenata	2100 kW, ac 2000 kW, diesel
Diametro Ruota (a Nuovo)	1.1 m
Diametro Ruota (Usurata)	1.02 m

Tabella 3.4: Caratteristiche della Locomotiva SIEMENS - VECTRON DUAL MODE

Figura 3.4: Locomotiva SIEMENS - VECTRON DUAL MODE

STADLER - EURO 4001

Caratteristica	
Casa Costruttrice	Stadler
Nome del Modello	Euro 4001
Tipologia di Alimentazione	Diesel
Anno di Messa in Servizio	2018
Operatori	Varie
Tipologia di Treno	Merci
Profilo Cinematico	UIC 505-1
Scartamento	1435 mm
Curva Minima di Linea	122 m
Rodiggio	C0'-C0'
Norme Applicabili	EN
Aree di Circolazione	Spagna, Francia, Belgio
Lunghezza (con Accoppiatori)	23.02 m
Larghezza	2.9 m
Altezza	4.29 m
Tipologia di Freno	Elettrico
Protocolli di Sicurezza Usati	ETCS, KVBlevel2, TBL1+
Peso	120-123 ton
Carico per Asse	20-20.5 ton/asse
Motore diesel	1, CAT16C175
Capacitá del serbatoio	6400 l
Velocitá di Servizio Massima	100 km/h in Belgio 120 km/h in Francia
Forza di Trazione allo Spunto	500 kN
Forza di Trazione Continuativa	430 kN
Potenza Erogata in Trazione	2800 kW
Diametro Ruota (a Nuovo)	1.1 m
Diametro Ruota (Usurata)	1.02 m

Tabella 3.5: Caratteristiche della Locomotiva STADLER - EURO 4001

Figura 3.5: Locomotiva STADLER - EURO 4001

STADLER - EURO 6000

Caratteristica	
Casa Costruttrice	Stadler
Nome del Modello	Euro 6000
Tipologia di Alimentazione	Elettrica
Anno di Messa in Servizio	2018
Operatori	Varie
Tipologia di Treno	Merci
Profilo Cinematico	UIC 505-1
Scartamento	1435 mm
Curva Minima di Linea	90 m
Rodiggio	C0'-C0'
Norme Applicabili	EN
Aree di Circolazione	Spagna, Francia, Belgio, Lussemburgo
Lunghezza (con Accoppiatori)	23.02 m
Larghezza	2.9 m
Altezza	4.29 m
Tipologia di Freno	Elettrico (rigenerativo)
Protocolli di Sicurezza Usati	ETCS, ASFA, KBV
Peso	120 ton
Carico per Asse	20 ton/asse
Tensione alla Catenaria	25 kV, 50 Hz, ac
	3 kV, dc
	1.5 kV, dc
Motori elettrici	6
Velocitá di Servizio Massima	120 km/h
Forza di Trazione allo Spunto	500 kN
Forza di Trazione Continuativa	430 kN
Potenza Erogata in Trazione	6000 kW, 25 kV, 16.7 Hz, ac
	5600 kW, 3 kV, dc
	4000 kW, 1.5 kV, dc
Diametro Ruota (a Nuovo)	1.1 m
Diametro Ruota (Usurata)	1.02 m

Tabella 3.6: Caratteristiche della Locomotiva STADLER - EURO 6000

Figura 3.6: Locomotiva STADLER - EURO 6000

STADLER - EURO 9000

Caratteristica	
Casa Costruttrice	Stadler
Nome del Modello	Euro 9000
Tipologia di Alimentazione	Elettrica-Diesel
Anno di Messa in Servizio	2020
Operatori	Varie
Tipologia di Treno	Merci
Profilo Cinematico	UIC 505-1
Scartamento	1435 mm
Rodiggio	C0'-C0'
Norme Applicabili	EN
Aree di Circolazione	Italia, Germania, Austria, Svizzera, Olanda, Belgio
Lunghezza (con Accoppiatori)	23.02 m
Larghezza	2.9 m
Altezza	4.29 m
Interperno	14 m
Autisti nella Cabina di Guida	2
Tipologia di Freno	Pneumatico, elettrico (rigenerativo, reostatico)
Protocolli di Sicurezza Usati	ERTMS, ETCS-BL3
Peso	120 ton
Carico per Asse	20 ton/asse
Tensione alla Catenaria	15kV, 16.7 Hz, ac
	25 kV, 50 Hz, ac
	3 kV, dc
	1.5 kV, dc
Motore diesel	1, CATC32
Capacitá del Serbatoio	3500 l
Motori Elettrici	6 asincroni, trifase
Velocitá di Servizio Massima	120 km/h
Forza di Trazione allo Spunto	500 kN
Potenza Erogata in Trazione	9000 kW, ac
	1500 kW, dc
	1900 kW, diesel

Tabella 3.7: Caratteristiche della Locomotiva STADLER - EURO 9000

Figura 3.7: Locomotiva STADLER - EURO 9000

STADLER - EURO DUAL

Caratteristica	
Casa Costruttrice	Stadler
Nome del Modello	Euro Dual
Tipologia di Alimentazione	Elettrica-Diesel
Anno di Messa in Servizio	2019
Operatori	Varie
Tipologia di Treno	Merci, passeggeri
Profilo Cinematico	UIC 505-1
Scartamento	1435 mm
Rodiggio	C0'-C0'
Norme Applicabili	EN
Aree di Circolazione	Austria, Francia, Germania, Sud-Africa, Regno Unito
Lunghezza (con Accoppiatori)	23.02 m
Larghezza	2.9 m
Altezza	4.29 m
Autisti nella Cabina di Guida	2
Tipologia di Freno	Elettrico
Protocolli di Sicurezza Usati	PZB, ETCS
Peso	123 ton
Carico per Asse	20.5 ton/asse
Tensione alla Catenaria	15kV, 16.7 Hz, ac
	25 kV, 50 Hz, ac
	1.5 kV, dc
Motore diesel	1, CAT16C175
Capacitá del Serbatoio	3500 l
Motori Elettrici	6 trifase
Velocitá di Servizio Massima	120 km/h
Forza di Trazione allo Spunto	500 kN
Forza Frenante	240 kN
Potenza Erogata in Trazione	6150 kW, 15 kV, ac
	7000 kW, 25 kV, ac
	4100 kW, 1.5 kV, dc
	2800 kW, diesel
Diametro Ruota (a Nuovo)	1.067 m

Tabella 3.8: Caratteristiche della Locomotiva STADLER - EURO DUAL

Figura 3.8: Locomotiva STADLER - EURO DUAL

SOFTRONIC - TRANSMONTANA

Caratteristica	
Casa Costruttrice	Softronic
Nome del Modello	Transmontana
Tipologia di Alimentazione	Elettrica
Anno di Messa in Servizio	2010
Operatori	Varie
Tipologia di Treno	Merci
Profilo Cinematico	UIC 505-1
Scartamento	1435 mm
Curva Minima di Deposito	90 m
Rodiggio	C0'-C0'
Pendenza Massima Percorribile	2.5 pct.
Norme Applicabili	EN
Aree di Circolazione	Austria, Ungheria, Romania, Svezia, Slovacchia
Temperatura di Lavoro	-35ºC, +40ºC
Lunghezza (con Accoppiatori)	20.7 m
Larghezza	3 m
Interperno	10.3 m
Postazione di Comando	UIC-651
Illuminazione Interna	LED
Peso	120 ton
Carico per Asse	20 ton/asse
Tensione alla Catenaria	15kV, 16.7 Hz, ac
	25 kV, 50 Hz, ac
Pantografi	1, Stemann
Motori Elettrici	6 x 1000 kW asincroni, trifase
Velocitá di Servizio Massima	160 km/h
Forza di Trazione allo Spunto	435 kN
Forza di Trazione Continuativa	320 kN
Forza Frenante	245.3 kN
Potenza Erogata in Trazione	6600 kW, allo spunto
	6000 kW, continuativa
Passo del Carrello	2.175 m
Diametro Ruota (a Nuovo)	1.25 m
Diametro Ruota (Usurata)	1.21 m

Tabella 3.9: Caratteristiche della Locomotiva SOFTRONIC - TRANSMONTANA

Figura 3.9: Locomotiva SOFTRONIC - TRANSMONTANA

SOFTRONIC - PHOENIX

Caratteristica	
Casa Costruttrice	Softronic
Nome del Modello	Phoenix
Tipologia di Alimentazione	Elettrica
Anno di Messa in Servizio	2009
Operatori	Varie
Tipologia di Treno	Merci, Passeggeri
Profilo Cinematico	UIC 505-1
Scartamento	1435 mm
Curva Minima di Deposito	90 m
Rodiggio	C0-C0
Norme Applicabili	EN
Aree di Circolazione	Ungheria, Romania
Temperatura di Lavoro	+40ºC
Lunghezza (con Accoppiatori)	19.8 m
Larghezza	3 m
Interperno	10.3 m
Tipologia di Freno	Elettrico reostatico, auto-pneumatico (Knorr K-GPR)
	diretto-pneumatico (Oerlikon)
Protocolli di Sicurezza Usati	IVMS, DSV, PZB
Peso	126 ton +- 2 pct., ballast, a 120 km/h
	120 ton +- 2pct., no ballast, a 160-200 km/h
Carico per Asse	21 ton/asse +- 2pct., ballast, a 120 km/h
	20 ton/asse +- 2 pct., no ballast, a 160-200 km/h
Tensione alla Catenaria	25 kV, 50 Hz, ac
Giri del Motore	1100 rpm, continuativi
	1085 rpm, orari
	1930 rpm, di picco
Rapporto di Trasmissione	1/3.65, a 120 km/h
	1/2.66, a 160 km/h
	1/2.108, a 200 km/h
Pantografi	2
Motori Elettrici	6 x LJE 108-1
Velocitá di Servizio Massima	120 km/h, ballast
	160-200 km/h, no ballast
Forza di Trazione allo Spunto	440 kN, a 120 km/h/ 288 kN, a 160-200 km/h
Potenza Erogata in Trazione	6000 kW, allo spunto/ 5100 kW, continuativa
Passo del Carrello	2.175 m
Diametro Ruota (a Nuovo)	1.25 m
Diametro Ruota (Usurata)	1.21 m

Tabella 3.10: Caratteristiche della Locomotiva SOFTRONIC - PHOENIX

Figura 3.10: Locomotiva SOFTRONIC - PHOENIX

Capitolo 4

Simulazione Multibody in Simpack

4.1 Descrizione del Modello

4.1.1 Locomotiva

La locomotiva presa in riferimento per lo sviluppo del modello é una tipica locomotiva australiana, adibita al trasporto merci, con alimentazione Diesel e schema di rodiggio "C0-C0".

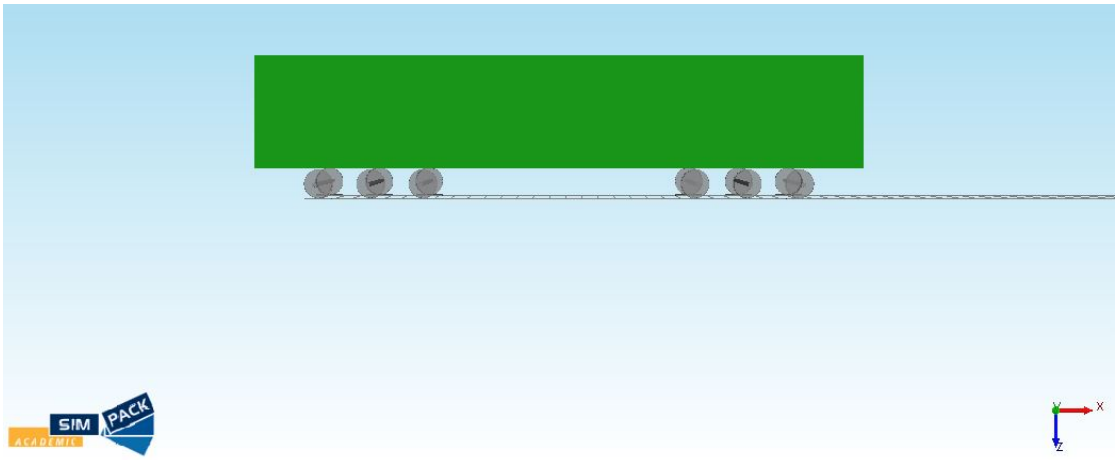

Figura 4.1: Locomotiva Modellata in Simpack

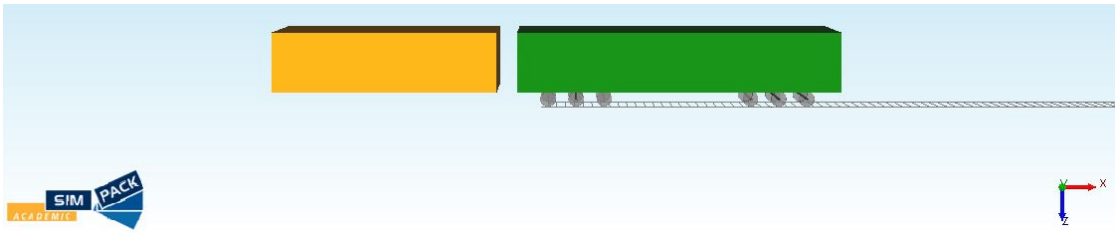

Figura 4.2: Convoglio Modellato in Simpack (Versione con 1 Vagone)

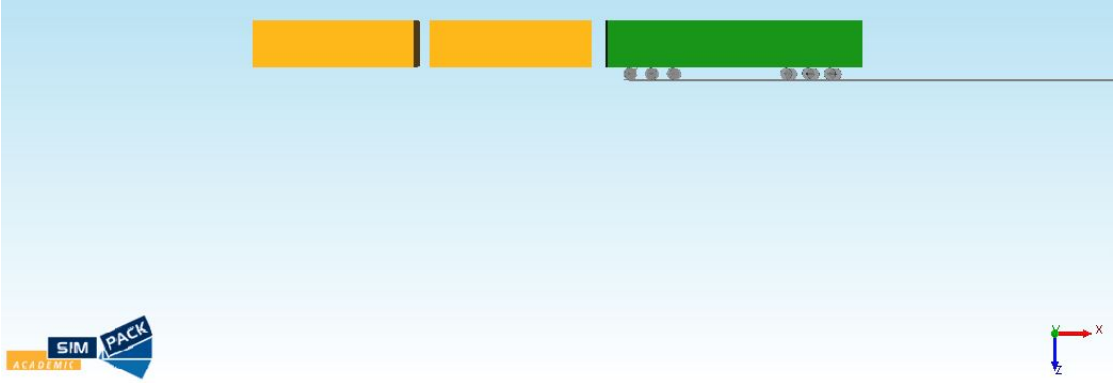

Figura 4.3: Convoglio Modellato in Simpack (Versione con 2 Vagoni)

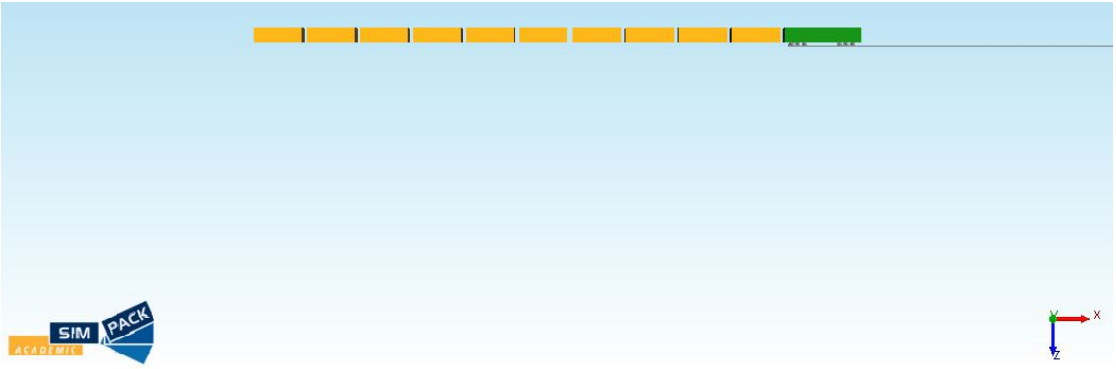

Figura 4.4: Convoglio Modellato in Simpack (Versione con 10 Vagoni)

Tra le principali caratteristiche si hanno:

- massa (complessiva): 134 ton;
- carico per asse: 22.33 ton/asse.

Proprietá Inerziali

Essa é stata realizzata modellando i corpi riportati nella tabella in basso con le seguenti caratteristiche.

Corpo	**m** **kg**	**zG** **m**	**Ixx** **kg*m2**	**Iyy** **kg*m2**	**Izz** **kg*m2**
cassa	90510	1.93	132139	3394125	3390553
telaio carrello	4903	0.733	3629	14453	17659
sala	2036	0.5016	1231	255	1231
boccola	239	0.5016	16.5	12.5	7
motore	3100	0.5086	608	496	553

Tabella 4.1: Caratteristiche dei Componenti della Locomotiva

Geometria

La geometria dei corpi in esame é la seguente:

- cassa:
  - lunghezza (con accoppiatori): 22.95 m;
  - larghezza: 3 m;
  - altezza: 4 m;
  - interperno: 13.7 m;
- sala montata:
  - lunghezza: 2.4 m;
  - diametro: 0.16 m.

Per telaio carrello, boccola e motore, poi, non é stata delineata una geometria dettagliata nel modello; essa, comunque, risulta inessenziale ai fini della simulazione in quanto i corpi, nel software, sono considerati a parametri concentrati.

Vincoli Applicati

I corpi in esame, successivamente, sono stati vincolati tramite la voce "joint" con l'uso del "general rail track joint", che permette:

- traslazione in x (longitudinale);
- traslazione in y (trasversale);
- traslazione in z (verticale);
- rotazione in x (rollio);
- rotazione in y (beccheggio);
- rotazione in z (imbardata).

Fanno eccezione, poi, motore e boccola per i quali e possibile solo la rotazione attorno all'asse y, rispetto alla sala; modellata con l'uso del "revolute beta".

4.1.2 Carrello

Scendendo nel dettaglio del carrello, si puó osservare che é del tipo a tre assi, a passo rigido (non c'é, dunque, possibilitá di sterzata delle sale), con sale motorizzate. Tra le principali caratteristiche si hanno:

- passo: 1.9 m;
- raggio ruota: 0.5016 m;

- profilo ruota: S1002;
- trasmissione: tranviaria.

A seguire, é riportato il suo schema costruttivo.

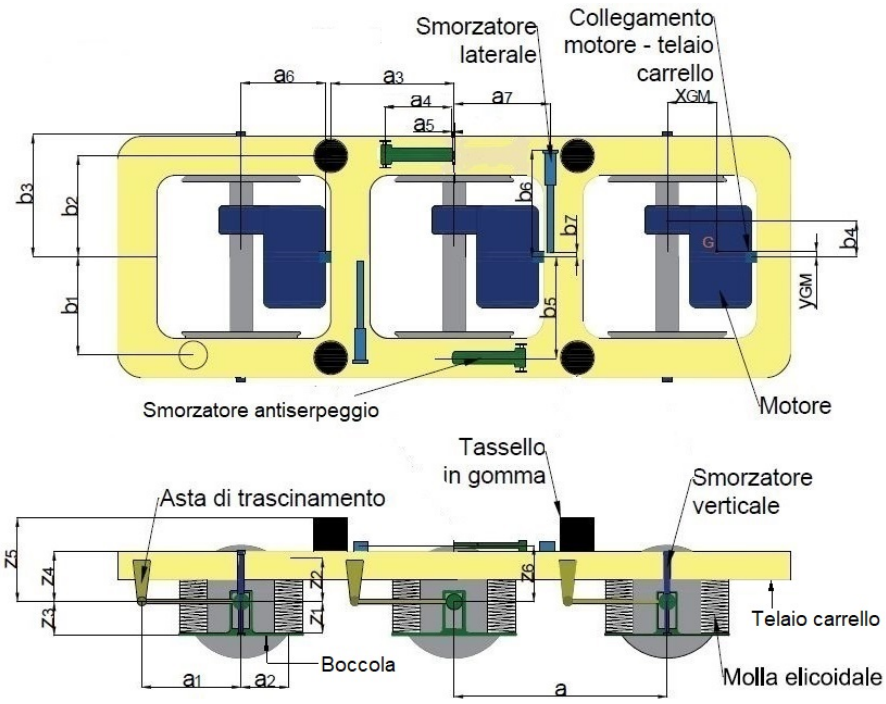

Figura 4.5: Schema del Carrello

Elementi Forza

É importante notare che in Simpack i componenti come sospensioni, smorzatori, trascinamenti o accoppiatori non sono modellabili come "corpi" ma come "elementi forza"; a tale proposito sono riportate le rigidezze e gli smorzamenti degli elementi forza che caratterizzano il carrello.

Corpo	Parametro kN,kN*s/m	Elemento forza in Simpack
trascinamento	**kx** 31000	linear spring PtP
molla elicoidale	**kx** 379	bushing cmp
	ky 200	
	kz 200	
	kflex 26	
	ktors 13	
smorzatore verticale	**cz** 45	linear damper PtP
smorzatore antiserpeggio	**kx** 10000	spring-damper serial PtP
	cx 100	
smorzatore laterale	**cy** 45	linear damper PtP
tassello in gomma	**kx** 157	bushing cmp
	ky 157	
	kz 7870	
collegamento telaio-motore	**kx** 100	bushing cmp
	ky 100	
	kz 100	

Tabella 4.2: Dati sugli Elementi Forza del Carrello

Quote

Per la definizione di tali elementi, poi, é essenziale la realizzazione dei marker appartenenti ai corpi che scambiano le forze, i quali sono opportunamente posizionati conoscendo la geometria degli stessi.

a	**a1**	**a2**	**a3**	**a4**	**a5**	**a6**	**a7**
1.9	0.9	0.45	0.95	0.65	0	0.75	0.95
b1	**b2**	**b3**	**b4**	**b5**	**b6**	**b7**	
1	1.1	1.2	0.32	1.1	1.1	0	
z1	**z2**	**z3**	**z4**	**z5**	**z6**		
0	0	0.3	0.45	0.45	0.6		
xGm	**yGm**						
0.45	0.045						

Tabella 4.3: Quote del Carrello

Modifiche Costruttive

Rispetto alla versione di partenza del carrello, nel modello di convoglio con dieci vagoni e accoppiatore automatico, sono state svolte due tipi di modifiche costruttive (in maniera alternativa):

- sostituzione degli smorzatori antiserpeggio con due trascinamenti a livello secondario, aventi stessa posizione e lunghezza e:
  - $k = 25000\ \frac{kN}{m}$;
  - $c = 100\ \frac{kN*s}{m}$.

  I quali sono stati modellati con l'elemento forza "spring-damper parallel PtP".

- sostituzione degli smorzatori antiserpeggio con un trascinamento di tipo Siemens (della locomotiva ER20CF), posizionato all'altezza delle sale, lungo 1 m e avente:
  - $k = 50000\ \frac{kN}{m}$
  - $c = 200\ \frac{kN*s}{m}$

  Il quale é stato modellato con l'elemento forza "spring-damper parallel PtP".

4.1.3 Rimorchiate

Le rimorchiate sono state modellate in tre modi differenti, a paritá di massa complessiva delle stesse:

- un vagone in cui é concentrata la massa di dieci vagoni;
- due vagoni, uno con massa unitaria ed uno con massa nove volte quella del singolo vagone;
- dieci vagoni, ciascuno con massa unitaria.

Proprietá Inerziali

Le proprietá inerziali del vagone sono le seguenti:

- massa: 90 ton;
- carico per asse: 22.5 ton/asse (i vagoni sono equipaggiati, solitamente, con due carrelli a due assi);
- I_{xx}: 10000 $kg * m^2$;
- I_{yy}: 10000 $kg * m^2$;
- I_{zz}: 10000 $kg * m^2$.

Geometria

La geometria del vagone é la seguente:

- lunghezza (con accoppiatori): 15 m;
- larghezza: 3 m;
- altezza: 4 m.

Vincolamento

Nel modello, il vagone é vincolato sempre mediante l'utilizzo del "general rail track joint", questa volta con la specifica "s only"; ció significa che il suo grado di libertá é solo la traslazione longitudinale lungo il tracciato (con l'impiego di questo "joint" non c'é bisogno di modellare i carrelli).

4.1.4 Accoppiatore

Il collegamento tra la locomotiva ed il vagone o tra i vagoni, é realizzato per mezzo di un accoppiatore il quale é stato modellato in due modi differenti:

- un accoppiatore base, inteso come parallelo di molla e smorzatore, tramite l'elemento forza "spring-damper parallel PtP", avente:
  - $k = 10^7 \ \frac{N}{m}$
  - $c = 10^4 \ \frac{N*s}{m}$
  - lunghezza: 0.68 m (ma ce ne sono due, disposti in serie, che collegano locomotiva e vagone o i vagoni);
  - altezza dal piano del ferro: 1.06 m;
- un accoppiatore automatico, tramite l'elemento forza "spring-damper nonlinear with hysteresis PtP, avente:
  - caratteritica: non lineare, con isteresi;

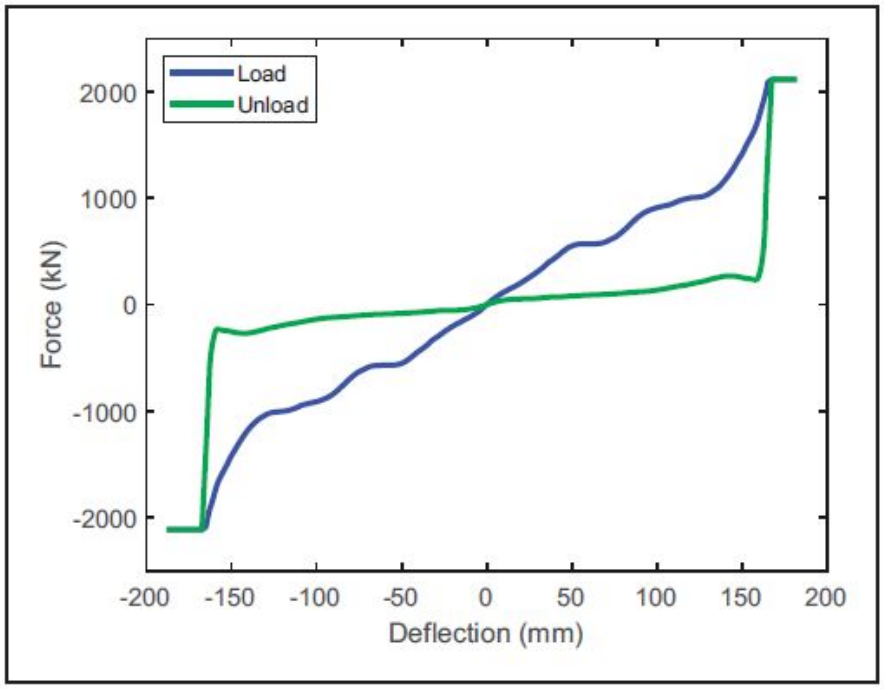

Figura 4.6: Caratteristica di Due Accoppiatori in Serie

- lunghezza: 0.68 m (ma ce ne sono due, disposti in serie, che collegano locomotiva e vagone o i vagoni);
- altezza dal piano del ferro: 1.06 m.

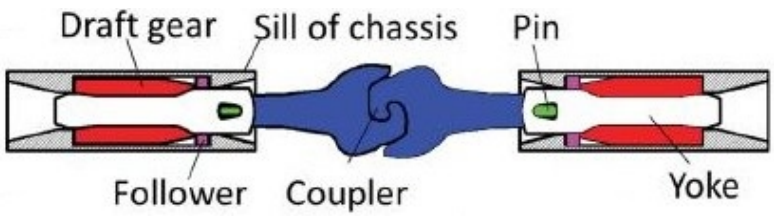

Figura 4.7: Accoppiatore Automatico

4.1.5 Rotaie

Nella modellazione del binario, tramite la voce "rail", sono state impiegate:

- rotaie Vignole, di tipo UIC-60;
- posate con un' inclinazione di 1/40 di radiante;
- aventi scartamento normale, di 1435 mm.

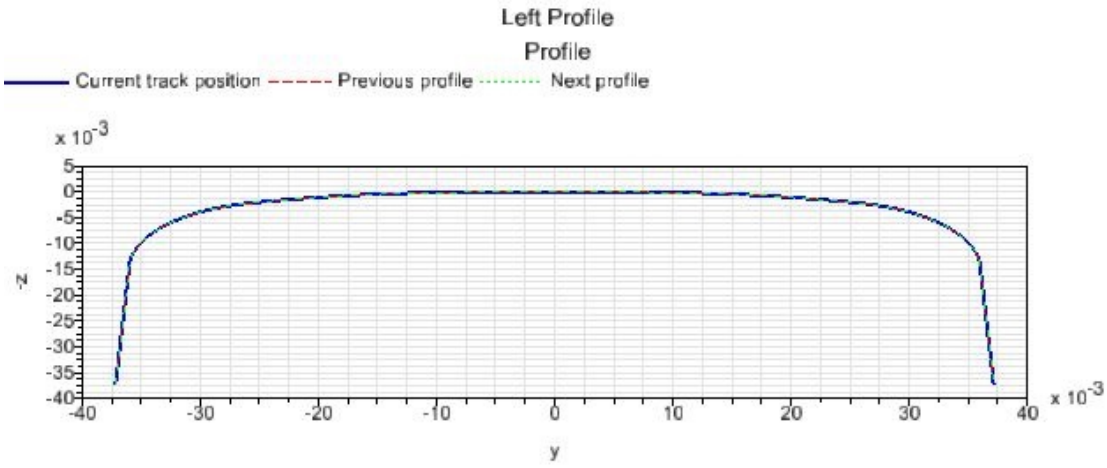

Figura 4.8: Profilo della Rotaia Sinistra

4.1.6 Coefficiente di Attrito Ruota-Rotaia

Le verifiche di funzionamento sono state condotte con un coefficiente di attrito ruota-rotaia paria a $f = 0.36$; esso fa parte delle specifiche della voce "rail-wheel pair", adibita alla realizzazione delle ruote.
Questo dato, assieme all'angolo di flangia della ruota, determina il massimo fattore di deragliamento ammissibile.

4.1.7 Contatto Ruota-Rotaia

Forze Tangenziali

Le forze tangenziali di contatto sono state modellate col contatto di tipo "fastsim", tramite la voce "rail-wheel contact"; questo tipo di contatto fa parte anche delle specifiche della voce "rail-wheel pair".

Forze Normali

Le forze normali di contatto sono state modellate col contatto di tipo "hertziano"; esso fa parte delle specifiche della voce "rail-wheel pair".
La teoria di Hertz nel campo della meccanica descrive ciò che avviene nel contatto tra due corpi con superfici curve, premuti l'uno contro l'altro da una forza diretta secondo la normale comune alle superfici dei due corpi e passante per il punto di contatto.
Si tratta di un problema di elasticitá non lineare in quanto il contatto, nella realtá, non avviene in un unico punto o lungo una retta, il che porterebbe ad infinito il valore della tensione, ma su di un'area.
Poiché l'estensione della zona di contatto aumenta in funzione del carico applicato, non si ha una proporzionalitá diretta tra forza e tensione.

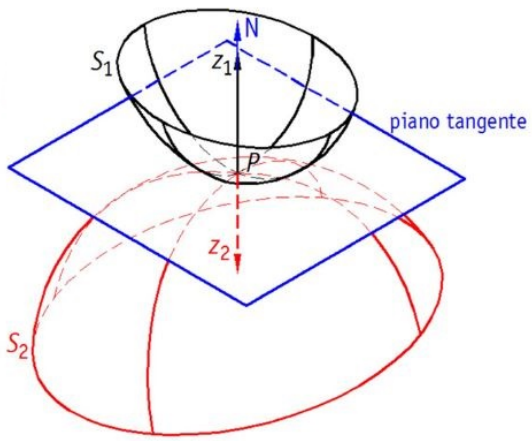

Figura 4.9: Contatto Hertziano tra Corpi

Le ipotesi alle quali sottostá la teoria del contatto impiegata sono le seguenti:

- le superfici sono continue e non conformi, cioè il contatto iniziale é in un punto o una linea;
- le superfici a contatto sono continue e possono essere rappresentate da polinomi del secondo ordine prima della deformazione;
- i solidi, rappresentanti i corpi a contatto, sono omogenei ed isotropi;
- le deformazioni sono elastiche e contenute entro i limiti di elasticità lineare quindi é valida la legge di Hooke;
- le deformazioni sono piccole;
- le dimensioni dell'area di contatto sono piccole rispetto al raggio di curvatura dei corpi a contatto;
- le superfici sono senza attrito, quindi fra i due corpi non vi sono forze di attrito radente e durante il contatto agisce solo la forza normale.

Ció, quindi, implica che:

- le tensioni di compressione si sviluppino a partire da pressioni superficiali tra due corpi curvi premuti tra di loro;
- le tensioni di contatto siano le tensioni principali di uno stato di tensione triassiale di compressione;
- vi sia lo sviluppo di una sezione critica al di sotto della superficie del corpo (sottopelle);
- il collasso si traduca, in genere, in sfaldamento o pitting sulle superfici dei corpi.

4.1.8 Coppia Motrice

La coppia motrice é stata modellata mediante l'elemento forza "force-torque expression cmp", la cui espressione é:

$$C = -k_0 * (V_{I,sala} - V_{ref}) \tag{4.1.8.1}$$

per il quale é prevista una taratura della costante k_0 nel rispetto di un profilo di velocitá di riferimento V_{ref} che il veicolo deve assumere trovandosi, invece, alla velocitá effettiva $V_{I,sala}$.
Nel tarare questa costante si é scelto il valore di 4500 $N * s$ al fine di evitare lo slittamento delle sale.
Questo tipo di controllo sulla coppia permette, dunque, il mantenimento della velocitá del convoglio pressoché costante.
La velocitá del veicolo, assimilata a quella della prima sala, é ottenuta tramite la funzione "jointst", che restituisce la derivata prima della posizione del "joint" della sala.
Il profilo di velocitá di riferimento é implementato tramite "input function".
La coppia motrice, inoltre, é scambiata tra due marker coincidenti: uno relativo al b.r.f. del motore e l'altro relativo alla sala, posizionato nella zona di interfaccia col motore.

4.1.9 Resistenza al Moto

La resistenza al moto, intesa come resistenza al rotolamento, é stata modellata in base ad una formulazione nota da un benchmark internazionale.

$$F_{RR} = Q * \frac{m}{1000} * (2.943 + 89.200 * \frac{n_a}{m} + 0.110 * V + 1581.12 * \frac{a}{m}) \tag{4.1.9.1}$$

Dove:

- Q é il fattore aerodinamico, vale 1 per i vagoni e 3.2 per le locomotive;
- m é la massa del rotabile considerato;
- n_a é il numero di assi del rotabile considerato;
- V é la velocitá del rotabile considerato;
- a é l'accelerazione del rotabile considerato.

L'elemento forza impiegato é la "force-torque expression Cmp" che agisce in direzione x, ovvero é sempre tangente alla traiettoria percorsa dal convoglio.
La resistenza al moto é stata associata esclusivamente alle rimorchiate mentre per la locomotiva essa é considerata nella definizione del contatto ruota-rotaia.
Questa forza é scambiata tra il marker del b.r.f. della massa rimorchiata e un follow-track marker associato a tale massa (é un s.d.r. inerziale ma mobile lungo il tracciato e giace in corrispondeza del "joint" del corpo associato).

4.2 Verifica del Comportamento Dinamico della Locomotiva

4.2.1 Normative di Riferimento

Durante la fase di verifica del comportamento dinamico del veicolo ferroviario ci si é attenuti agli standard della normativa UNI-EN-14363, riguardante:

- prove e simulazioni per l'accettazione delle caratteristiche di marcia dei veicoli ferroviari;
- prove di comportamento dinamico e statico.

4.2.2 Tracciati di Prova

Nelle simulazioni sono state impiegate le seguenti tipologie di tracciato:

- curva (dx) con raggio di 150 m e Twist;
  - rettilineo di ingresso di lunghezza 100 m;
  - clotoide di lunghezza 50 m, raggio 150 m e sopraelevazione lineare da 0 mm a 27.7 mm;
  - curva di lunghezza 100, raggio 150 m, sopraelevazione costante per 43.15 m pari a 27.7 mm, lineare per 13.7 m (lunghezza del twist pari all'interperno della locomotiva) da 27.7 mm a -27.7 mm ed infine costante per 43.15 m pari a -27.7 mm;
  - clotoide di lunghezza 50 m, raggio 150 m e sopraelevazione lineare da -27.7 mm a 0 mm;
  - rettilineo di uscita di lunghezza 100 m;

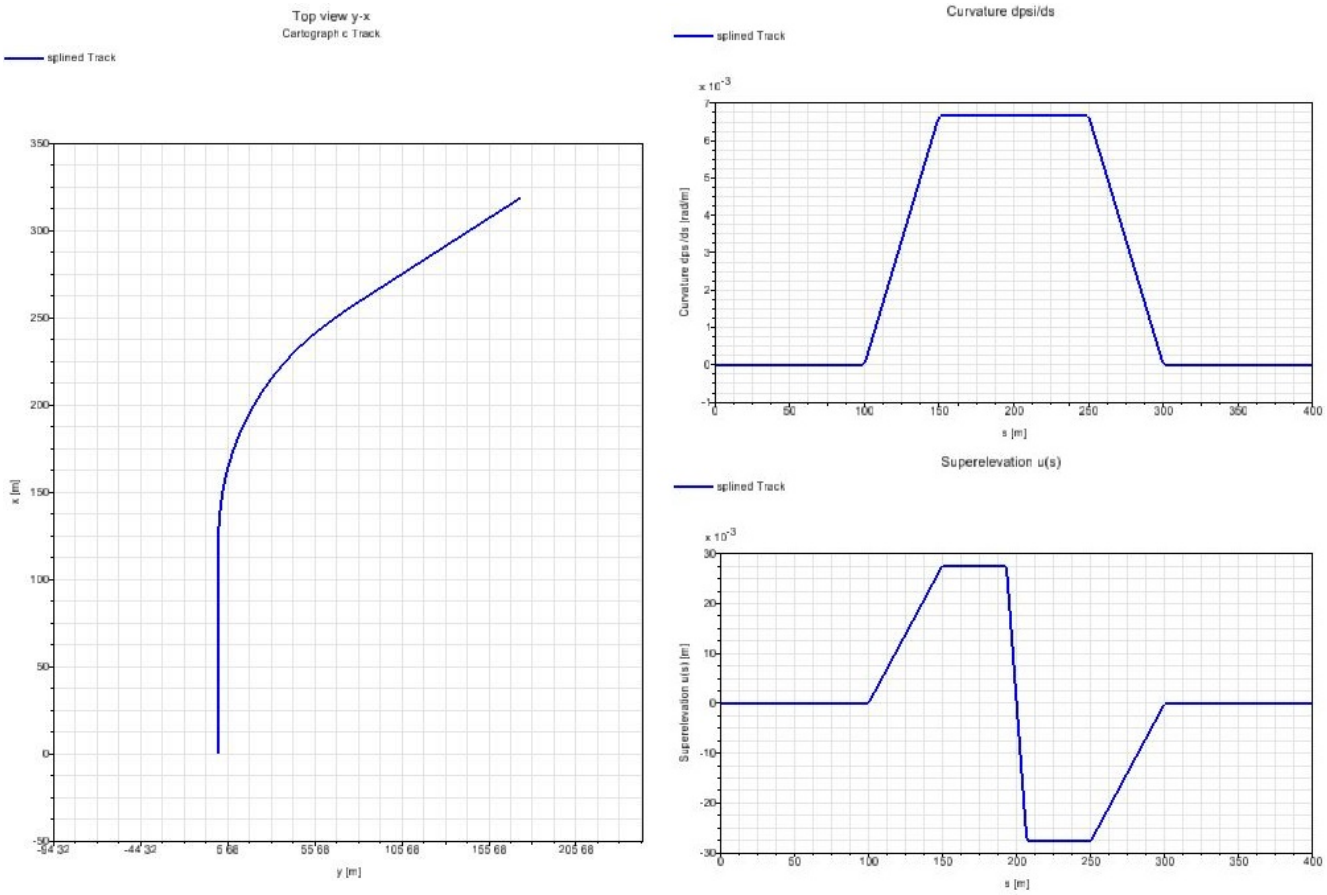

Figura 4.10: Curva con Raggio di 150 m e twist

- curva (dx) con raggio di 100 m;
  - rettilineo di ingresso di lunghezza 100 m;
  - clotoide di lunghezza 50 m, raggio 100 m, sopraelevazione lineare da 0 mm a 50 mm e allargamento di binario lineare da 0 mm a 19 mm;
  - curva di lunghezza 100 m, raggio 100 m, sopraelevazione costante pari a 50 mm e allargamento di binario costante pari a 19 mm;
  - clotoide di lunghezza 50 m, raggio 100 m, sopraelevazione lineare da 50 mm a 0 mm e allargamento di binario lineare da 19 mm a 0 mm;
  - rettilineo di uscita di lunghezza 100 m;

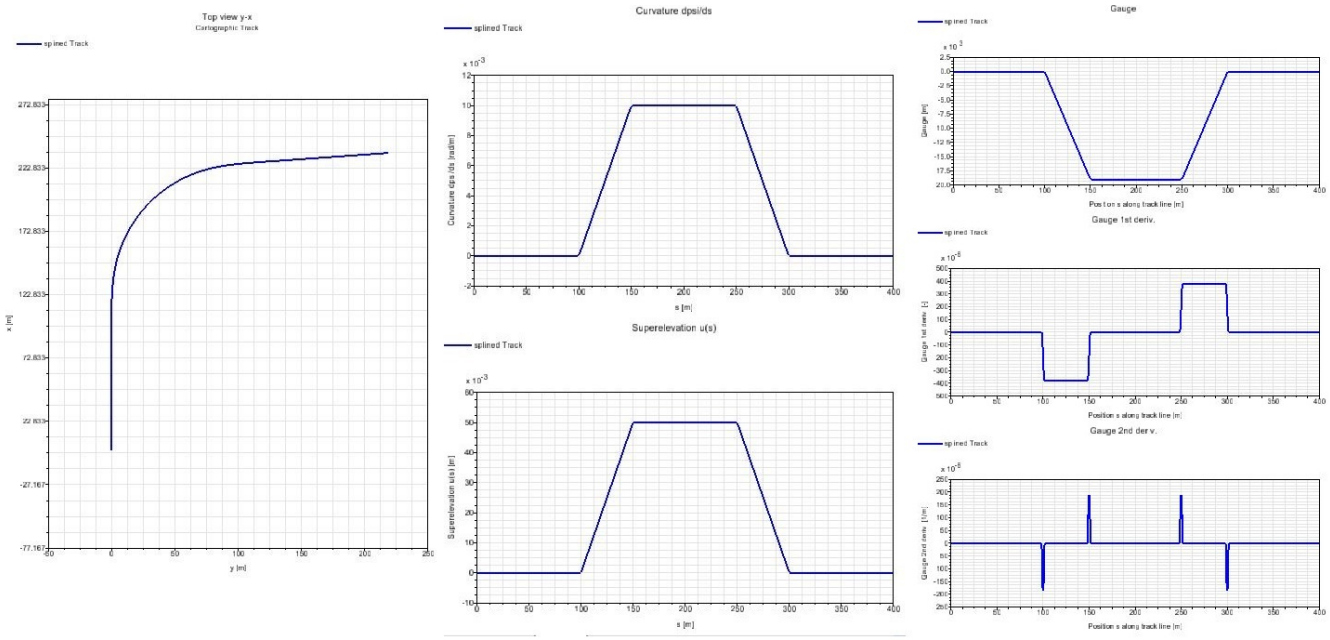

Figura 4.11: Curva con Raggio di 100 m

- curva (dx) con raggio di 150 m;
  - rettilineo di ingresso di lunghezza 100 m;
  - clotoide di lunghezza 50 m, raggio 150 m, sopraelevazione lineare da 0 mm a 100 mm e allargamento di binario lineare da 0 mm a 13 mm;
  - curva di lunghezza 100 m, raggio 150 m, sopraelevazione costante pari a 100 mm e allargamento di binario costante pari a 13 mm;
  - clotoide di lunghezza 50 m, raggio 150 m, sopraelevazione lineare da 100 mm a 0 mm e allargamento di binario lineare da 13 mm a 0 mm;
  - rettilineo di uscita di lunghezza 100 m;

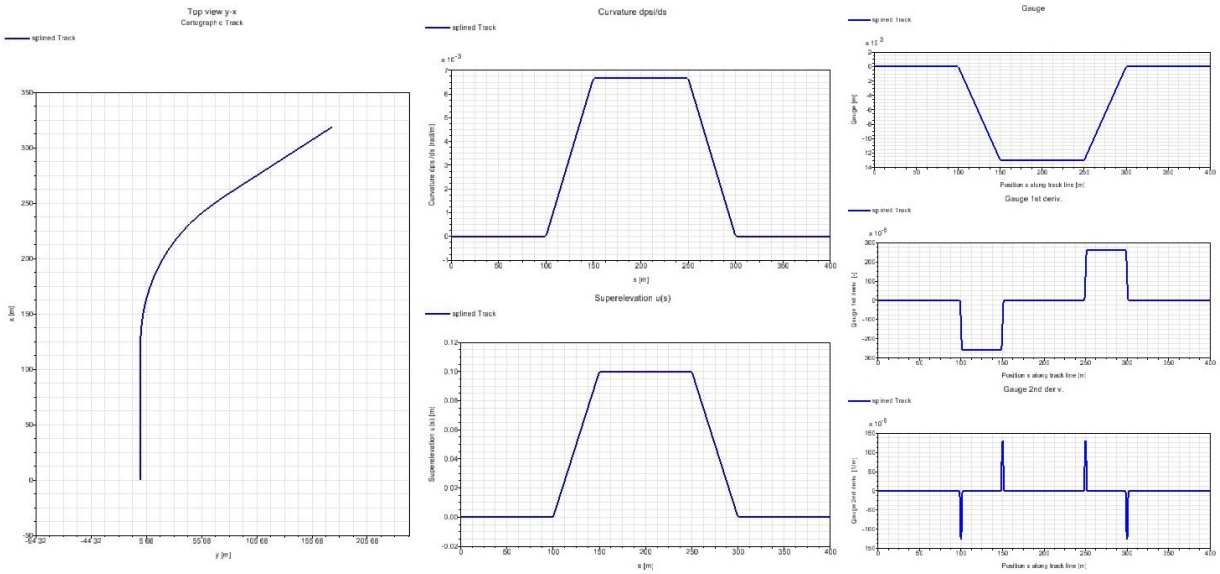

Figura 4.12: Curva con Raggio di 150 m

- curva "s" (dx-sx).
  - rettilineo di ingresso di lunghezza 100 m;
  - curva (dx) di lunghezza 21.09 m e raggio 190 m;
  - rettilineo di transizione di lunghezza 8.5 m;
  - curva (sx) di lunghezza 21.09 m e raggio 190 m;
  - rettilineo di uscita di lunghezza 100 m;

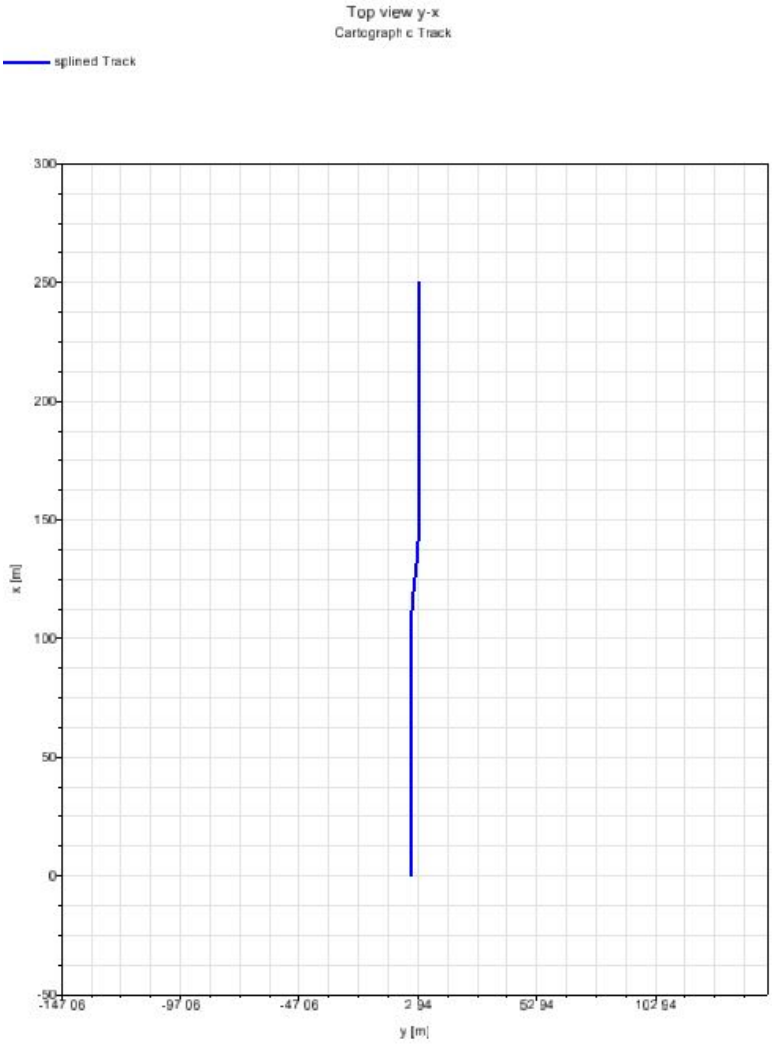

Figura 4.13: Curva "s"

4.2.3 Irregolaritá del Tracciato

Le irregolaritá, nelle simulazioni in cui sono state impiegate, sono state modellate con difetti:

- laterali;
- verticali;
- di rollio;
- di scartamento.

di tipo "ERRI-B176-high", relativi a velocitá del convoglio al di sotto dei 160 km/h (limite specifico per treni merci).
Questa tipologia di difetti é implementata con i seguenti passi:

- realizzazione delle "p.s.d." (power spectral density) in base al difetto da introdurre, con specifica di:
  - tipo, "predefinito, track irregularity ERRI B176";
  - sottotipo, "horizontal, vertical o crosslevel", "low" o "high", rispettivamente per difetti laterali, verticali, di rollio e di scartamento;
  - numero di punti per la realizzazione dello spettro;
- realizzazione delle "excitation" in base al difetto da introdurre, con specifica di:
  - tipo, "stocastico da p.s.d.";
  - valore di inizio generazione difetti, solitamente 1 o 2;
  - p.s.d. realizzata in precedenza;
  - numero di frequenze, solitamente 1000;
  - frequenza limite superiore, solitamente 0.333;
  - frequenza limite inferiore, solitamente 0.001;
  - posizione di inizio e fine inserimento, ricavata dallo sviluppo del tracciato;
- inserimento delle "excitation" durante la definzione del tracciato, nella voce omonima e specifica dei punti di inzio e fine inserimento con rispettive "fade-in length" e "fade-out length" (i difetti si presentano e si attenuano gradualmente ad inzio e fine tracciato, rispetto alla p.s.d. realizzata).

Va ricordato, poi, che ai fini delle verifiche, come da normativa, non é prevista la modellazione delle irregolaritá.

4.2.4 Velocitá del Convoglio

Il convoglio, nei vari tracciati, ha velocitá costante e pari alla massima velocitá ammissibile per un determinato raggio di curvatura, nel rispetto dell'accelerazione centrifuga limite di 0.1*g; fa eccezione esclusivamente il primo tracciato, per la verifica del twist, in cui é prevista una velocitá massima di 3 m/s (10 km/h).
Per i vari tracciati si ha, quindi:

- 12 m/s (43 km/h) per il tracciato con curva di 100 m;
- 16 m/s (58 km/h) per il tracciato con curva di 150 m;
- 14 m/s (50 km/h) per il tracciato con curva "s".

Capitolo 5

Risultati

5.1 Introduzione

La verifica del comportamento dinamico della locomotiva, con la conseguente quantificazione del suo rischio di deragliamento, si snoda attraverso l'analisi, tramite le simulazioni in Simpack (in questa sede), di quattro parametri:

- fattore di deragliamento delle ruote Y/Q, il cui valore massimo ammissibile, con un coefficiente d'attrito di 0.36 ed un angolo di flangia della ruota di 70° (profilo S1002), é di 1.2;
- alzata delle ruote Δ_Z, il cui valore massimo ammissibile é di 5 mm;
- somma delle forze laterali di contatto ΣY della sala, il cui valore massimo ammissibile é pari al limite di ripage che vale $10^4 + \frac{P_{f0}}{3}$ (per le locomotive). P_{f0} é la somma dei carichi verticali nominali agenti sulla sala piú carica che nel caso in esame é quella anteriore del carrello anteriore, con un carico di 229.3 kN ed un limite di ripage di 86.4 kN.
  Questo parametro determina il rischio di spostamento delle traversine;
- fattore di scaricamento delle ruote Δ_Q/Q_0, il cui valore massimo ammissibile é di 0.6.

Agli andamenti di tali grandezze, successivamente, sono stati aggiunti, come da normativa:

- un filtro passa basso a 20 Hz ed un filtro di media mobile, nel caso di Y/Q, ΣY e Δ_Q/Q_0;
- un filtro passa basso a 5 Hz, nel caso del Δ_Z;

Va sottolineato che:

- Δ_Z é il parametro di validazione della prova di twist (Y/Q e Δ_Q/Q_0 risultano ulteriori parametro di controllo);

- Y/Q é il parametro di validazione delle prove con curva "s" e curve a 100, 150 m di raggio (Δ_Z e Δ_Q/Q_0 risultano ulteriori parametri di controllo) .

Inoltre, si é indagato, nei parametri analizzati, l'influenza di:

- irregolaritá del tracciato;
- presenza del convoglio e strategia di modellazione dello stesso;
- strategia di modellazione dell'accoppiatore;
- modifiche costruttive fatte al carrello della locomotiva.

Si sono svolte, dunque, simulazioni:

- esclusivamente con la locomotiva, con e senza irregolaritá di tracciato;
- con uno, due e dieci vagoni al seguito della locomotiva (stessa massa complessiva delle rimorchiate) con irregolaritá di tracciato;
- con accoppiatore "base" e automatico, nei casi in cui sono presenti le rimorchiate;
- con trascinamento singolo e doppio a livello secondario della locomotiva, in sostituzione degli smorzatori antiserpeggio, nel caso con dieci vagoni ed accoppiatore automatico.

5.2 Comportamento Dinamico della Locomotiva: Analisi

In primo luogo, é stato condotto un gruppo di simulazioni esclusivamente con la locomotiva, senza irregolaritá, come previsto da normativa, e si sono riscontrati i seguenti risultati:

	Parametro	**Twist**	**Curva 100 m**	**Curva 150 m**	**Curva "S"**
carrello anteriore	$Y/Q_{,max}$	-0.66	-0.48	-0.44	0.57
	$\Delta_{Z,max}[mm]$	0.88	0.86	0.86	1.02
	$\Sigma_{Y,max}[kN]$	-31.4	-60.8	-46.4	47.3
	$\Delta_Q/Q_{0,max}$	0.24	0.54	0.53	-0.53
carrello posteriore	$Y/Q_{,max}$	0.40	0.40	0.39	0.41
	$\Delta_{Z,max}[mm]$	0.86	0.84	0.85	0.97
	$\Sigma_{Y,max}[kN]$	-15.0	-43.7	-39.0	43.5
	$\Delta_Q/Q_{0,max}$	-0.20	0.41	0.45	-0.52

Tabella 5.1: Valori di Picco dei Parametri Analizzati

Si puó osservare che:

- per il primo parametro il caso piú critico é la prova del twist.
  Il segno positivo, riscontrato nelle ruote destre-interne alla curva, indica una forza laterale che riporta la ruota verso il suo centro di curvatura; il segno negativo, riscontrato nelle ruote sinistre-esterne alla curva, invece, indica una forza laterale che allontana la ruota dalla curva.

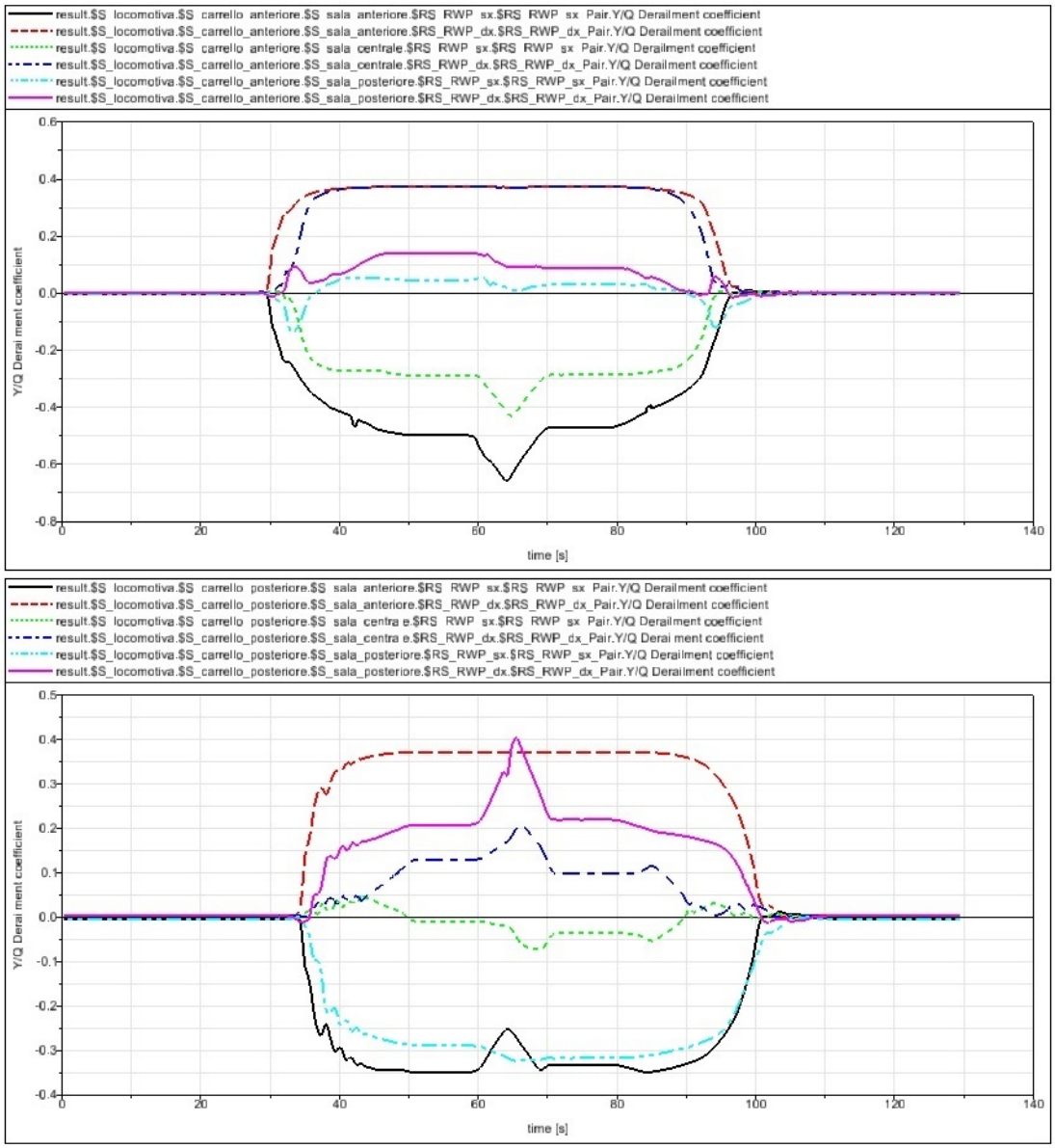

Figura 5.1: Fattore di Deragliamento delle Ruote nel Caso Critico (Twist)

- per il secondo parametro, il caso piú critico é la prova della curva "s".
  Il segno positivo, riscontrato nelle ruote sinistre-esterne alla curva, indica il loro arrampicamento sul binario; il segno negativo, riscontrato nelle ruote destre-interne alla curva, invece, indica il loro abbassamento rispetto alla zona nominale di contatto.

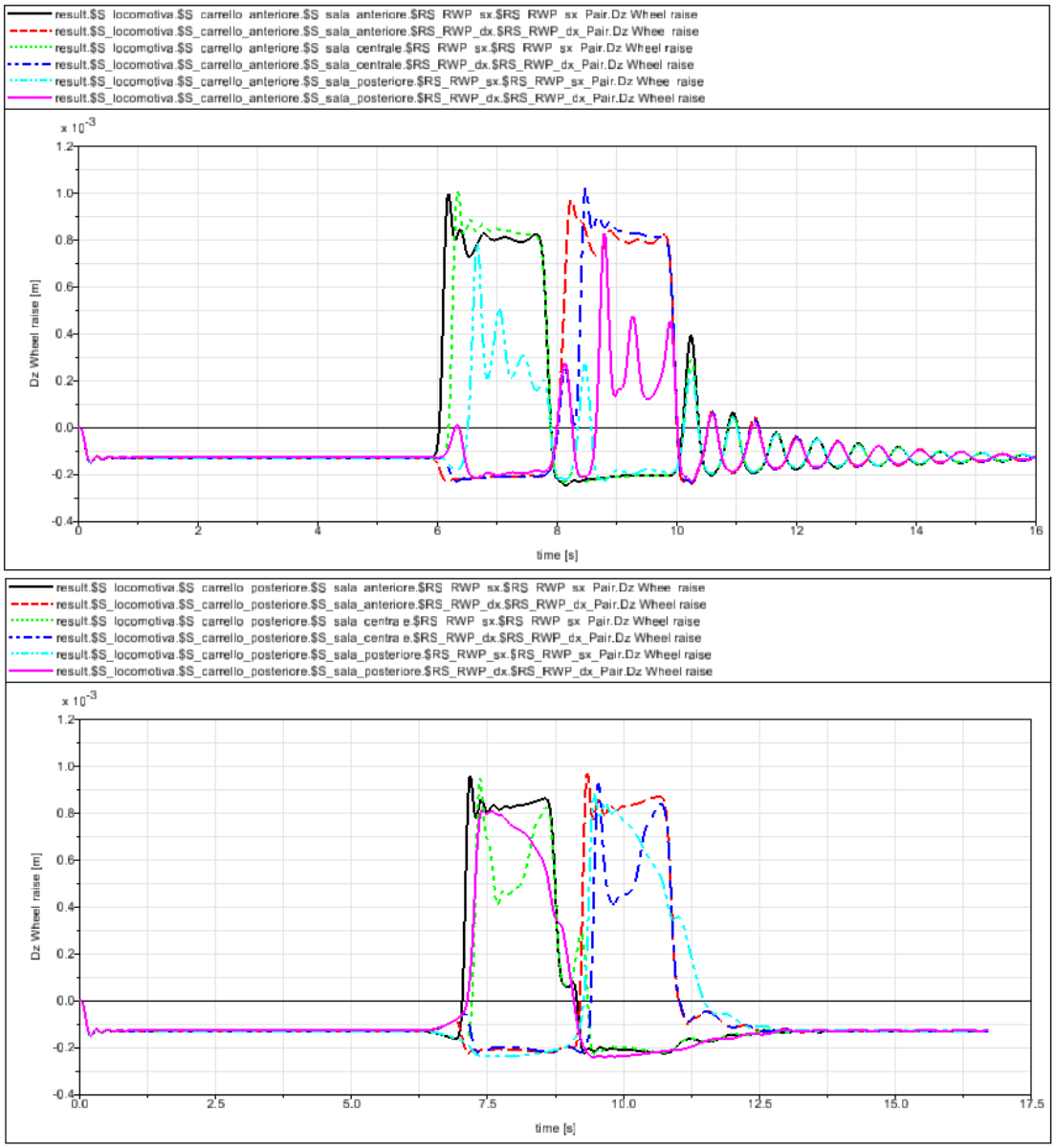

Figura 5.2: Alzata delle Ruote nel Caso Critico (Curva "s")

- per il terzo parametro, il caso piú critico é la prova della curva con raggio di 100 m.
  Valgono considerazioni sul segno, analoghe a quelle fatte per il primo parametro;

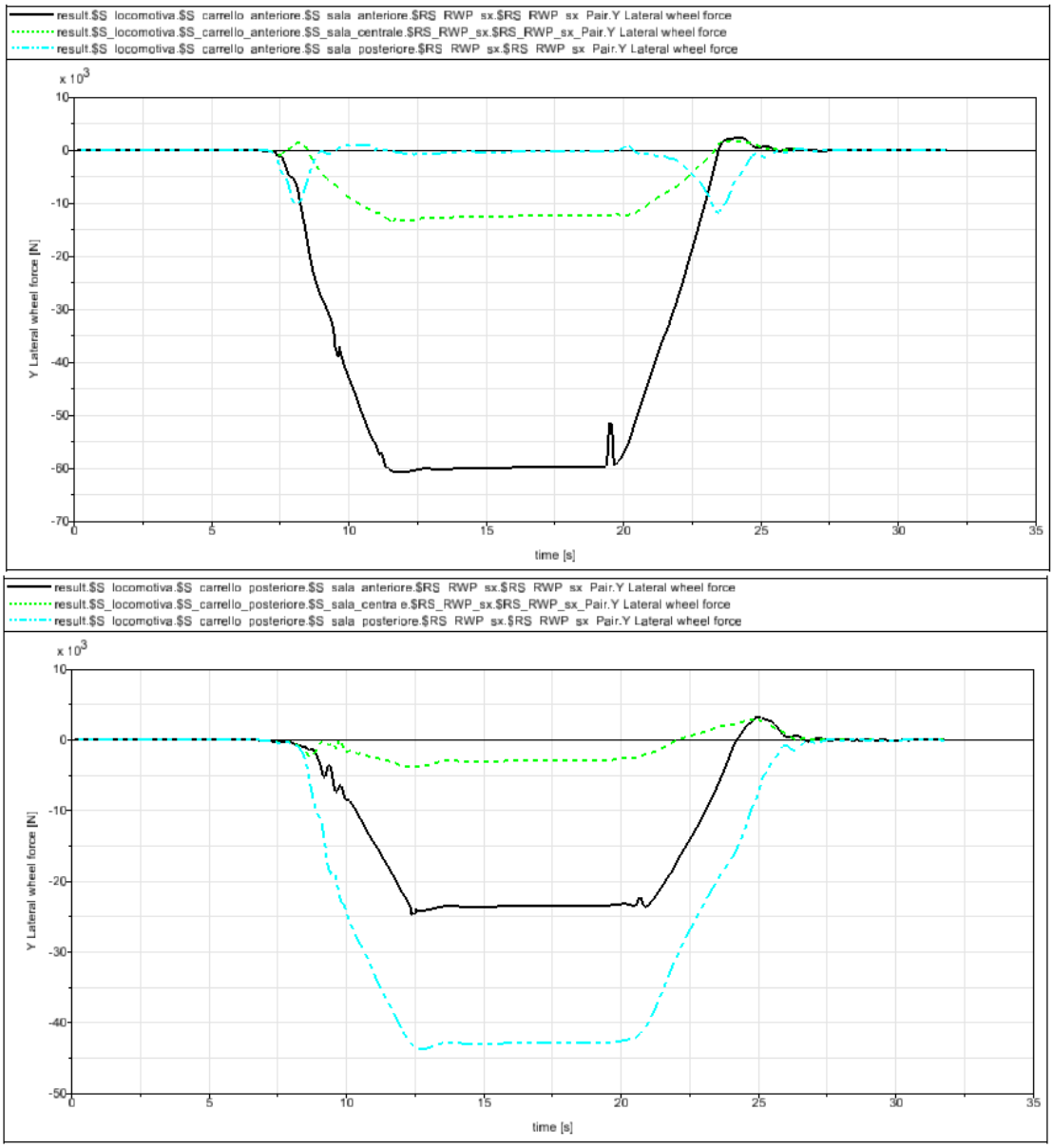

Figura 5.3: Somma delle Forze Laterali sulle Sale nel Caso Critico (Curva R100 m)

- per il quarto parametro, il caso piú critico é la prova della curva con raggio di 100 m.
  Il segno positivo, riscontrato nelle ruote sinistre-esterne alla curva, indica il loro caricamento rispetto rispetto al valore nominale di peso sostenuto; il segno negativo, riscontrato nelle ruote destre-interne alla curva, invece, indica il loro scaricamento rispetto al valore nominale di peso sostenuto.
  Quanto osservato é in accordo col fatto che il veicolo compie curve orarie ed il trasferimento di carico va dall'interno all'esterno della curva.

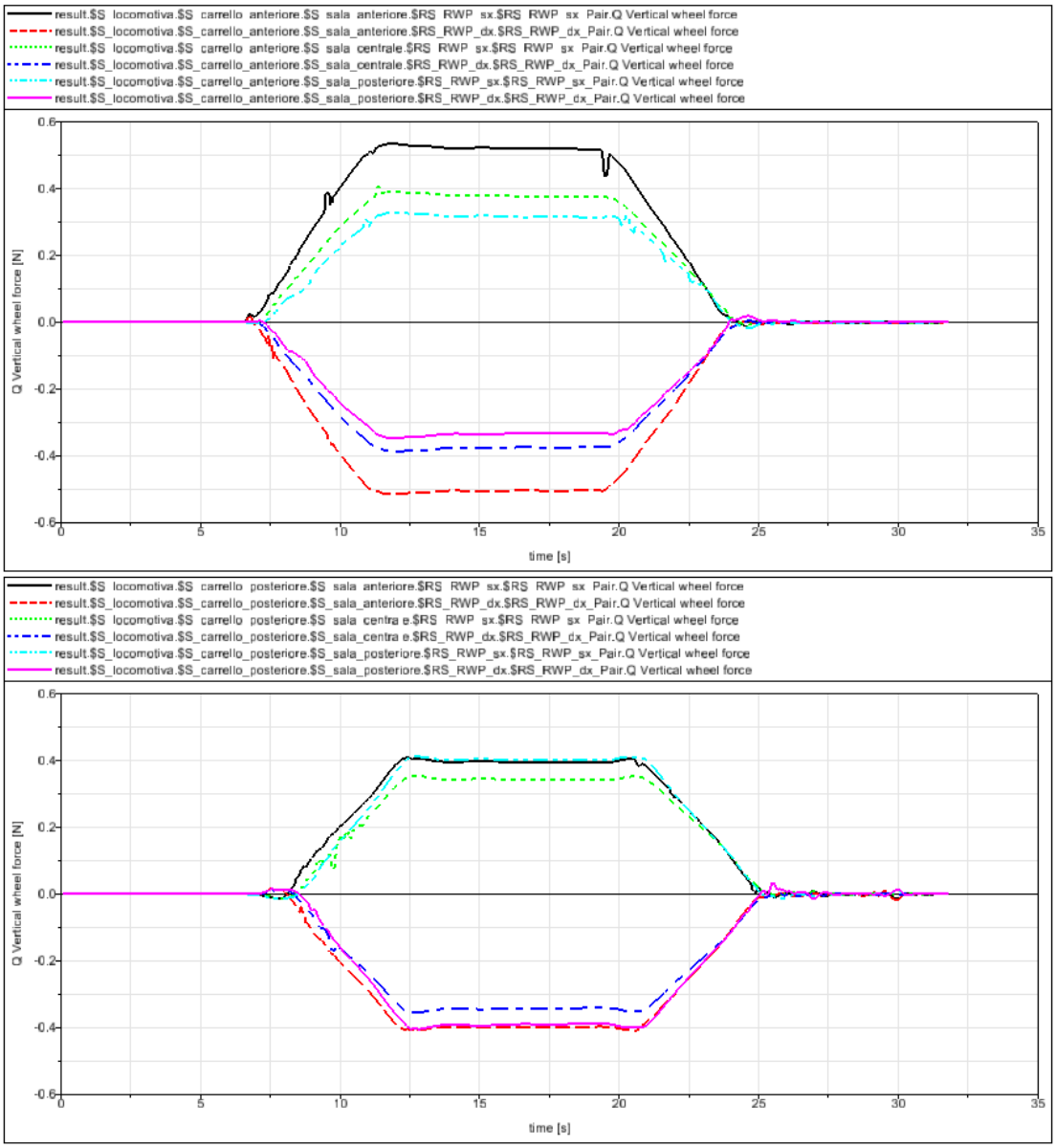

Figura 5.4: Fattore di Scaricamento delle Ruote nel Caso Critico (Curva R100 m)

Infine, dai valori registrati, si nota che il carrello anteriore, il primo ad inscriversi nelle curve, risulta piú critico rispetto a quello posteriore.
L'analisi dei valori ottenuti ha permesso di accertare, quindi, il corretto comportamento dinamico della locomotiva.

5.3 Effetto delle Irregolaritá del Tracciato

Successivamente, sono state introdotte le irregolaritá nel modello della locomotiva e si é potuto osservare un andamento delle grandezze in esame, analogo al caso precedente, seppure con un globale peggioramento dei risultati.

	Parametro	**Twist**	**Curva 100 m**	**Curva 150 m**	**Curva "S"**
carrello anteriore	$Y/Q_{,max}$	-0.65	-0.57	-0.45	0.61
	$\Delta_{Z,max}[mm]$	0.89	0.96	0.88	1.03
	$\Sigma_{Y,max}[kN]$	-35.4	-65.0	-52.3	-49.3
carrello posteriore	$Y/Q_{,max}$	0.42	0.41	0.39	0.39
	$\Delta_{Z,max}[mm]$	0.87	0.96	0.90	0.96
	$\Sigma_{Y,max}[kN]$	-15.7	-45.0	-41.1	44.5

Tabella 5.2: Valori di Picco dei Parametri Analizzati con Irregolaritá

	Parametro (pct.)	**Twist**	**Curva 100 m**	**Curva 150 m**	**Curva "S"**
carrello anteriore	$\delta_{Y/Q,max}$	-1.5	18.8	2.3	7.0
	$\delta_{\Delta_{Z,max}}$	1.1	11.6	2.3	1.0
	$\delta_{\Sigma_{Y,max}}$	12.7	6.9	12.7	4.2
carrello posteriore	$\delta_{Y/Q,max}$	5	2.5	0	-4.9
	$\delta_{\Delta_{Z,max}}$	1.2	14.2	5.9	-1.0
	$\delta_{\Sigma_{Y,max}}$	4.7	3.0	5.4	2.3

Tabella 5.3: Scostamenti tra Valori di Picco con e Senza Irregolaritá

Gli scostamenti sono stati evidenziati attraverso il parametro $\delta = \frac{|val_{irr}|-|val_{no,irr}|}{val_{no,irr}} *$ 100 che indica la differenza percentuale tra i parametri, con e senza irregolaritá. A seguire, sono riportati il fattore di deragliamento delle ruote, la loro alzata e la soma delle forze laterali sulle sale, nei casi critici, con (in basso) e senza (in alto) irregolaritá, relativamente alle ruote del carrello anteriore.

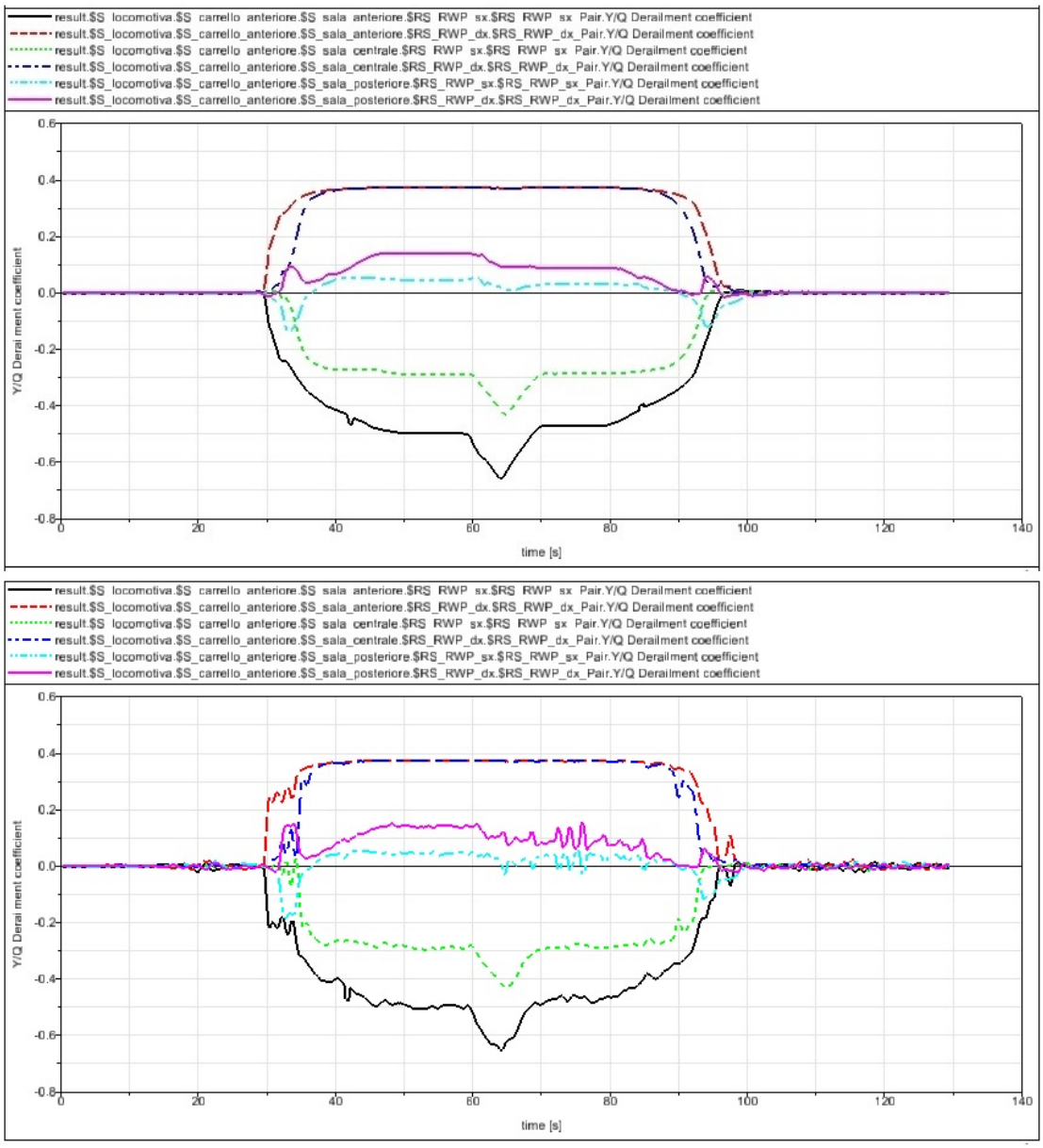

Figura 5.5: Fattore di Deragliamento delle Ruote nel Caso Critico (Twist) con e Senza Irregolaritá

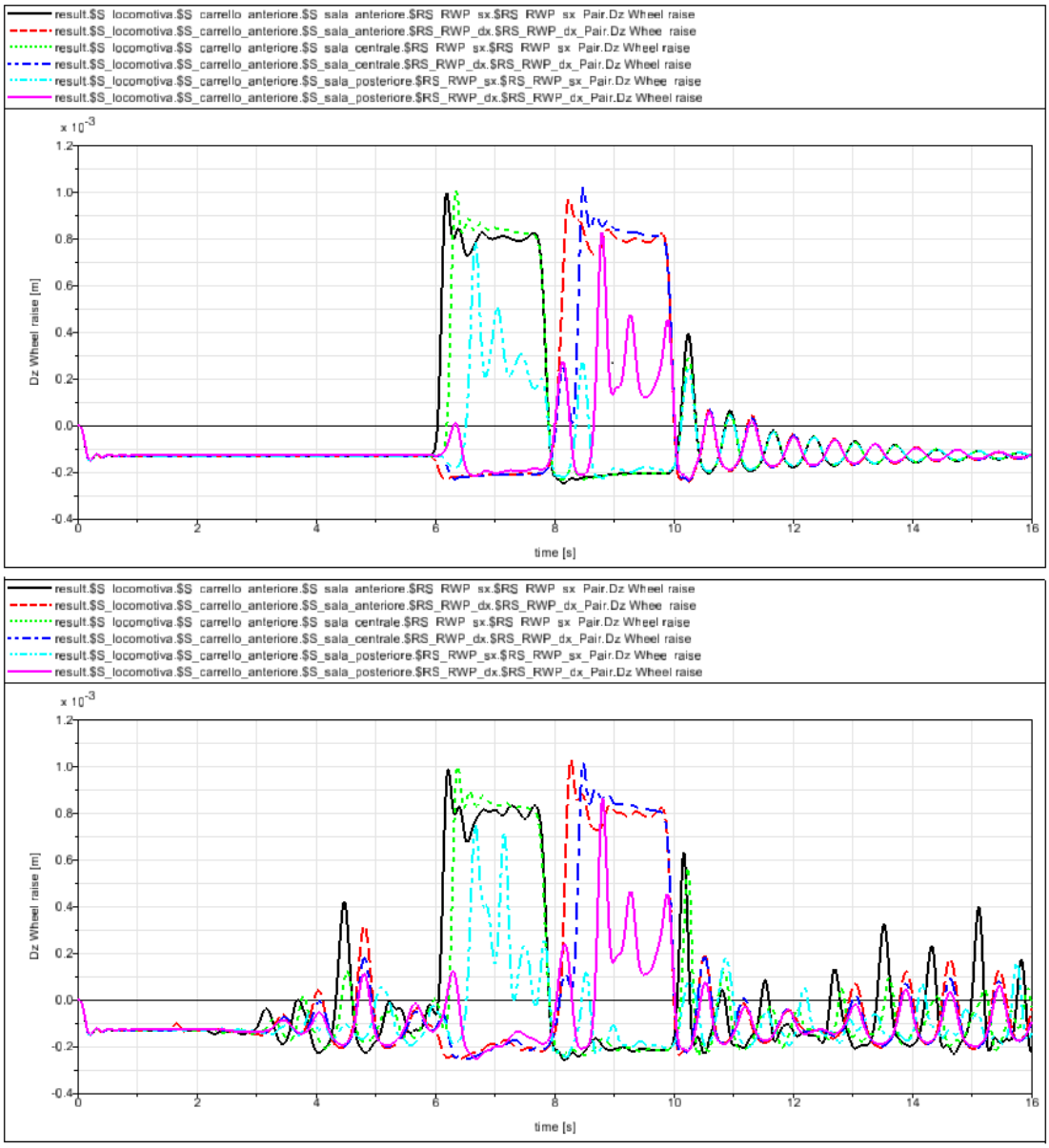

Figura 5.6: Alzata delle Ruote nel Caso Critico (Curva "s") con e Senza Irregolaritá

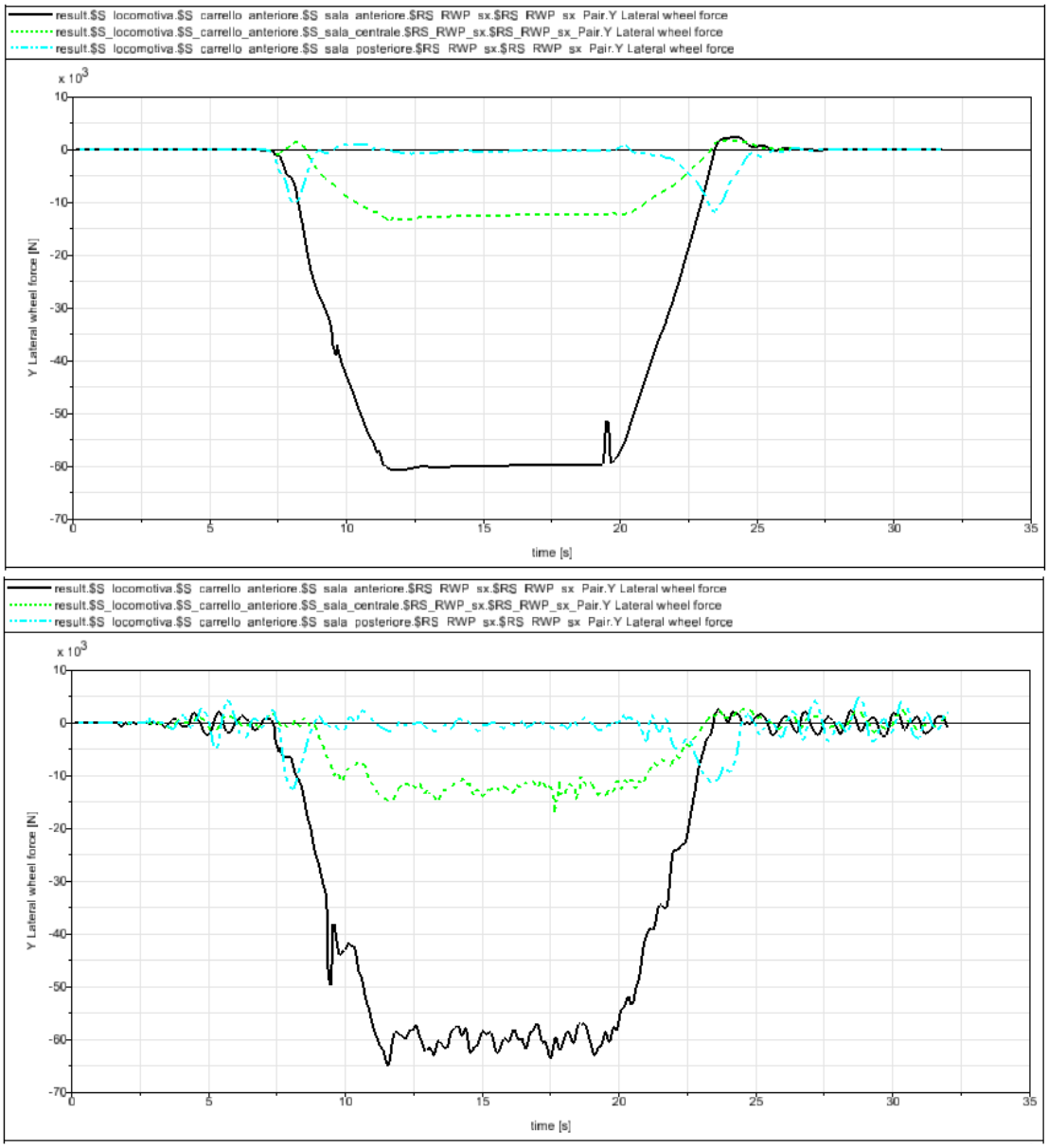

Figura 5.7: Somma delle Forze Laterali sulle Sale nel Caso Critico (Curva R100 m) con e Senza Irregolaritá

5.4 Effetto del Convoglio e dell'Accoppiatore

Le ulteriori simulazioni, in cui sono presenti il convoglio e le irregolaritá, hanno permesso di determinare l'ininfluenza della presenza del convoglio e della strategia di modellazione dello stesso ai fini dello studio dei parametri in esame, rispetto al caso della sola locomotiva.
Ció puó essere in accordo col fatto che i vagoni siano modellati col joint "s-only", per cui il loro unico grado di libertá é quello longitudinale, quindi, seguendo pedestremente il tracciato il loro comportamento non influenza quello della locomotiva.

Questa osservazione permette di determinare, dunque, la conservativitá del modello della sola locomotiva tanto quanto il modello piú dettagliato con la stessa avente al seguito dieci vagoni, col vantaggio che la prima soluzione risulta piú immediata da realizzare.
Contestualmente a quanto detto sopra, é stata osservata, inoltre, l'equivalenza dei risultati ottenuti modellando l'accoppiatore con le strategie "base" ed automatico rispetto al caso della sola locomotiva.
Va sottolineato, peró, che il valore aggiunto dei modelli con i vagoni (in particolare quello con dieci rimorchiate) sta nel fatto che essi riproducano anche il comportamento degli accoppiatori.

			Facc, kN		
		Twist	Curva 100 m	Curva 150 m	Curva "S"
acc. base	1 vagone	0.9	3.3	4.5	66.1
	2 vagoni	0.9*	5.2	3.3	87.1
	10 vagoni	0.9	4.1**	5.2	117.4
acc. automatico	1 vagone	0.8	2.7	2.5	60.3
	2 vagoni	0.9*	3.4	2.0	68.2
	10 vagoni***	0.8	0.8	1.1	75.2

Tabella 5.4: Valori di Picco della Reazione di Trazione dell'Accoppiatore

*picco riscontrato nel primo accoppiatore, negli altri casi nel secondo
**picco riscontrato nel primo accoppiatore, negli altri casi nel quinto
***in questo gruppo di simulazioni l'accoppiatore in cui si ha il picco di reazione cambia in ogni prova:

- nel twist é il quinto;
- nella curva R100 m é il nono;
- nella curva R150 m é il secondo;
- nella curva "s" é il sesto;

			Facc, kN		
		Twist	Curva 100 m	Curva 150 m	Curva "S"
acc. base	1 vagone	-7.6	-21.7	-16.6	-86.6
	2 vagoni	-7.4*	-22.0	-18.2*	-102.6
	10 vagoni**	-7.6	-11.2	-15.2	-110.2
acc. automatico	1 vagone	-7.4	-19.2	-14.8	-66.5
	2 vagoni	-7.4	-18.7	-14.4	-67.8***
	10 vagoni	-7.4	-10.5	-13.3	-56.2****

Tabella 5.5: Valori di Picco della Reazione di Compressione dell'Accoppiatore

*picco riscontrato nel primo accoppiatore, negli altri casi nel secondo
**in questo gruppo di simulazioni l'accoppiatore in cui si ha il picco di reazione cambia in ogni prova:

- nel twist e nella curva R150 m é il primo;
- nella curva R100 m é il terzo;
- nella curva "s" é il quinto;

***picco riscontrato nel secondo accoppiatore, negli altri casi nel primo
****picco riscontrato nel secondo accoppiatore, negli altri casi nel primo
Nella figura in basso é presentato il comportamento degli accoppiatori nel caso piú critico per questo componente (sia in trazione che in compressione), ovvero la curva "s"; a sinistra sono riportate le soluzioni con accoppiatore "base" e a destra quelle con accoppiatore automatico mentre dall'alto al basso si hanno i risultati dei modelli con uno, due e dieci vagoni.

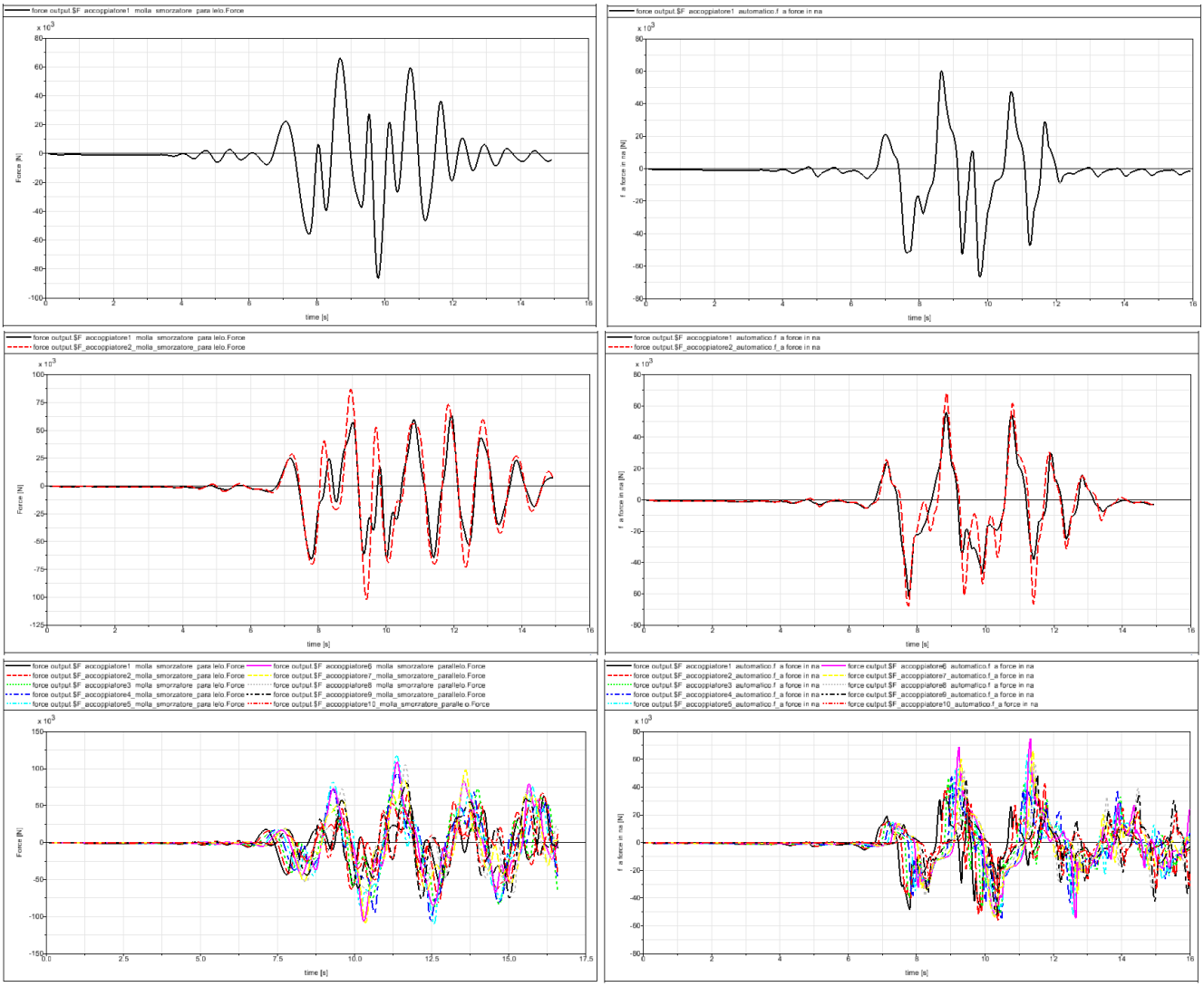

Figura 5.8: Reazioni dell'Accoppiatore a Confronto nel Caso Critico (Curva "s")

A titolo di esempio, infine, sono riportati il fattore di deragliamento delle ruote, la loro alzata e la somma delle forze laterali sulle sale, per le ruote del carrello anteriore, relativamente al tracciato con curva di raggio 150 m.
Dall'alto al basso si hanno i grafici relativi a: locomotiva sola, con un vagone ed accoppiatore "base" e con dieci vagoni ed accoppiatore automatico.

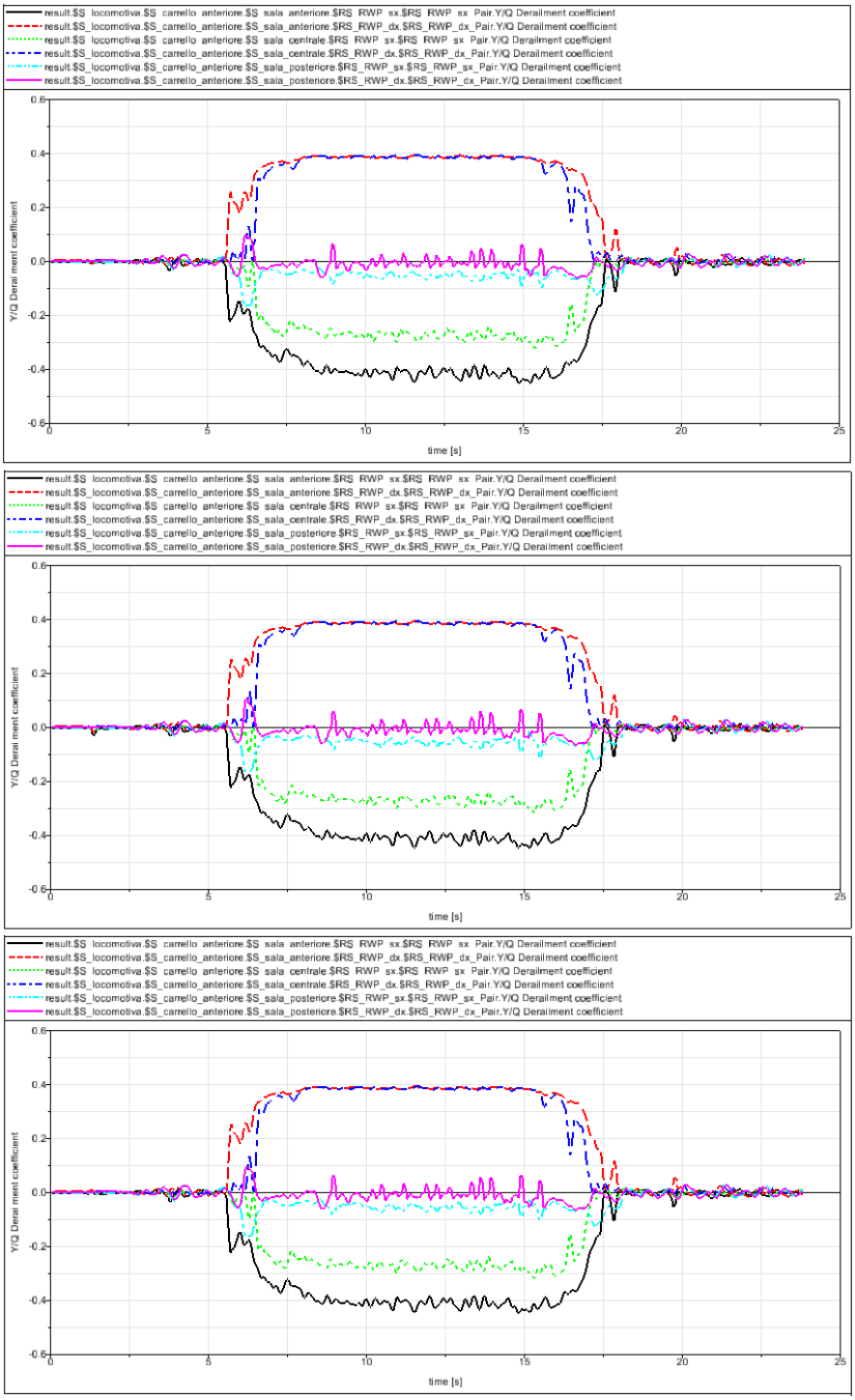

Figura 5.9: Fattori di Deragliamento delle Ruote a Confronto (Curva R150 m)

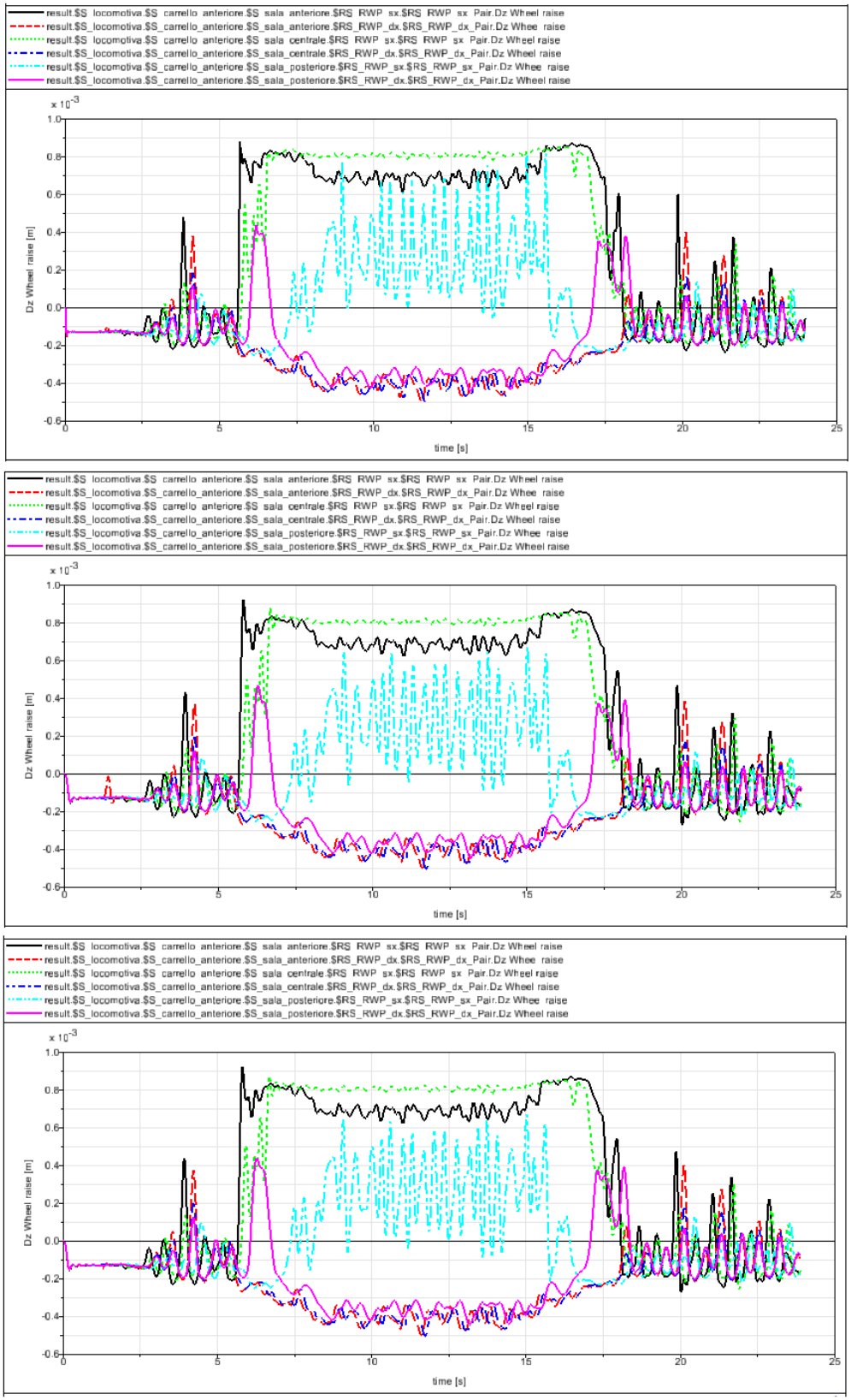

Figura 5.10: Alzata delle Ruote a Confronto (Curva R150 m)

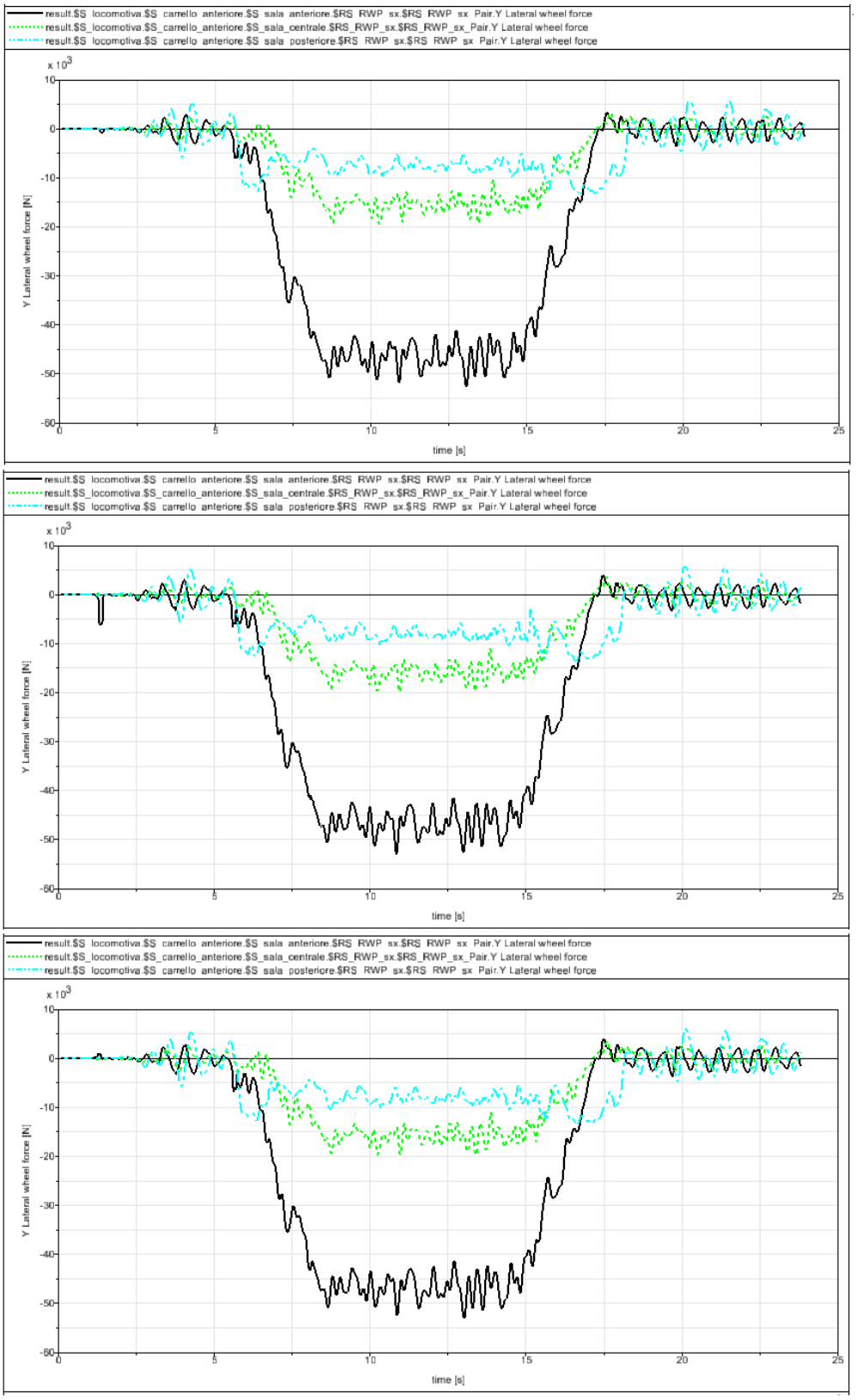

Figura 5.11: Somma delle Forze Laterali sulle Sale a Confronto (Curva R150 m)

5.5 Effetto del Trascinamento Singolo e Doppio

Infine, relativamente al modello di locomotiva con dieci vagoni ed accoppiatore automatico, sono state confrontate tre soluzioni costruttive diverse del carrello.
Si é potuto notare come la versione con smorzatori antiserpeggio (usata da principio) e quella con trascinamento singolo si equivalgano mentre la soluzione con trascinamento doppio dia delle performance peggiori, relativamente ai parametri analizzati.
Si é osservato, anche, che:

- per il primo parametro il caso critico rimane la prova del twist, nel caso del trascinamento singolo;
- per il primo parametro il caso critico diventa la prova della curva "s", nel caso del trascinamento doppio;
- per il secondo parametro il caso critico rimane la prova della curva "s";

Nel caso del trascinamento doppio, poi, il carrello critico é risultato essere quello posteriore e non quello anteriore come invece é accaduto negli scenari con antiserpeggio e trascinamento singolo.

	Parametro	**Twist**	**Curva 100 m**	**Curva 150 m**	**Curva "S"**
carrello anteriore	$Y/Q_{,max}$	-0.65	-0.48	-0.45	0.63
	$\Delta_{Z,max}[mm]$	0.89	0.92	0.92	1.04
carrello posteriore	$Y/Q_{,max}$	0.41	0.41	0.39	0.39
	$\Delta_{Z,max}[mm]$	0.87	0.91	0.93	0.97

Tabella 5.6: Valori di Picco dei Parametri Analizzati con Antiserpeggio

	Parametro	**Twist**	**Curva 100 m**	**Curva 150 m**	**Curva "S"**
carrello anteriore	$Y/Q_{,max}$	-0.65	-0.48	-0.45	0.62
	$\Delta_{Z,max}[mm]$	0.89	0.92	0.90	1.04
carrello posteriore	$Y/Q_{,max}$	0.41	0.41	0.39	0.38
	$\Delta_{Z,max}[mm]$	0.87	0.92	0.94	0.97

Tabella 5.7: Valori di Picco dei Parametri Analizzati con Trascinamento Singolo

	Parametro	Twist	Curva 100 m	Curva 150 m	Curva "S"
carrello anteriore	$Y/Q_{,max}$	-0.87	0.60	-0.57	0.95
	$\Delta_{Z,max}[mm]$	0.86	0.96	0.94	1.24
carrello posteriore	$Y/Q_{,max}$	0.79	0.76	0.79	-1.06
	$\Delta_{Z,max}[mm]$	0.87	0.92	0.95	1.01

Tabella 5.8: Valori di Picco dei Parametri Analizzati con Trascinamento Doppio

Come esempio, sono riportati gli andamenti del fattore di deragliamento delle ruote nei casi analizzati, relativamente al tracciato con curva "s".
Dall'alto al basso si hanno i grafici relativi a: smorzatori antiserpeggio, trascinamento singolo e trascinamento doppio.

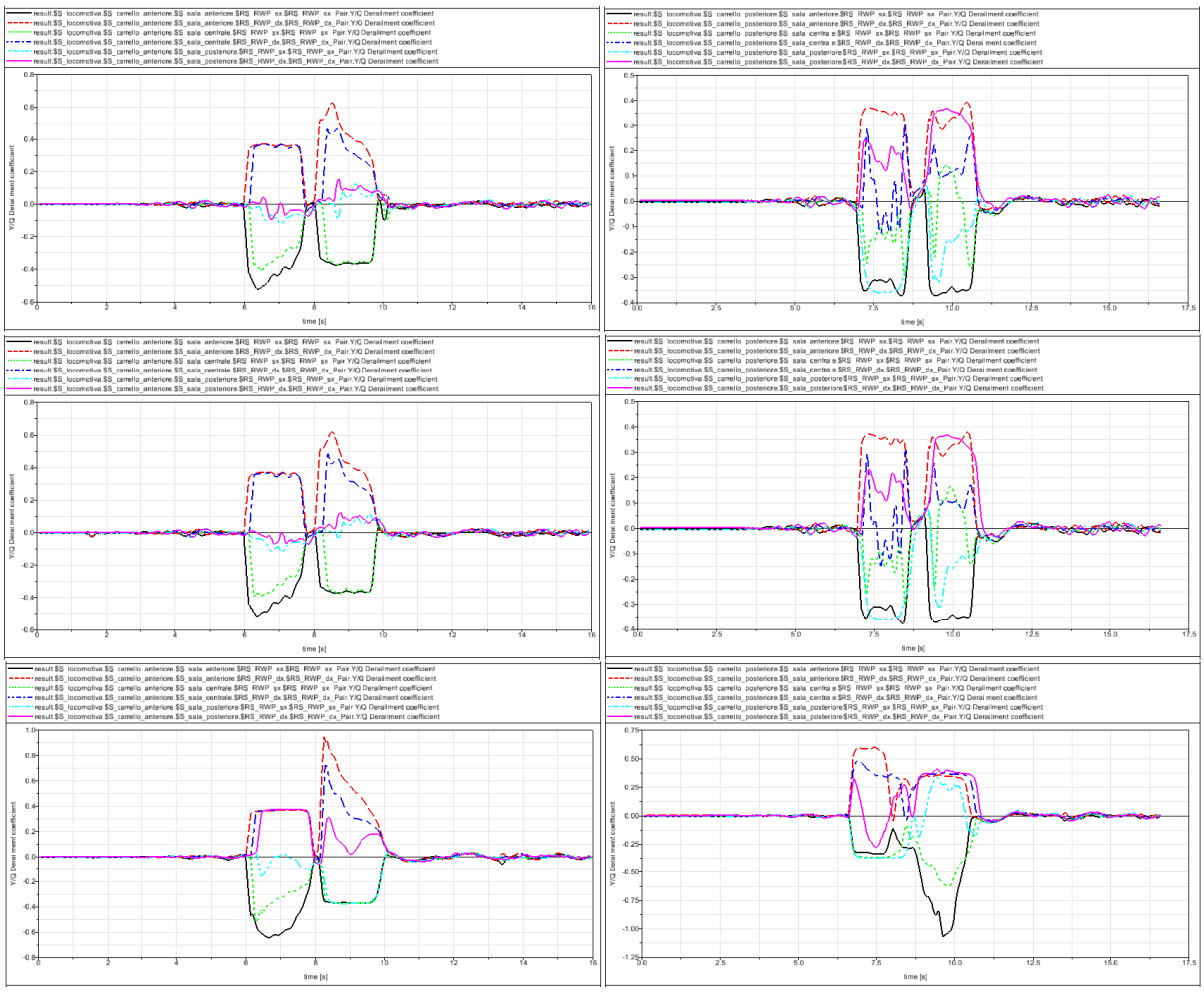

Figura 5.12: Soluzioni Costruttive a Confronto (Curva "s")

Conclusioni

Tramite il software di modellazione multibody "Simpack", é stato possibile realizzare il modello di una tipica locomotiva australiana, adibita al trasporto merci ed avente alimentazione diesel e di verificarne il comportamento dinamico, in termini di tendenza al deragliamento.
Le simulazioni svolte hanno permesso anche di determinare, relativamente ai principali parametri per la valutazione del rischio di deragliamento:

- globale peggioramento dei risultati con la modellazione delle irregolaritá del tracciato;
- ininfluenza di masse rimorchiate e della loro strategia di modellazione;
- equivalenza dei risultati con le strategie di modellazione degli accoppiatori "base" e automatico;
- equivalenza delle performance, nel caso di utilizzo del trascinamento singolo a livello secondario, in sostituzione degli smorzatori antiserpeggio;
- peggioramento delle performance, nel caso di utilizzo del trascinamento doppio a livello secondario, in sostituzione degli smorzatori antiserpeggio.

Infine, una prospettiva futura di sviluppo di questo lavoro potrebbe vertere sulla valutazione del comportamento dinamico del convoglio, in cui i vagoni siano equipaggiati anch'essi con dei carrelli (a due assi) e si potrebbe confrontare il comportamento dello stesso con quello osservato nella tesi in esame.

Bibliografia

[**1**] F.Di Majo, "Costruzione di Materiale Ferroviario"

[**2**] N.Bosso, "Slides del Corso di Progettazione Meccanica e Trazione Elettrica di Veicoli su Rotaia"

[**3**] N.Bosso, "Slides del Corso di Applicazioni di Sistemi Multibody"

[**4**] A.Somá, "Slide del Corso di Costruzione di Macchine"

[**5**] G.Leonardi, "Slides del Corso di Infrastrutture Ferroviarie"

[**6**] M.Lupi, "Slides del Corso di Tecnica dei Trasporti Terrestri, Marittimi e Aerei"

[**7**] M.Giunta, "Slides del Corso di Infrastrutture Ferroviarie"

[**8**] F.Maltinti, "Slides del Corso di Costruzione di Strade, Ferrovie e Aeroporti"

[**9**] D.Sassanelli, "Slides del Corso di Tecnica ed Economia dei Trasporti"

[**10**] A.Piovano, "Slides Misure Senza Contatto di Profilo e Diametro di Ruote Ferroviarie"

[**11**] Norma UNI-EN-14363

[**12**] M.Spiryagin, "Simplified and Advanced Modelling of Traction Control Sysyems of Heavy Haul Locomotives"

[**13**] M.Spiryagin, "International Benchmarking of Longitudinal Train Dynamics Simulator Benchmarking Questions"

[**14**] N.Bosso, M.Magelli, N. Zampieri, "Developement and Validation of a New Code for Longitudinal Train Dynamics Simulation"

Sitografia

[1] https://it.wikipedia.org/wiki/TRAXX

[2] https://it.wikipedia.org/wiki/TRAXX

[3] https://it.frwiki.wiki/wiki/Bombardier_Traxx_E_186

[4] https://railpool.it/flotta-locomotive-dettagli/

[5] https://italiawiki.com/pages/locomotivabombardier/bombardier-traxx-storia-co/struzione-e-tecnologia-panoramica.html

[6] https://www.alphatrains.eu/it/fleet/locofinder/?lid=54&iid=2#locos

[7] https://www.wiki.it-it.nina.az/TRAXX.html

[8] https://www.alphatrains.eu/en/fleet/locofinder/?lid=24&iid=2#locos

[9] https://it.wikipedia.org/wiki/Locomotiva_Siemens_Vectron

[10] https://en.wikipedia.org/wiki/Vectron_(locomotive)

[11] https://www.mobility.siemens.com/global/en/portfolio/rail/rolling-stock/locomotives/vectron/ac-dc-ms.html

[12] https://italiawiki.com/pages/locomotiva-elettrica/siemens-vectron-storia-varian
ti-tecnologia-clienti-ordini-pi-piccoli.html

[13] https://trainspo.com/model/vectron-ac/

[14] https://www.mobility.siemens.com/global/en/portfolio/rail/rolling-stock/locomotives/vectron/ac-dc-ms.html

[15] https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:623d14cd-e56b-4a96-84c0-
d7d7b7727847/mo-vectron-technical-brochure-en.pdf

[16] https://www.ferrovie.info/index.php/it/modellismo/13-treni-reali/6769-ferrovie-da-siemens-arriva-la-vectron-dual-mode-diesel-ed-elettrica

[17] https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:39caa73b-86f4-4f6a-86b4-
de1264cdf45c/mors-b10046-00-vectron-dual-mode-light-2-pagesenus-144.pdf

[18] https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:e792c7e1-6099-4d47-9b0e-
5e0216806264/mors-b10047-00-vectron-dual-mode-4-pagesenus-144.pdf

[19] https://en.wikipedia.org/wiki/Vectron_(locomotive)

[20] https://trainspo.com/model/6376/

[21] https://www.alphatrains.eu/it/fleet/locofinder/?lid=94&iid=1#locos

[22] https://www.stadlerrail.com/en/products/detail-all/eurodual/40/

[23] https://www.alphatrains.eu/en/fleet/locofinder/?lid=44&iid=4#locos

[24] https://en.wikipedia.org/wiki/Stadler_Euro

[25] https://www.railvolution.net/news/captrain-france-s-euro4001-fleet-complete

[26] https://www.wikiwand.com/de/Stadler_Euro_4001

[27] https://www.railwaypro.com/wp/stadler-new-generation-of-six-axle-locomotives-/
presented-at-transport-logistic/

[28] https://trainspo.com/model/6457/

[29] https://www.stadlerrail.com/it/prodotti/detail-all/euro6000/485/

[30] https://trainspo.com/model/6886/

[31] https://www.alphatrains.eu/downloads/fleet/loco/alpha_data_sheet_
locomotives_euro6000_de_en.pdf

[32] https://it.wikipedia.org/wiki/Locomotiva_Stadler_Euro_9000

[33] https://www.ferrovie.it/portale/articoli/10807

[34] https://www.stadlerrail.com/en/products/detail-all/euro9000/474/

[35] https://www.ferrovie.info/index.php/it/13-treni-reali/22957-ferrovie-/
lokomotion-ordina-due-locomotive-euro9000-a-stadler

[36] https://www.europeanlocpool.com/en/locomotives/euro9000-locomotives/

[37] https://www.railadvent.co.uk/2022/09/impressive-euro9000-locomotive-presented-/
at-innotrans-2022-by-stadler-and-elp.html

[38] https://blog.tuttotreno.it/35960-stadler-eurodual-bimodali-lena-e-nina-di-elp-/
per-vtg/

[39] https://trainspo.com/model/6730/

[48] https://en.wikipedia.org/wiki/Softronic_Transmontana

[49] https://www.lte-group.eu/en/Locomotives/Unsere-Loks-Detail/iLocType_
_10.htm

[50] https://it.upwiki.one/wiki/softronic_transmontana

[51] https://www.softronic.ro/copy-of-products

[52] http://www.ipacv.ro/dorothy/Dorothy%20-%20Mexico%20-%20Romania/
2.%20Dolj%20County%20-%20R&D%20entities,%20companies/A.%20Dolj%
20County,%20companies/A10.3%20Transmontana.pdf

[53] https://trainspo.com/model/1068/

[54] https://www.softronic.ro/copy-of-hyperion

[55] https://it.wikipedia.org/wiki/Carro_merci

[56] https://it.wikipedia.org/wiki/Elettrotreno

[57] https://it.wikipedia.org/wiki/Carrozza_ferroviaria

[58] https://www.google.com/searchq=rimorchio+ferroviario&sxsrf=ALiCzsadBpcSZ7EmGbIg/
3NUU1vSBsN82Q:1666946303404&sourcenms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwjympjwoL7AhURiVw/
KHcSpBQIQ_AUoAXoECAIQAw&biw=1600&bih=789&dpr=1#imgrc=TJunTUhLpVAHzM

[59] https://www.google.com/search?q=stadler+euro+9000&tbm=isch&ved=
2ahUKEwi8x-3ywoL7AhXVO8AKHZIEAfQQ2-cCegQIABAA&oq=stadler+euro+&gs_
lcp=CgNpbWcQARgAMgQIIxAnMgQIIxAnMgQIABAeMgQIABAeMgQIABAeMgQIABAeMgQIABA/
eMgQIABAeMgQIABAeMgQIABAeOgUIABCABDoICAAQgAQQsQM6CAgAELEDEIMBOgQIABBDOgcIABCAB/
BADOgsIABCABBCxAxCDAVCLCVinF2C7IGgAcAB4AIABkgGIAeQIkgEEMTMuMZgBAKABAaoBC2d3cy13/
aXotaW1nwAEB&sclient=img&ei=AJVbY7zHMNX3gAaSiYSgDw&bih=789&biw=
1600#imgrc=Ff15F8FgrssCQM

[60] https://www.google.com/search?q=carro+merci+ferroviario&sxsrf=ALiCzsZLswpg29rD2/
chekGiGc_i_mKkEpQ:1666947918097&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwjqnZH0yIL7/
AhXNa8AKHd1JCbIQ_AUoAXoECAIQAw&biw=1600&bih=789&dpr=1#imgrc=pLNIO0D4J4KK8M

[61] https://it.wikipedia.org/wiki/Carro_riscaldo

[62] https://it.wikipedia.org/wiki/Carro_soccorso

[63] https://it.wikipedia.org/wiki/Carro_scudo

[64] https://www.ghh-bonatrans.com/it/prodotti-e-servizi/sale-montate/

[65] https://it.wikipedia.org/wiki/Sala_montata

[66] https://www.google.com/search?q=sala+montata&sxsrf=ALiCzsaacenbf3N1jFABilJsFJE8/
jewdVQ:1666966334559&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwjq-OTBjYP7AhUXg1wKHT/
qjCGsQ_AUoAXoECAIQAw&biw=1600&bih=789&dpr=1#imgrc=rXBGRAoQVU-1aM&
imgdii=91gH1UoulUIu4M

[67] https://www.indiamart.com/bhilai-engineering-corporation/locomotive-bogies.html

[68] https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.amstedrail.com%2Fproducts%2Fbogies%2F&psig=AOvVaw2npRO3Psln5-rqGEoLXhO4&ust=1667485041097000&source=images&cd=vfe&ved=0CA0QjRxqFwoTCOjZqf7Xj_sCFQAAAAAdAAAAABAV

[69] https://www.google.com/search?q=3+axis+bogie+stadler&tbm=isch&ved=2ahUKEwjLj9C92I_7AhU7Q0EAHYg9AgAQ2-cCegQIABAA&oq=3+axis+bogie+stadler&gs_lcp=CgNpbWcQAzoECCMQJ1C-EFiNIWCbImgBcAB4AIABdIgBqAaSAQM4LjKYAQCgAQGqAQtnd3M/td2l6LWltZ8ABAQ&sclient=img&ei=d3xiY4v4FLuGhbIPiPsI&bih=789&biw=1600#imgrc=E6H27yExXymaVM

[70] https://www.istockphoto.com/it/immagine/brake-train-railroad-track-shock-absor/ber

[71] https://it.wikipedia.org/wiki/Scartamento_ferroviario

[72] https://evolution.skf.com/it/nuove-boccole-per-carichi-elevati/

[73] https://it.quora.com/Cosa-sono-e-a-cosa-servono-sui-treni-gli-smorzatori-anti/serpeggio-Se-gentilmente-potete-spiegarlo-in-maniera-semplice

[74] http://www.trainsimhobby.net/galleriafotografica/displayimage.php?pid=14216

[75] https://it.wikipedia.org/wiki/TRAXX

[76] https://moba-hgh.de/modellbahn/digital/decoder-traegerplatinen/fuer-lokomotiven/maerklin/systems/sonderbauweisen/2683-29841-br-185-1-der-db-/ag-traxx-1-mfx-mld.html

[77] https://www.alphatrains.eu/it/fleet/locofinder/?lid=64&iid=3

[78] https://www.alphatrains.eu/it/fleet/locofinder/?lid=65&iid=2

[79] https://www.google.com/search?q=stadler+euro+9000&tbm=isch&ved=2ahUKEwiEm-mIwYP9AhXNhlwKHec-AeQQ2-cCegQIABAA&oq=stadler+euro+9000&gs_lcp=CgNpbWcQAzIECCMQJzIECCMQJzIECAAQHjIECAAQHlDcBVj1CWCDEWgAcAB4AIABR4gBzgG/SAQEzmAEAoAEBqgELZ3dzLXdpei1pbWfAAQE&sclient=img&ei=ClHiY4TuLc2N8gLn_YSgDg&bih=789&biw=1600#imgrc=OC1gBZPI5OctpM

[80] https://railway-news.com/stadler-eurodual-locomotive-now-approved-in-austria/

[81] https://www.lte-group.eu/en/Locomotives/Unsere-Loks-Detail/iLocType__10/iLocoImg__207.htm

[82] https://www.google.com/searchq=softronic+phoenix&tbm=isch&ved=2ahUKEwj58Z7SwYP/9AhVCnVwKHSwnCGIQ2-cCegQIABAA&oq=softronic+phoenix&gs_lcp=CgNpbWcQAzIECCMQJzIE/CCMQJ1CSC1jSF2DyGWgAcAB4IABY4gB6gSSAQE4mAEAoAEBqgELZ3dzLXdpei1pbWfAAQE&sclient=img&ei=pFHiY_mPLMK68gKszqCQBg&bih=789&biw=1600#imgrc=hfNJgEkDpCkgWM

[83] https://railcolornews.com/2020/02/07/de-expert-dual-mode-in-multiple-mode-vec/tron-hybrids-running-tests-together/

Ringraziamenti

Ringrazio la Mia Jessica ed Enea, che sono il Mio Sole; da sempre ho ricercato motivazione e determinazione in me, per raggiungere i miei obbiettivi, ma ho capito che a volte questa "energia" puó arrivare da qualcuno al di fuori di noi stessi e puó essere incredibilmente forte, bisogna accettare il fatto che a volte le nostre sfide vogliamo vincerle anche per chi ancora ci deve essere, c'é..o c'é stato.
Ringrazio la Mia Famiglia, che da sempre mi ha supportato e per sempre mi supporterá, ne sono certo; se sono ció che sono lo devo anche a loro, per le possibilitá ed il sostegno che mi hanno dato e per come mi hanno educato a stare al Mondo.
Ringrazio un Uomo Silenzioso che ha lasciato la Terra troppo presto e non potrá vedermi arrivare alla fine di questo viaggio o magari lo stará facendo da posti ultraterreni, lo penso sempre; il suo silenzio riecheggia ancora rumorosamente in me.
Ringrazio la Famiglia della Mia Dolce Metá che mi ha accolto nei loro Cuori; é proprio vero che, a volte, le mele non cascano lontano dall'albero..ma nella campagna di Mio Suocero mele non ce ne sono, al massimo arance..e lo sapete come sono: squisite !
Ringrazio il Mio, Unico, Maestro che mi manca ogni volta che penso al Judo, meno male che ti ho conosciuto; anche se ormai stavi andando a combattere battaglie senza tempo, hai avuto la pazienza di aspettarmi e donarmi un po' del tuo Sapere.
Ringrazio i Miei Amici, quelli di sempre e quelli che ho conosciuto negli anni, la Felicitá é reale solo se condivisa.
Ringrazio il Prof. Aurelio Somá per avermi messo al corrente di questa opportunitá di tesi e per la disponibilitá dimostratami nella ricerca di un'azienda ospitante.
Ringrazio Matteo ed il Prof. Nicola Bosso per la manforte datami nella realizzazione di questo lavoro, "nessuno nasce imparato", nessuno ce la fa da solo.
Ringrazio Marco, Vito e tutti i ragazzi della Blue Engineering che con la loro cordialitá mi hanno fatto sentire accolto in un mondo che per me era nuovo.
In ultimo, ma non per importanza, ringrazio i Miei Capelli per aver tenuto duro fino alla fine di questi anni di studio matto e disperatissimo permettendomi di arrivare alla laurea senza calvizie.