

ESTUDO DINÂMICO DE UMA COMPOSIÇÃO FERROVIÁRIA DE CARGA E ANÁLISE DE CONDIÇÕES DE DESCARRILAMENTO

André Romeu de Andrade Di Luccio

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Prof. Max Suell Dutra

Rio de Janeiro Setembro de 2016





ESTUDO DINÂMICO DE UMA COMPOSIÇÃO FERROVIÁRIA DE CARGA E ANÁLISE DE CONDIÇÕES DE DESCARRILAMENTO

André Romeu de Andrade Di Luccio

PROJETO FINAL SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO MECÂNICO.

Aprovado por:

Prof. Max Suell Dutra; Dr.Ing. (orientador)

Prof. Vitor Ferreira Romano; Dott.Ric.

Prof. Armando Carlos de Pina Filho; D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL SETEMBRO DE 2016 Di Luccio, André Romeu de Andrade.

Estudo Dinâmico de uma Composição Ferroviária de Carga e Análise de Condições de Descarrilamento / André Romeu de Andrade Di Luccio - Rio de Janeiro - UFRJ/Escola Politécnica, 2016.

xii, 112 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Prof. Max Suell Dutra.

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia Mecânica, 2016.

Referências Bibliográficas: p. 111.

1. Trens. 2. Ferrovia. 3. Simulações Dinâmicas. 4. Descarrilamento.

I. Dutra, Max Suell. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Mecânica. III. Estudo Dinâmico de uma Composição Ferroviária de Carga e Análise de Condições de Descarrilamento.

DEDICATÓRIA

O projeto final de graduação, desenvolvido a seguir, é dedicado à minha mãe, Marcia. Dedico a ela todas as conquistas e realizações que eu tiver nessa vida, pois sei que, de alguma forma, minha mãe sempre estará comigo nos momentos mais importantes. Só pude conviver 21 anos ao lado dela, mesmo assim todo o amor, carinho, conhecimento e valores morais que ela me passou, vão continuar comigo e me ajudarão eternamente.

AGRADECIMENTO

Primeiramente agradeço aos meus pais, por todo o amor com o qual me criaram e que foi fundamental para formar meu caráter. Agradeço por terem me apoiado e também por terem incentivado os meus estudos e na minha escolha de faculdade, principalmente minha mãe, que mesmo nos momentos mais difíceis e sofridos de sua vida, fazia questão de me ouvir e aconselhar.

Agradeço também à minha madrinha, meus primos, minhas avós e meus amigos, pela força e por estarem comigo nos momentos bons e ruins. Especialmente agradeço à minha avó paterna, Amélia, que sempre foi muito carinhosa e atenciosa comigo, de quem sempre sentirei saudade.

Agradeço à minha namorada, Mari, por todos os momentos de apoio, carinho e motivação durante a fase final do trabalho.

Por fim, agradeço ao orientador deste meu projeto, o Prof. Max Suell, e também a todos os amigos integrantes da equipe do Laboratório de Robótica, pelos conselhos dados e por terem me transmitido muito conhecimento. Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica / UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

ESTUDO DINÂMICO DE UMA COMPOSIÇÃO FERROVIÁRIA DE CARGA E ANÁLISE DE CONDIÇÕES DE DESCARRILAMENTO André Romeu de Andrade Di Luccio Setembro/2016

Orientador: Max Suell Dutra, Dr.Ing.

Curso: Engenharia Mecânica

O presente trabalho consiste do estudo da dinâmica de uma composição ferroviária e de seus vagões, com foco nos mecanismos de descarrilamento e nos critérios de desempenho operacionais, visando à realização de simulações dinâmicas com o intuito de se analisar o comportamento do trem e de seus componentes. O Projeto de Graduação foi dividido nas seguintes etapas: descrição dos componentes de trens e ferrovias, fundamentação teórica sobre a dinâmica dos vagões e os mecanismos de descarrilamento, simulações dinâmicas, análise longitudinal das forças nos engates entre vagões, análise tridimensional das forças no contato roda-trilho e concluindo o trabalho com apresentação de resultados, discussões sobre os resultados e sugestões de trabalhos futuros relacionados ao tema deste projeto. Durante o desenvolvimento do trabalho, foi utilizado o *Universal Mechanism*, recurso computacional para a realização de simulações dinâmicas de sistemas multicorpos.

Palavras-chave: Trens, Ferrovia, Simulações Dinâmicas, Descarrilamento.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Engineer.

FREIGHT TRAIN DYNAMICS STUDY AND ANALYSIS OF DERAILMENT CONDITIONS André Romeu de Andrade Di Luccio

September/2016

Advisor: Max Suell Dutra, Dr.Ing.

Course: Mechanical Engineering

This work consists of the freight train and its wagons dynamics study, focusing on derailment mechanisms and operational performance criteria, carrying out dynamic simulations in order to analyze the train's and its components behavior. The Undergraduate Project was divided into the following steps: description of rail and train components, theoretical basis of the dynamics of wagons and the derailment mechanisms, dynamic simulations, longitudinal analysis of the forces in the couplings between wagons, three-dimensional analysis of the forces in the wheel-rail contact and concluding the work with the results presentation, discussion of these results and suggestions for future work related to the theme of this project. During the work development, the Universal Mechanism® has been used. It's a software to perform dynamic simulations of multibody systems.

Keywords: Trains, Railway, Dynamics Simulations, Derailment.

SUMÁRIO

Í	NDICE	DE FIGURAS	viii
Í	NDICE	DE TABELAS	xii
1.	. Iì	NTRODUÇÃO	1
	1.1.	Objetivos do projeto	1
	1.2.	Organização do trabalho	1
	1.3.	Histórico	2
2.	. N	IATERIAL RODANTE E COMPOSIÇÕES FERROVIÁRIAS	6
	2.1.	Vagões	8
	2.2.	Componentes de um vagão	11
	2.2.1.	Rodeiro	12
	2.2.2.	Truque	13
	2.2.3.	Truque de veículos de carga	14
3.	. V	IAS PERMANENTES	16
	3.1.	Trilhos	17
	3.2.	Geometria da via permanente	18
	3.2.1.	Irregularidades da via	18
	3.2.2.	Bitola	22
	3.2.3.	Rampas	23
	3.2.4.	Curvas	25
4.	. D	NINÂMICA DO VAGÃO E MECANISMOS DE DESCARRILAMENTO	28
	4.1.	Possibilidades de movimento	28
	4.1.1.	Lacê - estabilidade e orientação	30
	4.1.2.	Velocidade crítica de Lacê	30
	4.2.	Equações de movimento	32
	4.2.1.	Resolução das equações de movimento	33
	4.2.2.	Contato roda-trilho	34
	4.3.	Mecanismos de descarrilamento	35

4.3.1. Modos de descarrilamento	35
4.3.2. Critérios de descarrilamento	38
4.3.3. Critérios de desempenho recomendados pela AAR	40
5. PARÂMETROS PROPOSTOS DA COMPOSIÇÃO FERROVIÁRIA E DA VIA PERMANENTE	A 41
5.1. Modelos de vagão e composição ferroviária	41
5.2. Modelo da via	43
5.3. Modelo de rodas e trilhos	46
6. SIMULAÇÕES DINÂMICAS	48
6.1. Análise longitudinal	48
6.1.1. Composição ferroviária com vagões carregados	49
6.1.2. Composição ferroviária com vagões vazios	64
6.2. Análise tridimensional	77
6.2.1. Vagão carregado	79
6.2.2. Vagão vazio	90
6.3. Resultados e discussões	105
7. CONCLUSÃO	109
7.1. Sugestões para trabalhos futuros	109
REFERÊNCIAS	111

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Primeira locomotiva a vapor, de George Stephenson [3]	2
Figura 2: "Baronesa", primeiro trem do Brasil [3].	3
Figura 3: Total de acidentes nas concessionárias ferroviárias no Brasil, de 2006 a 201	3
[4]	4
Figura 4: Causas de acidentes ferroviários no Brasil, de 2006 a 2013 [4]	5
Figura 5: Exemplo de material de tração (locomotiva) [6]	6
Figura 6: Composição ferroviária [1].	7
Figura 7: Exemplo de um acoplamento de vagões [7].	7
Figura 8: Composição com cinco locomotivas na frente [8]	8
Figura 9: Vagão Fechado [5]	9
Figura 10: Vagão Gôndola [10]	9
Figura 11: Vagão Hopper [5].	. 10
Figura 12: Vagão Plataforma. [5]	. 10
Figura 13: Vagão Tanque [11]	. 11
Figura 14: Vagão Isotérmico [12].	. 11
Figura 15: Afastamento entre flange e trilho, adaptado de [13]	. 12
Figura 16: Componentes de um rodeiro, adaptado de [15].	. 13
Figura 17: Exemplo de truque com dois rodeiros [16].	. 14
Figura 18: Elementos de um truque de três peças [1]	. 15
Figura 19: Elementos da via permanente, adaptado de [3]	. 16
Figura 20: Nomenclatura das regiões do trilho, adaptado de [1]	. 17
Figura 21: Irregularidade periódica dos trilhos direito e esquerdo [1].	. 19
Figura 22: Bitola da via [9]	. 22
Figura 23: Inclinações – (a) ascendente leve; (b) descendente leve; (c) ascendente	
pesada; (d) descendente pesada; (e) côncava; (f) corcova; (g) depressão; (h) ondulada	ι,
adaptado de [1].	. 25
Figura 24: Superelevação, adaptado de [1].	. 26
Figura 25: Segmentos de via, adaptado de [1]	. 27
Figura 26: Modos de vibração de um vagão, adaptado de [18]	. 29
Figura 27: Rodeiro em movimento de Lacê [15].	. 29
Figura 28: Raios de rolamento do rodeiro, adaptado de [1]	. 31
Figura 29: Exemplo de sistema multicorpos, adaptado dos manuais do <i>Universal</i>	
Mechanism [®]	. 32
Figura 30: Parâmetros do método numérico, interface do UM®.	. 34
Figura 31: Posições relativas dos perfis de roda e trilho, adaptado dos manuais do	
software.	. 34
Figura 32: Escalada da roda [1].	. 36
Figura 33: Levantamento da roda, adaptado de [1].	. 36
Figura 34: Deflexão do trilho, adaptado de [1]	37
Figura 35: Separação veículo-truque [1]	37
Figura 36: Forcas no ponto de contato roda-trilho [1]	39
Figura 37: Truque Barber, representação gráfica no Universal Mechanism®	. 41
Figura 38: Dimensões em milímetros do vação gôndola utilizado como modelo [19]	42
Figura 39. Vagão gôndola, representação gráfica no <i>UM</i> ®	42
Figura 40: Composição ferroviária, representação gráfica no UM®	43
Figura 41: Trajeto padrão - plano horizontal representação no Universal Mechanism	R R
1.5. 1. 111joto pueruo prano nonzontai, representação no o niversar meenanismo	45
	, 15

Figura 42: Trajeto padrão - plano vertical, representação no UM®	. 45
Figura 43: Contato roda-trilho padrão, representação no UM®	. 46
Figura 44: Força nos engates traseiros, em função da distância, com vagões carregado	os a
30 km/h	. 50
Figura 45: Força Média nos engates traseiros de cada veículo, para o trem carregado a	a
30 km/h	. 51
Figura 46: Força no engate traseiro do veículo 13, em função da distância, carregado	a
30 km/h	. 51
Figura 47: Plano vertical da via, essencial na análise longitudinal, representação no	
<i>UM</i> ®	. 52
Figura 48: Força Média nos engates traseiros de cada veículo, para o trem carregado a	a
40 km/h	. 53
Figura 49: Força no engate traseiro do veículo 15, em função da distância, carregado	a
40 km/h	. 54
Figura 50: Força Média nos engates traseiros de cada veículo, para o trem carregado	a
50 km/h	. 55
Figura 51: Força no engate traseiro do veículo 15, em função da distância, carregado	a
50 km/h	. 55
Figura 52: Força Média nos engates traseiros de cada veículo, para o trem carregado a	a
60 km/h	. 56
Figura 53: Força no engate traseiro do veículo 12, em função da distância, carregado	a
60 km/h	. 57
Figura 54: Força Média nos engates traseiros de cada veículo, para o trem carregado a	a
65 km/h	. 58
Figura 55: Força no engate traseiro do veículo 14, em função da distância, carregado	a
65 km/h	. 59
Figura 56: Força Média nos engates traseiros de cada veículo, para o trem carregado	a
70 km/h	. 60
Figura 57: Força no engate traseiro do veículo 14, em função da distância, carregado	a
70 km/h	. 60
Figura 58: Força Média nos engates traseiros de cada veículo, para o trem carregado	a
75 km/h	. 61
Figura 59: Força no engate traseiro do veículo 15, em função da distância, carregado	a
75 km/h	. 62
Figura 60: Força Média nos engates traseiros de cada veículo, para o trem carregado a	a
80 km/h	. 63
Figura 61: Força no engate traseiro do veículo 14, em função da distância, carregado	a
80 km/h	. 63
Figura 62: Força nos engates traseiros, em função da distância, com vagões vazios a .	30
km/h	. 64
Figura 63: Força Média nos engates traseiros de cada veículo, para o trem vazio a 30	
km/h.	. 65
Figura 64: Força no engate traseiro do veículo 13, em função da distância, vazio a 30	
km/h.	. 66
Figura 65: Força Média nos engates traseiros de cada veículo, para o trem vazio a 40	<i></i>
km/h.	. 67
Figura 66: Força no engate traseiro do veículo 14, em função da distância, vazio a 40	
km/h.	. 68
Figura 6/: Força Média nos engates traseiros de cada veículo, para o trem vazio a 50	
km/h	. 69

Figura 68: Força no engate traseiro do veículo 12, em função da distância, vazio a 5 km/h.	0 69
Figura 69: Força Média nos engates traseiros de cada veículo, para o trem vazio a 6	0 70
Figura 70: Força no engate traseiro do veículo 9, em função da distância, vazio a 60 km/h.	70
Figura 71: Força Média nos engates traseiros de cada veículo, para o trem vazio a 6 km/h.	5 72
Figura 72: Força no engate traseiro do veículo 11, em função da distância, vazio a 6 km/h.	5 72
Figura 73: Força Média nos engates traseiros de cada veículo, para o trem vazio a 70 km/h.	0 73
Figura 74: Força no engate traseiro do veículo 8, em função da distância, vazio a 70 km/h.	74
Figura 75: Força Média nos engates traseiros de cada veículo, para o trem vazio a 72 km/h.	5 75
Figura 76: Força no engate traseiro do veículo 11, em função da distância, vazio a 7 km/h.	5 75
Figura 77: Força Média nos engates traseiros de cada veículo, para o trem vazio a 8 km/h.) 76
Figura 78: Força no engate traseiro do veículo 9, em função da distância, vazio a 80 km/h.	77
Figura 79: Animação do contato roda-trilho, no <i>UM</i> ®	78
Figura 80: Nomenciatura e orientação para os rodeiros do modeio [1] Figura 81: Força lateral em função da distância, em vagão carregado a 30 km/h	79 79
Figura 82: Plano horizontal da via, essencial na análise tridimensional, representaçã <i>UM</i> ®	o no 80
Figura 83: Força vertical em função da distância, em vagão carregado a 30 km/h Figura 84: Critério de Nadal em função da distância, em vagão carregado a 30 km/h	81
Figura 85: Valores de L/V, lado esquerdo do Rodeiro 3, vagão carregado a 30 km/h Figura 86: Valores de L/V, lado direito do Rodeiro 3, vagão carregado a 40 km/h	83
Figura 80: Valores de L/V, lado direito do Rodeiro 3, vagão carregado a 40 km/h Figura 87: Valores de L/V, lado direito do Rodeiro 3, vagão carregado a 50 km/h	85
Figura 88. Valores de L/V, lado direito do Rodeiro 3, vagão carregado a 65 km/h Figura 89: Valores de L/V, lado direito do Rodeiro 3, vagão carregado a 65 km/h	80
Figura 90: Valores de L/V, lado direito do Rodeiro 3, vagão carregado a 70 km/h Figura 91: Valores de L/V, lado direito do Rodeiro 3, vagão carregado a 75 km/h	88 89
Figura 92: Valores de L/V, lado direito do Rodeiro 3, vagão carregado a 80 km/h Figura 93: Força lateral em função da distância, em vagão vazio a 30 km/h	90 91
Figura 94: Força vertical em função da distância, em vagão vazio a 30 km/h Figura 95: Critério de Nadal em função da distância, em vagão vazio a 30 km/h	92 93
Figura 96: Valores de L/V, lado esquerdo do Rodeiro 1, vagão vazio a 30 km/h Figura 97: Valores de L/V, lado direito do Rodeiro 1, vagão vazio a 40 km/h	94 95
Figura 98: Soma L/V, lado direito do truque traseiro, vagão vazio a 40 km/h Figura 99: Valores críticos de L/V, em vagão vazio a 50 km/h	96 96
Figura 100: Soma L/V, lado direito do truque traseiro, vagão vazio a 50 km/h	97
Figura 101: valores críticos de L/v, em vagao vazio a 60 km/n Figura 102: Soma L/V, lado direito do truque dianteiro, vagão vazio a 60 km/h	98 99
Figura 103: Valores críticos de L/V, em vagão vazio a 65 km/h Figura 104: Soma L/V, lado direito do truque dianteiro, vagão vazio a 65 km/h	99 . 100
Figura 105: Valores de L/V, lado esquerdo do Rodeiro 3, vagão vazio a 70 km/h	. 101

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Irregularidades aperiódicas da via. adaptado de [14]	
Tabela 2: Parâmetros de representação analítica de irregularidades,	adaptado de [14]. 21

1. INTRODUÇÃO

O presente projeto final tem como escopo o estudo do comportamento dinâmico de trens, com foco na análise de possíveis causas de acidentes. Principalmente, foram consideradas condições operacionais desse meio de transporte e condições estruturais de ferrovia.

A motivação do projeto surgiu da oportunidade de acompanhar o trabalho de análise de descarrilamento de um trem de carga, realizado pela equipe do Laboratório de Robótica. A minha participação nesse trabalho foi fundamental na escolha do tema deste projeto final.

1.1. Objetivos do projeto

O trabalho proposto visa à realização de um estudo dinâmico de uma composição ferroviária de carga, utilizando-se o *Universal Mechanism*®, que também pode ser abreviado por *UM*®, *software* comercial de simulação dinâmica de sistemas multicorpos. Espera-se ao final do projeto que uma análise de condições de descarrilamento seja mostrada, com relação aos parâmetros da via permanente, tornando possível a avaliação de quais fatores seriam críticos para o fenômeno do descarrilamento.

1.2. Organização do trabalho

Neste primeiro capítulo do trabalho é apresentado o escopo do projeto assim como os objetivos do mesmo, que devem ser atingidos em sua conclusão. A organização do trabalho é descrita e fala-se, resumidamente, o que é tratado em cada seção do projeto final. Por fim, neste capítulo inicial do projeto também são apresentados um breve histórico da evolução dos trens, assim como estatísticas de acidentes e descarrilamentos.

O capítulo 2 tem a descrição de material rodante e composições ferroviárias, assim como a apresentação dos principais elementos dos mesmos.

No terceiro capítulo são descritos os principais componentes da via permanente e definidos seus parâmetros mais importantes.

O quarto capítulo tem a apresentação do estudo teórico da dinâmica dos vagões e dos mecanismos de descarrilamento. Critérios de segurança, baseados nos estudos sobre descarrilamento, também estão presentes neste capítulo.

Após a fundamentação teórica das seções anteriores, no quinto capítulo são detalhados os parâmetros a serem considerados nas simulações, com as justificativas para

suas escolhas.

No capítulo 6 é determinado o procedimento de testes a ser seguido para a realização das simulações dinâmicas do projeto. Nesta mesma seção, é realizada a análise longitudinal e tridimensional do sistema, ainda sendo apresentados os resultados comparativos de todas as simulações.

Por último, o sétimo capítulo contém as discussões finais do projeto, bem como sugestões para trabalhos futuros sobre o tema abordado.

1.3. Histórico

O transporte ferroviário está entre os principais meios de transporte existentes há mais de um século. Em muitos países desenvolvidos e em desenvolvimento, o transporte ferroviário tem sido responsável pela movimentação de milhares de pessoas e por ligar a produção ao mercado consumidor, sendo assim fator fundamental nas atividades da população e desenvolvimento dos países [1].

O engenheiro inglês Richard Trevithick construiu em 1803 um veículo a vapor similar a uma locomotiva, que pesava 5 toneladas e atingia 5 km/h. Entretanto, George Stephenson, também engenheiro inglês, foi considerado o verdadeiro criador da tração a vapor em estrada de ferro. Primeiro a compreender o princípio de aderência de rodas lisas sobre uma superfície também lisa, George construiu em 1813 a locomotiva *Blucher* (Figura 1), testada em 1814 puxando oito vagões com 30 toneladas, entre Lilligwort e Hetton [2].



Figura 1: Primeira locomotiva a vapor, de George Stephenson [3].

A primeira linha ferroviária do Brasil foi inaugurada em 1854, ligando o Porto de Mauá (Baía de Guanabara) a Petrópolis, na Vila do Fragoso. Com 14,5 km de extensão, puxado pela locomotiva "Baronesa" (Figura 2), o primeiro trem a circular no Brasil fazia a ligação entre a capital do império e Petrópolis. Com o incentivo da Inglaterra, o Brasil construiu diversas linhas que atendiam principalmente a exportação de matérias primas e produtos agrícolas, como o café [2].



Figura 2: "Baronesa", primeiro trem do Brasil [3].

Nas últimas décadas a tecnologia de transporte ferroviário tem passado por um significativo progresso. Modernos trens de passageiros operam em alta velocidade com objetivos de diminuir custos e tempo de viagem, no entanto, segurança e conforto continuam sendo premissas primordiais nas operações e projetos ferroviários. Os trens de carga também têm obtido aumentos de carga por eixo e velocidade, possuindo as mesmas premissas em suas operações e projetos.

Segundo a Agência Nacional de Transporte Terrestre (ANTT), o modal ferroviário caracteriza-se, especialmente, por sua capacidade de transportar grandes volumes, com elevada eficiência energética, principalmente em casos de deslocamentos a médias e grandes distâncias. Apresenta, ainda, maior segurança em relação ao modal rodoviário, com menor índice de acidentes e menor incidência de furtos e roubos. São cargas típicas

do modal ferroviário: produtos siderúrgicos, grãos, minério de ferro, cimento, fertilizantes, derivados de petróleo, carvão mineral e contêineres [1].

Embora seja considerado mais seguro que o modal rodoviário, o transporte ferroviário demanda constantemente um investimento em prevenção de acidentes e estudos sobre as causas desses acidentes são recorrentes. A segurança e a produtividade das operações ferroviárias estão relacionadas com o desempenho dos veículos ferroviários. A segurança dos veículos é considerada essencialmente em termos de descarrilamento. Falhas em equipamentos, más condições da via, operações inseguras dos trens e o excesso nos limites admissíveis da dinâmica dos veículos são considerados as principais origens de descarrilamento. A produtividade dos veículos ferroviários é considerada uma função de sua receita e operação, manutenção e custos de capital. Estes fatores são influenciados pela qualidade da marcha, velocidade do veículo e forças de contato roda-trilho, as quais levam ao desgaste e degradação das vias e veículos.

Na última década a quantidade de acidentes tem diminuído devido às melhores condições das vias e composições ferroviárias, também tem havido uma maior preocupação das operadoras em utilizar as modernas tecnologias ferroviárias. De acordo com um relatório da ANTT [4], ocorreram 8738 acidentes ferroviários no Brasil, de 2006 a 2013. No gráfico apresentado na Figura 3 é possível observar como o número de acidentes tem diminuído realmente nos últimos anos.



Figura 3: Total de acidentes nas concessionárias ferroviárias no Brasil, de 2006 a 2013 [4].

Esse mesmo relatório da ANTT também explicita as principais causas desses acidentes, quantificados de 2006 a 2013. No gráfico da Figura 4, constata-se que o grande motivo de acidentes nos últimos anos são problemas relacionados à via permanente, ou seja, relacionados às instalações e estrutura da ferrovia.



Figura 4: Causas de acidentes ferroviários no Brasil, de 2006 a 2013 [4].

2. MATERIAL RODANTE E COMPOSIÇÕES FERROVIÁRIAS

Material rodante é a denominação dada ao conjunto de todos os equipamentos que se locomovem sobre a via permanente. É classificado pela sua capacidade de tração, como material de transporte (sem tração ou rebocado) ou material de tração (Figura 5), que são as locomotivas e os carros motores. Material de transporte são os carros que transportam os passageiros e os vagões que transportam as cargas [5].



Figura 5: Exemplo de material de tração (locomotiva) [6].

Uma composição ferroviária é assim denominada quando há um conjunto de material rodante composto por pelo menos uma locomotiva e pelo menos um vagão ou carro. O "trem" é a denominação mais comum e largamente utilizada para uma composição ferroviária. A referida composição tem duas extremidades, a Frente (ou Testa), que é a ponta da composição que está no sentido de deslocamento, e a Cauda, que é a parte contrária à Frente, a parte de trás.



Figura 6: Composição ferroviária [1].

Uma composição ferroviária (Figura 6) é normalmente constituída de vários veículos, sendo geralmente o primeiro a locomotiva (podendo ser mais de uma) e os demais podem ser os vagões ou os carros. A transmissão de força entre os veículos é através dos chamados acoplamentos, ou engates (Figura 7).



Figura 7: Exemplo de um acoplamento de vagões [7].

Usualmente, as composições podem ser configuradas com uma, ou até cinco locomotivas na frente da composição (Figura 8). Em alguns casos pode ser utilizada uma locomotiva de apoio na cauda, ou ainda podem ter locomotivas distribuídas ao longo da composição, acarretando em uma tração distribuída. Nesse caso, é comum utilizar duas locomotivas na frente, tracionando 2/3 da composição, e mais uma ou duas locomotivas tracionando o 1/3 restante.



Figura 8: Composição com cinco locomotivas na frente [8].

2.1. Vagões

O vagão é o veículo destinado ao transporte de cargas. Os veículos utilizados para transporte de passageiros são chamados de "carros". Um vagão não possui capacidade motriz, então necessita ser rebocado.

A caixa (ou corpo do vagão) é o componente de sustentação utilizado para o confinamento da carga e instalação dos equipamentos de modo geral [9]. Basicamente, os diferentes tipos de vagões são denominados em função do formato e utilização de suas caixas:

- Vagão Fechado (Figura 9): carregam granéis corrosivos e granéis sólidos que não podem ser expostos ao tempo. Dentre os vagões fechados, existem subtipos. Por exemplo, podem ter caixa metálica ou de madeira, com ou sem escotilhas, podem ser ventilados, entre outras diferenças.



Figura 9: Vagão Fechado [5].

- Vagão Gôndola (Figura 10): para granéis sólidos e produtos diversos que podem ser expostos ao tempo.



Figura 10: Vagão Gôndola [10].

- Vagão *Hopper* (Figura 11): fechados para granéis corrosivos e granéis sólidos que não podem ser expostos ao tempo ou abertos para granéis que podem ser expostos ao tempo.



Figura 11: Vagão Hopper [5].

- Vagão Plataforma (Figura 12): carregam contêineres, produtos siderúrgicos, grandes volumes, madeira, peças de grandes dimensões.



Figura 12: Vagão Plataforma. [5]

- Vagão Tanque (Figura 13): carregam cimento a granel, derivados de petróleo claros e líquidos não corrosivos em geral.



Figura 13: Vagão Tanque [11].

- Vagão Isotérmico (Figura 14): carregam produtos congelados em geral.



Figura 14: Vagão Isotérmico [12].

2.2. Componentes de um vagão

O veículo ferroviário de carga é constituído pelo corpo do veículo (caixa) e dois truques, sendo um dianteiro e outro traseiro. O truque é um componente estruturado por uma travessa central e duas laterais, que contém duas ou mais montagens de roda-eixo (rodeiros).

A suspensão primária do truque, constituída pelo rolamento e adaptador, localiza-se entre os rodeiros e as travessas laterais, enquanto a suspensão secundária, constituída pelas molas e cunhas de fricção, localiza-se entre as travessas laterais e a travessa central. A suspensão suporta o corpo do veículo, fornece orientação direcional, filtra os efeitos das imperfeições da geometria da via e fornece estabilidade dinâmica. O truque, portanto é de importância fundamental nos estudos dinâmicos de veículos ferroviários.

O corpo do veículo está apoiado sobre o prato-pião e o peso é transmitido para baixo até a via, através da travessa central, suspensão secundária, travessas laterais, suspensão primária, rodeiros e o contato roda-trilho.

2.2.1. Rodeiro

O elemento básico do veículo ferroviário é o rodeiro (*wheelset*), que consiste de duas rodas rígidas montadas em um eixo. As rodas possuem perfil cônico e um flange para o lado de dentro dos trilhos. Um afastamento entre o flange e trilho previne que haja o contato em retas, o que evita um desgaste maior do flange, além de diminuir a propensão ao descarrilamento. Os afastamentos ($e_1 e e_2$) entre o flange de cada roda e os trilhos podem ser observados na Figura 15.



Figura 15: Afastamento entre flange e trilho, adaptado de [13].

Em veículos ferroviários convencionais, o rodeiro consiste de duas rodas que são rigidamente fixadas a um eixo e rotacionam juntos (Figura 16). As rodas possuem perfil cônico fornecendo assim uma ação autocentrante com os eixos, movendo-se lateralmente com respeito à via. Sobre condições usuais de simetria e pequenos deslocamentos, de acordo com [14], evidencia-se que os graus de liberdade necessários para descrever os movimentos laterais do rodeiro são o deslocamento lateral (centróide do rodeiro) e ângulo

yaw (sobre o eixo vertical perpendicular ao eixo no centróide). O rodeiro é conectado ao restante do veículo através do sistema de suspensão, o qual se opõe ao deslocamento lateral e ao movimento de ângulo de *yaw* [1].



Figura 16: Componentes de um rodeiro, adaptado de [15].

2.2.2. Truque

Os truques (Figura 17) são montados em estruturas rígidas de, no mínimo, dois rodeiros. No Brasil, a maior parte dos vagões possui dois rodeiros por truque, já as locomotivas podem possuir dois, três ou quatro rodeiros por truque.

Os veículos ferroviários mais convencionais usam truques de dois eixos. As configurações dos truques podem ser classificadas em três amplas categorias: truques de passageiros, truques de carga e truques de locomotivas.

As funções primordiais de um truque de veículo ferroviário são:

- a) Suportar com segurança o corpo do veículo sobre a cadeia inteira de operações.
- b) Fornecer orientação com operação estável em via tangente e flange livre em via curva.

- c) Fornecer isolamento aceitável, ao corpo do veículo, de vibrações provenientes das irregularidades da via.
- d) Fornecer adesão aceitável durante operações de potência e frenagem.

Para reunir estes objetivos, diferentes tipos e configurações de truques têm sido desenvolvidos ao longo dos anos [1].



Figura 17: Exemplo de truque com dois rodeiros [16].

2.2.3. Truque de veículos de carga

O truque de três peças (Figura 18) para veículos de carga consiste de duas travessas laterais e uma travessa central, diferenciando-se de um truque de passageiros pela falta dos elementos de suspensão primária entre rodeiros e estrutura do truque, e o uso de fricção em paralelo com as molas na suspensão secundária.

O corpo de um veículo de carga é suportado no centro da travessa central do truque através do prato-pião. Esta conexão consiste de um prato fixado no corpo do veículo, que se ajusta livremente na outra conexão do prato-pião, um disco com rebaixo no centro da travessa. O pino-rei é colocado através do furo no centro do prato do veículo e do prato-pião da travessa. O corpo do veículo pode balançar no prato-pião com um pouco de restrição do pino-rei ou da borda do prato do truque.



Figura 18: Elementos de um truque de três peças [1].

3. VIAS PERMANENTES

Via permanente é a denominação do conjunto das obras civis que constituem uma linha férrea, que resumidamente pode ser dividida em superestrutura e infraestrutura. No Brasil, são considerados como parte da superestrutura os trilhos, as fixações do trilho ao dormente, talas de junção, dormentes, lastro e sublastro. Já a infraestrutura consiste de subleito, elementos de drenagem, taludes de cortes e aterros e obras de arte correntes e especiais. No desenho esquemático da Figura 19, é possível identificar alguns elementos da via permanente.



Figura 19: Elementos da via permanente, adaptado de [3].

As condições da via permanente influenciam diretamente nas operações e desempenho das locomotivas e vagões. As vias, quando são construídas incorretamente ou em condições precárias, podem causar desgaste de componentes e acidentes. Como este projeto visa o estudo dinâmico de composições ferroviárias, cuja análise depende principalmente da interação roda-trilho, somente os trilhos e a macrogeometria da via permanente serão abordados neste capítulo.

3.1. Trilhos

Os trilhos são os elementos da via permanente que guiam o veículo no trajeto e dão sustentação ao mesmo. Funcionam como viga contínua e transferem as solicitações das rodas para os dormentes. Na Figura 20, é possível observar a nomenclatura utilizada para identificar as principais partes de um trilho.



Figura 20: Nomenclatura das regiões do trilho, adaptado de [1].

Os trilhos recebem a carga dos veículos através das pequenas superfícies de contato, que resultam em altas tensões compressivas. Estas tensões, quando muito elevadas, podem causar escoamento do metal na superfície do boleto, desgaste por atrito e fraturas provocadas por fissuras decorrentes da fadiga. Outros aspectos também influenciam as forças de contato roda-trilho, como por exemplo: o diâmetro da roda, carga no eixo e velocidade do veículo [1].

O boleto possui uma grande área de seção transversal, para que o desgaste não afete o momento de inércia da seção. A alma possui altura suficiente para resistir à flexão e espessura mínima capaz de garantir adequada resistência e rigidez transversal. A espessura da alma também é projetada considerando o desgaste provocado pela corrosão atmosférica. O patim tem seção adequada para manter a alma perpendicular em relação ao dormente e transferir os esforços dos trilhos para a placa de apoio e dormentes.

Resumidamente, o trilho deve atender à condição de ser estável ao tombamento. Essa

estabilidade acontece se as espessuras da alma e do patim são compatíveis com a solicitação. O trilho também deve possuir resistência lateral, com patim e boleto largos o suficiente para garantir resistência à flexão devido à força transversal, atuante principalmente em curvas. Além disso, as arestas do trilho devem ser arredondadas, diminuindo a ação de tensões residuais, e o mesmo possui um limite de utilização devido a desgaste vertical concomitante ao desgaste lateral [2]. Esse limite depende do tipo de trilho, de quais tipos de composições ferroviárias trafegam na ferrovia, entre outros fatores.

3.2. Geometria da via permanente

Os efeitos de contato entre a roda e o trilho são essenciais ao estudo dinâmico ferroviário, mas além desses efeitos, também são de extrema importância as excitações mecânicas relativas às variações da geometria da via permanente. O estudo das interações entre veículo e via, com o intuito de se avaliar a qualidade de marcha, desempenho do veículo, conforto do passageiro e danos à carga, necessita de uma representação precisa das variações da geometria da via.

Irregularidades ou variações na geometria da via resultam de forças cumulativas que deformam a estrutura da via durante seu tempo de vida. Estas variações muitas vezes iniciam com pequenas imperfeições no material, tolerâncias e erros na fabricação dos trilhos e outros componentes da via. Irregularidades do terreno e erros em levantamentos topológicos durante o projeto e construção da via também originam essas variações. A deterioração progressiva da geometria da via decorre do nível de tráfego e dos fatores ambientais [1].

3.2.1. Irregularidades da via

As irregularidades de uma via podem ser estáticas ou dinâmicas. As irregularidades estáticas são formadas nos trilhos devido a vários motivos possíveis e permanecem assim ou sofrem poucas alterações com o decorrer do tempo. Já as irregularidades dinâmicas são causadas no instante da passagem da composição ferroviária sobre a via. Essa situação dinâmica de flexibilidade da via pode ser modelada por uma compilação de baixas frequências e um sistema massa-mola de um grau de liberdade para altas frequências [1].

As irregularidades estáticas podem ser periódicas, aperiódicas ou randômicas. Como exemplo, cada tipo dessas irregularidades pode ser modelado das seguintes formas:

a) Irregularidades periódicas (Figura 21)

As componentes periódicas que podem ser observadas no plano vertical são devidas às juntas dos trilhos que estão sujeitas a batidas nas extremidades dos mesmos. As extremidades de cada segmento de trilho são golpeadas e dirigidas para baixo pelas forças de impacto que ocorrem nas juntas. Por exemplo, para juntas defasadas, a forma de cada trilho pode ser aproximada por uma onda senoidal, ou seja:

Trilho direito:
$$z_d = S|\sin(u)|$$

Trilho esquerdo: $z_e = S|\sin(u - \pi/2)|$
 $u = \frac{\Omega x}{2}$
 $\Omega = \frac{2\pi}{L_R}$

Onde:

S: amplitude da onda senoidal, em m;

 L_R : comprimento dos trilhos, em m;

x: distância ao longo da via, em m;

 Ω : número de onda, em rad/m.



Figura 21: Irregularidade periódica dos trilhos direito e esquerdo [1].

b) Irregularidades aperiódicas

Estruturas especiais de via, tal como, aparelhos de mudança de via e passagens de nível podem ser simulados como outras excitações mecânicas. As irregularidades aperiódicas mais comuns em vias férreas são conhecidas e podem ser representadas por expressões analíticas, conforme pode ser observado na Tabela 1, adaptada de [14]. Elas incluem pontas (*cusp*), protuberâncias (*bump*), desnível (*jog*), platô (*plateau*), depressão (*trough*), onda senoidal (*sinusoid*) e senoidal amortecida (*damped sinusoid*).

Irregularidade	Irregularidade Forma			
Ponta	A V(s)	y = Ae ⁻⁺ H		
Protuberância	A V(s)	$y = Ae^{-(\sqrt{2})(\omega)^2}$		
Desnivel	1.1/k +1	$y = \frac{Aks}{\sqrt{(1+4k^2s^2)}}$		
Platô	A IA S	$y = \sqrt{\left(\frac{A^2}{1 + \left(k_{\rm S}\right)^n}\right)}$		
Depressão		$y = Ak \sqrt{\left[\left(\frac{1}{k} \right)^2 - s^2 \right]}$		
Onda Senoidal		y = Asin πks		
Senoidal Amortecida		$y = Ae^{-it}\cos \pi ks$		

Os principais tipos de irregularidades aperiódicas, apresentados na Tabela 1, possuem parâmetros de cálculo para as suas respectivas expressões analíticas. Esses parâmetros podem ser observados na Tabela 2.

	Faixa de valores							
Funções de	Bitola		Alinhamento		Nivelamento Transversal		Perfil	
irregularidade	A (in.)	k (ft-1)	A (in.)	k (ft ⁻¹)	A (in.)	k (ít-1)	A (in.)	k (ft-1)
Ponta	0.8-1.4	0.016-0.061	0.5-0.3	0.011-0.103	0.9-3.0	0.031-0.095	0.9-3.0	0.016-0.095
Protuberância	0.8 - 1.4	0.031-0.040	0.5-2.8	0.009-0.083	1.0-3.0	0.017-0.031	0.5-4.0	0.013-0.065
Desnivel			0.5-3.3	0.006-0.025	1.6-2.8	0.020-0.05	0.5-5.0	0.008-0.045
Platô	0.8-1.3	0.029-0.08	1.2-1.6	0.025-0.027	0.6-1.0	0.026-0.04	0.9-3.0	0.009-0.033
Depressão			1.4-2.2	0.013-0.029	***		0.7-2.0	0.020-0.025
Senoidal		***	0.8-1.2	0.033-0.020	1440	***	1.0-1.5	0.020-0.025
Sen. Amortecida	0.5-1.0		1.0-2.2	0.013-0.015	0.9-1.2	0.051-0.061		

Tabela 2: Parâmetros de representação analítica de irregularidades, adaptado de [14].

Como exemplo, considere dois tipos de irregularidades: as pontas (*cusp*) e o desnível (*jog*). Em geral, uma ponta ocorre como uma irregularidade de nível transversal em juntas entre trilhos soldados em desvios de via. A tendência para a utilização dos trilhos continuamente soldados (CWR), que devido à expansão e contração térmica cíclica formam as pontas, torna esta uma das irregularidades importantes para uma avaliação, já que representa uma condição crítica que ocorre com muita frequência.

Por sua vez, um desnível pode ocorrer devido a variações na rigidez da via, como no caso da conexão entre uma via muito flexível e uma ponte rígida. Com o passar do tempo, os dormentes se enfraquecem e perdem o aperto sólido sobre o lastro, devido principalmente à falta de manutenção na via e a alta carga. Atualmente, vários operadores de ferrovias estão substituindo os dormentes de madeira por dormentes de concreto nas vias de carga excessiva, ao passo que nas vias para trens de alta velocidade, estes são quase que obrigatórios. No entanto, converter as vias existentes para dormentes de concreto é considerado caro e demorado, assim a irregularidade de desnível é encontrada com certa frequência nas ferrovias e torna-se importante também uma simulação dinâmica nesta condição [1].

c) Irregularidades randômicas

As irregularidades randômicas em vias são descritas pelo Espectro de Densidade de Potência (PSD). A densidade espectral é um valor médio quadrático distribuído de uma

variável como uma função de frequência ou número de onda. Espectros de densidade medidos para vários tipos de superfícies foram aproximados por:

$$S_p(\Omega) = A_s / \Omega^2$$

Onde $S_p(\Omega)$ é o espectro de densidade de potência, o valor A_s depende do tipo de superfície medida e Ω é o número de onda.

3.2.2. Bitola

A bitola de uma via é definida como a menor distância entre dois trilhos ("G", na Figura 22), tomada entre a superfície de rolamento e a uma linha paralela a esta, situada a uma distância $Z_p = 14$ mm abaixo da mesma. A superfície de rolamento é definida como uma linha perpendicular ao eixo central vertical da via, tangente às duas superfícies superiores do trilho. A tolerância dessa medida Z_p é de ±1 mm [9]. Uma via, entretanto, pode ter mais de um tipo de bitola, permitindo que seja utilizada por mais de um tipo de trem [2].



Figura 22: Bitola da via [9].

Os valores de bitola não são padronizados igualmente ao redor do mundo, entretanto pode-se afirmar que os mais comuns são de 1000 mm, 1435 mm e 1600 mm. A tolerância no tamanho da bitola varia em função do país, da organização ferroviária e da velocidade da via [2].

Os principais países da Europa (com exceção da Irlanda, Reino Unido e Finlândia) e a América do Norte possuem geralmente ferrovias com valor de bitola de 1435 mm. No Brasil é possível encontrar quatro bitolas diferentes: 760 mm, 1000 mm, 1440 mm e a mais difundida que é a de 1600 mm. Além do Brasil, essa bitola de 1600 mm só é encontrada na Austrália, Reino Unido e Irlanda [9].
3.2.3. Rampas

A rampa é definida como um trecho da ferrovia que não está em nível, ou seja, possui inclinação ascendente ou descendente, considerando o sentido de deslocamento da composição ferroviária. Essa inclinação é geralmente expressa como uma porcentagem, chamada de gradiente da rampa. A porcentagem indica o número de metros pelo qual a via ascende ou descende, em uma distância longitudinal de 100 m. A rampa é ascendente quando o gradiente é positivo e descendente quando o gradiente é negativo [17].

As rampas devem possuir uma restrição quanto ao máximo gradiente possível a ser adotado em determinado trecho, de forma que o esforço trator seja adequado. De acordo com [17], adotam-se os limites de 2% a 3% quando o tráfego predominante for de velocidade, caso das linhas de fluxo de passageiros. E quando o tráfego for de tração, caso das linhas de fluxo de cargas, o limite vai para uma faixa de 0,4% a 0,6%.

Típicas inclinações encontradas na prática são descritas a seguir e podem ser observadas na Figura 23:

- a) Inclinação ascendente leve: é uma inclinação ascendente de 1,0 % ou menos. Os procedimentos para operar (segurar) o trem neste tipo de rampa é assumir que esta seja longa o suficiente para que um balanço possa ser estabelecido entre forças de desaceleração gravitacional e a influência das forças de resistência dos veículos e forças de aceleração da locomotiva.
- b) Inclinação descendente leve: é uma inclinação descendente de 1,0% ou menos. Os procedimentos para operar (segurar) o trem neste tipo de inclinação é assumir que esta seja longa o suficiente para que um balanço possa ser alcançado entre as forças de aceleração gravitacional devido à inclinação e forças de desaceleração devido à resistência do trem e frenagem.
- c) Inclinação ascendente pesada: é uma inclinação ascendente maior que 1,0%. Os procedimentos para operar (segurar) o trem neste tipo de inclinação são baseados na consideração que a inclinação é longa o suficiente para que o balanço possa ser estabelecido entre as forças de desaceleração e aceleração, da mesma forma que em inclinações ascendentes leves.

- d) Inclinação descendente pesada: é uma inclinação descendente maior que 1,0%. Os procedimentos para operar (segurar) o trem neste tipo de inclinação é assumir que esta seja longa o suficiente para que um balanço possa ser alcançado entre as forças de aceleração e desaceleração, da mesma forma que em inclinações descendentes leves.
- e) Inclinação de perfil côncavo (colina): é uma longa inclinação ascendente que muda para uma longa inclinação descendente, sendo que ambas as inclinações são de magnitude suficiente para que haja uma mudança nos procedimentos de operação do trem na colina.
- f) Corcova, monte ou cômoro: estes termos são usados para descrever um rápido aumento na inclinação, seguido de um decréscimo na inclinação suficiente para resultar em um considerável afrouxamento no ajuste do engate.
- g) Depressão: é uma inclinação descendente seguida por uma ascendente, raso ou quase raso, que resulta em ajuste de acoplamento mais frouxo do que em outras rampas.
- h) Inclinação ondulada: uma inclinação ondulada define um perfil de via onde as mudanças de inclinação são tão frequentes que a média de um trem passando por cima cobre três ou mais inclinações ascendentes e descendentes. O afrouxamento do trem é continuamente ajustado com os veículos em inclinações descendentes tendendo a mover mais rápido do que aqueles em inclinações ascendentes.



Figura 23: Inclinações – (a) ascendente leve; (b) descendente leve; (c) ascendente pesada; (d) descendente pesada; (e) côncava; (f) corcova; (g) depressão; (h) ondulada, adaptado de [1].

3.2.4. Curvas

Em uma ferrovia, a forma mais simples de uma curva tem um raio constante, uma superelevação constante e nenhuma irregularidade. Superelevação consiste em elevar o

nível do trilho externo de uma curva. Esta técnica reduz o risco de tombamento devido à força centrífuga que aparece nas curvas, além de diminuir o desconforto gerado pela mudança de direção e o desgaste no contato metal-metal entre roda e trilho [2].

A soma do peso do veículo e a força centrífuga produzem uma força resultante direcionada para o trilho externo, a menos que este seja superelevado, como pode ser observado na Figura 24.



Figura 24: Superelevação, adaptado de [1].

Uma curva é descrita como sendo balanceada na velocidade de equilíbrio, a qual produz uma força resultante através da linha de centro da via. Nesta condição as forças verticais nos trilhos são iguais, para que a máxima utilização dos esforços de tração e mínimo desgaste nas rodas e trilhos possam ser alcançados.

A geometria de uma via pode conter os seguintes tipos de segmentos: tangente, curva permanente, espiral e transição. Um trecho de via tangente é uma reta, onde curvatura e superelevação são iguais a zero. Por sua vez, uma curva permanente possui curvatura e superelevação constantes. O raio de curvatura pode variar de um mínimo de 30 m, em vias de tráfego de baixa velocidade, até 3048 m, em vias de alta velocidade.

Segmentos de espiral são usados entre tangentes e segmentos de curva permanente. Sua curvatura e superelevação variam segundo funções específicas de posição na via, das quais são normalmente utilizadas funções lineares, seno ou arco-tangente. Por último, um segmento de transição é um trecho da via que é muitas vezes usado entre tangente e espiral, ou espiral e segmentos de curva permanente. A transição pode não ser necessária para certos tipos de segmentos de espiral, que proporcionam transições suaves por si mesmos. Por exemplo, na Figura 25, o segmento de transição não aparece.



Figura 25: Segmentos de via, adaptado de [1].

4. DINÂMICA DO VAGÃO E MECANISMOS DE DESCARRILAMENTO

O estudo dinâmico de veículos ferroviários pode ser realizado de maneira efetiva ao se utilizar um modelo matemático aproximado, onde podem ser escolhidas opções que facilitem a alteração dos parâmetros dinâmicos do sistema da suspensão, das inércias dos corpos, das alturas dos centros de gravidade, entre outros.

Uma análise detalhada sobre o desempenho da dinâmica dos veículos ferroviários requer a modelagem dos seus principais componentes: truque, corpo do veículo e carga; todos eles alocados em um modelo matemático, para que as interações entre estes vários componentes possam ser corretamente representadas.

A dinâmica de sistemas multicorpos, conforme destacado em [14], pode ser utilizada para o desenvolvimento e solução das equações não lineares que governam o complexo movimento dos componentes de veículos ferroviários, os quais podem sofrer deslocamentos e rotações. Os movimentos destes componentes estão sujeitos a restrições cinemáticas, que são resultados de juntas mecânicas, elementos de força e movimentos com trajetórias específicas. As equações de movimento são desenvolvidas utilizando os princípios da mecânica, as quais normalmente são resolvidas por programação ou simulação [1]. No presente trabalho, um programa computacional com possibilidades gráficas foi utilizado, para que as equações de movimento fossem automática e sistematicamente construídas e resolvidas.

A interação roda-trilho é um elemento importante que distingue veículos ferroviários de outros sistemas em aplicações multicorpos. A interação roda-trilho é descrita em termos de forças de contato, bem como outras forças e variáveis cinemáticas. Os algoritmos de sistemas multicorpos também podem ser usados para estudos de cenários de descarrilamento e desenvolvimento de critérios de descarrilamento [14].

4.1. Possibilidades de movimento

Um vagão possui seis possibilidades de movimento, que são mais conhecidas como modos de vibração (Figura 26). São três modos de translação (Longitudinal, Vertical e Lateral) e três de rotação (Balanço, Arfagem e Direção) [18]. A translação Longitudinal e o Balanço são modos de vibração cujo eixo está orientado ao longo da via permanente. A translação Lateral e a Arfagem têm seu eixo orientado horizontalmente e transversal à via permanente. E a translação Vertical (Galope) e a Direção possuem eixo orientado verticalmente à via permanente.



Figura 26: Modos de vibração de um vagão, adaptado de [18].

Na Figura 26 é possível observar os movimentos do vagão já citados, além do Balanço Lateral Inferior e Superior, que correspondem à combinação dos movimentos de Balanço com a translação Lateral da caixa. Já na Figura 27, pode-se observar o movimento de Lacê (*hunting*), oscilação violenta combinada de Balanço (*roll*) e Direção (*yaw*), que resulta em um movimento lateral dos rodeiros com respeito a sua posição de equilíbrio [1].



Figura 27: Rodeiro em movimento de Lacê [15].

4.1.1. Lacê - estabilidade e orientação

Os problemas de estabilidade são geralmente concentrados sobre o termo "Lacê". O Lacê primário (ou do veículo) envolve movimentos laterais, ângulo de Direção e Balanço do corpo do veículo. Muitas vezes ele ocorre em velocidades menores do que a velocidade crítica necessária para o Lacê do truque. O Lacê secundário (ou do truque), que muitas vezes ocorre sem o Lacê primário, é uma oscilação do ângulo de Direção, deslocamento lateral dos rodeiros e estrutura do truque. Ele é amortecido abaixo de certa velocidade crítica. Acima da velocidade crítica, a amplitude de oscilação aumenta até o truque golpear de trilho a trilho, limitado apenas pelos flanges das rodas. O Lacê do truque ocorre em via tangente e ele pode ocorrer com o veículo vazio em velocidades tão baixas como 56 km/h, em casos especiais, mas normalmente não se inicia até a faixa de, aproximadamente, 72 a 80 km/h com rodas gastas, ou 88 a 104 km/h com rodas novas. O contato severo do flange em intervalos de 9,14 a 15,24 metros tem sido observado durante este fenômeno. A velocidade crítica é mais alta para locomotivas e veículos mais pesados. Veículos vazios com rolamentos e rodas gastas são mais propensos ao Lacê.

O Lacê do truque causa desgaste acelerado da roda e trilho, fadiga e avarias em componentes do veículo tal como prato-pião, travessas centrais e laterais, avarias nas cargas de veículos levemente carregados, alargamento de bitola, afrouxamento de pregos da via e ruptura do balastro em torno dos dormentes. Em casos extremos pode causar descarrilamento [1].

4.1.2. Velocidade crítica de Lacê

Embora se imagine que as rodas sejam mantidas nos trilhos pelos flanges, os flanges na realidade têm pouco contato com o trilho, e quando o fazem, a maioria do contato é deslizamento. O atrito de um flange no trilho dissipa grandes quantidades de energia, principalmente na forma de calor, mas também incluindo o ruído, e se sustentado leva ao desgaste das rodas.

A partir de observações de campo, verifica-se que a superfície de rolamento da roda de um vagão é polida, mas o flange não, isto porque o flange raramente faz contato com o trilho. A superfície de rodagem da roda é levemente cônica e quando o veículo está no centro da via, a região das rodas em contato com os trilhos forma um círculo que tem o mesmo raio de rolamento R_e e R_d , para ambas as rodas, conforme pode ser visto na Figura 28. De acordo com [14], se as duas rodas são idênticas e simetricamente localizadas em relação ao eixo, as velocidades das rodas são iguais e o veículo se move em linha reta. Os dois raios de rolamento $R_e e R_d$ na configuração inicial simétrica são iguais e podem ser denotados como R_0 . A conicidade γ é definida pela inclinação do perfil da roda.



Figura 28: Raios de rolamento do rodeiro, adaptado de [1].

No entanto, se a roda se desloca para um lado, os raios de rolamento e, portanto, as velocidades das rodas são diferentes, e o rodeiro tende a dirigir-se de volta para o centro. Além disso, quando a composição ferroviária encontra uma curva, a roda desloca-se lateralmente um pouco, de modo que a velocidade da roda externa aumenta (linearmente) e a roda interna diminui, fazendo com que o trem faça a curva.

Com o rolamento de contato entre a roda e o trilho, a forma cônica das rodas se manifesta como uma oscilação, fazendo com que o trem tenha um movimento de um lado para o outro. Na prática, essa oscilação é amortecida abaixo de uma velocidade crítica, mas é amplificada pelo movimento para frente do trem acima da velocidade crítica. Esta oscilação lateral é conhecida como Lacê. O fenômeno do Lacê é conhecido desde o final do século XIX, embora a causa não fosse totalmente compreendida até 1920, e as medidas para eliminá-lo não estavam tomadas até o final dos anos 1960. Como o fenômeno é frequente, a limitação da velocidade foi imposta ao atingir a instabilidade no movimento [1].

4.2. Equações de movimento

A composição ferroviária pode ser modelada por um sistema multicorpos, conforme destacado em [14]. Um trem pode ser considerado um conjunto de corpos rígidos interligados entre si, mas com restrições de movimento através de juntas mecânicas. As forças entre os elementos são transmitidas através dessas juntas, que no caso dos trens, são os acoplamentos entre veículos.

Por exemplo, um pêndulo múltiplo, ou um duplo pêndulo como na Figura 29, pode ser citado a fim de comparação. Cada pêndulo é um corpo rígido, sendo que esses corpos são interligados entre si por hastes que restringem seus movimentos. Como pode ser visto na figura, para descrever a posição e posteriormente o movimento, a cada corpo é associado um sistema de coordenadas próprio. Porém, também podem ser relacionados ao referencial inercial, denotado por O (x_0 , y_0 , z_0), que nesse caso é um ponto fixo ligado ao sistema.



Figura 29: Exemplo de sistema multicorpos, adaptado dos manuais do Universal Mechanism®.

A diferença do exemplo dos pêndulos para o trem é que o referencial inercial não está conectado ao sistema, mas pode ser considerado como a Terra, por exemplo.

Assim, cada veículo possui seu próprio sistema de coordenadas, que indica a posição relativa entre um corpo e outro, mas o sistema como um todo pode ter sua posição indicada com relação ao referencial inercial. Além disso, a composição também possui o trajeto da ferrovia como uma restrição cinemática a ser modelada.

As equações de movimento para uma composição ferroviária, considerada como um sistema multicorpos, podem ser apresentadas na forma matricial a seguir:

$$[M]\ddot{x} + [c]\dot{x} + [k]x = \vec{F}$$

A matriz "M" corresponde à matriz das massas dos vários corpos rígidos do sistema, pois além dos corpos dos veículos, os principais elementos dos truques e as cargas também são modelados separadamente. A matriz "c" corresponde aos coeficientes de amortecimento provenientes do conjunto de molas dos truques. A matriz "k" representa a rigidez encontrada nos elementos do truque e dos trilhos. O vetor "x" representa o posicionamento dos corpos em relação ao referencial inercial e "F" é o vetor de forças externas ao sistema multicorpos, que representa as excitações atuantes nos pontos de contato entre as rodas e trilhos, durante todo o trajeto da via.

4.2.1. Resolução das equações de movimento

O programa *Universal Mechanism*® foi selecionado para construir e resolver as equações de movimento da composição ferroviária e de seus vagões. É um *software* comercial amplamente utilizado e bem específico para o estudo de veículos ferroviários, já que possui diversos módulos voltados exclusivamente para esse meio de transporte.

O *UM*® utiliza integração numérica para resolver as equações de movimento dos sistemas multicorpos. Nesse programa, é possível a utilização de vários métodos numéricos iterativos para a solução dessas equações não lineares. De acordo com o manual do *software*, o método iterativo mais eficiente e recomendado para a simulação de veículos ferroviários é o *Park*. Esse é um método numérico implícito de segunda ordem, de passo variável. Na Figura 30, é possível verificar os parâmetros utilizados no programa com o método *Park*.

Object simulation inspector		Simulation process parameters Solver options	
Rail/Wheel XVA Information Tools Solver Identifiers Initial conditions Object variables Simulation process parameters Solver options Solver Type of solution BDF ABM ABM Null space method (NSM) Park method Range space method (RS Park Parallel Operation		Initial discretization 2 Initial discretization 2 Minimal possible step size 1E-0012 Maximal step size 0.002 Minimal step size 0.001 Minimal N iterations: 1 Maximal N iterations: 1 Iterational solution (<=1)	2 1E-0012 0.002 0.001 5 1 1 1 1 1
Simulation time 15.000 Step size for animation and data storage 0.005			
Error tolerance 4E-6 Delay to real time simulation Computation of accelerations and reaction forces Computation of Jacobian Block-diagonal Jacobian Keep decomposition of iterative matrix Jacobian for wheel/rail forces		BDF Minimal step size Maximal order ABM Minimal step size Maximal order RK4 Constant step size	1E-0010 5 1E-0010 11 10.001

Figura 30: Parâmetros do método numérico, interface do UM®.

4.2.2. Contato roda-trilho

O contato roda-trilho também é modelado matematicamente através do *software*. A localização dos pontos de contato é feita para a posição do rodeiro em relação aos trilhos. Com isso, as características cinemáticas nos pontos de contato são computadas e as forças no contato entre a roda e o trilho são calculadas de acordo com os parâmetros geométricos e cinemáticos estabelecidos naquele ponto. Estes problemas são solucionados através de um procedimento iterativo. Na Figura 31, é possível observar os sistemas de coordenadas utilizados no programa durante o procedimento para modelar o contato roda-trilho.



Figura 31: Posições relativas dos perfis de roda e trilho, adaptado dos manuais do software.

4.3. Mecanismos de descarrilamento

O problema do descarrilamento tem sido observado desde o início do uso dos veículos ferroviários, pois a análise desse processo é crítica para a previsão de segurança desse meio de transporte. A mecânica do descarrilamento é determinada pela interação de muitos efeitos não lineares, incluindo variação na localização dos pontos de contato roda-trilho, ângulos de contato, geometria da zona de contato e forças devido ao escorregamento.

O estudo desse fenômeno levou à identificação de cinco modos fundamentais de descarrilamento: escalada da roda, levantamento da roda, deflexão do trilho, separação veículo-truque e falha repentina de componentes. Os modos de descarrilamento permitem entender a natureza e condições em que podem ocorrer situações inseguras [1].

Um critério de descarrilamento usado na literatura é medir a razão entre a força vertical V e a força lateral L atuando na roda. Um desses critérios, a chamada Fórmula de Nadal, consiste em um simples balanço de forças que pode ser usado para determinar a razão L/V antes da ocorrência de um descarrilamento. Essa teoria de Nadal, utilizada para prever o fenômeno de descarrilamento, é um parâmetro importante de avaliação e desempenho utilizado amplamente na literatura ferroviária, inclusive neste trabalho.

4.3.1. Modos de descarrilamento

Baseado na verificação dos mecanismos do sistema veículo-via, cinco modos de descarrilamento fundamentais foram identificados. Conforme já foi citado anteriormente no texto, os cinco modos são: escalada da roda, levantamento da roda, deflexão do trilho, separação veículo-truque e falha repentina de componentes.

Cada um destes modos de descarrilamento descreve como o veículo pode sair da via permanente, e são caracterizados por um único indicador de descarrilamento, denotando que o limiar do modo de descarrilamento foi excedido.

Escalada da roda: o modo de descarrilamento de escalada de roda é produzido sempre que a posição do flange da roda passa lateralmente sobre a linha do centro do trilho, como pode ser observado na Figura 32. O indicador de descarrilamento para este modo é simplesmente expresso como o deslocamento lateral do flange da roda além de um valor limite, ou seja, $y_{ri} \ge y_{lim}$, i=1 até N, onde N é o número de eixos.



Figura 32: Escalada da roda [1].

Levantamento da roda: o modo de levantamento da roda ocorre sempre que a borda inferior do flange levanta acima do boleto do trilho. Assim tanto o movimento vertical quanto o giro podem levar ao levantamento da roda. O indicador é que o deslocamento vertical, para qualquer roda, não exceda o valor limite, ou seja, $z_{ri} \ge z_{lim}$, i=1 até N. Esta situação pode resultar também de uma translação vertical ou rotação do eixo no plano transversal, como pode ser visto na Figura 33.



Figura 33: Levantamento da roda, adaptado de [1].

Deflexão do trilho: a deflexão do trilho é definida como um modo de descarrilamento no qual a bitola dos trilhos excede a largura do rodeiro. Este modo resulta de um deslocamento lateral retilíneo (afastamento do trilho) ou rotacional (rotação do trilho) do boleto do trilho, o que pode ser observado na Figura 34. Em ambos os casos, o indicador de descarrilamento é dado pela condição que a bitola da via G excede a largura do rodeiro L_w , ou seja, $G_i \ge L_w$, i=1 até N.



Figura 34: Deflexão do trilho, adaptado de [1].

Separação veículo-truque: a separação do veículo do truque é definida como um modo de descarrilamento que existe quando o prato pião do veículo desengata do prato pião do truque. Isto é simplesmente expresso pelo indicador de descarrilamento $h_i \ge h_{lim}$, i=1,2. A separação veículo-truque pode resultar também de excessivos movimentos verticais ou de rolamento do corpo do veículo. Na Figura 35, é possível observar a separação do prato pião.



Figura 35: Separação veículo-truque [1].

Falha repentina de componentes: o descarrilamento resultante da falha repentina de componentes pode ocorrer de diversas maneiras, sempre que a força ou a tensão em um

componente crítico do veículo ou componente da via excede um valor limite. A quebra do eixo do rodeiro, por exemplo, é uma falha deste tipo. Indicadores de tensões ou forças excedentes são da forma: $\sigma_i \ge \sigma_{lim}$ ou $F_i \ge F_{lim}$, i=1 até Nc, onde Nc é o número de componentes. Sabe-se que os veículos em serviço estão submetidos a um enfraquecimento gradual devido ao desgaste e à fadiga à medida que envelhecem, e que essa deterioração é uma consideração importante no projeto. Os parâmetros σ_{lim} e F_{lim} descrevem a condição atual do veículo, não sua história, se a resistência é baixa, a probabilidade de descarrilamento é reforçada independente da causa de seu enfraquecimento. Assim, do ponto de vista do descarrilamento, o resultado do processo de fadiga em si, é motivo de preocupação.

O fato que o indicador de descarrilamento excede seu valor limite não garante que o descarrilamento deva ocorrer. Trata-se, no entanto, que uma condição inaceitável perigosa existe, o que equivale ao descarrilamento. Um exemplo é fornecido pelo modo de separação veículo-truque. É concebível que o veículo poderia levantar, aumentando a folga do pino rei e cair de volta no lugar novamente, sem efeitos negativos, além de choques violentos. Este evento, apesar disso, deve ser considerado como um descarrilamento em estudos de simulação, e assim, não é viável precisar os fatores complexos do modelo (como rajadas de vento, resistência ao rolamento, a geometria do local de impacto, etc.) que determinam a trajetória exata da separação do truque e veículo. Argumentos semelhantes se aplicam à escolha dos limiares de outros modos. Como resultado da utilização de indicadores de descarrilamento, devem-se esperar resultados superestimados a fim de evitar o descarrilamento [1].

4.3.2. Critérios de descarrilamento

Várias fórmulas estão disponíveis como um critério para o processo de descarrilamento, as quais dão a relação entre a força lateral e vertical para uma combinação específica de roda-trilho. Essa relação é usualmente chamada de "relação de descarrilamento" ou "quociente de descarrilamento", sendo denotada por (L/V), onde L e V são as forças laterais e verticais atuando no flange. A razão de descarrilamento (L/V) é utilizada como uma medida de segurança de marcha de veículos ferroviários. A fórmula do quociente de descarrilamento mais recorrente na literatura ferroviária é a Fórmula de Nadal.

As forças atuantes no flange, no momento de contato entre uma roda e um trilho,

podem ser observadas na Figura 36. As forças L e V são as forças laterais e verticais respectivamente, T_2 é a força de atrito no plano de contato e T_3 é a força normal à área de contato, sendo α_f o ângulo do flange e μ o coeficiente de atrito. O balanço de forças no plano lateral e no plano vertical resulta nas equações a seguir:

$$L = T_2 \cos(\alpha_f) - T_3 \sin(\alpha_f) \tag{1}$$

$$V = -\left[T_2 \sin(\alpha_f) + T_3 \cos(\alpha_f)\right]$$
(2)

Considerando $T_2 = \mu T_3$, então a razão L/V pode ser expressa dessa forma:

$$\frac{L}{V} = \frac{\tan(\alpha_f) - \mu}{1 + \mu \tan(\alpha_f)} \tag{3}$$

A relação (3) é conhecida como a Fórmula de Nadal para a razão de descarrilamento. A Fórmula de Nadal não considera o movimento de Direção da roda relativa ao trilho e não leva em conta o efeito do giro devido ao ângulo de conicidade dos flanges. O flange é considerado sendo deslizante sobre o trilho. A Fórmula de Nadal é uma das mais práticas para se determinar o valor crítico da razão de descarrilamento do rodeiro sujeito a um golpe lateral estacionário [1].



Figura 36: Forças no ponto de contato roda-trilho [1].

4.3.3. Critérios de desempenho recomendados pela AAR

Grande parte dos operadores ferroviários nacionais segue as recomendações da AAR (*Association of American Railroads*) em suas operações, limites de segurança e praticas de manutenção. De acordo com [18], dentre os vários volumes e capítulos de sua norma, pode-se destacar o Capítulo XI (*Service-worthiness tests and analyses for new freight cars*), que estabelece procedimentos experimentais e limites de segurança para a razão L/V. Os valores escolhidos para os critérios selecionados têm sido usados em vagões atualmente em serviço.

Evidentemente, por ser uma norma prática, esta tende a ser a mais conservativa possível, pois deve abranger o maior número de casos possíveis. Valores piores do que os recomendados pela norma da AAR são considerados como tendo alto risco de comportamento inseguro, enquanto valores melhores do que esses são considerados como indicadores de comportamento seguro do vagão.

Valor máximo de L/V para uma roda = 1,0: este é definido como a razão da força lateral e vertical entre a roda e trilho em uma roda individual. É utilizado para avaliar a proximidade da roda de subir no trilho.

Valor máximo do somatório de L/V para um eixo = 1,5: é definido como a soma de valores absolutos das razões L/V das rodas num mesmo eixo, como dado na seguinte equação. Estes devem ser medidos ao mesmo tempo.

Soma L/V do eixo =
$$|L/V$$
 (roda esquerda)| + $|L/V$ (roda direita)| (4)

Essa soma é utilizada para avaliar a proximidade da roda de subir no trilho, sendo mais apropriado onde o ângulo de ataque do flange da roda para o trilho não resulta em completa derrapagem na área de contato.

Valor máximo da soma de L/V de um dos lados do truque = 0,6: é definido como a soma total das forças laterais entre rodas e trilhos num lado do truque, dividindo pela soma total das forças verticais no mesmo lado do truque, como dado na seguinte expressão. Esse valor máximo é usado para indicar a proximidade do movimento lateral do truque ao trilho [1].

$$L/V \text{ lateral do truque} = \frac{\sum L (\text{lateral do truque})}{\sum V (\text{lateral do truque})}$$
(5)

5. PARÂMETROS PROPOSTOS DA COMPOSIÇÃO FERROVIÁRIA E DA VIA PERMANENTE

A dinâmica do veículo pode ser estudada através de um modelo matemático e da realização de simulações do modelo, que podem ser realizadas com o auxílio de *software* comercial de simulação dinâmica de sistemas multicorpos, como já foi dito anteriormente. Para determinar como serão feitas as simulações, é necessário estabelecer algumas considerações e escolher as variáveis do sistema.

Com o intuito de se realizar uma análise mais próxima das condições reais de operação, todos os parâmetros e dados selecionados para as simulações foram baseados em estudos de referência e em testes padronizados de desempenho.

5.1. Modelos de vagão e composição ferroviária

Os modelos de veículo e truque selecionados foram o de um vagão gôndola e truque *Barber*, tipos que são amplamente utilizados nas ferrovias brasileiras, para transporte de minério de ferro, por exemplo. O ambiente dinâmico destes veículos pode ser considerado como representativo do ambiente de operações encontrado no transporte ferroviário.

A representação do truque na Figura 37 foi obtida diretamente do *software* utilizado neste trabalho, que possui em seus próprios arquivos esse modelo, como um dos truques padronizados e mais utilizados nos vagões.



Figura 37: Truque Barber, representação gráfica no Universal Mechanism®.

As dimensões utilizadas para a modelagem do vagão gôndola foram obtidas em [19]. Trata-se de um desenho esquemático do perfil do vagão, com as principais dimensões de um dos subtipos existentes de vagão gôndola, o que pode ser visto na Figura 38.



Figura 38: Dimensões em milímetros do vagão gôndola, utilizado como modelo [19].

Entretanto, os dados referentes à quantidade máxima de transporte desse vagão, em termos de massa, foram retirados de [20], a qual relata que o vagão consegue transportar até 93000 kg e sua tara (massa do vagão vazio) é de aproximadamente 17000 kg. Na Figura 39, é possível observar a representação gráfica do modelo utilizado de vagão gôndola, durante uma das simulações realizadas.



Figura 39: Vagão gôndola, representação gráfica no UM®.

Um modelo de composição ferroviária, que contenha os vagões gôndola com os mesmos parâmetros citados anteriormente, também precisa ser estabelecido. Uma composição de vinte veículos foi selecionada, assim como foi optado em [21], já que esta é a referência que apresenta um modelo de composição ferroviária com o menor número de veículos em uma simulação. Entre os vinte veículos, encontram-se duas locomotivas (uma em cada ponta da composição) e dezoito vagões gôndola. O modelo de locomotiva escolhido é um dos modelos padrão presentes entre os arquivos do *software*, que se trata de uma locomotiva Diesel, com massa igual a 127500 kg. Na Figura 40, pode-se visualizar a representação gráfica da composição ferroviária, durante uma das simulações.



Figura 40: Composição ferroviária, representação gráfica no UM®.

5.2. Modelo da via

A definição da trajetória da composição ferroviária é mais uma das variáveis que devem ser modeladas para as simulações dinâmicas deste trabalho. O modelo da via é utilizado como restrição cinemática nas simulações.

Assim, foi estabelecido um trajeto padrão, que fosse adequado para ser utilizado igualmente em todas as simulações, representando condições reais de operação de trens.

Dados pertinentes em [16] e [17] foram obtidos, para que a trajetória modelo fosse definida.

Primeiramente, foram comparadas as premissas de [16] e [17] quanto à máxima inclinação de rampa aceitável em um trecho de ferrovia. Em [16], foi considerado que o trajeto teria rampas máximas de 0,4% ascendente e 1% descendente. Como já foi citado anteriormente no texto, em [17] é recomendado que trechos com tráfego de trens de carga tenham rampas máximas entre 0,4% e 0,6%, ascendentes ou descendentes.

A fim de buscar uma adequação entre essas duas referências, foi estabelecido que o trajeto padrão deste trabalho tivesse pelo menos uma rampa descendente de 0,6% e outra descendente de 1%. A rampa máxima ascendente escolhida foi de 0,4%.

Em seguida, foram escolhidos os trechos em curva do trajeto. Em [16], uma das premissas é que o raio mínimo de curvas seja 860 m, pois seria um dado retirado de uma via existente. Portanto, foi determinado que o trajeto padrão deste trabalho tivesse pelo menos uma curva de raio 860 m para a esquerda e outra de raio igual para a direita.

Entretanto, em [17] é estabelecido o conceito de velocidade limite. Esta seria a velocidade máxima com a qual um veículo ferroviário pode trafegar numa curva dotada de superelevação máxima ($S_{max} = 1/10$ da bitola da via). Uma das bitolas mais usadas no Brasil é a de 1600 mm, portanto essa será a bitola do modelo de via adotado e consequentemente a superelevação máxima será utilizada, $S_{max} = 160$ mm. Assim, a velocidade limite deve ser calculada da seguinte forma para:

Trens de carga vazios: $V_{lim} = 4,32 R^{1/2}$ Trens de carga carregados: $V_{lim} = 3,49 R^{1/2}$ Onde R é o raio da curva. Considerando R = 860 m, tem-se que: $V_{lim} = 4,32*860^{1/2} = 126,7 km/h$ (para trens vazios) $V_{lim} = 3,49*860^{1/2} = 102,3 km/h$ (para trens carregados)

Porém, no Brasil, a velocidade média dos trens (em vias de bom desempenho) operando com vagões carregados é de 30 a 40 km/h e operando com vagões vazios é de 50 a 60 km/h [1]. Portanto, é bastante viável realizar uma análise de comportamento do modelo de composição ferroviária em curvas com raios menores que 860 m.

O trajeto padrão final é apresentado nas Figuras 41 e 42, em suas projeções no plano horizontal e vertical, respectivamente. A projeção horizontal é dividida em trechos de "A" a "G", enquanto a projeção vertical tem segmentos de "1" a "8", em algarismos romanos.



Figura 41: Trajeto padrão - plano horizontal, representação no Universal Mechanism®.

Trecho A: 0 a 20 m – via tangente Trecho B: 20 a 180 m – curva para a esquerda, com R = 600 m Trecho C: 180 a 330 m – curva para a direita, com R = 600 m Trecho D: 330 a 430 m – via tangente Trecho E: 430 a 590 m – curva para a direita, com R = 860 m Trecho F: 590 a 740 m – curva para a esquerda, com R = 860 m Trecho G: 740 a 1000 m – via tangente



Figura 42: Trajeto padrão - plano vertical, representação no UM®.

Segmento I: 0 a 200 m – via plana (0% de inclinação) Segmento II: 200 a 300 m – via com rampa descendente de 0,2% Segmento III: 300 a 400 m – via com rampa descendente de 0,1% Segmento IV: 400 a 500 m – via com rampa ascendente de 0,2% Segmento V: 500 a 650 m – via com rampa ascendente de 0,4% Segmento VI: 650 a 750 m – via com rampa descendente de 0,2% Segmento VII: 750 a 850 m – via com rampa descendente de 1% Segmento VIII: 850 a 1000 m – via com rampa descendente de 0,6%

5.3. Modelo de rodas e trilhos

Após a modelagem dos vagões, composição ferroviária e da via, é necessário definir qual o perfil de rodas e trilhos. A interação entre esses é o que vai possibilitar a realização de todas as simulações do trabalho.

Foram escolhidos perfis padronizados de rodas e trilhos novos, presentes entre os arquivos do *software* utilizado. Embora houvesse também arquivos de rodas e trilhos desgastados, esses não foram considerados no trabalho devido aos diversos fatores de influência externa ao sistema, que acarretam no desgaste em si. A representação dos perfis selecionados em contato, na posição inicial das simulações, pode ser observada na Figura 43, retirada do programa.



Figura 43: Contato roda-trilho padrão, representação no UM®.

Além da escolha do perfil de roda e trilho, o *software* permite a alteração de alguns parâmetros importantes do contato. A inserção de irregularidades periódicas ou

aperiódicas na via e a lubrificação dos trilhos são aspectos que podem ser modificados. Entretanto, as irregularidades não foram consideradas nas simulações, pelo mesmo motivo que as rodas e trilhos desgastados também não foram.

A lubrificação dos trilhos é determinada pela escolha do coeficiente de atrito μ . Em vias tangentes, foi determinado que no topo do boleto, $\mu = 0,35$. Já em trechos em curva, no topo do boleto também foi utilizado $\mu = 0,35$, mas no canto da bitola (região do trilho que fica em contato com o flange da roda, durante a curva) foi adotado $\mu = 0,25$ [22].

6. SIMULAÇÕES DINÂMICAS

As simulações dinâmicas realizadas neste trabalho seguiram um procedimento de testes baseado no que foi utilizado em [16], pois se trata de um exemplo prático, real. Esse procedimento serviu para avaliar o desempenho de um tipo de vagão gôndola a ser colocado em operação no Brasil.

As simulações neste trabalho foram realizadas, primeiramente, fazendo com que o modelo descrito anteriormente de composição ferroviária, com os vagões carregados, percorresse o trajeto padrão selecionado para cada uma das seguintes velocidades: 30, 40, 50, 60, 65, 70, 75 e 80 km/h. Posteriormente, a mesma sequência de velocidades foi repetida, mas dessa vez com os vagões vazios.

O procedimento adotado com o modelo de composição ferroviária gerou dezesseis configurações, já que as simulações foram feitas em oito velocidades diferentes com vagões carregados e depois com as mesmas oito velocidades para vagões vazios. Essa etapa serviu para a realização da análise longitudinal dos esforços nos engates de cada vagão, em cada uma das dezesseis configurações estabelecidas. Com essa análise, é possível avaliar qual vagão teve os engates mais solicitados durante o percurso, sendo esse vagão escolhido para a etapa seguinte de simulações.

A segunda etapa de simulações consiste em utilizar um modelo mais realista do vagão gôndola, com os mesmos parâmetros utilizados na composição ferroviária, com o intuito de realizar uma análise tridimensional dos esforços no contato entre roda e trilho, durante todo o trajeto. Nessa etapa, as maiores forças médias são aplicadas nos engates do vagão, forças que foram obtidas na primeira etapa de simulações.

6.1. Análise longitudinal

O Universal Mechanism[®] possibilitou, durante as simulações com a composição ferroviária, que gráficos de força, nos engates traseiros dos veículos, em função da distância percorrida ou tempo fossem gerados. Com esses gráficos, pôde ser realizada a análise longitudinal para cada uma das dezesseis configurações estabelecidas, avaliando o comportamento dos vagões ao longo do trecho percorrido.

A partir dos gráficos de força em função da distância ou tempo, foi calculada a força média para cada um dos vagões, a fim de se determinar qual desses seria o veículo mais solicitado da composição e, portanto, o mais crítico para análise tridimensional posterior, de contato entre rodas e trilhos.

O modelo de composição ferroviária, utilizado em todas as simulações do projeto, possui duas locomotivas, uma em cada extremidade. A fonte de movimento da composição é a locomotiva, portanto o esforço de tração necessário para a movimentação dos veículos, nesse caso, está concentrado na frente e na cauda do trem.

A concentração dos esforços de tração em cada uma das extremidades da composição ferroviária provoca uma distribuição não uniforme de esforços durante o percurso. Devido às folgas existentes no acoplamento que interliga cada par de veículos, o trem como um todo pode estar trafegando pela via na condição comprimido, distendido ou misto.

Na composição ferroviária em condição comprimida, os acoplamentos estão sujeitos a esforços de compressão, ao passo que no modo distendido os esforços entre os veículos são de tração. Dependendo da formação do trem (tipo, peso e posição dos veículos) e da topografia da via (variação da inclinação, curvatura, etc.), uma parte do trem pode estar comprimida enquanto outra estará distendida, configurando o modo misto. Neste caso, é possível haver ondas de choque produzindo forças longitudinais elevadas [21].

6.1.1. Composição ferroviária com vagões carregados

Primeiramente, é realizada a análise longitudinal para as situações em que a composição ferroviária percorre o trajeto padrão com todos os vagões carregados. Os casos serão apresentados na sequência das velocidades estabelecidas pelo procedimento de testes escolhido.

A seguir, como exemplo, é apresentado o gráfico de Força (kN) x Distância (m) para a velocidade operacional de 30 km/h (Figura 44). É importante ressaltar que foram selecionados os gráficos em função da distância, em detrimento dos gráficos em função do tempo, já que assim é mais fácil e direta a correspondência do comportamento dos vagões com os trechos do percurso.



Figura 44: Força nos engates traseiros, em função da distância, com vagões carregados a 30 km/h.

O gráfico da Figura 44 serve para mostrar como os dados são apresentados pelo programa, ao computar os resultados de forças nos engates traseiros de cada veículo da composição ferroviária. Como são vinte veículos (o vigésimo não aparece no gráfico, já que a força no engate traseiro desse veículo é sempre nula), existe muita informação em uma figura só, o que dificulta o entendimento do comportamento dos vagões. Portanto, os próximos gráficos de força em função da distância terão somente os dados do vagão mais solicitado no caso em questão, vagão esse escolhido através do cálculo da força média nos engates durante o trajeto percorrido.

Para a situação de operação a 30 km/h, as forças médias nos engates traseiros de cada veículo da composição apresentam o perfil mostrado na Figura 45.



Figura 45: Força Média nos engates traseiros de cada veículo, para o trem carregado a 30 km/h.

O gráfico da Figura 45 permite afirmar que somente os dois primeiros veículos estão sujeitos a esforços de tração durante a maior parte do percurso, enquanto os outros veículos da composição ficam durante boa parte do trajeto com seus acoplamentos comprimidos.

A locomotiva da frente da composição teve uma força média de 1085 N de tração, enquanto o veículo 13 teve a maior força média, 5304 N de compressão. Segue na Figura 46 o gráfico desse vagão de número 13, com a variação da força no seu engate traseiro durante toda a trajetória.



Figura 46: Força no engate traseiro do veículo 13, em função da distância, carregado a 30 km/h.

A observação do gráfico da Figura 46 permite verificar que, durante o percurso, a composição ferroviária trafega em condição mista. Em alguns trechos, o vagão está com seu engate tracionado (valores positivos de força), enquanto em outros está com o engate comprimido (valores negativos de força). Isso acontece devido à topografia da via, principalmente por causa das variações de inclinação (Figura 47).



Figura 47: Plano vertical da via, essencial na análise longitudinal, representação no UM®.

Analisando conjuntamente as Figuras 46 e 47, pode-se observar a primeira grande variação positiva das forças no engate, aproximadamente entre 148 e 219 m, devido ao Segmento II da via. Os veículos que estão mais a frente do vagão, analisado na Figura 46, tracionam o engate do mesmo, pois estão iniciando uma descida na rampa de inclinação negativa, correspondente ao Segmento II do trajeto.

Aproximadamente em 300 m, há uma grande compressão no veículo 13. Nesse ponto de transição entre os Segmentos II e III, quase toda a composição está trafegando em rampa descendente, portanto encontra-se em condição comprimida. O peso dos vagões influencia muito nas forças longitudinais, por isso acontece uma condição distendida numa inclinação positiva e condição comprimida numa inclinação negativa, quando a composição está inteira ou quase inteira na rampa.

A partir do início do Segmento V até 563 m, aproximadamente, o vagão de número 13 fica submetido a grandes esforços de tração. Isso ocorre porque a composição está trafegando em um trecho de rampa ascendente bastante inclinada.

Durante a transição do Segmento VI para o Segmento VII, a composição começa a trafegar na rampa descendente de maior inclinação. Portanto, o veículo 13 fica novamente

submetido a grandes esforços de compressão.

Nos últimos metros do percurso, aproximadamente de 970 m em diante, picos de tração são observados no engate traseiro do vagão analisado. Embora a composição esteja inteira em uma rampa descendente, o veículo 13 está tracionado porque a rampa é longa o suficiente para que as forças de aceleração e desaceleração das locomotivas se ajustem à descida, assim os vagões do trem podem ser tracionados novamente. Esse ajuste de forças de aceleração e desaceleração e desaceleração e desaceleração e consiga promover as simulações à velocidade constante.

A seguir, é apresentado o gráfico de forças médias nos engates traseiros de cada veículo, para a situação de 40 km/h (Figura 48).



Figura 48: Força Média nos engates traseiros de cada veículo, para o trem carregado a 40 km/h.

Novamente, a partir do gráfico da Figura 48, é possível afirmar que somente os dois primeiros veículos estão sujeitos a esforços de tração durante a maior parte do percurso, enquanto os outros veículos da composição ficam durante boa parte do trajeto em condição comprimida.

A primeira locomotiva da composição teve uma força média de 1526 N de tração, enquanto o veículo 15 teve a maior força média, 4904 N de compressão. Segue na Figura 49 o gráfico desse vagão de número 15, com a variação da força no seu engate traseiro durante toda a trajetória.



Figura 49: Força no engate traseiro do veículo 15, em função da distância, carregado a 40 km/h.

A observação do gráfico da Figura 49 permite afirmar que a primeira grande variação positiva das forças no engate traseiro do vagão, a partir de 197 m, ocorre devido ao Segmento II da via. Os vagões que estão mais a frente do veículo 15, tracionam o engate do mesmo, pois estão iniciando uma descida na rampa de inclinação negativa, correspondente ao Segmento II do trajeto.

Em 326 m, há uma grande compressão no engate do vagão. Durante o Segmento III, quase toda a composição está trafegando em rampa descendente, portanto encontra-se em condição comprimida.

Entre 515 e 577 m, aproximadamente, o vagão de número 15 fica submetido a grandes esforços de tração. Isso ocorre porque a composição está trafegando em um trecho de rampa ascendente bastante inclinada.

Em 754 m, início do Segmento VII, o veículo 15 torna a receber grandes esforços de compressão, por causa do tráfego na rampa descendente de maior inclinação.

Assim como foi destacado na situação de 30 km/h, nos últimos metros do percurso, aproximadamente de 986 m em diante, picos de tração são observados no engate traseiro do vagão analisado. Embora a composição esteja inteira em uma rampa descendente, o veículo 15 está tracionado pelo mesmo motivo que já foi explicado anteriormente, para a operação da composição a 30 km/h.

A seguir, é apresentado o gráfico de forças médias nos engates traseiros de cada veículo, para a situação de 50 km/h (Figura 50).



Figura 50: Força Média nos engates traseiros de cada veículo, para o trem carregado a 50 km/h.

A partir do gráfico da Figura 50, é possível afirmar que, diferentemente das velocidades anteriores, a 50 km/h os três primeiros veículos estão sujeitos a esforços de tração durante a maior parte do percurso, enquanto os outros veículos da composição ficam durante boa parte do trajeto em condição comprimida.

A locomotiva da frente da composição apresentou uma força média de 1805 N de tração, enquanto o veículo 15 teve a maior força média, 5642 N de compressão. Segue na Figura 51 o gráfico do veículo 15, com a variação da força no seu engate traseiro durante toda a trajetória.



Figura 51: Força no engate traseiro do veículo 15, em função da distância, carregado a 50 km/h.

No gráfico da Figura 51 é possível observar que, entre 206 e 274 m, o engate traseiro do vagão encontra-se tracionado. Embora esteja em uma rampa descendente, o veículo 15 é mais tracionado pelos vagões que estão à sua frente, do que comprimido pelos vagões que estão atrás.

Em 342 m, aproximadamente, há uma grande compressão no engate do vagão. Durante o Segmento III, quase toda a composição está trafegando em rampa descendente, portanto encontra-se em condição comprimida.

Entre 542 e 608 m, o vagão de número 15 fica submetido a grandes esforços de tração. Isso ocorre porque a composição está trafegando em um longo trecho de inclinação positiva, correspondente ao Segmento V.

Ao longo do Segmento VII, o vagão fica submetido a grandes esforços de compressão, por causa do tráfego da composição na rampa descendente de maior inclinação.

Diferentemente do que ocorreu nas simulações para as velocidades de operação de 30 e 40 km/h, observa-se que não aparecem na Figura 51 os picos de tração no fim do percurso. Torna-se necessário avaliar o que acontece nas próximas velocidades para se entender melhor o que determinou isso.

A situação de operação a 60 km/h apresenta o perfil, de forças médias nos engates traseiros de cada veículo da composição, mostrado na Figura 52.



Figura 52: Força Média nos engates traseiros de cada veículo, para o trem carregado a 60 km/h.

Observando a Figura 52, é possível afirmar que, assim como ocorreu a 50 km/h, os três primeiros veículos da composição estão sujeitos a esforços de tração durante a maior parte do percurso, enquanto os outros veículos ficam durante boa parte do trajeto em condição comprimida.

A locomotiva da frente da composição apresentou uma força média de 2203 N de tração, enquanto que nessa velocidade de 60 km/h, o veículo 12 teve a maior força média, 5816 N de compressão. A seguir, é apresentado o gráfico desse vagão de número 12, com a variação da força no seu engate traseiro durante toda a trajetória (Figura 53).



Figura 53: Força no engate traseiro do veículo 12, em função da distância, carregado a 60 km/h.

A partir do gráfico da Figura 53 é possível observar que, entre 180 e 250 m, aproximadamente, o engate traseiro do vagão encontra-se tracionado. Embora esteja em uma rampa descendente, a partir de 200 m, o veículo 12 é mais tracionado pelos vagões que estão à sua frente, do que comprimido pelos vagões que estão atrás.

Entre 350 e 395 m, aproximadamente, ocorrem grandes intensidades de compressão no engate do vagão. Durante o Segmento III, quase toda a composição está trafegando em rampa descendente, portanto encontra-se em condição comprimida.

Entre 540 e 588 m, o vagão de número 12 fica submetido a grandes esforços de tração. Isso ocorre porque a composição está trafegando em um longo trecho de inclinação positiva, correspondente ao Segmento V.

Ao longo do Segmento VII, o vagão fica submetido a grandes esforços de compressão, por causa do tráfego da composição na rampa descendente de maior inclinação.

Observa-se que não aparecem na Figura 53 os picos de tração no fim do percurso, assim como ocorreu na situação anterior de 50 km/h. Aparentemente, com o aumento da velocidade de operação, a composição trafega por menos tempo na última rampa descendente, o que dificulta o ajuste de forças de aceleração e desaceleração das locomotivas. Isso deve se confirmar nos próximos casos, com velocidades maiores.

A situação de operação a 65 km/h apresenta o perfil, de forças médias nos engates traseiros de cada veículo da composição, mostrado na Figura 54.



Figura 54: Força Média nos engates traseiros de cada veículo, para o trem carregado a 65 km/h.

Com a Figura 54 é possível observar que, novamente, os três primeiros veículos da composição estão sujeitos a esforços de tração durante a maior parte do percurso, enquanto os outros veículos ficam durante boa parte do trajeto em condição comprimida.

A primeira locomotiva da composição apresentou uma força média de 2317 N de tração, enquanto que nessa velocidade de 65 km/h, o veículo 14 teve a maior força média, 5999 N de compressão. A seguir, é apresentado o gráfico desse vagão de número 14, com a variação da força no seu engate traseiro durante toda a trajetória (Figura 55).


Figura 55: Força no engate traseiro do veículo 14, em função da distância, carregado a 65 km/h.

No gráfico da Figura 55 é possível observar que, diferentemente do que ocorre nas velocidades inferiores a 65 km/h, o engate traseiro do vagão não sofre ação de forças longitudinais elevadas na transição do Segmento I para o II, ou no próprio Segmento II. Em velocidades maiores, o vagão permanece menos tempo nas rampas, portanto numa inclinação leve e de curta distância, como é o caso do Segmento II, a influência das forças nos engates acaba sendo bem menor.

Entretanto, em torno de 375 m, ocorrem grandes forças de compressão no engate do vagão. O Segmento III corresponde a uma rampa descendente mais inclinada que do Segmento II, portanto isso acarreta numa condição comprimida do engate do veículo 14.

Entre 550 e 650 m, aproximadamente, o vagão fica submetido a grandes esforços de tração. Isso ocorre porque a composição está trafegando em um longo trecho de inclinação positiva, correspondente ao Segmento V.

De 791 a 893 m, o vagão fica submetido a grandes esforços de compressão, por causa do tráfego da composição em um longo trecho de inclinação negativa pesada.

Observa-se novamente que não houve picos de tração no fim do percurso. Com isso, vai se confirmando o que foi inferido no caso anterior, para a velocidade operacional de 60 km/h.

A seguir, é apresentado o gráfico de forças médias nos engates traseiros de cada veículo, para a situação de 70 km/h (Figura 56).



Figura 56: Força Média nos engates traseiros de cada veículo, para o trem carregado a 70 km/h.

No gráfico da Figura 56 é possível observar que os três primeiros veículos da composição, mais uma vez, estão sujeitos a esforços de tração durante a maior parte do percurso, enquanto os outros veículos ficam durante boa parte do trajeto em condição comprimida.

A primeira locomotiva da composição apresentou uma força média de 2512 N de tração, enquanto o veículo 14 teve a maior força média, 6145 N de compressão. A seguir, é apresentado o gráfico desse vagão de número 14, com a variação da força no seu engate traseiro durante toda a trajetória (Figura 57).



Figura 57: Força no engate traseiro do veículo 14, em função da distância, carregado a 70 km/h.

No gráfico da Figura 57, é possível observar novamente que o engate traseiro do vagão não sofre ação de forças longitudinais elevadas na transição do Segmento I para o II, ou no próprio Segmento II.

Entretanto, entre 346 e 404 m, ocorrem forças de compressão consideráveis no engate do vagão. O Segmento III corresponde a uma rampa descendente mais inclinada que do Segmento II, portanto isso acarreta numa condição comprimida do engate do veículo 14.

Entre 574 e 630 m, aproximadamente, o vagão fica submetido a grandes esforços de tração. Isso ocorre porque a composição está trafegando em um longo trecho de inclinação positiva, correspondente ao Segmento V.

Aproximadamente de 797 a 900 m, o vagão fica submetido a grandes esforços de compressão, por causa do tráfego da composição em um longo trecho de inclinação negativa pesada.

Observa-se novamente que não houve picos de tração no fim do percurso, assim como foi notado nas situações a partir de 50 km/h.

A seguir, é apresentado o gráfico de forças médias nos engates traseiros de cada veículo, para a situação de 75 km/h (Figura 58).



Figura 58: Força Média nos engates traseiros de cada veículo, para o trem carregado a 75 km/h.

No gráfico da Figura 58 se observa que os três primeiros veículos da composição, mais uma vez, estão sujeitos a esforços de tração durante a maior parte do percurso, enquanto os outros veículos ficam durante boa parte do trajeto em condição comprimida.

A locomotiva da frente da composição teve uma força média de 2728 N de tração, enquanto o veículo 15 teve a maior força média, 6304 N de compressão. A seguir, é apresentado o gráfico desse vagão de número 15, com a variação da força no seu engate traseiro durante toda a trajetória (Figura 59).



Figura 59: Força no engate traseiro do veículo 15, em função da distância, carregado a 75 km/h.

No gráfico da Figura 59, diferentemente dos anteriores para velocidades menores, percebe-se que em apenas dois segmentos aparecem forças longitudinais bastante elevadas. Entre 580 e 630 m, aproximadamente, o vagão fica submetido a grandes esforços de tração. Isso ocorre porque a composição está trafegando em um longo trecho de inclinação positiva, correspondente ao Segmento V.

Entretanto, em alguns pontos entre 795 e 910 m, aproximadamente, o vagão fica submetido a grandes esforços de compressão, por causa do tráfego da composição em um longo trecho de inclinação negativa pesada.

A seguir, é apresentado o gráfico de forças médias nos engates traseiros de cada veículo da composição, na velocidade operacional de 80 km/h (Figura 60).



Figura 60: Força Média nos engates traseiros de cada veículo, para o trem carregado a 80 km/h.

A partir da observação do gráfico da Figura 60, pode-se verificar que os três primeiros veículos da composição, novamente, estão sujeitos a esforços de tração durante a maior parte do percurso, enquanto os outros veículos ficam durante boa parte do trajeto em condição comprimida.

A locomotiva da frente da composição teve uma força média de 3154 N de tração, enquanto o veículo 14 teve a maior força média, 6377 N de compressão. A seguir, é apresentado o gráfico desse vagão de número 14, com a variação da força no seu engate traseiro durante toda a trajetória (Figura 61).



Figura 61: Força no engate traseiro do veículo 14, em função da distância, carregado a 80 km/h.

No gráfico da Figura 61, novamente percebe-se que em apenas dois segmentos aparecem forças longitudinais bastante elevadas. Entre 600 e 650 m, aproximadamente, o vagão fica submetido a grandes esforços de tração. Isso ocorre porque a composição está trafegando em um longo trecho de inclinação positiva, correspondente ao Segmento V.

Entretanto, em alguns pontos entre 800 e 900 m, aproximadamente, o vagão fica submetido a grandes esforços de compressão, por causa do tráfego da composição em um longo trecho de inclinação negativa pesada.

6.1.2. Composição ferroviária com vagões vazios

Nesta seção é realizada a análise longitudinal para as situações em que a composição ferroviária percorre o trajeto padrão com todos os vagões vazios. Os casos serão apresentados repetindo a sequência das oito velocidades, já utilizadas nas simulações da composição com vagões carregados.

A seguir, como exemplo, é apresentado o gráfico de Força (kN) x Distância (m) para a velocidade operacional de 30 km/h (Figura 62), mas dessa vez para o trem com vagões vazios.



Figura 62: Força nos engates traseiros, em função da distância, com vagões vazios a 30 km/h.

O gráfico da Figura 62 serve para mostrar qual é a diferença principal em relação à composição ferroviária com vagões carregados. Observa-se que a composição ferroviária com vagões vazios também trafega em condição mista, assim como já foi constatado para o caso dos vagões carregados. Porém, para os vagões vazios, as forças longitudinais nos engates possuem valores bem menores e os picos são mais escassos. Isso ocorre porque o peso dos vagões vazios é quase dez vezes menor do que o peso dos vagões carregados.

Assim como foi constatado para o caso da composição ferroviária com vagões carregados, existe muita informação nesse gráfico com todos os veículos, o que dificulta o entendimento do comportamento dos vagões. Portanto, os próximos gráficos de força em função da distância terão somente os dados do vagão mais solicitado no caso em questão, vagão esse escolhido através do cálculo da força média nos engates durante o trajeto percorrido.

Para a situação de operação a 30 km/h, as forças médias nos engates traseiros de cada veículo da composição apresentam o perfil mostrado na Figura 63.



Figura 63: Força Média nos engates traseiros de cada veículo, para o trem vazio a 30 km/h.

O gráfico de Força Média da Figura 63 permite afirmar que, diferentemente do que ocorreu na mesma velocidade para o trem carregado, com o trem vazio todos os veículos estão sujeitos a esforços de compressão durante a maior parte do percurso.

Isso acontece porque o peso das locomotivas é mais de dez vezes maior do que o peso dos vagões vazios. Assim, é muito mais comum a composição estar em modo comprimido durante quase todo o percurso, devido à quantidade maior, em número e extensão, de rampas descendentes no trajeto padrão utilizado.

O veículo 13 teve a maior força média, 2240 N de compressão. Segue na Figura 64 o gráfico desse vagão de número 13, com a variação da força no seu engate traseiro durante toda a trajetória.



Figura 64: Força no engate traseiro do veículo 13, em função da distância, vazio a 30 km/h.

Analisando a Figura 64, pode-se observar a primeira aparição de forças positivas no engate, aproximadamente entre 129 e 191 m, devido ao Segmento II da via. Os veículos que estão mais a frente do vagão tracionam o engate do mesmo, pois estão iniciando uma descida na rampa de inclinação negativa, correspondente ao Segmento II do trajeto.

Aproximadamente em 300 m, há uma grande compressão no veículo 13. Nesse ponto de transição entre os Segmentos II e III, quase toda a composição está trafegando em rampa descendente, portanto encontra-se em condição comprimida.

A partir de 475 até 530 m, aproximadamente, o vagão de número 13 fica submetido a grandes esforços de tração. Isso ocorre porque a composição está trafegando em um trecho de rampa ascendente bastante inclinada.

Entre 705 e 741 m, a composição trafega em rampa descendente de inclinação pesada. Portanto, o veículo 13 fica novamente submetido a grandes esforços de compressão.

Nos últimos metros do percurso, aproximadamente de 970 m em diante, picos de tração são observados no engate traseiro do vagão analisado. É uma situação idêntica a

que acontece com o vagão mais solicitado da composição carregada, na mesma velocidade de 30 km/h. Novamente, o motivo é a última rampa descendente ser longa o suficiente para que as forças de aceleração e desaceleração das locomotivas se ajustem à descida, assim os vagões do trem podem ser tracionados novamente.

A seguir, é apresentado o gráfico de forças médias nos engates traseiros de cada veículo, para a situação de 40 km/h (Figura 65).



Figura 65: Força Média nos engates traseiros de cada veículo, para o trem vazio a 40 km/h.

No gráfico da Figura 65, novamente, todos os veículos são submetidos a esforços de compressão durante a maior parte do percurso. Isso era esperado, em função da análise da situação anterior, de velocidade operacional de 30 km/h.

O veículo 14 apresentou a maior força média, 1899 N de compressão. Segue na Figura 66 o gráfico desse vagão de número 14, com a variação da força no seu engate traseiro durante toda a trajetória.



Figura 66: Força no engate traseiro do veículo 14, em função da distância, vazio a 40 km/h.

A partir do gráfico da Figura 66, pode-se observar forças positivas de pequena intensidade no engate, aproximadamente entre 141 e 200 m, devido à transição do Segmento I para o Segmento II, que corresponde a uma mudança de inclinação da via.

Aproximadamente em 344 m, há uma grande compressão no veículo 14. Nesse ponto do Segmento III, quase toda a composição está trafegando em rampa descendente, portanto encontra-se em condição comprimida.

A partir de 471 até 594 m, aproximadamente, o vagão de número 14 fica submetido a grandes esforços de tração. Isso ocorre porque a composição está trafegando em um trecho de rampa ascendente bastante inclinada.

Entre 715 e 800 m, aproximadamente, a composição trafega em rampa descendente de inclinação pesada. Portanto, o veículo 14 fica novamente submetido a grandes esforços de compressão.

Nos últimos metros do percurso não houve picos de tração, como fora observado para a velocidade anterior. A partir de 40 km/h, com a composição vazia, as ondas de choque geradas são insuficientes para produzirem forças longitudinais elevadas no fim do trajeto. Isso poderá ser confirmado nas próximas situações simuladas.

A seguir, é apresentado o gráfico de forças médias nos engates traseiros de cada veículo, para a situação de 50 km/h (Figura 67).



Figura 67: Força Média nos engates traseiros de cada veículo, para o trem vazio a 50 km/h.

No gráfico da Figura 67, todos os veículos são submetidos a esforços de compressão durante a maior parte do percurso. Isso já era esperado, em função da análise das situações anteriores.

O veículo 12 apresentou a maior força média, 1821 N de compressão. Segue na Figura 68 o gráfico desse vagão de número 12, com a variação da força no seu engate traseiro durante toda a trajetória.



Figura 68: Força no engate traseiro do veículo 12, em função da distância, vazio a 50 km/h.

A partir do gráfico da Figura 68, pode-se observar forças de tração no engate, aproximadamente entre 137 e 204 m, devido à transição do Segmento I para o Segmento II, que corresponde a uma mudança de inclinação da via.

Em torno de 335 m, há grandes esforços de compressão atuando no engate traseiro do veículo 12. Nesse ponto do Segmento III, quase toda a composição está trafegando em rampa descendente, portanto encontra-se em condição comprimida.

A partir de 463 até 587 m, aproximadamente, o vagão de número 12 fica submetido a grandes esforços de tração. Isso ocorre porque a composição está trafegando em um trecho de rampa ascendente bastante inclinada.

Entre 730 e 874 m, aproximadamente, a composição trafega em rampa descendente de inclinação pesada. Portanto, o veículo 12 fica novamente submetido a grandes esforços de compressão. Já nos últimos metros do percurso, não houve picos de tração, como fora inferido anteriormente.

A seguir, é apresentado o gráfico de forças médias nos engates traseiros de cada veículo, para a situação de 60 km/h (Figura 69).



Figura 69: Força Média nos engates traseiros de cada veículo, para o trem vazio a 60 km/h.

No gráfico da Figura 69, todos os veículos são submetidos a esforços de compressão durante a maior parte do percurso. Isso já era esperado, em função da análise das situações anteriores.

O veículo 9 apresentou a maior força média, 1696 N de compressão. Segue na Figura 70 o gráfico desse vagão de número 9, com a variação da força no seu engate traseiro durante toda a trajetória.



Figura 70: Força no engate traseiro do veículo 9, em função da distância, vazio a 60 km/h.

A partir do gráfico da Figura 70, pode-se observar forças de tração no engate, aproximadamente em torno de 197 m, devido à transição do Segmento I para o Segmento II, que corresponde a uma mudança de inclinação da via.

Em torno de 387 m, há grandes esforços de compressão atuando no engate traseiro do veículo 9. Nesse ponto do Segmento III, quase toda a composição está trafegando em rampa descendente, portanto encontra-se em condição comprimida.

A partir de 500 até 600 m, aproximadamente, o vagão de número 9 fica submetido a grandes esforços de tração. Isso ocorre porque a composição está trafegando em um trecho de rampa ascendente bastante inclinada.

Entre 748 e 862 m, aproximadamente, a composição trafega em rampa descendente de inclinação pesada. Portanto, o veículo 9 fica novamente submetido a grandes esforços de compressão.

A seguir, é apresentado o gráfico de forças médias nos engates traseiros de cada veículo, para a situação de 65 km/h (Figura 71).



Figura 71: Força Média nos engates traseiros de cada veículo, para o trem vazio a 65 km/h.

No gráfico da Figura 71, todos os veículos são submetidos a esforços de compressão durante a maior parte do percurso. Isso já era esperado, em função da análise das situações anteriores.

O veículo 11 apresentou a maior força média, 1730 N de compressão. Segue na Figura 72 o gráfico desse vagão de número 11, com a variação da força no seu engate traseiro durante toda a trajetória.



Figura 72: Força no engate traseiro do veículo 11, em função da distância, vazio a 65 km/h.

A partir do gráfico da Figura 72, pode-se observar pequenas forças de tração no engate, aproximadamente em torno de 213 m, devido à mudança de inclinação da via.

Em torno de 420 m, há esforços de compressão de baixa intensidade atuando no engate traseiro do veículo 11. Nesse ponto do Segmento IV, quase toda a composição está trafegando em rampa descendente, portanto encontra-se em condição comprimida.

A partir de 554 até 600 m, aproximadamente, o vagão de número 11 fica submetido a grandes esforços de tração. Isso ocorre porque a composição está trafegando em um trecho de rampa ascendente bastante inclinada.

Entre 748 e 873 m, a composição trafega em rampa descendente de inclinação pesada. Portanto, em alguns pontos desse trecho, o veículo 11 fica submetido a grandes esforços de compressão.

A seguir, é apresentado o gráfico de forças médias nos engates traseiros de cada veículo, para a situação de 70 km/h (Figura 73).



Figura 73: Força Média nos engates traseiros de cada veículo, para o trem vazio a 70 km/h.

No gráfico da Figura 73, todos os veículos são submetidos a esforços de compressão durante a maior parte do percurso. Isso já era esperado, em função da análise das situações anteriores.

O veículo 8 apresentou a maior força média, 1684 N de compressão. A seguir, é apresentado o gráfico desse vagão de número 8, com a variação da força no seu engate traseiro durante toda a trajetória (Figura 74).



Figura 74: Força no engate traseiro do veículo 8, em função da distância, vazio a 70 km/h.

No gráfico da Figura 74, diferentemente dos anteriores para velocidades menores, percebe-se que em apenas dois segmentos aparecem forças longitudinais bastante elevadas. Em torno de 587 m, aproximadamente, o vagão de número 8 fica submetido a grandes esforços de tração. Isso ocorre porque a composição está trafegando em um trecho de rampa ascendente bastante inclinada.

Entre 710 e 830 m, a composição trafega em rampa descendente de inclinação pesada. Portanto, em alguns pontos desse trecho, o veículo 8 fica submetido a grandes esforços de compressão.

A seguir, é apresentado o gráfico de forças médias nos engates traseiros de cada veículo, para a situação de 75 km/h (Figura 75).



Figura 75: Força Média nos engates traseiros de cada veículo, para o trem vazio a 75 km/h.

No gráfico da Figura 75, todos os veículos são submetidos a esforços de compressão durante a maior parte do percurso. Isso já era esperado, em função da análise das situações anteriores.

O veículo 11 apresentou a maior força média, 1633 N de compressão. A seguir, é apresentado o gráfico desse vagão de número 11, com a variação da força no seu engate traseiro durante toda a trajetória (Figura 76).



Figura 76: Força no engate traseiro do veículo 11, em função da distância, vazio a 75 km/h.

No gráfico da Figura 76, assim como foi visto na situação anterior de 70 km/h, percebe-se que em apenas dois segmentos aparecem forças longitudinais bastante elevadas. Em torno de 600 m, aproximadamente, o vagão de número 11 fica submetido a grandes esforços de tração. Isso ocorre porque a composição está trafegando em um trecho de rampa ascendente bastante inclinada.

Entre 714 e 881 m, aproximadamente, a composição trafega em rampa descendente de inclinação pesada. Portanto, em alguns pontos desse trecho, o veículo 11 fica submetido a grandes esforços de compressão.

A seguir, é apresentado o gráfico de forças médias nos engates traseiros de cada veículo, para a situação de 80 km/h (Figura 77).



Figura 77: Força Média nos engates traseiros de cada veículo, para o trem vazio a 80 km/h.

No gráfico da Figura 77, todos os veículos são submetidos a esforços de compressão durante a maior parte do percurso. Isso já era esperado, em função da análise das situações anteriores.

O veículo 9 apresentou a maior força média, 1658 N de compressão. A seguir, é apresentado o gráfico desse vagão de número 9, com a variação da força no seu engate traseiro durante toda a trajetória (Figura 78).



Figura 78: Força no engate traseiro do veículo 9, em função da distância, vazio a 80 km/h.

No gráfico da Figura 78, novamente percebe-se que em apenas dois segmentos aparecem forças longitudinais bastante elevadas. Em 600 m, aproximadamente, o vagão de número 9 fica submetido a grandes esforços de tração. Isso ocorre porque a composição está trafegando em um trecho de rampa ascendente bastante inclinada.

Entre 700 e 841 m, aproximadamente, a composição trafega em rampa descendente de inclinação pesada. Portanto, em alguns pontos desse trecho, o veículo 9 fica submetido a grandes esforços de compressão.

6.2. Análise tridimensional

Após a realização da análise longitudinal da composição ferroviária nas dezesseis configurações estabelecidas para simulação, os resultados mais críticos, em cada situação, de força longitudinal nos engates foram salvos e utilizados como dados de entrada para as simulações tridimensionais. Nessa etapa, somente um vagão percorre o trajeto padrão, com as mesmas características e condições das simulações com a composição ferroviária, utilizando os dados de força longitudinal citados anteriormente.

O *Universal Mechanism*® permite que gráficos de força lateral e vertical, ambas atuantes no contato roda-trilho, sejam gerados. No *software* ainda existe a opção de salvar uma animação dessa interação entre as rodas e trilhos, que pode ser observada na Figura

79. Gráficos com o Critério de Nadal, que estabelece a relação entre as forças laterais e verticais, também foram obtidos. É importante ressaltar, novamente, que todos esses gráficos foram gerados em função da distância, em detrimento dos gráficos em função do tempo, para estabelecer uma relação direta com os trechos do percurso.



Figura 79: Animação do contato roda-trilho, no UM®.

Com os gráficos citados anteriormente, pôde ser realizada a análise tridimensional para cada uma das dezesseis configurações estabelecidas, avaliando o comportamento dos contatos roda-trilho do vagão ao longo do trecho percorrido. A fim de facilitar a identificação dos dados nos gráficos, foram utilizadas a nomenclatura e orientação estabelecidas na Figura 80.



Figura 80: Nomenclatura e orientação para os rodeiros do modelo [1].

6.2.1. Vagão carregado

A fim de explicar como é obtida a relação de descarrilamento, como exemplo são apresentados a seguir os gráficos de força lateral (Figura 81) e vertical (Figura 83), para o vagão carregado percorrendo o trajeto a 30 km/h.



Figura 81: Força lateral em função da distância, em vagão carregado a 30 km/h.

Para a análise do gráfico de força lateral em função da distância, torna-se necessária a correspondência com o plano horizontal da via (Figura 82), pois assim é possível relacionar as variações de força com as curvas do trajeto.



Figura 82: Plano horizontal da via, essencial na análise tridimensional, representação no UM®.

Analisando conjuntamente as Figuras 81 e 82, é possível verificar que, nas curvas do percurso, a amplitude da força lateral para cada roda aumenta bastante. As duas primeiras curvas, correspondentes aos Trechos B e C, acarretam em forças maiores por terem raios menores.

Os Trechos A, D e G correspondem a trechos de via tangente e claramente possuem bem menos influência nas variações de forças laterais do que os trechos de curva. A influência de rampas, ascendentes ou descendentes, na intensidade da força lateral não é perceptível.



Figura 83: Força vertical em função da distância, em vagão carregado a 30 km/h.

No gráfico da Figura 83, também é possível observar que as curvas causam grandes variações nas forças verticais nos rodeiros. Porém, a diferença de raio de curva modifica muito pouco a intensidade da força.

Nos trechos de via tangente, verifica-se que as forças verticais equivalem ao peso do vagão carregado, 150 kN. As rampas também não possuem influência perceptível nas forças verticais.

A partir da medição das forças laterais (L) e das forças verticais (V), é possível estabelecer a relação de descarrilamento, ou quociente de descarrilamento (L/V). Os gráficos de Critério de Nadal, uma das relações de descarrilamento mais utilizadas, são apresentados a seguir. Estão na sequência das oito velocidades estabelecidas para simulação, na condição de vagão carregado.



Figura 84: Critério de Nadal em função da distância, em vagão carregado a 30 km/h.

Com a observação do gráfico da Figura 84, constata-se que existe muita informação nessa imagem, visto que são oito rodas para cada vagão. Isso dificulta o entendimento do que acontece no contato entre rodas e trilhos, durante o percurso.

Portanto, nos próximos gráficos de Critério de Nadal em função da distância, serão mostradas todas as rodas que em algum momento apresentarem L/V maior ou igual a 1,0, valor recomendado pela AAR. Ou então, caso em nenhum momento o valor limite seja alcançado, os dados da roda que apresentar o valor mais alto de L/V serão mostrados.



Figura 85: Valores de L/V, lado esquerdo do Rodeiro 3, vagão carregado a 30 km/h.

Para a situação de vagão carregado a 30 km/h, verifica-se que o valor máximo de L/V aconteceu no lado esquerdo do Rodeiro 3, mas ficou bem abaixo do valor recomendado pela AAR. Isso indica que esse caso corresponderia a uma operação segura.

Percebe-se que as curvas para a esquerda, no trecho de 20 a 180 m e de 590 a 740 m, são as mais críticas para essa situação. Só que na curva para a esquerda de raio menor, o Critério de Nadal apresenta valores maiores. Outra observação importante é que os picos de L/V ocorreram nas entradas e saídas das curvas.



Figura 86: Valores de L/V, lado direito do Rodeiro 3, vagão carregado a 40 km/h.

Para a situação de vagão carregado a 40 km/h, verifica-se que o valor máximo de L/V aconteceu no lado direito do Rodeiro 3, mas novamente ficou bem abaixo do valor recomendado pela AAR. Isso indica que esse caso corresponderia a uma operação segura.

Percebe-se que as curvas para a direita, no trecho de 180 a 330 m e de 430 a 590 m, são as mais críticas para essa situação. Só que na curva para a direita de raio menor, o Critério de Nadal apresenta valores maiores. Outra observação importante é que os picos de L/V ocorreram nas entradas e saídas das curvas, mais uma vez.



Figura 87: Valores de L/V, lado direito do Rodeiro 3, vagão carregado a 50 km/h.

Para o vagão carregado a 50 km/h, verifica-se que o valor máximo de L/V, quase 0,36, novamente aconteceu no lado direito do Rodeiro 3. Ficou bem abaixo do valor recomendado pela AAR. Isso indica que esse caso corresponderia a uma operação segura.

Assim como foi observado para a situação anterior, percebe-se que as curvas para a direita, no trecho de 180 a 330 m e de 430 a 590 m, são as mais críticas para essa situação de vagão carregado a 50 km/h. Só que na curva para a direita de raio menor, o Critério de Nadal apresenta valores maiores. Outra observação importante é que os picos de L/V ocorreram nas entradas e saídas das curvas, mais uma vez.



Figura 88: Valores de L/V, lado direito do Rodeiro 3, vagão carregado a 60 km/h.

O vagão carregado, a 60 km/h, também apresenta valor máximo de L/V no lado direito do Rodeiro 3. Mais uma vez ficou bem abaixo do valor recomendado pela AAR. Isso indica que esse caso corresponderia a uma operação segura.

Novamente, é possível observar que as curvas para a direita, no trecho de 180 a 330 m e de 430 a 590 m, são as mais críticas para essa situação de vagão carregado a 60 km/h. Só que na curva para a direita de raio menor, o Critério de Nadal apresenta valores maiores. Outra observação importante é que os picos de L/V ocorreram nas entradas e saídas das curvas, mais uma vez.



Figura 89: Valores de L/V, lado direito do Rodeiro 3, vagão carregado a 65 km/h.

O vagão carregado, a 65 km/h, também apresenta valor máximo de L/V no lado direito do Rodeiro 3. Mais uma vez ficou bem abaixo do valor recomendado pela AAR. Isso indica que esse caso corresponderia a uma operação segura.

Novamente, é possível observar que as curvas para a direita, no trecho de 180 a 330 m e de 430 a 590 m, são as mais críticas para essa situação de vagão carregado a 65 km/h. Só que na curva para a direita de raio menor, o Critério de Nadal apresenta valores maiores. Outra observação importante é que os picos de L/V ocorreram nas entradas e saídas das curvas, mais uma vez.



Figura 90: Valores de L/V, lado direito do Rodeiro 3, vagão carregado a 70 km/h.

Para o vagão carregado a 70 km/h, o valor máximo de L/V acontece novamente no lado direito do Rodeiro 3. Chegou a quase 0,37 e mais uma vez ficou bem abaixo do valor recomendado pela AAR. Isso indica que esse caso corresponderia a uma operação segura.

Assim como foi possível observar em todas as situações anteriores com o lado direito do Rodeiro 3, as curvas para a direita, no trecho de 180 a 330 m e de 430 a 590 m, são as mais críticas para esse caso. Só que na curva para a direita de raio menor, o Critério de Nadal apresenta valores maiores. Outra observação importante é que os picos de L/V ocorreram nas entradas e saídas das curvas, mais uma vez.



Figura 91: Valores de L/V, lado direito do Rodeiro 3, vagão carregado a 75 km/h.

Para o vagão carregado a 75 km/h, o valor máximo de L/V acontece novamente no lado direito do Rodeiro 3. Mais uma vez ficou bem abaixo do valor recomendado pela AAR. Isso indica que esse caso corresponderia a uma operação segura.

Assim como foi possível observar em todas as situações anteriores com o lado direito do Rodeiro 3, as curvas para a direita, no trecho de 180 a 330 m e de 430 a 590 m, são as mais críticas para esse caso. Só que na curva para a direita de raio menor, o Critério de Nadal apresenta valores maiores. Outra observação importante é que os picos de L/V ocorreram nas entradas e saídas das curvas, mais uma vez.



Figura 92: Valores de L/V, lado direito do Rodeiro 3, vagão carregado a 80 km/h.

Para o vagão carregado a 80 km/h, o valor máximo de L/V acontece novamente no lado direito do Rodeiro 3. Mais uma vez ficou bem abaixo do valor recomendado pela AAR. Isso indica que esse caso corresponderia a uma operação segura.

Entretanto, não aconteceu o mesmo padrão de comportamento das situações anteriores. A curva para a direita do trecho de 180 a 330 m, e a saída da segunda curva para a direita, a 590 m, foram as regiões mais críticas novamente. Porém, a curva para a esquerda, correspondente ao trecho de 20 a 180 m, e a entrada da outra curva para a esquerda, em torno de 600 m, tiveram valores de L/V mais altos do que a entrada da segunda curva para a direita, em 430 m.

6.2.2. Vagão vazio

Os gráficos de força lateral (Figura 93) e força vertical (Figura 94), para o vagão vazio a 30 km/h, serão apresentados a seguir, assim como foi feito para a situação de vagão carregado. Serve de comparação entre o comportamento do vagão vazio e carregado no âmbito do contato roda-trilho.



Figura 93: Força lateral em função da distância, em vagão vazio a 30 km/h.

Assim como foi observado para a situação de vagão carregado, a amplitude da força lateral para cada roda do vagão vazio aumenta bastante nas curvas do trajeto. Novamente é possível observar que nas duas primeiras curvas, que possuem raios menores, as forças laterais são um pouco maiores.

Os trechos de via tangente, nesse caso, também influenciam bem menos nas variações de forças laterais do que os trechos de curva. A influência de rampas, ascendentes ou descendentes, na intensidade da força lateral não é perceptível, mais uma vez.

A grande diferença aparece nas intensidades das forças laterais. Enquanto com o vagão carregado as forças laterais chegam a quase 60 kN, com o vagão vazio essas forças alcançam um pouco mais de 15 kN.



Figura 94: Força vertical em função da distância, em vagão vazio a 30 km/h.

Comparando com o mesmo gráfico da situação de vagão carregado, observa-se também que as curvas causam grandes variações nas forças verticais nos rodeiros do vagão vazio. Entretanto, a diferença entre os raios das curvas não afeta muito na intensidade da força vertical.

Nos trechos de via tangente, verifica-se que as forças verticais equivalem ao peso do vagão vazio, 35 kN, enquanto o vagão carregado tinha peso de 150 kN. As rampas também não possuem influência perceptível nas forças verticais.

A seguir, são apresentados os gráficos de Critério de Nadal em função da distância, para o vagão vazio. A sequência de velocidades será a mesma que já fora utilizada nas outras simulações.



Figura 95: Critério de Nadal em função da distância, em vagão vazio a 30 km/h.

Com a observação do gráfico da Figura 95, já é possível perceber que a 30 km/h, os valores de L/V são mais altos para o vagão vazio do que para o vagão carregado. Entretanto, assim como fora constatado para o caso de vagão carregado, existe muita informação nessa figura, visto que são oito rodas para cada vagão.

Portanto, mais uma vez, nos próximos gráficos de Critério de Nadal em função da distância, serão mostradas todas as rodas que em algum momento apresentarem L/V maior ou igual a 1,0, valor recomendado pela AAR. Ou então, caso em nenhum momento o valor limite seja alcançado, os dados da roda que apresentar o valor mais alto de L/V serão mostrados.



Figura 96: Valores de L/V, lado esquerdo do Rodeiro 1, vagão vazio a 30 km/h.

O valor máximo do Critério de Nadal para o vagão vazio, na velocidade mais baixa de 30 km/h, é aproximadamente igual a 0,72. Esse valor de L/V aconteceu no lado esquerdo do Rodeiro 1, mas ficou abaixo do valor recomendado pela AAR. Isso indica que esse caso corresponderia a uma operação segura.

Percebe-se que as saídas das curvas para a direita, em torno de 330 m e em torno de 580 m, respectivamente, são as mais críticas para essa situação. Na saída da curva para a direita de raio menor, o Critério de Nadal apresenta valores maiores. Diferentemente do que aconteceu em várias situações com o vagão carregado, os picos de L/V nem sempre ocorreram nas entradas e saídas das curvas, para essa velocidade de 30 km/h.


Figura 97: Valores de L/V, lado direito do Rodeiro 1, vagão vazio a 40 km/h.

A 40 km/h, o lado direito do Rodeiro 1 passa do valor limite recomendado pela AAR, na saída da última curva do percurso, para a esquerda com raio de 860 m.

Percebe-se que, além do ponto em que L/V ultrapassa 1,0, a saída da primeira curva para a esquerda também é uma região mais crítica, onde aparece outro valor alto de Critério de Nadal. Diferentemente do que aconteceu em várias situações com o vagão carregado, os picos de L/V nem sempre ocorreram nas entradas e saídas das curvas, para essa velocidade de 40 km/h.

Apesar de o valor limite ter sido alcançado em um momento, o vagão não descarrilou na simulação. Para realizar uma análise mais detalhada sobre o assunto, continuando a comparação com os valores recomendados pela AAR, foi calculada a soma L/V para cada lateral dos truques do vagão e conferido se em algum momento o valor ultrapassou 0,6. O gráfico com esses valores mais críticos das laterais dos truques é apresentado a seguir (Figura 98).



Figura 98: Soma L/V, lado direito do truque traseiro, vagão vazio a 40 km/h.

A partir do gráfico da Figura 98, é possível observar que a soma L/V das laterais dos truques não ultrapassa o valor recomendado pela AAR, de 0,6.

A seguir, é apresentado o gráfico de Critério de Nadal para o vagão vazio, a 50 km/h (Figura 99).



Figura 99: Valores críticos de L/V, em vagão vazio a 50 km/h.

Na velocidade de 50 km/h, existem dois pontos do trajeto em que o valor limite é ultrapassado: o lado direito do Rodeiro 1, na saída da primeira curva a esquerda, com raio de 600 m e o lado esquerdo do Rodeiro 1, na saída da curva seguinte a direita, com o mesmo raio de 600 m.

Percebe-se que, além dos pontos em que L/V ultrapassa 1,0, as outras saídas das curvas seguintes também são regiões mais críticas, onde aparecem outros valores altos de Critério de Nadal.

Apesar de o valor limite ter sido alcançado em dois momentos, o vagão não descarrilou na simulação. Para realizar uma análise mais detalhada sobre o assunto, novamente foi calculada a soma L/V para cada lateral dos truques do vagão e conferido se em algum momento o valor ultrapassou 0,6. O gráfico com esses valores mais críticos das laterais dos truques é apresentado a seguir (Figura 100).



Figura 100: Soma L/V, lado direito do truque traseiro, vagão vazio a 50 km/h.

A partir do gráfico da Figura 100, é possível observar que a soma L/V das laterais dos truques não ultrapassa o valor recomendado pela AAR, de 0,6.

A seguir, é apresentado o gráfico de Critério de Nadal para o vagão vazio, a 60 km/h (Figura 101).



Figura 101: Valores críticos de L/V, em vagão vazio a 60 km/h.

Com o vagão vazio a 60 km/h, em quatro momentos o valor limite de L/V é ultrapassado, sendo o mais crítico chegando a quase 1,3 na entrada da última curva a esquerda, com o lado direito do Rodeiro 3.

Percebe-se que, além do ponto em que L/V chega a quase 1,3, todas as saídas das curvas do percurso também são regiões mais críticas, onde aparecem outros valores altos de Critério de Nadal.

Apesar de o valor limite ter sido alcançado em quatro momentos, o vagão não descarrilou na simulação. Para realizar uma análise mais detalhada sobre o assunto, novamente foi calculada a soma L/V para cada lateral dos truques do vagão e conferido se em algum momento o valor ultrapassou 0,6. O gráfico com esses valores mais críticos das laterais dos truques é apresentado a seguir (Figura 102).



Figura 102: Soma L/V, lado direito do truque dianteiro, vagão vazio a 60 km/h.

A partir do gráfico da Figura 102, é possível observar que o lado direito do truque dianteiro atinge uma soma L/V de quase 0,96. Isso ocorre na saída da primeira curva para a esquerda, de raio igual a 600 m. Embora nesta velocidade de 60 km/h dois valores recomendados pela AAR tenham sido ultrapassados, isto não garante que o vagão descarrilaria. Entretanto, esta é uma situação que não pode ser dada como segura.



Figura 103: Valores críticos de L/V, em vagão vazio a 65 km/h.

A 65 km/h, o vagão volta a ficar um pouco mais estável, pois novamente são dois os pontos em que o valor limite da AAR é ultrapassado, mas muito próximos de 1,0. Esses valores ocorrem em ambos os lados do Rodeiro 1.

Percebe-se que, além dos pontos em que L/V ultrapassa o valor limite, todas as saídas das curvas do percurso também são regiões mais críticas, onde aparecem outros valores altos de Critério de Nadal.

Apesar de o valor limite ter sido alcançado em dois momentos, o vagão não descarrilou na simulação. Para realizar uma análise mais detalhada sobre o assunto, novamente foi calculada a soma L/V para cada lateral dos truques do vagão e conferido se em algum momento o valor ultrapassou 0,6. O gráfico com esses valores mais críticos das laterais dos truques é apresentado a seguir (Figura 104).



Figura 104: Soma L/V, lado direito do truque dianteiro, vagão vazio a 65 km/h.

A partir do gráfico da Figura 104, é possível observar que a soma L/V das laterais dos truques não ultrapassa o valor recomendado pela AAR, de 0,6.

A seguir, é apresentado o gráfico de Critério de Nadal para o vagão vazio, a 70 km/h (Figura 105).



Figura 105: Valores de L/V, lado esquerdo do Rodeiro 3, vagão vazio a 70 km/h.

Na velocidade de 70 km/h, o lado esquerdo do Rodeiro 3 passa do valor limite, na entrada da curva a direita de raio igual a 600 m. É o único pico de valores de L/V que ocorre durante todo o trajeto.

Apesar de o valor limite ter sido alcançado em um momento, o vagão não descarrilou na simulação. Para realizar uma análise mais detalhada sobre o assunto, novamente foi calculada a soma L/V para cada lateral dos truques do vagão e conferido se em algum momento o valor ultrapassou 0,6. O gráfico com esses valores mais críticos das laterais dos truques é apresentado a seguir (Figura 106).



Figura 106: Soma L/V, lado direito do truque traseiro, vagão vazio a 70 km/h.

A partir do gráfico da Figura 106, é possível observar que a soma L/V das laterais dos truques não ultrapassa o valor recomendado pela AAR, de 0,6.

A seguir, é apresentado o gráfico de Critério de Nadal para o vagão vazio, a 75 km/h (Figura 107).



Figura 107: Valores críticos de L/V, em vagão vazio a 75 km/h.

Na velocidade de 75 km/h, existem dois pontos do trajeto em que o valor limite é ultrapassado: o lado direito do Rodeiro 1, na saída da primeira curva a esquerda, com raio de 600 m e o lado esquerdo do Rodeiro 1, na saída da curva seguinte a direita, com o mesmo raio de 600 m.

Percebe-se que, além dos pontos em que L/V ultrapassa 1,0, as outras saídas das curvas seguintes também são regiões mais críticas, onde aparecem outros valores altos de Critério de Nadal.

Apesar de o valor limite ter sido alcançado em dois momentos, o vagão não descarrilou na simulação. Para realizar uma análise mais detalhada sobre o assunto, novamente foi calculada a soma L/V para cada lateral dos truques do vagão e conferido se em algum momento o valor ultrapassou 0,6. O gráfico com esses valores mais críticos das laterais dos truques é apresentado a seguir (Figura 108).



Figura 108: Soma L/V, lado direito do truque dianteiro, vagão vazio a 75 km/h.

Com o vagão vazio a 75 km/h, existe um ponto em que a soma L/V da lateral dos truques ultrapassa 0,6. O lado direito do truque dianteiro atinge o valor de 1,1 na saída da primeira curva do trajeto, para a esquerda com raio de 600 m. Embora nesta velocidade de 75 km/h dois valores recomendados pela AAR tenham sido ultrapassados, isto não garante que o vagão descarrilaria. Entretanto, esta é uma situação que não pode ser dada como segura.



Figura 109: Valores críticos de L/V, em vagão vazio a 80 km/h.

O vagão vazio, a 80 km/h, ultrapassa mais vezes o valor limite recomendado pela AAR. São seis momentos em que isso ocorre, na entrada e saída das duas primeiras curvas do trajeto e também na entrada e saída da última curva do percurso. Porém, o valor mais alto chega a 1,2, com a roda direita do Rodeiro 3, na entrada da última curva. É um valor um pouco mais baixo do que o valor máximo de todas as simulações, que também ocorreu com a mesma roda, no mesmo ponto do trajeto, só que a 60 km/h.

Apesar de o valor limite ter sido alcançado em seis momentos, o vagão não descarrilou na simulação. Para realizar uma análise mais detalhada sobre o assunto, novamente foi calculada a soma L/V para cada lateral dos truques do vagão e conferido se em algum momento o valor ultrapassou 0,6. O gráfico com esses valores mais críticos das laterais dos truques é apresentado a seguir (Figura 110).



Figura 110: Soma L/V, lado direito do truque dianteiro, vagão vazio a 80 km/h.

Na velocidade mais alta, de 80 km/h, em um momento a soma L/V da lateral dos truques ultrapassa 0,6. Na saída da última curva do percurso, à esquerda com raio igual a 860 m, o lado direito do truque dianteiro passa um pouco de 1,0. Embora nesta velocidade de 80 km/h dois valores recomendados pela AAR tenham sido ultrapassados, isto não garante que o vagão descarrilaria. Entretanto, esta é uma situação que não pode ser dada como segura.

6.3. Resultados e discussões

Os resultados das simulações foram, em alguns aspectos, bem condizentes com o que se espera teoricamente do comportamento de trens e vagões. Por exemplo, durante a análise longitudinal, foi possível observar que, nas rampas ascendentes do trajeto, os acoplamentos foram tracionados, enquanto nas rampas descendentes, os engates foram submetidos a esforços de compressão.

Os veículos da composição estiveram submetidos a esforços de compressão durante a maior parte do percurso, pois os trechos de rampa descendente possuem inclinações maiores, são mais longos e ocorrem mais vezes. Assim, quase todos os veículos da composição ficam durante boa parte do trajeto com seus acoplamentos comprimidos. Além disso, pôde ser verificado que o peso dos vagões e a velocidade de operação tiveram grande influência no comportamento da composição ferroviária.

Com os gráficos de Força Média para a composição ferroviária carregada, foi possível perceber que as intensidades de forças médias longitudinais geralmente aumentam à medida que a velocidade também aumenta. Isso pode ser observado na Figura 111.



Figura 111: Força Média em função da velocidade, para trem carregado.

Entretanto, para a composição ferroviária vazia, ao invés das forças médias longitudinais aumentarem de intensidade à medida que as velocidades também crescem, essas forças acabam diminuindo no veículo mais solicitado e sendo redistribuídas ao longo da composição. Isso pode ser verificado pela observação do gráfico da Figura 112.



Figura 112: Força Média em função da velocidade, para trem vazio.

Em velocidades mais baixas, os esforços de compressão são maiores do meio para o final da composição vazia. Isso vai se modificando em função da redistribuição de forças, e a partir de 60 km/h os esforços são maiores na parte inicial até o meio da composição. O gráfico a seguir exemplifica isso, pois nele é possível verificar quais foram os veículos mais solicitados de acordo com a velocidade de operação (Figura 113).



Figura 113: Número do veículo mais solicitado em função da velocidade, para trem vazio.

Durante a análise tridimensional do vagão, carregado com sua capacidade máxima, também foi observado um comportamento que corresponde à teoria. Os picos da relação de descarrilamento L/V sempre ocorreram nas entradas e saídas das curvas do trajeto, sendo que nas curvas de raio menor, o valor de L/V era geralmente mais alto. A seguir, é mostrado um gráfico comparativo dos valores máximos do Critério de Nadal (L/V) para cada uma das velocidades de operação, na condição vagão carregado (Figura 114).



Figura 114: Valores máximos de L/V para vagão carregado, em cada uma das velocidades de operação.

No gráfico comparativo da Figura 114, é possível perceber a existência de um padrão quanto à roda com L/V mais crítico. O lado direito do Rodeiro 3 é quase sempre o com relação de descarrilamento mais alta, exceto à 30 km/h, em que é o lado esquerdo do Rodeiro 3 o mais crítico.

Entretanto, verifica-se que a velocidade não tem influência direta sobre os valores de L/V, pois o valor máximo do Critério de Nadal aumenta e diminui entre uma velocidade e outra, sem motivo aparente. Mesmo assim, os valores estão muito abaixo do valor limite de 1,0, recomendado pela AAR, o que indicaria uma condição bem segura e confiável de operação.

Por sua vez, a análise tridimensional para o vagão vazio não revelou um comportamento trivial, sendo bem diferente e mais crítico do que o comportamento do vagão carregado. Em cada uma das velocidades de operação, verificou-se que o comportamento é menos previsível, pois não segue o mesmo padrão das situações com vagão carregado, além de ter valores de Critério de Nadal sempre mais altos.

Outra observação importante sobre o comportamento do vagão vazio, é que para cada

velocidade de operação, o valor máximo de Critério de Nadal ocorre numa roda diferente, não existe um padrão. Isso pode ser observado na Figura 115.



Figura 115: Valores máximos de L/V para vagão vazio, em cada uma das velocidades de operação.

Para as situações com vagão vazio, existe uma relação um pouco mais direta da velocidade com o valor de L/V. Esses valores vão aumentando a cada mudança de velocidade de operação, de 30 a 60 km/h. Porém, de 60 para 65 km/h, ocorre uma diminuição inesperada do valor máximo do Critério de Nadal, mas que logo em seguida volta a aumentar para as velocidades consecutivas. Isso mostra realmente que o comportamento para essas situações de vagão vazio não é trivial.

A única velocidade em que não há um valor acima de 1,0 para as rodas do vagão vazio é 30 km/h. Em todas as outras, existe pelo menos um ponto do trajeto em que esse valor recomendado pela AAR é ultrapassado. Além disso, para as velocidades de 60, 70, 75 e 80 km/h, o valor limite de 0,6, recomendado pela AAR, para a soma L/V das laterais dos truques também é excedido.

Dentre as simulações realizadas, aquelas que podem ser consideradas como de maior risco, de acordo com as condições estabelecidas no projeto, são as de vagão vazio trafegando a 60 km/h ou 80 km/h, comprovando resultados caóticos. A 60 km/h, foram quatro momentos em que o valor de L/V excedeu o limite recomendado, sendo que um desses atingiu o valor máximo encontrado em todas as simulações, de quase 1,3. Já com o vagão vazio a 80 km/h, foram seis momentos em que L/V ultrapassou o valor de 1,0 e ainda nessa velocidade foi registrado o segundo maior valor de Critério de Nadal, de aproximadamente 1,2.

7. CONCLUSÃO

O trabalho foi feito com o intuito de explicitar as principais características da dinâmica de composição ferroviária e vagões, com atenção especial aos mecanismos de descarrilamento e critérios de desempenho recomendados pela literatura ferroviária.

Simulações foram realizadas com o auxílio do *software* comercial *Universal Mechanism*® para que os cálculos e a geração de dados fossem facilitados, assim o foco ficou voltado para a análise dos resultados.

Um procedimento de testes foi adotado para que se pudesse avaliar o comportamento da composição ferroviária e dos vagões que a compõem, utilizando sempre o mesmo trajeto padrão. Seguindo esse procedimento, foi possível analisar os resultados das simulações e comparar os mesmos com os critérios de desempenho recomendados. Assim, é possível afirmar que foi realizado um estudo de caso específico, no qual os resultados foram afetados pelas considerações determinadas no projeto.

Embora os valores recomendados para uma operação segura tenham sido excedidos várias vezes, durante as simulações com vagão vazio, em nenhuma dessas houve descarrilamento. Uma explicação possível para isso é o fator de segurança envolvido nessas recomendações. Esses critérios de desempenho sempre são conservativos, o máximo possível, pois devem ser seguros, confiáveis e devem abranger situações das mais diversas.

Assim, é correto dizer que esses limites operacionais, ao serem excedidos, são um indicativo de que a situação em questão pode não ser totalmente segura, mas não dão certeza de que o descarrilamento irá ocorrer. Portanto, é difícil prever a ocorrência desse fenômeno, pois se trata de um problema não linear, muitas vezes caótico. Neste projeto foram feitas diversas restrições, mas para se realizar simulações que sejam as mais próximas possíveis da realidade, torna-se necessário um estudo empírico para cada caso a ser analisado.

7.1. Sugestões para trabalhos futuros

Para futuros trabalhos, seria fundamental aumentar o número de variáveis nas simulações, o que geraria uma quantidade significativa de dados relevantes a serem analisados. Por exemplo, simulações com rodas e trilhos desgastados poderiam ser executadas, para se avaliar qual o momento propício para a realização de uma manutenção nos veículos ou vias. Ou então inserir nos trilhos algumas das irregularidades periódicas ou aperiódicas que foram citadas neste trabalho, mas não foram utilizadas como parâmetro para as simulações. Isso seria útil para estudar os efeitos de cada irregularidade em situações reais.

Outra sugestão importante e interessante seria realizar simulações focadas nos modos de vibração do vagão, como a Arfagem, o Galope, ou o Balanço, por exemplo.

REFERÊNCIAS

- VIGANICO, C.E.H., Avaliação Dinâmica de Veículos Ferroviários Através de um Sistema Multicorpos. Tese de M.Sc., UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil, 2010.
- [2] PORTO, T.G., Apostila PTR 2501 Ferrovias, USP / Engenharia de Transportes, 2004.
- [3] VIEIRA, A., Apostila de Curso de Especialização em Engenharia Ferroviária, IME.
- [4] AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES, Relatório 01/2014/GEROF/SUFER/ANTT – Acidentes Ferroviários ocorridos no Subsistema Ferroviário Federal no ano de 2013, Brasil, 2014.
- [5] ROSA, R.A., Notas de aula Estradas de Ferro / Material Rodante, UFES / Engenharia Civil.
- [6] LOCOMOTIVA, acesso em 19 de julho de 2016. Disponível em: <<u>https://transferr.files.wordpress.com/2014/04/locomotiva_vli.jpg</u>>.
- [7] ENGATES, acesso em 19 de julho de 2016. Disponível em:
 <<u>http://farm4.static.flickr.com/3356/3407634937_7f5c107a43.jpg?v=0</u>>.
- [8] COMPOSIÇÃO FERROVIÁRIA, acesso em 19 de julho de 2016. Disponível em: <<u>http://assets1.exame.abril.com.br/assets/images/2011/1/22167/size_810_16_9_ferrovia.jpg</u>>.
- [9] CONSOLI, L.R.P., Análise do Comportamento Dinâmico Lateral de um Veículo Ferroviário. Tese de M.Sc., USP, São Paulo, SP, Brasil, 2007.
- [10] VAGÃO GÔNDOLA, acesso em 19 de julho de 2016. Disponível em: <<u>https://c2.staticflickr.com/8/7039/6888035523_c8033ed2b5.jpg</u>>.
- [11] VAGÃO TANQUE, acesso em 19 de julho de 2016. Disponível em: <<u>static.wixstatic.com/media/47a2d9_4be5953f056749a080653edae621941b.jpeg</u>>.
- [12] VAGÃO ISOTÉRMICO, acesso em 19 de julho de 2016. Disponível em: <<u>http://mlb-d2-p.mlstatic.com/vago-isotermico-rffsa-ho-187-frateschi-2015-11050-MLB20038794567_012014-F.jpg?square=false</u>>.
- [13] INDIAN RAILWAYS INSTITUTE OF CIVIL ENGINEERING, The Investigation of

Derailments, Third Edition, 2007.

- [14] SHABANA, A.A., ZAAZAA, K.E., SUGIYAMA, H., Railroad Vehicle Dynamics A Computational Approach, Boca Raton: CRC Press - Taylor & Francis Group, 2008.
- [15] OKAMOTO, I., How Bogies Work, Japan Railway & Transport Review 18, 1998.
- [16] SANTOS, G.F.M., Desenvolvimento de Vagões GDU para 37,5 t/eixo, acesso em 25 de março de 2016. Disponível em: <<u>http://www.revistaferroviaria.com.br/premios/AMSTED2011/Desenvolvimento-GDU-2011-1.pdf</u>>.
- [17] MAIA, A.A., MARTINS, J.A.C., Estudos e Relatórios Técnicos Volume IX, RFFSA, 1984.
- [18] SANTOS, G.F.M., Comportamento Dinâmico do Vagão GDE na Passagem Sobre o Travessão. Monografia de Curso de Especialização, IME, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008.
- [19] DESENHO VAGÃO GÔNDOLA, acesso em 09 de março de 2016. Disponível em: <<u>https://tremdovale.wordpress.com/2015/07/03/classificacao-de-rodagem-para-vagoes/</u>>.
- [20] ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTADORES FERROVIÁRIOS -ANTF, Necessidade de Vagões, acesso em 09 de março de 2016. Disponível em: <<u>http://www.antf.org.br/pdfs/negocios-nos-trilhos-necessidade-de-vagoes-luizhungria.pdf</u>>.
- [21] BARBOSA, R.S., Estudo da Dinâmica Longitudinal do Trem. Tese de M.Sc., UNICAMP, Campinas, SP, Brasil, 1993.
- [22] SOARES, L.S., Procedimento para Determinação da Velocidade Máxima Autorizada. Monografia de Curso de Especialização, IME, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2006.