U.PORTO

FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

AVALIAÇÃO DE METODOLOGIA PARA PESAGEM DINÂMICA DE COMBOIOS

BRUNO MIGUEL RICON PERES PINTÃO

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM VIAS DE COMUNICAÇÃO

Orientadora: Professora Doutora Cecília Maria Nogueira Alvarenga Santos do Vale

Coorientadora: Professora Doutora Araliya Mosleh

JUNHO DE 2021

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2020/2021

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
Tel. +351-22-508 1901
Fax +351-22-508 1446
✉ miec@fe.up.pt

Editado por
FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO
Rua Dr. Roberto Frias
4200-465 PORTO
Portugal
Tel. +351-22-508 1400
Fax +351-22-508 1440
✉ feup@fe.up.pt
🌍 http://www.fe.up.pt

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2014/2015 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2015*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Ao meu Avô

AGRADECIMENTOS

Concluindo esta dissertação, expresso os meus agradecimentos a quem contribuiu direta ou indiretamente para a sua realização.

- À Professora Cecília Vale, agradeço pela orientação exemplar, pela dedicação, disponibilidade, rigor, e partilha de conhecimentos durante o desenvolvimento desta dissertação.

- À Doutora Araliya Mosleh, pela ajuda na adaptação ao algoritmo desenvolvido, disponibilidade total e partilha de conhecimentos durante o desenvolvimento da dissertação.

- Ao Professor Pedro Costa, por ter facultado os modelos para o estudo realizado neste trabalho.

- Aos professores do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, pela transmissão de conhecimento durante o meu percurso académico.

- Aos meus colegas de curso, pelo apoio, amizade e companheirismo.

- Aos meus Amigos, pela união e bons momentos de amizade profunda ao longo da minha vida.

- Por último, mas não menos importante, à minha Família por todo o apoio, valores e educação dada. Sem eles este percurso académico não seria possível.

RESUMO

A pesagem estática convencional obriga a ter o comboio parado, fazendo com que haja um congestionamento de tráfego, sendo então mais vantajoso utilizar os sistemas de pesagem em movimento. No entanto, ao contrário da pesagem estática convencional, o sistema de pesagem em movimento não permite uma medição direta da carga estática, uma vez que a interação dinâmica do comboio e da via resulta em cargas dinâmicas que são adicionadas às cargas estáticas. A fim de atingir esse objetivo, Mosleh, et al. [1] propôs uma metodologia para a determinação de um intervalo de confiança da carga estática do comboio a circular sobre uma via férrea.

Nesta dissertação analisa-se a modelação numérica de um sistema de pesagem em movimento desenvolvido com o objetivo de avaliar as cargas estáticas impostas pelo veículo ferroviário sobre a infraestrutura da via. Após a modelação da via e dos comboios foi feito um estudo paramétrico para avaliar a influência que a velocidade, o perfil de irregularidades, a rigidez de contacto e a rigidez e amortecimento das palmilhas das travessas têm na carga dinâmica imposta pelo comboio sobre a via.

Depois, a metodologia de pesagem dinâmica foi testada em vários cenários de modo a avaliar a influência da velocidade do comboio na carga dinâmica. Por fim, a metodologia foi ainda testada com valores realistas, possíveis de obter com sistemas de pesagem dinâmica colocados sobre a via constituídos por extensómetros. Os resultados obtidos mostram a possibilidade de obter um intervalo de confiança da carga estática.

PALAVRAS-CHAVE: sistema de pesagem em movimento, carga dinâmica, via-férrea, modelação, veículo ferroviário.

ABSTRACT

Conventional static weighing requires the train to be stopped, causing traffic congestion, so it is more advantageous to use weigh-in-motion systems. However, unlike conventional static weighing, the weigh-in-motion system does not allow a direct measurement of the static load, since the dynamic interaction of the train and track results in dynamic loads that are added to the static loads. In order to achieve this goal, Mosleh, et al. [1] proposed a methodology for determining a confidence interval of the static load of the train moving on a railway track.

This dissertation analyzes the numerical modeling of a weigh-in-motion system developed to evaluate the static loads imposed by a railway vehicle on the track infrastructure. After modeling the railway track and the trains, a parametric study was performed to evaluate the influence of the velocity, unevenness profiles of the rail, Hertzian contact stiffness and railpad damping and stiffness on the dynamic load imposed by the train on the track.

Then, the weigh in motion metodology was tested in several scenarios, in order to evaluate the influence of train speed on the dynamic load. Finally, the methodology was further tested with realistic values obtainable with dynamic weighing systems placed on the track consisting of strain gauges. The results obtained show the possibility of obtaining a confidence interval of the static load.

KEY-WORDS: weigh-in-motion system, dynamic load, railway track, modelation, railway vehicle.

Índice Geral

Agradecimentos i

Resumo iii

Abstract v

1. INTRODUÇÃO 1

1.1 Motivação Pessoal 1

1.2 Enquadramento ao tema 1

1.3 Objetivo e âmbito 2

1.4 Organização do trabalho 2

2. MODELAÇÃO NUMÉRICA 3

2.1 Introdução 3

2.2 Elementos constituintes da Via-Férrea 3

2.2.1 Carril 4

2.2.2 Travessas 4

2.2.3 Sistema de fixação carril-travessa 5

2.2.4 Palmilhas 5

2.2.5 Camada de balastro 5

2.2.6 Camada de sub-balastro 5

2.2.7 Fundação 6

2.3 Modelação da via 6

2.4 Modelação do veículo 11

2.5 Modelação da interação via-veículo 13

2.6 Modelação dos perfis de irregularidades 14

2.7 Estudo paramétrico 15

2.7.1 Objetivo e dados 15

2.7.2 Influência da rigidez de contacto 18

2.7.3 Influência da velocidade 22

2.7.4 Influência dos perfis de irregularidades 26

2.7.5 Influência da rigidez e amortecimento das palmilhas 30

2.8 Conclusões 34

3. APLICAÇÃO DO ALGORITMO PARA UM SISTEMA DE PESAGEM DINÂMICA 35

3.1 Descrição do algoritmo 35

3.2 Estudo Paramétrico 37

3.3 Aplicação a caso real 46

3.3.1 Descrição do sistema PEDDIR 46

3.3.2 Dados 46

3.3.3 Validação da metodologia de pesagem dinâmica 49

3.3 Conclusões 52

4. CONCLUSÕES E PERSPETIVAS FUTURAS 51

5. ANEXOS 59

Índice de Figuras

Figura 2.1 – Esquema estrutural da via balastrada em perfil longitudinal [9] 4

Figura 2.2 – Modelo de via a) Modelo 3D de viga sobre maciço de fundação b) Modelo 2D de viga de rigidez equivalente [9] 7

Figura 2.3 – Modelação da via-férrea de acordo com Costa [9] 8

Figura 2.4 – Tipos de comboio na rede europeia de alta velocidade: a) convencional; b) articulado; c) regular 11

Figura 2.5 – Modelos dinâmicos dos comboios: vista lateral do a) convencional com bogies (p. ex. Alfa Pendular); b) vista lateral do comboio convencional sem bogies (p. ex. comboio de mercadorias) [31] 12

Figura 2.6 – Processo de cálculo do software 15

Figura 2.7 – Esquema da passagem do Alfa Pendular pelo sistema de pesagem constituído por extensómetros 16

Figura 2.8 – Perfis de irregularidade com 100 m de extensão 17

Figura 2.9 – Identificação Rigidez de contacto dinâmica: procedimento 19

Figura 2.10 – Influência da velocidade na carga dinâmica (Alfa Pendular) 23

Figura 2.11 - Influência da velocidade na carga dinâmica (comboio de mercadorias) 25

Figura 2.12 – Pormenor de irregularidade de via: a) troço 12 m a 15 m; b) troço de 25 m a 28 m; c) troço de 40 m a 43 m 27

Figura 2.13 – Influência do perfil de irregularidades na carga dinâmica (Alfa Pendular) 28

Figura 2.14 - Influência do perfil de irregularidades na carga dinâmica (comboio de mercadorias) 29

Figura 3.1 – Passagem da massa móvel por um perfil de irregularidade 35

Figura 3.2 – Representação esquemática do método proposto 36

Figura 3.3 – Soma da carga estática e dinâmica para diferentes velocidades do Alfa Pendular 37

Figura 3.4 – Soma da carga estática e dinâmica para diferentes velocidades de comboio de mercadorias 38

Figura 3.5 – Variação da carga dinâmica em relação à velocidade 39

Figura 3.6 – Distribuição normal das cargas dinâmicas para diferentes velocidades: a) 5m/s; b) 10 m/s; c) 20 m/s; d) 40 m/s 40

Figura 3.7 – Representação gráfica do intervalo de confiança (Alfa Pendular) 45

Figura 3.8 – Representação gráfica do intervalo de confiança (comboio de mercadorias) 46

Figura 3.9 – Perfil de irregularidades total dos dados realísticos 47

Figura 3.10 – Perfil de irregularidades do troço em estudo 48

Figura 3.11 – Esforço transverso na passagem do Alfa Pendular a 10 m/s a) carril direita; b) carril esquerda 49

Figura 3.12 – Esforço transverso na passagem do Alfa Pendular a 20 m/s a) carril direita; b) carril esquerda..... 49

Figura 5.1 – Carga dinâmica com amortecimento de 10 kN.s/m para diferentes tipos de rigidez (Alfa Pendular): a) Eixo A; b) Eixo B; c) Eixo C; d) Eixo D 58

Figura 5.2 – Carga dinâmica com amortecimento de 20 kN.s/m para diferentes tipos de rigidez (Alfa Pendular): a) Eixo A; b) Eixo B; c) Eixo C; d) Eixo D 60

Figura 5.3 – Carga dinâmica com rigidez de 40 kN/mm para diferentes tipos de amortecimento (Alfa Pendular): a) Eixo A; b) Eixo B; c) Eixo C; d) Eixo D 62

Figura 5.4 – Carga dinâmica com rigidez de 100 kN/mm para diferentes tipos de amortecimento (Alfa Pendular): a) Eixo A; b) Eixo B; c) Eixo C; d) Eixo D 64

Figura 5.5 – Carga dinâmica com rigidez de 500 kN/mm para diferentes tipos de amortecimento (Alfa Pendular): a) Eixo A; b) Eixo B; c) Eixo C; d) Eixo D 66

Figura 5.6 – Carga dinâmica com amortecimento de 10 kN.s/m para diferentes tipos de rigidez (comboio de mercadorias): a) Eixo A; b) Eixo B 67

Figura 5.7 – Carga dinâmica com amortecimento de 20 kN.s/m para diferentes tipos de rigidez (comboio de mercadorias): a) Eixo A; b) Eixo B 68

Figura 5.8 – Carga dinâmica com rigidez de 40 kN/mm para diferentes tipos de amortecimento (comboio de mercadorias): a) Eixo A; b) Eixo B 69

Figura 5.9 – Carga dinâmica com rigidez de 100 kN/mm para diferentes tipos de amortecimento (comboio de mercadorias): a) Eixo A; b) Eixo B 70

Figura 5.10 – Carga dinâmica com rigidez de 500 kN/mm para diferentes tipos de amortecimento (comboio de mercadorias): a) Eixo A; b) Eixo B 71

Índice de Quadros

Quadro 2.1 – Valores de A propostos pela FRA [1] 15
Quadro 2.2 – Propriedades geométricas e mecânicas dos comboios [31] 18
Quadro 2.3 – Propriedades mecânicas do modelo da via [31] 18
Quadro 2.4 – Rigidez de contacto para cargas dinâmicas máximas e mínimas 20
Quadro 2.5 – Carga dinâmica média para diferentes valores de rigidez de contacto (Alfa Pendular) 21
Quadro 2.6 – Carga dinâmica média para diferentes valores de rigidez de contacto (comboio de mercadorias) 22
Quadro 2.7 – Somatório de carga dinâmica (N) nos quatro eixos do comboio Alfa Pendular 23
Quadro 2.8 – Somatório de carga dinâmica (N) nos dois eixos do comboio de mercadorias 24
Quadro 2.9 – Carga dinâmica média dos eixos do comboio (Alfa Pendular) 28
Quadro 2.10 – Carga dinâmica dos eixos do comboio (comboio de mercadorias) 29
Quadro 2.11 – Carga dinâmica para o Alfa Pendular com diferentes tipos de palmilha 31
Quadro 2.12 – Carga dinâmica para o comboio de mercadorias com diferentes tipos de palmilha 33
Quadro 3.1 – Carga dinâmica resultante das 50 passagens da carga móvel para diferentes velocidades 41
Quadro 3.2 – Intervalo de carga estática para o Alfa Pendular 43
Quadro 3.3 – Intervalo de carga estática para o comboio de mercadorias 44
Quadro 3.4 – Intervalo de carga estática para os dados realísticos 51

Símbologia

Notações latinas

Capítulo 2

A - Parâmetro de qualidade geométrica da via

a_i – Localização do ponto de contacto i em t = 0 s.

c – Velocidade do veículo

c_p – Amortecimento das palmilhas

c_p' – Velocidade de propagação de onda na direção vertical

C^v – Matriz de amortecimento do veículo

E – Módulo de elasticidade

E_b – Módulo de deformabilidade da camada granular

f – Frequência

F_2 – Força de interação das travessas

h_b – Espessura da camada granular

I – Inércia do carril

k_0 - Número de onda mínimo

k_1 - Número de onda máximo

k_{eq} – Rigidez equivalente da fundação

$K_{h,din}$ - Rigidez linearizada de contacto calculado com a carga dinâmica

$K_{h,est}$ - Rigidez linearizada de contacto calculado com a carga estática

K_h - Rigidez linearizada de contacto

k_p – Rigidez das palmilhas

k_p^* - Rigidez complexa da suspensão primária

k_p^* - Rigidez complexa equivalente

k_s^* - Rigidez complexa da suspensão secundária

K^v – Matriz de rigidez do veículo

lb – metade da distância entre centros de gravidade dos bogies

lr – metade da distância entre eixos que partilham o mesmo bogie

m – Massa da via em relação ao comprimento

m_s – Massa das travessas por unidade de comprimento

M^v – Matriz de massa do veículo

P_i – carga de interação dinâmica desenvolvida no ponto de contacto i

P_z – Força vertical aplicada ao carril

Q – Carga estática de cada roda do comboio

r_{eq}- Raio de curvatura equivalente

S_{rzz} – Densidade de potência do perfil de irregularidades

t – Tempo

u – Deslocamento vertical da via

ü – Aceleração

u_{bb} – Deslocamento vertical do plano inferior do estrato

$u_{c,i}$ - Deslocamentos verticais do ponto de contacto i do veículo

u_r – Deslocamento vertical do carril

u_s – Deslocamento vertical da travessa

V – Esforço Transverso

Capítulo 3

M_s – Massa móvel

M_r – Massa por eixo do comboio

P_{dyn_s} – Efeito da carga dinâmica da massa móvel

P_{dyn_w} – Carga dinâmica por eixo

Q_{W_max} – Carga estática máxima do intervalo de confiança

Q_{W_min} – Carga estática mínima do intervalo de confiança

Q_{i-mean} – Carga dinâmica média da massa móvel

Q_s – Carga quase – estática

Std_{Qi} – Desvio padrão

v – Velocidade

Var – Variância

Notações gregas

Capítulo 2

ξ_b – Coeficiente de amortecimento histerético do balastro

ρ_b – Massa volúmica do material da camada granular

Δu – Desnível do carril

λ – Comprimento de onda

ρ – Massa volúmica

Ω - Frequência

ν - Coeficiente de Poisson

ω – Frequência angular

1
INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO PESSOAL

A motivação para a realização desta dissertação tem como princípio fundamental a vontade de participar e contribuir de modo proativo na investigação de temas na minha área de formação, enquanto estudante do Mestrado em Engenharia Civil na área de vias de comunicação, da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Considero o tema desenvolvido motivador e impulsionador para a investigação, pois contribui para o desenvolvimento do estudo do transporte ferroviário de alta velocidade, que tem tido um elevado crescimento nos últimos anos, assim como é esperado um crescimento exponencial nos anos que se aproximam, devido à segurança, rapidez e comodidade que proporciona.

1.2 ENQUADRAMENTO AO TEMA

Nos dias correntes, os gestores de infraestruturas estão especialmente interessados na medição da pesagem dinâmica (*Weigh in Motion* - WIM), comparando-a com limites de peso permitidos e avisos quando o comboio está sobrecarregado. Isto é sobretudo crítico para comboios de mercadorias, com desequilíbrios na distribuição de carga nos eixos, uma vez que danifica a infraestrutura e também aumenta o risco de descarrilamento [2]. Sendo assim, a pesagem dinâmica é importante para medir o peso em movimento dos comboios e comparar com o peso permitido a fim de desencadear um aviso quando o comboio está sobrecarregado. O sistema de pesagem dinâmica apresentado no presente trabalho baseia-se num projeto designado por PEDDIR: "Sistema de Pesagem Dinâmica e Deteção de Irregularidade dos Rodados". A importância deste assunto é clara sendo que a pesagem do comboio pode ser realizada sem a necessidade da sua paragem, evitando assim congestionamento no tráfego ferroviário. A avaliação da carga dinâmica é de grande interesse para a proteção dos caminhos-de-ferro, planeamento da manutenção das vias, e segurança de tráfego [3, 4]. Sendo assim, existe atualmente uma procura pelos dados da pesagem dinâmica relativa a modelos de comboios usados no tráfego ferroviário. Dados estes que são uteis para: 1) controlo de comboios de mercadorias e veículos pesados, 2) manutenção da via, 3) segurança no tráfego, 4) capacidade de carga aplicada em pontes.

Em geral, existem duas abordagens distintas para estimar a carga dinâmica nos eixos dos comboios: 1) medição direta no contacto entre a roda e o carril [5], 2) medição indireta no carril com base nas forças aplicadas pelo veículo à infraestrutura [1].

A primeira abordagem é baseada em sensores instalados diretamente nas rodas, no eixo ou nos bogies do veículo ferroviário. Kanehara e Fujioka [6] fizeram a estimativa de cargas por eixo do veículo com base nos eixos do comboio e nos discos de rodas, ambos utilizando extensómetros elétricos. Já Uhl [7] propôs um método de identificação de força indireta baseado na função de transferência entre as respostas dinâmicas medidas em componentes específicos do veículo, neste caso a aceleração nos bogies e as forças de contacto vertical entre a roda e o carril. Estas funções analíticas de transferência são derivadas das equações da dinâmica de multi-corpos, assumindo que o veículo é formado por corpos rígidos (carroçaria, eixos e bogies) ligados por elementos elásticos (suspensão).

A segunda abordagem deduz as cargas dos comboios a partir da resposta dinâmica da via, e pode ser dividida em duas categorias com base na localização de instalação: 1) na via (WIM), ou 2) sobre as pontes (*Bridge – Weigh-in-Motion* , B-WIM). A principal vantagem de ambos é a capacidade de monitorizar cargas de vários veículos a velocidades variadas utilizando uma determinada secção de via ou ponte. Na presente dissertação, irá se aprofundar a medição da pesagem dinâmica na via.

1.3 OBJETIVO E ÂMBITO

Nesta dissertação, os objetivos principais são:

1. compreender a modelação da via, do veículo e da interação via-veículo;
2. avaliar a influência da rigidez de contacto, velocidade, perfil de irregularidades e da rigidez e amortecimento das palmilhas na carga dinâmica;
3. desenvolvimento de metodologia inicialmente proposta por Mosleh, et al. [1] para a obtenção da carga estática de um comboio a partir de um sistema de pesagem de um comboio em movimento.
4. Testar a metodologia com vários cenários numéricos e com valores realistas, possíveis de obter a partir de um sistema de monitorização instalado na via-férrea.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A presente dissertação foi dividida em seis capítulos.

No *Capítulo 1- Introdução*, apresenta-se o tema em estudo e enquadramento geral, seguido dos objetivos e âmbito da dissertação.

Depois, no *Capítulo 2- Modelação numérica*, é introduzida a modelação da via e dos veículos em estudo com uma descrição dos elementos constituintes da via-férrea. Finalmente, tem-se o estudo paramétrico avaliando a influência da rigidez de contacto, velocidade, perfil de irregularidades e da rigidez e amortecimento das palmilhas na carga dinâmica.

No *Capítulo 3- Aplicação do algoritmo para um sistema de pesagem dinâmica*, é verificado o algoritmo desenvolvido em Matlab, ajustando-o, quando necessário, para situações correntes da circulação ferroviária.

No *Capítulo 4 – Conclusões e perspetivas futuras*, são apresentadas as principais conclusões do estudo, assim como, as perspetivas de desenvolvimento para estudos futuros.

No *Capítulo 5 – Anexos*, são anexados todas as Figuras obtidas no trabalho e que complementa um melhor entendimento do estudo.

2
MODELAÇÃO NUMÉRICA

Neste Capítulo começa-se por descrever os elementos constituintes da via – férrea e posteriormente é apresentada a modelação da via, a modelação do veículo, a modelação da interação via – veículo e a modelação dos perfis de irregularidades. Após a modelação, é feito um estudo paramétrico para avaliar a influência da rigidez de contacto, da velocidade, dos perfis de irregularidade e dos parâmetros das palmilhas da via na carga dinâmica.

2.1 INTRODUÇÃO

A via-férrea tem como função viabilizar a circulação ferroviária de forma confortável, segura e económica. Quanto à sua estrutura, podem ser balastradas ou não balastradas. As mais usuais são as vias balastradas compostas por uma superestrutura incluindo o armamento da via, e uma substrutura composta por materiais terrosos que constituem o sub-balastro, o leito de via e o aterro ou fundação. Este tipo de via pode ser usado em vias de alta velocidade.

Quanto à via não balastrada, a maior diferença em relação à via balastrada consiste na ausência da camada de balastro. Nas vias não balastradas, a camada de balastro é substituída por uma laje de betão armado ou uma camada de mistura betuminosa. As vias não balastradas têm como desvantagem um baixo nível de absorção de ruído e vibrações, ou seja, em ambiente urbano é uma opção que é muitas vezes rejeitada.

Nesta investigação considera-se via balastrada, por dois motivos: 1) mais usual em Portugal e na Europa; 2) validação da metodologia numa via real em Portugal.

2.2 ELEMENTOS CONSTITUINTES DA VIA-FÉRREA

A via balastrada é uma estrutura, que pelas suas características tem um ótimo comportamento dinâmico relativo a esforços transmitidos pelas massas suspensas e não suspensas. As massas suspensas são veículos apoiados no respetivo eixo por uma suspensão primária, sendo que, esta deve contribuir para isolar essas elevadas massas e promover a dissipação de energia. As massas não suspensas que são as mais similares a um comboio, são as que constituem as rodas, eixo e todas as peças a eles ligados, do qual o comportamento está dependente das características mecânicas da via.

Desde a década de 1970, quando foi introduzido os veículos férreos de alta velocidade na Europa, foi dado continuidade ao uso da via balastrada de conceção clássica, sendo que esta oferece uma das melhores relações entre rigidez e amortecimento. Bastantes estudos confirmaram desde logo, garantindo a resistência da via para esforços laterais, a hipótese da utilização de comboio de altas velocidades da ordem dos 300 km/h com um coeficiente de segurança aceitável [8].

Na Figura 2.1 é apresentado detalhadamente todos os elementos que constituem a estrutura da via balastrada.

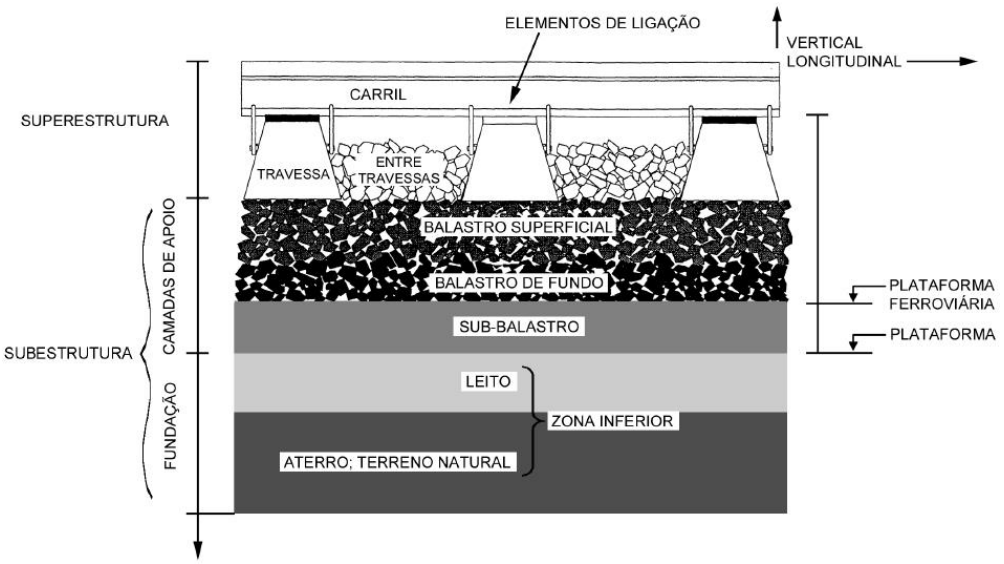


Figura 2.1 - Esquema estrutural da via balastrada em perfil longitudinal [9]

A via-férrea é separada em superestrutura e subestrutura assim como é indicado na Figura 2.1. Os carris, o sistema de fixação carril-travessa e as travessas são constituintes da superestrutura, sendo a fundação (leito de via e aterro), o balastro e o sub-balastro elementos da subestrutura.

A descrição da via balastrada que irá ser apresentada corresponde ao que se designa como solução corrente ou tradicional. Entretanto, nos últimos anos, tem havido um conjunto de inovações ao nível da via balastrada, procurando uma resposta a alguns dos problemas mais comuns deste tipo de solução ferroviária. Estas inovações têm se focado na construção de novas linhas de alta velocidade, tendo como principal objetivo a diminuição do dano causado pela passagem recorrente dos comboios à via e dos consequentes custos de manutenção da mesma. A introdução de elementos elásticos nas travessas e/ou sob o balastro, de maneira a diminuir as vibrações causadas pela passagem do veículo, constitui um exemplo do tipo de inovações que vão sendo introduzidas em casos reais nos últimos anos [10].

2.2.1 CARRIL

O carril é um elemento estrutural da via construído em aço, com as funções de suportar as cargas induzidas pelo material circulante e transmiti-las para as travessas e consequentemente para os elementos subjacentes da via-férrea. Cargas estas recebidas pelas rodas do comboio, sendo valores variados devido a forças originadas no arranque e na frenagem causadas pela aderência roda-carril. A principal função dos carris é impor a direção a ser seguida pelas rodas do comboio [8]. Nos dias correntes as linhas de alta velocidade adotam, por norma, o carril UIC 60 que é instalado em barra longa soldada, isto é, anulando a existência de juntas entre troços de carril. O carril UIC 60 apresenta uma rigidez á flexão elevada, permitindo assim uma distribuição contínua da ação pelas travessas que se encontram subjacentes ao carril.

2.2.2 TRAVESSAS

As travessas estão localizadas entre os carris e o balastro, tendo como função principal distribuir e amenizar as cargas transmitidas nos carris para o balastro. Para além de diminuir os níveis de tensão transmitidos para o balastro, as travessas também têm o objetivo de impedir movimentos verticais, longitudinais e transversais fixando os carris. As travessas são de madeira ou de betão armado pré-esforçado, dependendo da necessidade da via. Se a via tiver necessidade de altas velocidades esta deve ser constituída por travessas de betão armado pré-esforçado em monobloco de maneira a preservar a bitola e inclinação dos carris [8]. As exigências impostas á via em relação à rigidez e resistência das travessas

têm levado ao abandono das travessas em madeira e ao uso às travessas de betão. No caso de a via ser balastrada, é habitualmente usado um espaçamento de 0,60 m entre os eixos das travessas na direção longitudinal da via [9].

2.2.3 SISTEMA DE FIXAÇÃO CARRIL-TRAVESSA

O sistema de fixação carril – travessa traduz-se na transmissão de forças e de variação de temperatura aplicadas nos carris às travessas certificando o correto posicionamento e espaçamento dos carris sobre as travessas de forma a não prejudicar o funcionamento e a comodidade na via [8]. Os sistemas em questão são do tipo direto ou indireto. No sistema de fixação direto o carril juntamente com a palmilha são fixados diretamente à travessa com apenas um único sistema de fixação. No sistema de fixação indireto a fixação é feita em dois passos sendo uma ligação carril-palmilha e outra ligação palmilha-travessa [11].

2.2.4 PALMILHAS

As palmilhas são elementos elásticos integrados no sistema de fixação carril-travessa. O seu objetivo é garantir o apoio adequado dos carris, servir como amortecedor para as vibrações provocadas pelas rodas do comboio, minorar o atrito carril-travessa protegendo assim o desgaste do carril devido ao impacto e promover o isolamento elétrico dos carris na via [11]. Existem vários tipos de palmilhas, com diversas características de rigidez e amortecimento, tendo uma importância considerável da resposta dinâmica da estrutura. Na secção 2.7.5 serão considerados seis tipos de palmilhas com características diferentes de rigidez e amortecimento, de modo a avaliar a sua resposta á ação dinâmica aplicada à via-férrea.

2.2.5 CAMADA DE BALASTRO

É usual considerar para o balastro uma camada de partículas granulares grosseiras, regra geral, britado, com fuso granulométrico entre 32-64 mm, que conforma uma resistência à compressão, ocupando cerca de 35 cm de espessura [9].

O balastro é um elemento de estabilidade na via balastrada, tanto na vertente vertical como lateral e longitudinal. Esta estabilidade é possível através do atrito entre os componentes do balastro e as superfícies de contacto das travessas [8].

Em relação às funções da camada de balastro, serve de apoio às travessas, recebendo, por isso cargas de grande quantidade transferidas por elas. Estas cargas transferidas pelas travessas são absorvidas pela camada de balastro, atenuando assim as vibrações e minimizando a realização de ações de correção de nivelamento e alinhamento na via. Contribui também para uma drenagem da via, sendo que permite a percolação da água por entre as partículas [12].

2.2.6 CAMADA DE SUB-BALASTRO

A camada de sub-balastro situa-se entre a camada de balastro, constituída por materiais de boa qualidade e a fundação, cujo material é de qualidade inferior sendo assim mais económico. Esta camada por norma é constituída por agregado britado de granulometria extensa e ronda os 30 cm de espessura. A sua função é reduzir o nível de tensão aplicado á fundação protegendo assim a plataforma. De forma a proteger a plataforma, também é necessária esta camada evitar a interpenetração e migração do material fino proveniente das vibrações provocadas ao balastro. A camada de sub-balastro deve funcionar como um elemento drenante e filtrante da plataforma [8].

Habitualmente, esta camada é constituída por materiais granulares, mas também pode ser constituída por uma base de betão pobre em casos especiais. O betão pobre é usado quando é necessário uma proteção extra e uma melhor distribuição de carga à fundação. No caso de ser preciso este tipo de material,

também tem de se ter em consideração as suas desvantagens, como por exemplo uma possível fendilhação do betão e o custo ser superior em relação à camada granular [12].

2.2.7 FUNDAÇÃO

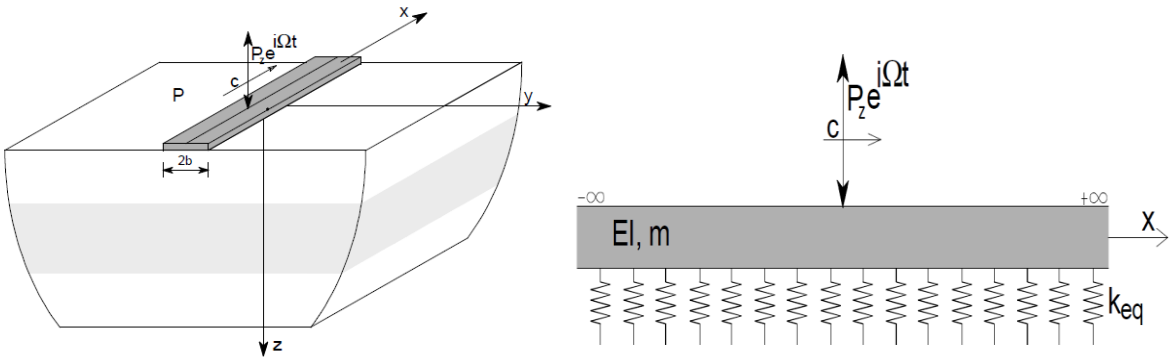
A fundação da via corresponde à camada de solo onde é apoiada a camada de sub-balastro sendo necessário construir uma superfície adequada para uma correta compactação do sub-balastro. Relativamente ao seu dimensionamento, tem uma profundidade dependente das solicitações do tráfego ferroviário e tem-se em consideração um período de dimensionamento de 100 anos [11]. Habitualmente, a fundação é composta por duas camadas, o leito da via, que constitui o elemento de proteção das terraplanagens na superfície da fundação e o aterro, constituído por terreno natural que se situa na zona inferior da fundação. A fundação é um suporte para a superestrutura e para as camadas de apoio da via com o objetivo de não atingir a rotura nem deformações excessivas. Deve resistir ao atrito e desgaste causado pela camada de balastro e sub-balastro [10].

2.3 MODELAÇÃO DA VIA

Para a modelação da via, existem vários modelos possíveis, tais como a modelação 2D, 2.5D e 3D. A modelação 2D consiste na simulação do comportamento da via nas direções vertical e longitudinal. Na modelação 2.5D não só é simulada a resposta dinâmica da via, mas também do maciço subjacente. No seguimento do trabalho será aprofundado o estudo da modelação 2.5D e para uma análise mais detalhada da modelação 2.5D também é possível consultar o trabalho de Costa [9]. Os modelos 3D são mais complexos que os modelos bidimensionais e são usados para análises globais do comportamento da estrutura, podendo avaliar, por exemplo, o comportamento da via em curva. o comportamento da via em zonas de juntas e a resposta da via e da fundação nas direções longitudinal e transversal, dado que considera as três dimensões. [13-17]

Nesta investigação, é adotado o modelo indicado por Costa [9]. Trata-se de um modelo de via simples, que consiste em admitir que todos os seus componentes podem ser baseados a uma viga de Bernoulli-Euler, com comprimento infinito. Esta viga está apoiada na superfície do maciço de fundação, tal como é mostrado na Figura 2.2 a). No que diz respeito à formulação matemática deste modelo, e com auxílio do conceito de rigidez equivalente, a rigidez da fundação passa a ser definida pela frequência angular e pelo número de onda, sendo determinada pela resposta dinâmica do maciço, devido à passagem do veículo ferroviário.

Assim, considera-se a fundação do maciço como sendo uma fundação elástica, sendo que o seu comportamento depende da frequência de excitação, incluindo efeitos pertencentes ao carácter contínuo do maciço, como se verifica na Figura 2.2 b). Esta modelação é significativamente mais sofisticada do que os modelos habitualmente usados na Engenharia Ferroviária, sendo que se baseiam na teoria da viga em fundação elástica (BOEF), também designado como modelo de Winkler.



a) b)

Figura 2.2 – Modelo de via a) Modelo 3D de viga sobre maciço de fundação b) Modelo 2D de viga rigidez equivalente [9]

Sendo considerada a passagem de uma carga móvel com velocidade *c*, esta carga apresenta uma magnitude harmónica no tempo, com amplitude P_z definida pela frequência angular. O equilíbrio dinâmico é retratado pela Equação (2.1), em regime estacionário:

$$EI\frac{\partial^4 u(x,t)}{\partial x^4} + k_{eq}u(x,t) + m\ddot{u}(x,t) = P_z\delta(x-ct)e^{i\Omega t} \tag{2.1}$$

Sendo que: *EI* é a rigidez da flexão da via; k_{eq} é a rigidez equivalente da fundação e *m* é a massa da via em relação ao comprimento; *u* é o deslocamento vertical da via a ser modelada; P_z é a força vertical aplicada ao carril; $\ddot{u}$ é a aceleração. A rigidez equivalente é calculada como demonstrado na Equação (2.2).

$$\tilde{k}_{eq}(k_1,\omega) = \frac{2\pi}{\int_{-\infty}^{+\infty}\tilde{u}_{zz}^{G}(k_1,k_2,0,\omega)\frac{\sin(k_2 b)}{k_2 b}dk_2} \tag{2.2}$$

A Equação (2.1) pode ser simplificada transformando o domínio do espaço – tempo no domínio do número de onda – frequência. O número de onda é o inverso do comprimento de onda (λ), e a frequência é o inverso do tempo (*t*).

O equilíbrio do sistema, ao aplicar a transformada de Fourier em relação ao espaço e tirando proveito das propriedades de derivação no domínio do número de onda, passa a ser definido por:

$$EIk_1 u(k_1,t) + k_{eq}u(k_1,t) + m\ddot{u}(k_1,t) = P_z e^{i(\Omega - k_1 c)t} \tag{2.3}$$

A transformada de Fourier é uma função matemática que decompõe uma forma de onda, que é uma função do tempo, nas frequências que a compõem. O resultado produzido pela transformada de Fourier é uma função de valor complexo da frequência. No contexto da presente dissertação aplica-se a transformada de Fourier às variáveis espaciais *x* ($x \rightarrow k_1$) e *y* ($y \rightarrow k_2$) e à variável temporal *t* ($t \rightarrow \omega$), como indicado na Equação (2.4):

$$\tilde{f}(k_1,k_2,z,\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty} f(x,y,z,t)e^{-i(k_1 x + k_2 y + \omega t)}dxdydt \tag{2.4}$$

Tendo a Equação (2.3) carácter harmónico ao longo do tempo, e a frequência angular definida por $\omega = \Omega k_1 c$, é possível simplificar a Equação, ficando da seguinte forma:

$$EI{k_1}^4\tilde{u}(k,\omega) + k_{eq}\tilde{u}(k_1,\omega) - m\omega^2\tilde{u}(k_1,\omega) = \tilde{P_z}(k_1,\omega) \tag{2.5}$$

Ou seja, para caracterizar o domínio transformado tem-se:

$$\tilde{u}(k_1,\omega) = \frac{\widetilde{P_z}}{EIk_1^4 - m\omega^2 + k_{eq}} \tag{2.6}$$

Para ter em consideração o amortecimento da própria via é necessário introduzir as grandezas de rigidez complexa, que se calcula como demonstrado na Equação (2.7) passando a ter um modelo de amortecimento histerético. O amortecimento histerético, quando um material é absorvido, absorve e dissipa energia. Isso acontece devido ao atrito entre os planos internos. Quando um comboio, sujeito a vibração, o diagrama tensão – deformação mostra um ciclo de histerese [9]. Amortecimento este que tem a capacidade de preservar a deformação efetuada pelo veículo.

Nos últimos anos, têm aparecido várias propostas que dão a entender o comportamento mecânico de cada elemento pertencente à via-férrea [18-21]. O modelo desenvolvido por Costa [9] e em estudo na presente dissertação está esquematizado na Figura 2.3 onde se considera *h* como espessura do balastro.

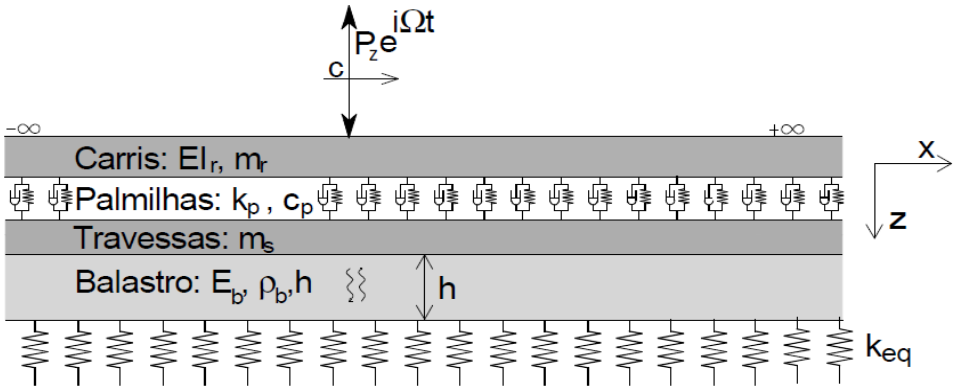


Figura 2.3 – Modelação da via-férrea de acordo com Costa [9]

Como se pode verificar, na Figura 2.3, trata-se de um modelo contínuo, isto é, os elementos discretos da via, tais como as palmilhas e as travessas, são incluídos no cálculo com auxílio de uma formulação contínua equivalente. É uma simplificação da realidade, de forma a simplificar o cálculo e obter resultados com mais brevidade, no entanto, devido a essa simplificação o cálculo não é muito rigoroso. Em termos matemáticos é uma grande vantagem, pois este modelo passa a ser invariante na direção de desenvolvimento da via, sendo assim possível a transformação da variável espacial *x* para o domínio do número de onda. Este tipo de modelo contínuo equivalente tem sido validado por um grande número de autores, tendo estes chegado, em concordância, à conclusão de que para frequências de excitação inferiores a 600 Hz não existem diferenças visíveis nas respostas por elementos discretos ou contínuos [20, 22-24]. A excitação paramétrica é excitação periódica originada pelo movimento da carga móvel do veículo sobre uma via perfeita, no entanto, a excitação paramétrica provocada pelo carácter periódico nas travessas não é possível ser analisada nos modelos contínuos equivalentes, pois a esta excitação está presente devido à diferença de deslocamento aquando da interação roda – carril, enquanto a roda se encontra sobre as travessas.

No que diz respeito aos carris, a modelação proposta por Costa [9] considera uma viga de Bernoulli – Euler devido à sua simplicidade de formulação comparando com outros modelos de viga, como por exemplo, a viga de Timoshenko. Sendo então considerada a viga de Bernoulli – Euler, o comportamento mecânico dos carris é descrito através da sua rigidez de flexão (EI_r) e massa por unidade de comprimento (m_r).

Para a ligação carril – travessa (palmilhas + sistema de fixação) é adotado um conjunto mola – amortecedor, com uma distribuição uniforme em todo o comprimento de desenvolvimento da via, como mostra na Figura 2.3. O comportamento das palmilhas é caracterizado pela rigidez complexa equivalente, k_p^*, definido por:

$$k_p^* = k_p + i\omega c_p \tag{2.7}$$

sendo k_p e c_p, respetivamente a rigidez e amortecimento das palmilhas.

Neste modelo, as travessas são consideradas como corpos rígidos, sendo que é considerado que têm uma massa equivalente uniformemente distribuída ao longo da direção longitudinal da via. A massa das travessas por unidade de comprimento, é a massa das travessas dividida pela distância compreendida entre as mesmas e é definida por m_s [21].

As camadas de balastro e sub-balastro, assim como aterro podem ser simulados considerando as suas propriedades mecânicas equivalentes. Para isso, as camadas granulares não são simuladas usando conjuntos mola – amortecedor como proposto por Lombaert et al. [21, 25] mas sim por elementos provenientes da equação exata da propagação de ondas unidirecionais. A vantagem destes elementos é que, para o mesmo esforço de cálculo, é possível, de forma mais correta, atender à propagação de ondas ao longo da direção vertical das camadas granulares. No entanto, é necessário ter em conta que na presente modelação não é considerada a simulação de propagação de ondas ao longo das camadas de apoio da via e ao longo do seu desenvolvimento. A dimensão das partículas do balastro e os vazios entre essas partículas levantam algumas questões em relação à mecânica dos meios contínuos. Como elaborado no artigo de Ricci et al. [26], é demonstrado que, de facto, o carácter discreto do balastro, ou seja, a dimensão das partículas e vazios entre elas, influencia a resposta ao nível da via, sendo que existe similaridades entre os modelos discretos e contínuos à medida que a dimensão das partículas no balastro diminui.

A modelação proposta para as camadas granulares da via é definida pela largura da via, 2b, pela espessura da camada, pelo módulo de deformabilidade e pela massa volúmica do material em causa, h_b, E_b e ρ_b respetivamente. O amortecimento material é introduzido pela consideração de propriedades elásticas complexas,

$$E_b^* = E_b(1 + 2i\xi_b sgn(\omega)) \tag{2.8a}$$

$$sgn(\omega) = \begin{cases} -1 : \omega < 0 \\ 0 : \omega = 0 \\ 1 : \omega > 0 \end{cases} \tag{2.8b}$$

Sendo que ξ_b é o coeficiente de amortecimento histerético do balastro.

Em síntese, e seguindo a esquematização da Figura 2.3, é definido o equilíbrio dinâmico dos elementos constituintes da via da seguinte forma:

Carris

$$EI_r \frac{\partial^4 u_r(x,t)}{\partial x^4} + m_r \ddot{u}_r(x,t) + k_p\big(u_r(x,t) - u_s(x,t)\big) = P_z e^{i\Omega t}\delta(x - ct) \tag{2.9}$$

Travessas

$$m_r\ddot{u}_s(x,t) + k_p[u_s(x,t) - u_r(x,t)] = -F_2(x,t) \tag{2.10}$$

Sendo que F_2 é a força de interação travessas – balastro e que u_s e u_r representam os deslocamentos verticais da travessa e carril, respetivamente.

Balastro

$$\frac{2\omega E_b^* b\alpha}{c_p{}'}\begin{bmatrix} \frac{1}{tg\left(\frac{\omega}{c_p{}'}h\right)} & -\frac{1}{sin\left(\frac{\omega}{c_p{}'}h\right)} \\ -\frac{1}{sin\left(\frac{\omega}{c_p{}'}h\right)} & \frac{1}{tg\left(\frac{\omega}{c_p{}'}h\right)} \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} u_s(x,\omega) \\ u_{bb}(x,\omega) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_2(x,\omega) \\ -k_{eq}u_{bb}(x,\omega) \end{Bmatrix} \tag{2.11}$$

Sendo que k_{eq} representa a impedância do maciço (ou rigidez equivalente), u_{bb} representa o deslocamento vertical do plano inferior do estrato e $c_p{}'$ representa a velocidade de propagação de onda na direção vertical, que é calculado da seguinte forma:

$$c_p{}' = \sqrt{\frac{E_b^*}{\rho_b}} \tag{2.12}$$

A introdução do parâmetro α na Equação (2.11) prende-se com o facto da rigidez e massa do balastro apenas participarem de maneira parcial no equilíbrio dinâmico do sistema. Como conclui Lombaert et al. [21, 25] , neste trabalho, após atender a diferentes propostas apresentadas na bibliografia, o valor de α foi considerado igual a 0,5.

Ao fazer o acoplamento das Equações (2.9), (2.10) e (2.11) e fazendo a transformação para o domínio do número de onda – frequência é possível obter os deslocamentos verticais u_r e u_s , relativos aos diferentes graus de liberdade na via-férrea, como demonstrado na Equação (2.13).

$$\begin{bmatrix} EIk_1^4 + k_p^* - \omega^2 m_r & -k_p^* & 0 \\ -k_p^* & k_p^* + \frac{2\omega E_b^* b\alpha}{tg\left(\frac{\omega}{c_p}h\right)c_p{}'} - \omega^2 m_s & \frac{2\omega E_b^* b\alpha}{tg\left(\frac{\omega}{c_p{}'}h\right)c_p{}'} \\ 0 & -\frac{2\omega E_b^* b\alpha}{tg\left(\frac{\omega}{c_p}h\right)c_p{}'} & \frac{2\omega E_b^* b\alpha}{tg\left(\frac{\omega}{c_p{}'}h\right)c_p{}'} + k_{eq} \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \tilde{u}_r(k_1,\omega) \\ \tilde{u}_s(k_1,\omega) \\ \tilde{u}_{bb}(k_1,\omega) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \tilde{P}(k_1,\omega) \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \tag{2.13}$$

2.4 MODELAÇÃO DO VEÍCULO

Considera-se um comboio como sendo um conjunto de veículos (carruagens) podendo estar agrupados em diferentes configurações. Segundo o Eurocódigo 1 [27], o comboio de passageiros pode ser configurado de três maneiras diferentes, sendo elas:

i. Convencionais, cada carruagem apoiada em dois bogies, cada bogie tendo dois eixos (Figura 2.4 a).

ii. Articulados, em que carruagens consecutivas dividem o mesmo bogie de dois eixos, centrado com a articulação entre carruagens (Figura 2.4 b).

iii. Regulares, articulação entre carruagens existe, na qual o apoio é garantido apenas por um eixo (Figura 2.4 c).

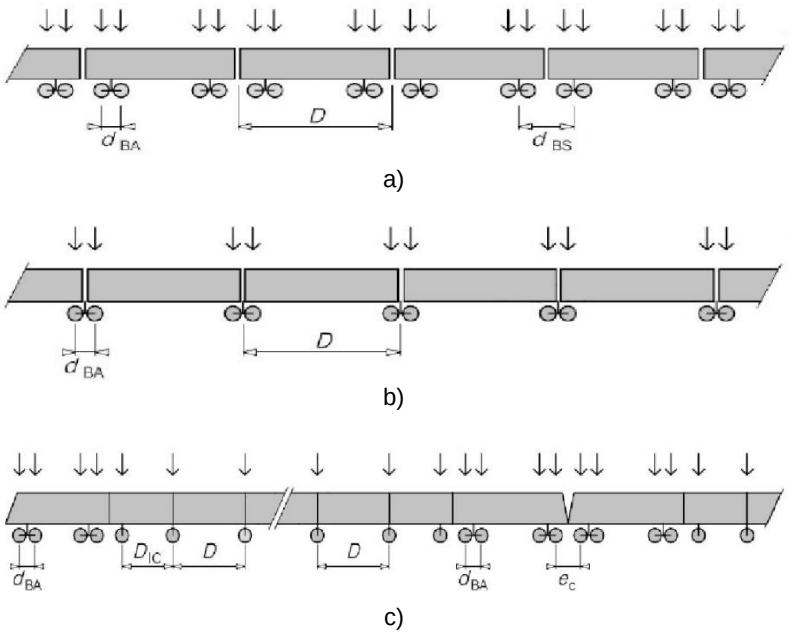


Figura 2.4 - Tipos de comboios na rede europeia de alta velocidade: a) convencional; b) articulado; c) regular (adaptado de [9])

Os veículos ferroviários são simulados por modelos 2D ou 3D. A escolha do modelo para simulação depende da análise a realizar. No caso em estudo, ou seja, uma análise 2D, o comboio pode ser modelado por uma associação de modelos elementares que representam cada meio eixo do comboio, sem qualquer ligação entre eles, ou um modelo que caracteriza a totalidade ou uma parte do veículo ferroviário. A simulação 3D é complexa, sendo considerada usualmente para a análise do comportamento dinâmico do veículo ferroviário e das vibrações transferidas aos passageiros durante a circulação.

Neste trabalho, considera-se que o modelo convencional através de massas discretas, molas e amortecedores é considerado suficiente pois tem revelado em estudos anteriores, que é adequado às finalidades do estudo [28-30]. O modelo usado neste estudo é o apresentado na Figura 2.5. No entanto, para outro tipo de estudo, por exemplo, quando se trata da segurança da circulação ou da análise de conforto é

necessário usar modelos mais complexos, tais como os modelos 3D que têm sido desenvolvidos nos últimos anos.[13-17]

Relativamente ao modelo mais simples constituído por massas discretas, molas e amortecedores apresenta-se na Figura 2.5 dois modelos correspondente a um veículo convencional (Fig. 2.4 a) que podem representar um comboio de passageiros e um comboio de mercadorias (vagão Laagrss), em que *k*, *c*, *m* e *I* representam a rigidez, amortecimento, massa concentrada e inércia rotacional, respetivamente. Finalmente, a distância longitudinal é representada por *a*.

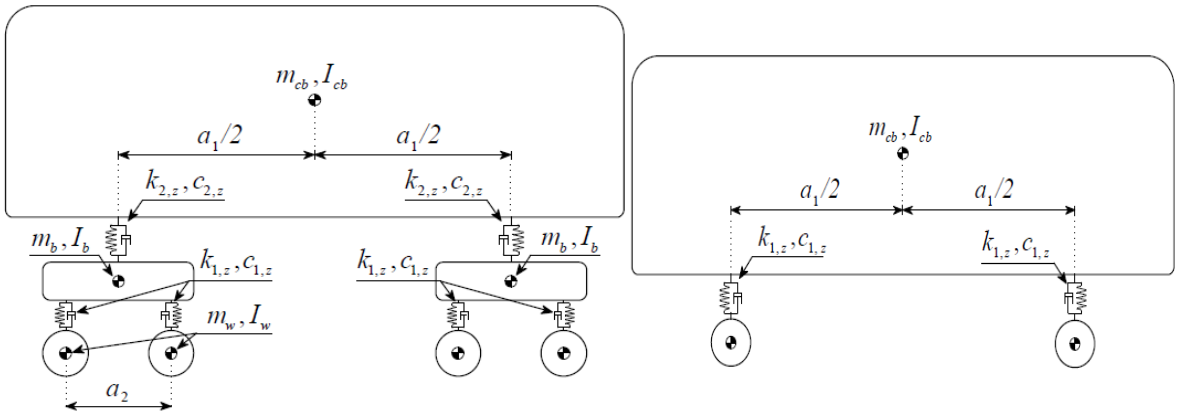


Figura 2.5 – Modelos dinâmicos dos comboios: vista lateral do comboio a) convencional com bogies (p. ex.Alfa Pendular); b) vista lateral do comboio convencional sem bogies (p. ex. comboio de mercadorias) [31]

Enquanto a caixa do veículo Alfa Pendular e os bogies apresentam dois graus de liberdade, o deslocamento vertical e a rotação em torno do eixo normal ao plano do veículo, só o grau de liberdade de translação é admitido para as massas não suspensas. A representação do veículo na Figura 2.5 a) permite verificar que dos dez graus de liberdade considerados para o Alfa, apenas quatro estabelecem o contacto entre veículo e carril.

Numa formulação matricial, o equilíbrio e movimento de um veículo ferroviário é dado por:

$$[M^v]_{10\times10}\{\ddot{u}(t)\} + [C^v]_{10\times10}\{\dot{u}(t)\} + [K^v]_{10\times10}\{u(t)\} = \begin{Bmatrix} \{0\}_{10-4} \\ -\{N(t)\}_4 \end{Bmatrix} \quad (2.14)$$

sendo que $[M^v]$, $[C^v]$, $[K^v]$ representam as matrizes de massa, amortecimento e rigidez do comboio, respetivamente. $\{u\}$ agrupa os movimentos associados aos graus de liberdade, e $\{N\}$ representa as forças de interação entre veículo e via.

No domínio da frequência a condição de equilíbrio e movimento do comboio, é representada da seguinte forma:

$$([K^v] - \Omega^2[M^v])\{u(\Omega)\} = \begin{Bmatrix} \{0\}_6 \\ -\{N(\Omega)\}_4 \end{Bmatrix} \quad (2.15)$$

sendo Ω a frequência.

No domínio da frequência, a matriz de amortecimento $[C^v]$ é excluída porque se considera a rigidez complexa para a caracterização do comportamento das suspensões primária e secundária do veículo que

inclui já o amortecimento, o que simplifica a formulação. Na Equação (2.15), a matriz de rigidez, $[K^v]$ é dada por:

$$[K^v] = \begin{bmatrix} 2k_s^* & 0 & -k_s^* & 0 & -k_s^* & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2k_s^* lb^2 & -k_s^* lb & 0 & k_s^* lb & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -k_s^* & -k_s^* lb & k_s^* + 2k_p^* & 0 & 0 & 0 & -k_p^* & -k_p^* & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2k_p^* lw^2 & 0 & 0 & -k_p^* lr & k_p^* lr & 0 & 0 \\ -k_s^* & k_s^* lb & 0 & 0 & k_s^* + 2k_p^* & 0 & 0 & 0 & -k_p^* & -k_p^* \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2k_p^* lr^2 & 0 & 0 & -k_p^* lr & k_p^* lr \\ 0 & 0 & -k_p^* & -k_p^* lr & 0 & 0 & k_p^* & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -k_p^* & k_p^* lr & 0 & 0 & 0 & k_p^* & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -k_p^* & -k_p^* lr & 0 & 0 & k_p^* & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -k_p^* & k_p^* lr & 0 & 0 & 0 & k_p^* \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

sendo que k_p^* e k_s^* são a rigidez complexa da suspensão primária e a rigidez complexa da suspensão secundária, respetivamente. A metade da distância entre centros de gravidade dos bogies é dada por *lb* e a metade da distância entre eixos que partilham o mesmo bogie é dada por *lr*. O conjunto de mola-amortecedor apresentado no modelo do comboio são baseados num modelo de amortecimento viscoso, sendo k_p e k_s dados por:

$$k_p^* = k_p + i\Omega c_p \quad (2.17)$$

$$k_s^* = k_s + i\Omega c_s \quad (2.18)$$

Em que k_p e k_s são a rigidezes das molas constituintes das suspensões e c_p e c_s correspondem ao amortecimento viscoso atribuído pelos amortecedores às molas de suspensão. Indica-se que a Equação (2.16) é apenas aplicável para o Alfa Pendular.

2.5 MODELAÇÃO DA INTERAÇÃO VIA-VEÍCULO

Para a modelação da interação comboio-carril é necessário o cumprimento dos requisitos de compatibilidade de deslocamentos e as condições de equilíbrio nos pontos de contacto, entre o material circulante e a via. Esta modelação de interação entre a via e o veículo é linear, não havendo consideração de perda de contacto da interação entre a roda e o carril, ou de elementos com comportamento não linear.

Como referido anteriormente, o modelo do veículo 2D é o modelo adotado neste estudo, considerando-se apenas o movimento vertical do comboio, ou seja, as cargas dinâmicas induzidas pelo movimento do comboio em direções que não as verticais não são consideradas. O requisito de compatibilidade de deslocamentos implica respeitar, em qualquer instante temporal, a Equação (2.19):

$$u_{c,i} = u_r(x = ct + a_i) + \Delta u\left(t + \frac{a_i}{c}\right) + \frac{P_i(t)}{K_h} \quad (2.19)$$

onde $u_{c,i}$ representa os deslocamentos verticais do ponto de contacto i do veículo, u_r representa o deslocamento vertical do carril no ponto de contacto i, Δu é o desnível do carril, t é o tempo, a_i é a localização do ponto de contacto i em $t = 0\ s$, e c é a velocidade do veículo. Note-se que, na presente abordagem, apenas a irregularidade de via é tida em conta como uma fonte dinâmica de excitação. O último

termo da Equação (2.19) tem em conta a deformação hertziana no contacto roda-carril, onde K_h é a rigidez linearizada de contacto e P_i é a carga de interação dinâmica desenvolvida no ponto de contacto i. O problema de contacto entre a roda e o carril é não linear, no entanto, para evitar resolver um problema não linear, procede-se à linearização da rigidez de contacto considerando-se como simplificação, que a carga de interação dinâmica corresponde a carga estática *Q* transmitida pelo rodado, como indica a Equação (2.20):

$$K_h = \sqrt[3]{\frac{3r_{eq}QE^2}{2(1-\nu^2)^2}} \tag{2.20}$$

Na Equação (2.20), r_{eq} é o raio de curvatura equivalente, Q é a carga de cada roda do comboio (Newton), E é o módulo de elasticidade de Young considerado 200 GPa e ν é o coeficiente de Poisson.

Note-se que a linearização não deverá ser considerada quando há níveis elevados e variações significativas de carga de interação dinâmica.

2.6 MODELAÇÃO DOS PERFIS DE IRREGULARIDADES

A carga transmitida pelo veículo em movimento à via depende muito da irregularidade do perfil da via, aumentando ou diminuindo, dependendo do perfil. A irregularidade da via é caracterizada geometricamente em termos de: 1) variação do alinhamento da via; 2) variação de nivelamento longitudinal da via; 3) variação de nivelamento transversal da via; 4) variação da bitola; 5) empeno da via. Tendo em conta o objetivo deste trabalho, basta ter em conta as irregularidades verticais de cada carril, ou seja, o nivelamento longitudinal da via.

As irregularidades reais da via são medidas por um veículo de inspeção. Este tipo de veículo ferroviário é composto por um sistema ótico colocado numa plataforma inercial, para a medição da irregularidade do perfil longitudinal da via, circulando a uma velocidade máxima que em Portugal é de 120 km/h [11].

No entanto, na falta do conhecimento de perfis reais de irregularidades, é possível gerá-las artificialmente através de uma metodologia que gera perfis aleatórios dentro de certos parâmetros a partir de formulações matemáticas baseadas em medições reais.

A Administração Ferroviária Francesa (SNCF), apresenta a função de densidade espectral de potência do perfil de irregularidades para gerar irregularidades verticais da via.

$$S_{rzz}(k1) = \frac{10^{-6}A}{\left(1+\frac{k_1}{k_0}\right)^3} \tag{2.21}$$

em que *A* é o parâmetro de qualidade geométrica da via, sendo que quando o valor é menor que 160 é considerado uma via de boa qualidade e acima de 550 é considerado uma via de má qualidade. k_0 e k_1 são o número de onda mínimo e o número de onda máximo, respetivamente. Segundo a SNCF, esta função constitui uma boa gama de resultados quando o comprimento de onda é compreendido entre 2 m a 40 m. O valor mínimo do número de onda k_0 é igual a 0,307 rad/m, sendo calculado da seguinte forma:

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_{máx}} \tag{2.22}$$

Já a FRA (Autoridade Ferroviária Norte-Americana) apresenta uma proposta mais detalhada na qual é considerada uma classificação por classes de qualidade de via. Nesta proposta, a Autoridade Ferroviária Norte-Americana propõe a Equação (2.23):

$$S_{rzz}(k1) = \frac{10^{-7} A k_3^2 (k_1^2 + k_2^2)}{k_1^4 (k_1^2 + k_3^2)} \tag{2.23}$$

Em que k_2 e k_3 representam frequências-padrão e são constantes tendo como valores 0,1464 rad/m e 0,8168 rad/m, respetivamente. Os valores de *A* que retratam as classes das vias são indicados no quadro 2.1.

Quadro 2.1 – Valores de A propostos pela FRA [1]

Classe	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
A (m^3/rad)	660,079	376,229	208,841	116,856	65,929	37,505

Segundo o estudo elaborado por Claus & Schielhen [32], várias medições de irregularidades da via mostram que as densidades espectrais de potência podem ser padronizadas, tendo a expressão da proposta a seguinte configuração:

$$\frac{A k_c^2}{(k_r^2 + k_1^2)(k_c^2 + k_1^2)} \tag{2.24}$$

onde k_c e k_r são constantes, de valor 0,82460 rad/m e 0,0206 rad/m, respetivamente. Dependendo da qualidade da via, o valor de *A* varia, sendo que quando a via é de boa qualidade, *A* toma valores de 0,59933 x 10^{-6} rad.m, e no caso contrário toma valores de 1,58610 x 10^{-6} rad.m.

2.7 ESTUDO PARAMÉTRICO

2.7.1 OBJETIVO E DADOS

O estudo paramétrico que se apresenta nesta secção tem como objetivo avaliar: 1) a influência da rigidez de contacto; 2) a influência da velocidade; 3) a influência dos perfis de irregularidades; 4) a influência da rigidez e amortecimento das palmilhas na carga dinâmica sobre a via. Para o efeito, considera-se um programa desenvolvido na plataforma Matlab por Costa [9], sendo que a interação via-veículo é feita através de um modelo computacional independente, podendo ser adaptado a qualquer modelo de comboio para a simulação da resposta dinâmica.

De modo sucinto, indica-se no diagrama da Figura 2.6, as fases de cálculo do software utilizado.

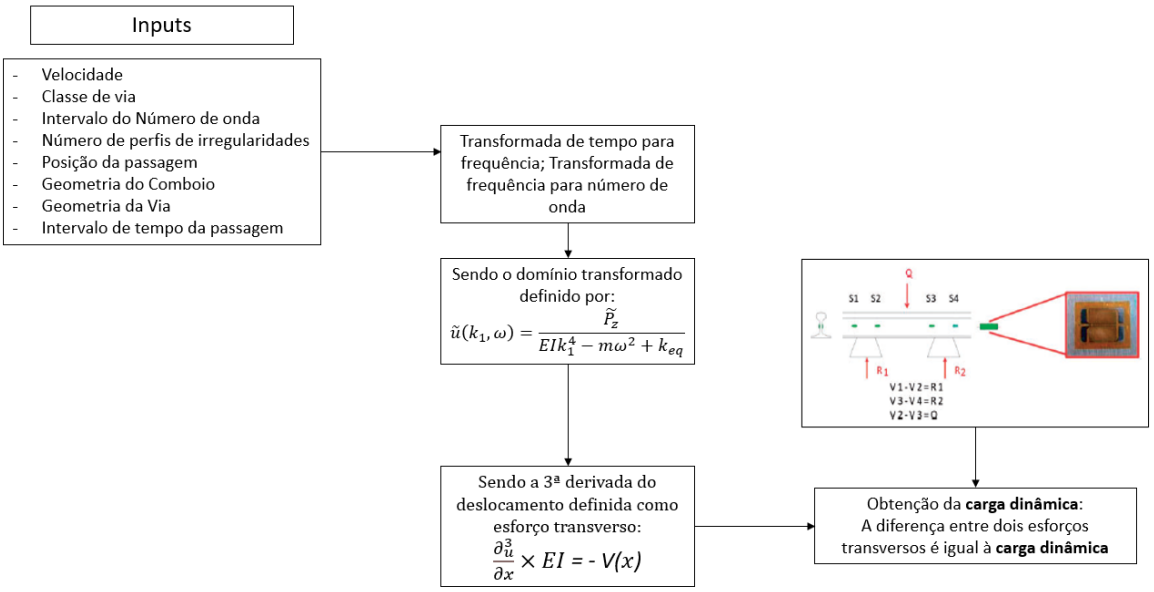


Figura 2.6 – Processo de cálculo do software

Para este estudo, foram adotados dois modelos diferentes de comboio, nomeadamente um comboio de passageiros (Alfa Pendular) e um comboio de mercadorias (Vagão Laagrss). Ambos os modelos indicados foram desenvolvidos por Neto et al. [16] e adaptados por Mosleh et al. [1]. Estes modelos foram desenvolvidos a simular as suspensões que ligam os diferentes componentes dos comboios, nomeadamente a caixa do comboio, os bogies (no caso do Alfa Pendular) e os rodados. A Figura 2.5 mostra os modelos dinâmicos adotados para cada comboio, em que *k*, *c*, *m* e *I* representam a rigidez, amortecimento, massa concentrada e inércia rotativa, respetivamente. Finalmente, a distância longitudinal é representada por *a*. Note-se que o comboio de mercadorias (Figura 2.5 b) contém apenas um nível de suspensão sem qualquer bogie. As propriedades geométricas e mecânicas de ambos os comboios são apresentados no Quadro 2.2. Para simplificar as análises numéricas, apenas uma carruagem foi considerada nos cálculos.

Sobre a via-férrea, adota-se uma via balastrada com as propriedades mecânicas da via usuais cujos valores podem ser consultados no Quadro 2.3.

Considera-se, neste estudo paramétrico que o sistema de pesagem dinâmica está instalado num troço reto da via de determinada extensão (p. ex. 100 m), e sem interferências nas proximidades, permitindo a passagem de comboios a uma velocidade constante. Da extensão da via, seleciona-se um troço de 3 m para fazer o estudo da pesagem dinâmica, dado que, posteriormente no Capítulo 3 na avaliação da metodologia de pesagem dinâmica, se considera um conjunto de seis pares de extensómetros espaçados por 0,6 m. Para explicar melhor o processo, é ilustrado na Figura 2.7 o processo de passagem de um comboio Alfa Pendular pelos sensores.

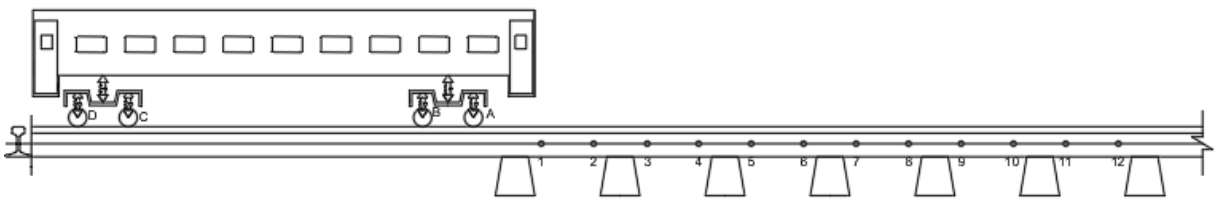


Figura 2.7 – Esquema da passagem do Alfa Pendular pelo sistema de pesagem constituído por extensómetros

Refere-se ainda que a cada classe de qualidade de via considerada no cálculo corresponde a um e só um perfil de irregularidades para cada comboio, independentemente da velocidade a que circula. Por simplificação, ambos os carris têm o mesmo perfil de via, dado que, no presente capítulo, se pretende relacionar a influência da carga dinâmica com parâmetros relacionados com a via e o veículo. É fixado o perfil de irregularidades de maneira a todos os casos apenas diferirem na velocidade e tempo de passagem consequentemente. Assim, os resultados são mais concretos e realmente só demonstra a influência da velocidade na passagem por diferentes tipos de qualidade de via. Este processo foi realizado tanto para o comboio de alta velocidade como para o comboio de mercadorias, sendo possível distinguir os seus parâmetros com auxílio do Quadro 2.2.

Para a geração dos perfis de irregularidade, foi seguida a modelação indicada no capítulo 2.6, tendo em conta os parâmetros do Quadro 2.1. Na Figura 2.8, indicam-se os perfis de irregularidades para as diferentes classes de qualidade de via. A inclusão das classes 7 e 8 no estudo foi de forma a poder verificar os valores futuros do estudo em comparação aos dados numéricos, visto que a via em estudo de caso real no Capítulo 3 tem uma qualidade geométrica superior à classe 6 do Quadro 2.1.

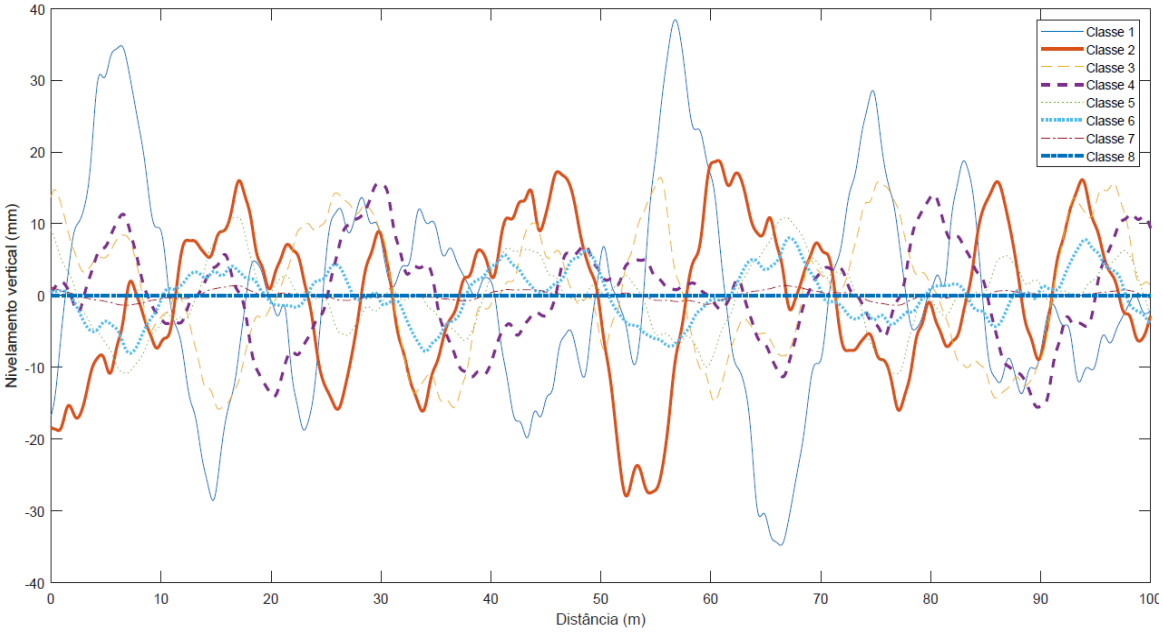


Figura 2.8 – Perfis de irregularidade com 100 m de extensão

Quadro 2.2 – Propriedades geométricas e mecânicas dos comboios [31]

Propriedades		Alfa Pendular	Comboio de Mercadorias
Caixa	Massa - Mc (kg)	35640	41100
	Inércia - Ic (kg.m2)	1475000	673322,46
Suspensão secundária	Rigidez - k2 (N/m)	734832	0
	Amortecimento - c2 (Ns/m)	35000	0
Bogie	Massa - Mb (kg)	2829	16739
	Inércia - Ic (kg.m2)	1931.49	0
Suspensão primária	Rigidez - k1 (N/m)	1652820	1860000
	Amortecimento - c1 (Ns/m)	16739	16739
Eixo	Massa - M_r(kg)	1711	1246,52
	Carga por eixo - P (N)	130000	214000
Dimensões	Comprimento do bogie - (m)	2,7	0
	Distância entre bogies - (m)	19	6

Quadro 2.3 – Propriedades mecânicas do modelo da via [31]

Carril (UIC-60)					
A ($\mathbf{m^2}$)	ρ (Kg/m^3)	I (m^4)	v (-)	E(N/m^2)	
0,01534	7850	6,11E-05	0,3	2E+11	
Palmilhas		**Travessas**	**Balastro**	**Fundação**	
$\mathbf{c_p}$ (N s/m)	k_p (N/m)	ρ (Kg/m)	p (Kg/m^3)	G (MPa)	ρ (Kg/m^3)
30000	2E+08	525	1550	20	1900

Os dados referidos nos Quadros 2.2 e 2.3 representam dados mecânicos e geométricos dos comboios e da via em estudo. Estes valores são utilizados para o cálculo da carga dinâmica e foram adaptados de Mosleh et al. [31]. Os valores que se encontram nos Quadros 2.2 e 2.3 são valores retirados de comboios reais (Alfa Pendular e comboio de mercadorias) e de uma via-férrea real de forma a obter resultados próximos a casos realísticos.

2.7.2 INFLUÊNCIA DA RIGIDEZ DE CONTACTO

Para avaliar a influência da rigidez de contacto - K_h consideram-se, para cada comboio, três valores de K_h, calculados a partir da sua carga estática (65 kN e 107 kN, respetivamente para o Alfa Pendular e para o comboio de mercadorias) e dos valores máximo e mínimo da carga dinâmica calculada com um perfil de irregularidades pré-definido da classe 1 a 7 e velocidades de 5 m/s, 10 m/s, 20 m/s e 40 m/s. Para calcular K_h, segundo a Equação (2.20), foi considerado que as rodas dos dois tipos de comboio têm uma superfície de contacto circular com curvatura do carril igual a 0,30 m e o raio da roda igual a 0,42 m. Sendo assim, o raio de curvatura equivalente pode ser obtido por $r_{eq} = \sqrt{0{,}3 \times 0{,}42}$ e vale 0,355 m. Foi considerado um coeficiente de Poisson igual a $\nu = 0{,}3$. [1]

No esquema da Figura 2.9 mostra-se a abordagem utilizada para avaliar as cargas dinâmicas para diferentes rigidezes de contacto.

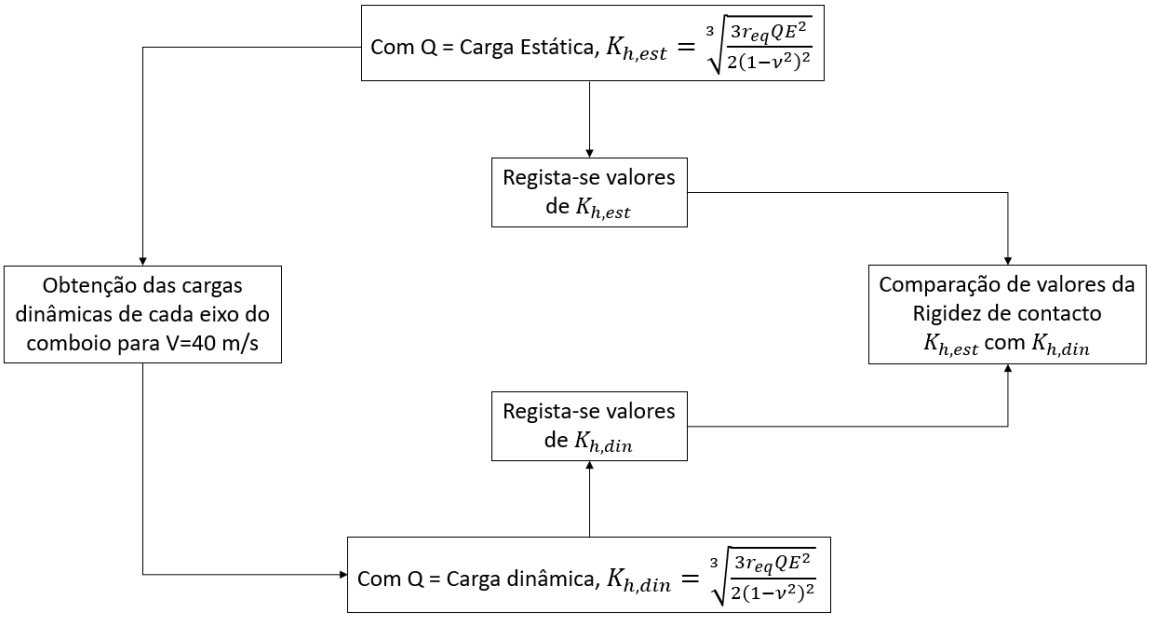


Figura 2.9 – Identificação Rigidez de contacto dinâmica: procedimento

Para o cálculo da influência da rigidez de contacto, foi considerada, como ponto de partida, a carga estática na Equação (2.20), obtendo-se um valor de $K_{h,est}$. Depois, com os valores máximo e mínimo da carga dinâmica de uma roda para cada velocidade em cada classe, resultantes do cálculo com $K_{h,est}$, obtém-se $K_{h,din+}$ e $K_{h,din-}$, com os quais se realiza novo cálculo dinâmico.

Para a análise da influência da rigidez de contacto na carga dinâmica, considerou-se o comboio Alfa Pendular a circular à velocidade 40 m/s numa via de classe 2. Como resultado de cálculo, o eixo com maior carga dinâmica registou o valor de 166482,84 N, enquanto o valor mínimo foi de 143665,84 N. Dividindo estes valores a metade, é obtido o valor da carga dinâmica máxima e mínima por roda na velocidade e classe estudada. Ao considerar estes valores na expressão (2.20) obtém-se um valor de fazer essa substituição obtém-se um valor de $K_{h,din+}$ de 1 288 836 236,04 N/m e $K_{h,din-}$ de 1 227 041 033,25 N/m. A diferença percentual entre os dois valores é de 5 %, prevendo-se, portanto, que a carga dinâmica, para os níveis de irregularidade considerados, não varie significativamente com a rigidez dinâmica de contacto.

Este estudo foi efetuado para a velocidade mais elevada, pois é onde se registou maiores diferenças de valores nas cargas dinâmicas, ou seja, onde a variação da rigidez de contacto é maior. Após o cálculo da rigidez de contacto para as cargas dinâmicas máximas e mínimas (Quadro 2.4), optou-se por recalcular a carga dinâmica com a rigidez de contacto do Quadro 2.4 de forma a avaliar a diferença da carga dinâmica quando se usa um conjunto de rigidezes diferente.

Quadro 2.4 – Rigidez de contacto para cargas dinâmicas máximas e mínimas

Alfa Pendular			**Comboio Mercadorias**		
Classe	**Kh**	**N/m**	**Classe**	**Kh**	**N/m**
Classe 1	Máximo	1282116803,74	**Classe 1**	Máximo	1442767154,83
	Mínimo	1182784758,20		Mínimo	1438198681,21
Classe 2	Máximo	1288836236,04	**Classe 2**	Máximo	1417415818,63
	Mínimo	1227041033,25		Mínimo	1414572684,23
Classe 3	Máximo	1232222749,23	**Classe 3**	Máximo	1419758507,85
	Mínimo	1205231550,01		Mínimo	1417439701,63
Classe 4	Máximo	1224520023,06	**Classe 4**	Máximo	1396286012,82
	Mínimo	1208715441,23		Mínimo	1396187652,11
Classe 5	Máximo	1197075437,82	**Classe 5**	Máximo	1404865135,73
	Mínimo	1177549240,02		Mínimo	1402892179,66
Classe 6	Máximo	1209010103,19	**Classe 6**	Máximo	1403944939,82
	Mínimo	1176253920,22		Mínimo	1402425742,83
Classe 7	Máximo	1187987940,97	**Classe 7**	Máximo	1402322477,82
	Mínimo	1185455628,43		Mínimo	1402130978,52

No Quadro 2.5, a cada valor corresponde a carga dinâmica de um eixo, sendo o primeiro valor de cada classe a carga dinâmica do primeiro eixo da passagem do veículo, até ao quarto valor de cada classe que corresponde à carga dinâmica do último eixo da passagem do veículo ferroviário sobre a via, processo esse demonstrado na Figura 2.7.

Quadro 2.5 – Carga dinâmica média para diferentes valores de rigidez de contacto (Alfa Pendular)

	$K_{h,din-}$	$K_{h,din+}$	$K_{h,est}$	**Diferença percentual**
Classe 1	128675,17	128666,17	128674,77	0,0067%
	147816,57	147815,28	147816,51	0,0008%
	146792,50	146791,26	146792,45	0,0008%
	163891,93	163904,57	163892,48	0,0074%
Classe 2	157252,06	157245,16	157256,95	0,0075%
	166479,99	166475,92	166482,84	0,0042%
	146881,11	146875,69	146884,95	0,0063%
	143665,29	143664,45	143665,84	0,0010%
Classe 3	136356,03	136354,87	136356,84	0,0014%
	136139,62	136138,21	136140,62	0,0018%
	141964,29	141961,63	141966,16	0,0032%
	145492,97	145492,06	145493,61	0,0011%
Classe 4	142779,67	142777,92	142782,15	0,0030%
	139192,95	139192,54	139193,53	0,0007%
	137327,08	137328,78	137324,64	0,0030%
	138969,66	138969,38	138970,05	0,0005%
Classe 5	133395,63	133395,12	133395,39	0,0002%
	126974,26	126972,91	126973,62	0,0006%
	127637,53	127636,66	127637,11	0,0004%
	127708,79	127705,07	127707,01	0,0015%
Classe 6	126554,52	126556,15	126555,06	0,0009%
	126684,58	126681,70	126683,64	0,0015%
	133114,10	133113,81	133114,00	0,0001%
	137425,71	137423,84	137425,10	0,0009%
Classe 7	130372,33	130372,33	130380,41	0,0062%
	129526,44	129526,43	129548,43	0,0170%
	129641,37	129641,37	129654,10	0,0098%
	129632,44	129632,39	129678,95	0,0359%

No Quadro 2.6, a cada valor corresponde a carga dinâmica de um eixo, sendo o primeiro valor de cada classe a carga dinâmica do primeiro eixo da passagem do veículo, e o segundo valor de cada classe correspondente à carga dinâmica do segundo e último eixo da passagem do veículo ferroviário sobre a via.

Quadro 2.6 – Carga dinâmica média para diferentes valores de rigidez de contacto (comboio de mercadorias)

	$K_{h,din-}$	$K_{h,din+}$	$K_{h,est}$	**Diferença percentual**
Classe 1	231321,26	231320,14	231330,51	0,0045%
	233533,87	233532,89	233542,00	0,0039%
Classe 2	221445,85	221445,80	221446,12	0,0001%
	220117,16	220117,36	220116,23	0,0005%
Classe 3	221457,27	221457,26	221457,32	0,0000%
	222545,73	222545,69	222545,95	0,0001%
Classe 4	211689,39	211689,39	211689,55	0,0001%
	211644,60	211644,60	211644,82	0,0001%
Classe 5	214708,41	214708,36	214708,45	0,0000%
	215615,58	215615,57	215615,59	0,0000%
Classe 6	214494,34	214494,31	214494,36	0,0000%
	215192,18	215192,17	215192,18	0,0000%
Classe 7	214362,16	214362,16	214362,18	0,0000%
	214447,78	214447,78	214447,84	0,0000%

Como é possível verificar nos Quadros 2.5 e 2.6, após aplicação das novas rigidezes de contacto calculadas no Quadro 2.4, as cargas dinâmicas por eixo não sofreram alterações significativas para justificar um avanço no estudo da influência da rigidez de contacto para velocidades menores a 40 m/s. Sendo assim, a linearização apresentada na modelação da interação via – veículo é aceitável para este estudo paramétrico.

2.7.3 INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE

Nesta secção é avaliada a influência da velocidade de circulação dos dois comboios nas cargas dinâmicas sobre a via. Adotou-se as velocidades dos comboios de 5 m/s, 10 m/s, 20 m/s e 40 m/s, correspondendo a 18 km/h, 36 km/h, 72 km/h e 144 km/h, respetivamente. Esta gama de velocidades foi definida para conseguir o efeito da velocidade na carga dinâmica em diferentes cenários de circulação.

Neste estudo, consideram-se todas as classes da via indicadas pelo FRA e que estão representadas no Quadro 2.1. A essas classes acrescentou-se a classe 7 que tem um A igual a 1,025 m^3/rad e a classe 8, que é considerada uma via perfeita (sem irregularidades), em que A= 0 m^3/rad.

Relembrando, o comboio Alfa Pendular tem dois eixos, cada eixo com duas rodas, e o comboio de mercadorias apenas tem um eixo com duas rodas. Como é possível verificar no Quadro 2.2, a carga por eixo é a carga que atua sobre a via quando o comboio se encontra em estado de repouso.

Alfa Pendular

No Quadro 2.7 e na Figura 2.10 são demonstrados os valores da carga dinâmica após uma passagem do Alfa Pendular. Note-se que no caso do Alfa Pendular, foi avaliado o troço de 25 m até os 28 m do perfil de 100 m indicado na Figura 2.8.

Quadro 2.7 – Somatório de carga dinâmica (N) dos quatro eixos do comboio Alfa Pendular

Alfa Pendular	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5	Classe 6	Classe 7	Classe 8
V=5 m/s	520222	523211	520692	521152	520788	520603	520400	520453
V=10 m/s	521634	521634	519515	524367	522632	519762	520066	520456
V=20 m/s	539073	551563	536824	531677	514697	515752	519050	520486
V=40 m/s	587176	614291	559957	558270	515713	523778	518462	520650

De forma a avaliar a influência da velocidade no veículo completo, fez-se a soma da carga dinâmica dos quatro eixos do Alfa Pendular, sendo os valores do Quadro 2.7 e da Figura 2.10 correspondentes a essa carga com grandeza em Newton.

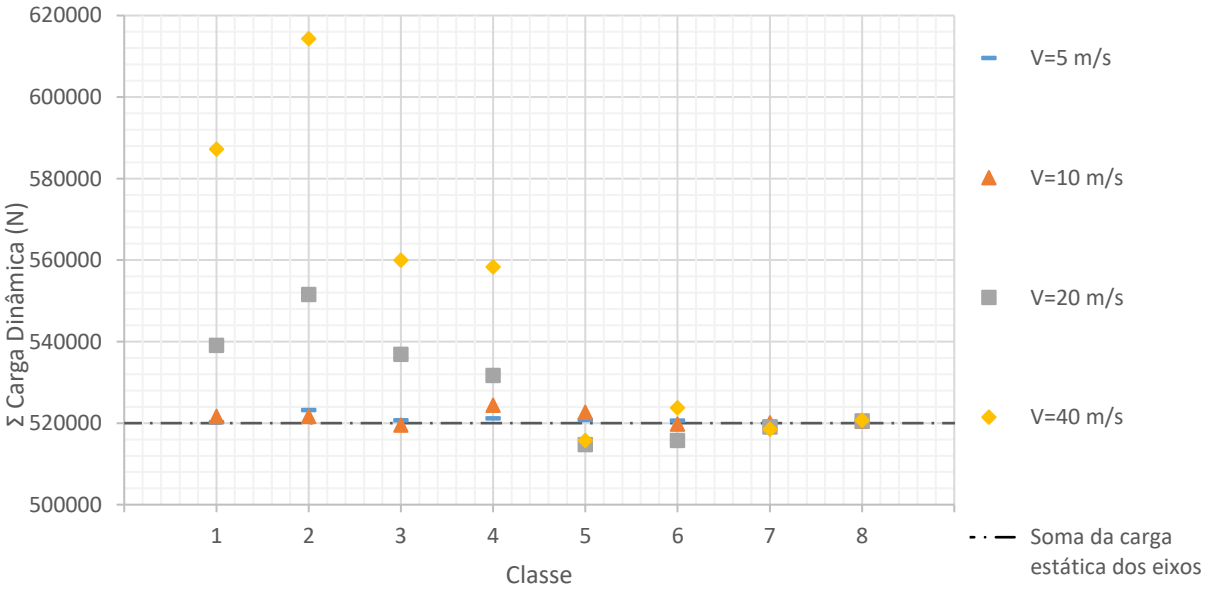


Figura 2.10 – Influência da velocidade na carga dinâmica (Alfa Pendular)

Observando os valores do Quadro 2.7 e da Figura 2.10, é possível verificar que a velocidade, quando igual a 40 m/s, tem uma influência significativa na carga dinâmica quando o comboio efetua uma passagem pelas classes 1 a 4 de via que correspondem a 587176 N, 614291 N, 559957 N, 558270 N, respetivamente. Comparando estes valores de carga dinâmica com o valor da soma da carga estática dos

eixos (520000 N), há uma diferença percentual de 11,44 %, 15,35 %, 7,14 % e 6,86 %, respetivamente para as classes 1, 2, 3 e 4. Teoricamente, para o mesmo modelo de veículo e para a mesma velocidade, quanto pior a qualidade geométrica da via (classe), maior a carga dinâmica transmitida para a via. No entanto, como para este estudo são gerados perfis aleatórios, e são estudados apenas 3 m de via (25 m a 28 m), pode-se ter estudado um troço de via que na classe 2 esteja em piores condições geométricas do que na classe 1 nesse troço curto específico de 3 m. Na seção 2.7.4 será abordado com maior clareza este tema.

Comparando a mesma classe para velocidades diferentes, atente-se no caso mais gravoso correspondente à classe 2. Nesta classe, quando o comboio circulava a 40 m/s, a soma das cargas dinâmicas é 614291 N, enquanto quando este circulava a 20 m/s, a carga dinâmica registada foi 551563 N, correspondendo a uma diferença percentual de 10,21 %. A diferença de 62728 N demonstra que, em vias de qualidade geométrica baixa, a circulação de um comboio de velocidade elevada pode trazer incertezas nas cargas dinâmicas transmitidas à via, podendo futuramente causar estragos à mesma.

Apesar de os valores da soma da carga apresentarem grande variação nas vias de má qualidade, quando a passagem do comboio Alfa Pendular é feita sobre uma via de classe 5 ou superior, a diferença percentual entre a carga estática de dois eixos e a carga dinâmica a 40 m/s é menor, não sendo superior a 1 %. Com base nos valores do Alfa Pendular é notável que a influência da velocidade, é maior nas vias de menor qualidade, e quase nula nas vias de boa qualidade geométrica. Note-se, no entanto, que o modelo de via considerado não tem em conta a posição discreta das palmilhas.

Comboio de Mercadorias

No Quadro 2.8 e na Figura 2.11 são demonstrados os valores da carga dinâmica após uma passagem do comboio de mercadorias. No caso do comboio de mercadorias, foi avaliado o troço de 12 m até os 15 m do perfil de 100 m indicado na Figura 2.8.

Quadro 2.8 –Somatório de carga dinâmica (N) dos dois eixos do comboio de mercadorias

Comboio de Mercadorias	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5	Classe 6	Classe 7	Classe 8
V=5 m/s	428646	428563	428561	428295	428361	428364	428379	428374
V=10 m/s	429567	429270	429189	428097	428330	428339	428413	428377
V=20 m/s	434413	433526	432710	427788	428281	428272	428574	428411
V=40 m/s	464873	441562	444003	441334	430324	429687	428806	428556

De forma a avaliar a influência da velocidade no veículo completo, fez-se a soma da carga dinâmica dos dois eixos do comboio de mercadorias, sendo os valores do Quadro 2.8 e da Figura 2.11 correspondentes a essa carga com grandeza em Newton.

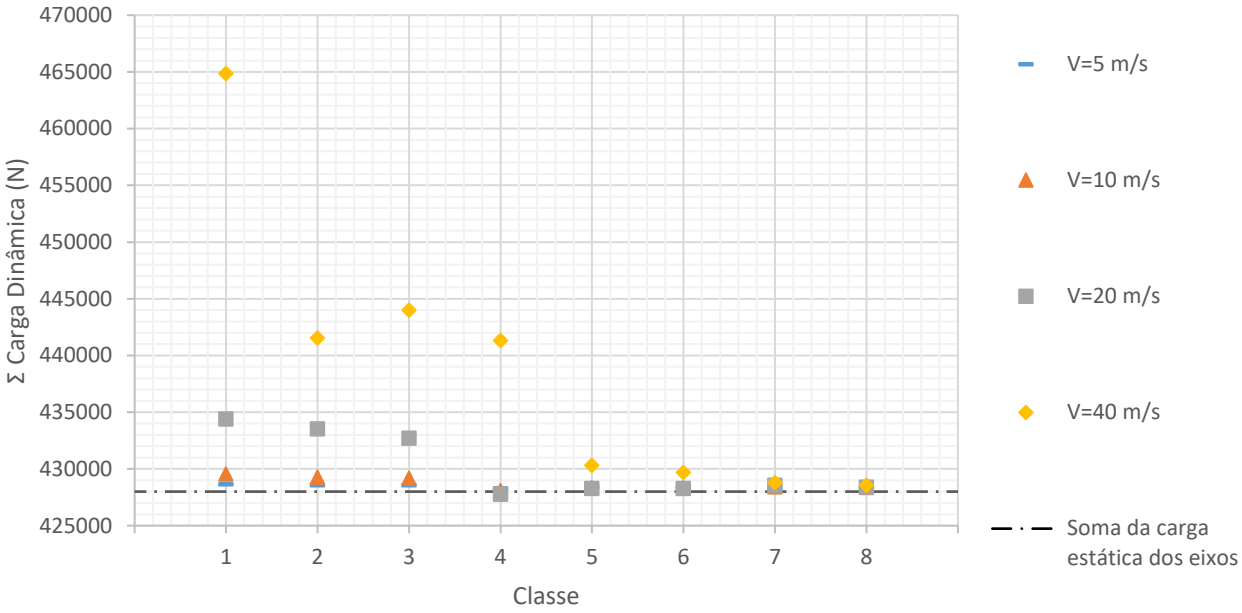


Figura 2.11 – Influência da velocidade na carga dinâmica (comboio de mercadorias)

Avaliando a influência da velocidade na carga dinâmica do comboio de mercadorias, observa-se que os valores de velocidades baixas não alteram significativamente a carga em relação à carga estática do comboio. Como se pode ver na Figura 2.11, as velocidades de 5 m/s e 10 m/s não sofrem alterações significativas independentemente da classe em estudo. A máxima diferença percentual de uma carga dinâmica em relação à carga estática, para as velocidades de 5 m/s e 10 m/s advém da classe 1 e é de 0,15 % e de 0,36 %, respetivamente.

No que diz respeito às duas velocidades mais elevadas (20 m/s e 40 m/s) é possível verificar que existe uma diferença grande nos valores da soma das cargas dinâmicas, como por exemplo a classe 1. Nesta Classe, à velocidade de 40 m/s, o valor da soma das cargas dinâmicas regista 464873 N, que comparando com os 434413 N da soma das cargas dinâmicas do comboio, é uma diferença percentual de 6,55 %. No entanto, no caso do comboio de mercadorias, ocorre o mesmo que no Alfa Pendular, ou seja, à medida que a qualidade da via melhora, a soma das cargas dinâmicas aproxima-se da soma das cargas estáticas do comboio, como é possível ver nas Figuras 2.10 e 2.11.

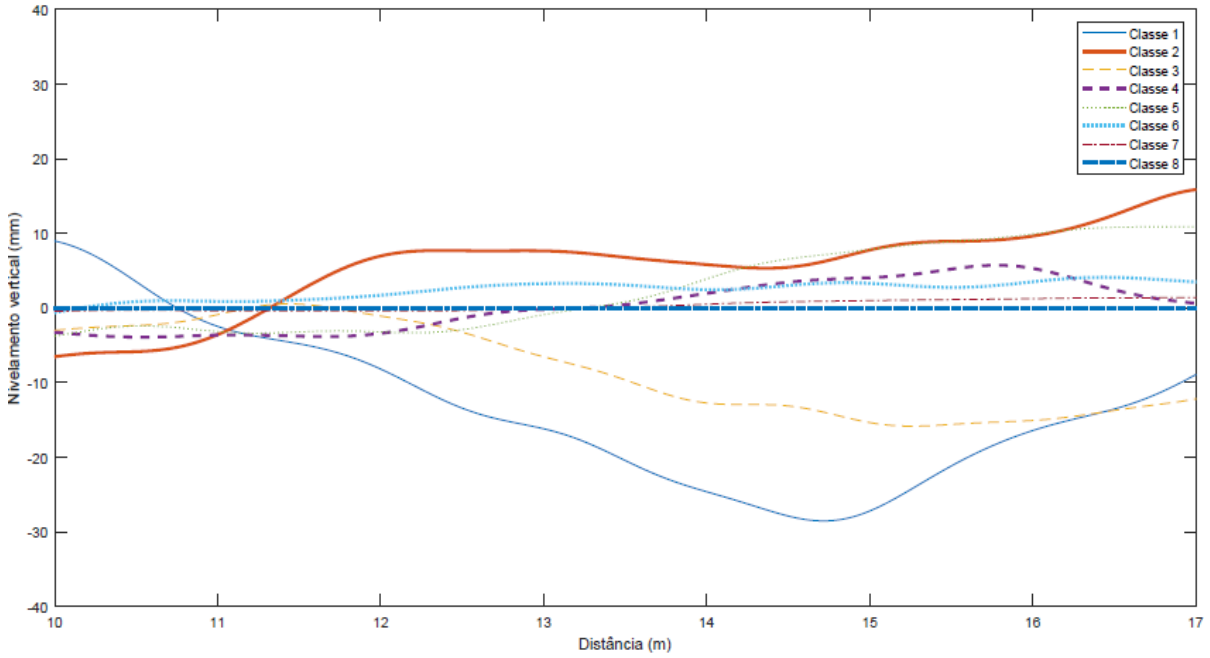
Numa avaliação geral, como é esperado, à medida que a classe é maior, ou seja, a qualidade da via melhora, as cargas dinâmicas vão se aproximando do valor da carga estática do comboio.

2.7.4 INFLUÊNCIA DOS PERFIS DE IRREGULARIDADES

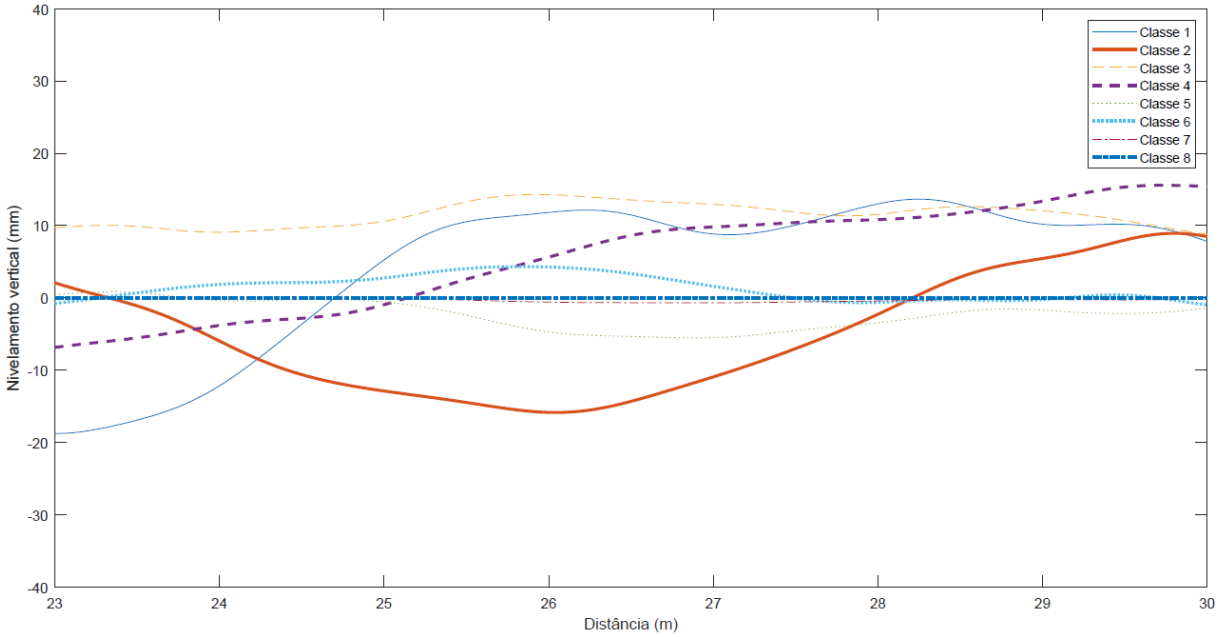
De forma a conseguir avaliar a influência dos perfis de irregularidades com o tempo reduzido do estudo, foi apenas avaliado dois troços de 3 m do mesmo perfil para o comboio Alfa Pendular e outros dois troços de 3 m para o comboio de mercadorias. Dentro dos 100 m de perfil gerados (Figura 2.8), os dois troços usados para avaliação deste parâmetro para o Alfa Pendular foi o troço dos 25 m aos 28 m e o troço dos 40 m aos 43 m. Para o comboio de mercadorias, os dois troços em estudo são dos 12 m aos 15 m e dos 40 m aos 43 m, sendo o último troço comum entre os dois comboios. Para ambos os comboios, foi considerada uma velocidade de 20 m/s na análise.

A estes perfis de irregularidade gerados aleatoriamente, estão associados diversos comprimento de onda entre 1 m e 30 m. Sendo assim, devido ao estudo apenas de 3 m de troço de via, é possível não considerar-se uma "irregularidade completa", no caso de comprimentos de onda superiores a 3 m.

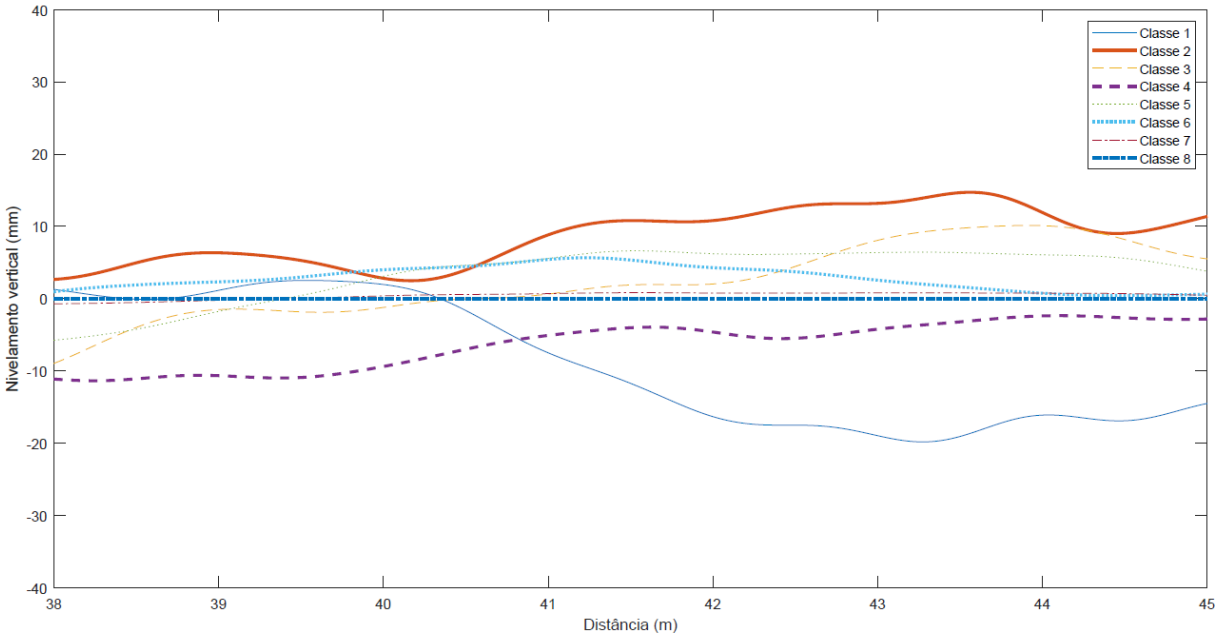
Como é possível verificar na Figura 2.8, há uma grande diferença no perfil de irregularidades comparando classe a classe. Para uma melhor compreensão do estudo, na Figura 2.12 é possível ver uma aproximação da Figura 2.8 nos troços em estudo para o Alfa Pendular e para o comboio de mercadorias.



a)



b)



c)

Figura 2.12 – Pormenor de irregularidade de via: a) troço 12 m a 15 m; b) troço 25 m a 28 m; c) troço 40 m a 43 m

Alfa Pendular

No caso do Alfa Pendular, após o cálculo das cargas dinâmicas nos dois troços em estudo, foi calculado a diferença percentual entre os mesmos eixos, nos troços diferentes. No eixo horizontal do gráfico da Figura 2.13, "Pos 1" significa "Posição 1" indicando que os valores são relativos à passagem do comboio pelo troço de 25 m até 28 m. O mesmo se aplica para "Pos 2", que significa "Posição 2" indicando que os valores são relativos à passagem do comboio pelo troço de 40 m até 43 m. Como é possível verificar

na Figura 2.13, a variação das cargas dinâmicas entre eixos diminui com a melhoria da qualidade geométrica da via, ou seja, com o aumento da classe da via. Com auxílio dos valores do Quadro 2.9 é feita uma análise da variação percentual entre os eixos em cada passagem (entre posição 1 e posição 2).

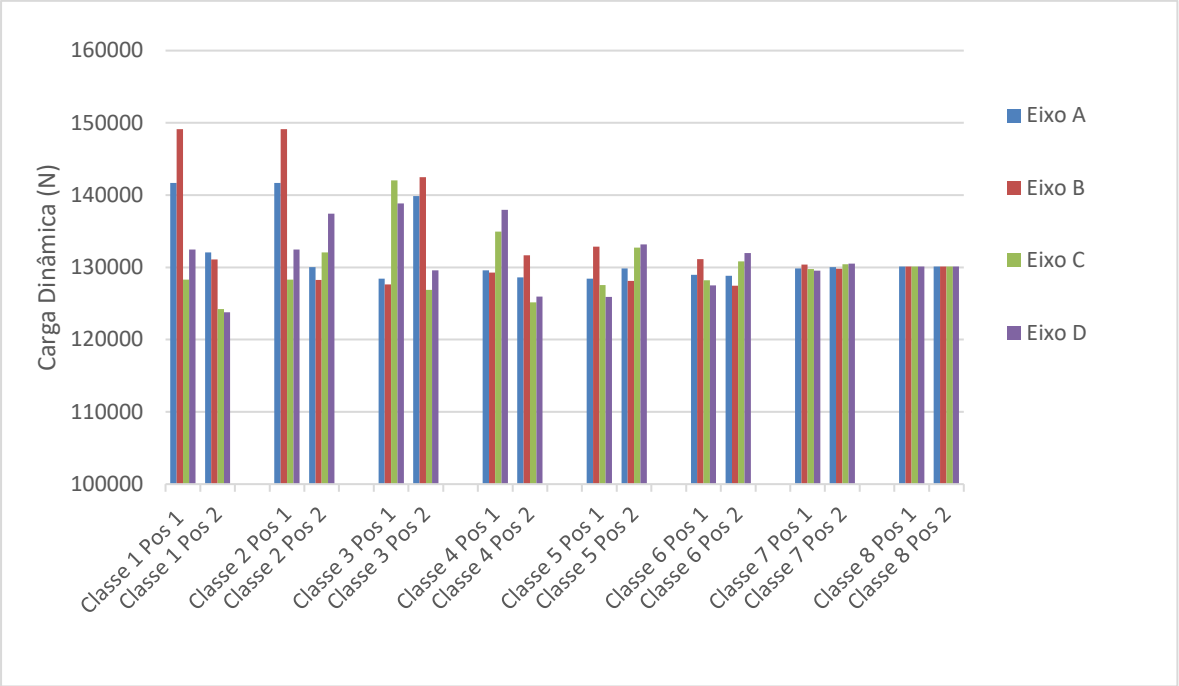


Figura 2.13 –Influência do perfil de irregularidades na carga dinâmica (Alfa Pendular)

Quadro 2.9 – Carga dinâmica média dos eixos do comboio (Alfa Pendular)

Alfa Pendular			Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5	Classe 6	Classe 7	Classe 8
$Q_{méd}$ (N)	Posição 1	Eixo A	141695	141695	128433	129574	128444	128972	129853	130123
		Eixo B	149135	149135	127630	129289	132863	131133	130404	130123
		Eixo C	128288	128288	142022	134931	127553	128198	129761	130122
		Eixo D	132486	132486	138850	137944	125900	127506	129559	130124
	Posição 2	Eixo A	132048	130019	139846	128603	129833	128831	130019	130123
		Eixo B	131090	128270	142480	131682	128127	127468	129810	130123
		Eixo C	124208	132085	126880	125173	132727	130809	130436	130122
		Eixo D	123790	137439	129601	125935	133175	132001	130501	130124

Após análise dos valores do Quadro 2.9, é possível verificar que a maior variação percentual entre eixos é situada na classe 2 no eixo B. Com um valor de 16,27 %, é possível constatar que independentemente de a via ter um intervalo de qualidade geométrica, há uma influência de pico superior a 16 % numa via

de classe 2. Esta diferença percentual ocorre devido à diferença de irregularidade de um troço para o outro, mesmo tendo as características da mesma qualidade geométrica. Se, por exemplo, tivesse sido avaliado o troço da classe 1 entre os 50 m e 60 m da via gerada na Figura 2.8, teria certamente obtido valores de carga dinâmica superiores a qualquer valor registado nos troços estudados.

Comboio de Mercadorias

Para o comboio de mercadorias, o mesmo processo foi feito. Na Figura 2.14, "Pos 1" significa "Posição 1" indicando que os valores são relativos à passagem do comboio pelo troço de 12 m até 15 m. O mesmo se aplica para "Pos 2", que significa "Posição 2" indicando que os valores são relativos à passagem do comboio pelo troço de 40 m até 43 m. Assim como no Alfa Pendular, é notável, com auxílio da Figura 2.14 e do Quadro 2.10, que a variação das cargas dinâmicas entre eixos diminui consoante a melhoria da qualidade da via.

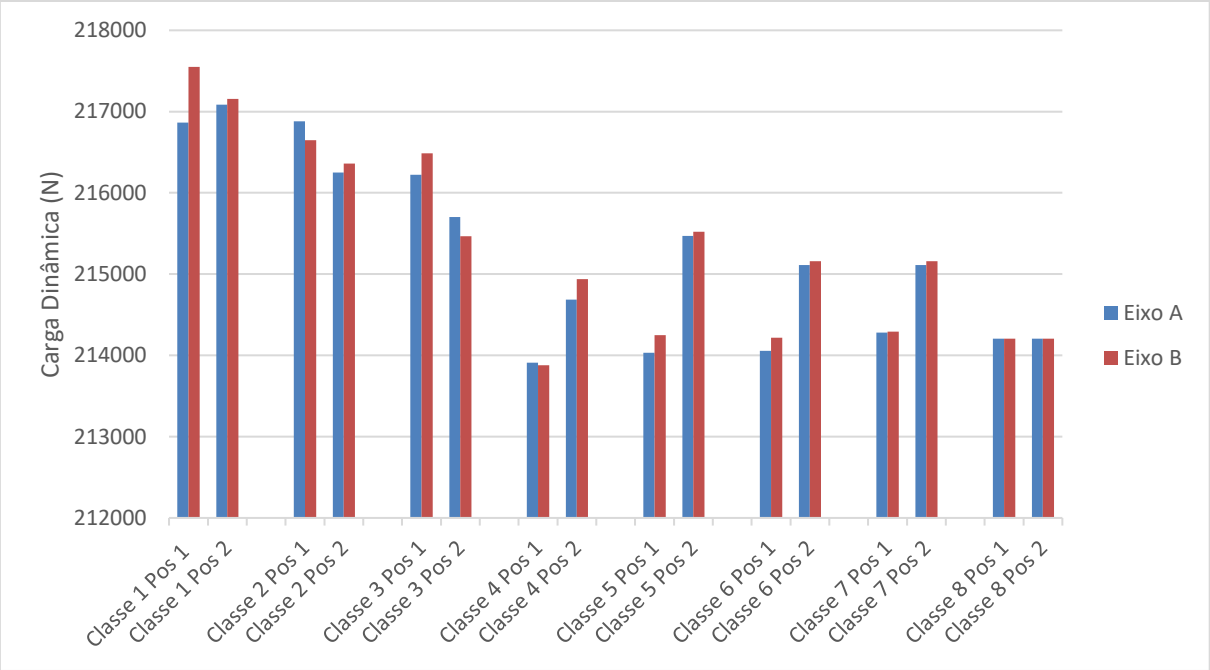


Figura 2.14 –Influência do perfil de irregularidades na carga dinâmica (comboio de mercadorias)

Quadro 2.10 – Carga dinâmica dos eixos do comboio (comboio de mercadorias)

Comboio Mercadorias			Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5	Classe 6	Classe 7	Classe 8
$Q_{méd}$ (N)	Posição 1	Eixo A	216864	216880	216222	213911	214031	214054	214281	214205
		Eixo B	217549	216646	216488	213878	214250	214218	214293	214206
	Posição 2	Eixo A	217085	216249	215703	214687	215469	215113	215113	214205
		Eixo B	217157	216360	215466	214939	215521	215158	215158	214206

Contrariamente ao Alfa Pendular, o comboio de mercadorias não registou uma diferença percentual tão significativa como esperado, tendo ocorrido a maior diferença de valor de cargas dinâmicas na via de classe 5 registando o valor de 0,67 %. Esta diferença percentual comparada à diferença percentual do Alfa Pendular é aproximadamente 24 vezes menor. Sendo o estudo do comboio de mercadorias efetuado em troços de perfil diferentes do Alfa Pendular, os resultados diferem. Como a irregularidade dos troços que foram estudados no comboio de mercadorias é alvo de menos picos no perfil de irregularidades, os valores das cargas dinâmicas não sofrem tantas alterações como no estudo do Alfa Pendular.

2.7.5 INFLUÊNCIA DA RIGIDEZ E AMORTECIMENTO DAS PALMILHAS

Para avaliar a influência da rigidez e do amortecimento das palmilhas, considera-se três valores de rigidez de palmilhas, k_p: 40, 100 e 500 kN/mm e dois valores de amortecimento, c_p , iguais a 10 e 20 kN.s/m. Esta análise foi feita para o Alfa Pendular e para o comboio de mercadorias e todos os perfis de irregularidades presentes na Figura 2.8, de forma a perceber se, mudando o modelo das palmilhas, as diferenças nos valores da carga dinâmica de cada eixo dos veículos ferroviários são notáveis. Este estudo foi realizado para o mesmo troço de via, representado na Figura 2.12 c), ou seja, o troço de 40 m a 43 m.

Alfa Pendular

Para analisar o efeito da rigidez das palmilhas na carga dinâmica dos comboios, fixou-se o valor do amortecimento das palmilhas, c_p , em 10 kN.s/m e, depois, em 20 kN.s/m, variando os valores da rigidez das palmilhas, k_p , entre 40, 100 e 500 kN/mm. Os resultados obtidos apresentam-se no Quadro 2.11, que representam a média da carga dinâmica dos quatro eixos do Alfa Pendular, ao fazer uma passagem pelos perfis da Figura 2.12 c).

Quadro 2.11 –Carga dinâmica para o Alfa Pendular com diferentes tipos de palmilha

Eixo A			**Classe**	**Classe**	**Classe**	**Classe**	**Classe**	**Classe**	**Classe**	**Classe**
Alfa Pendular			**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
$Q_{méd}$ **(N)**	c=10 kN.s/m	k=40 kN/mm	132026	130265	140028	128646	129986	128923	130028	130121
		k=100 kN/mm	132046	130082	139888	128613	129869	128853	130022	130123
		k=500 kN/mm	132050	129984	139822	128597	129811	128817	130016	130121
	c=20 kN.s/m	k=40 kN/mm	132018	130243	140024	128648	129986	128923	130028	130120
		k=100 kN/mm	132045	130079	139887	128613	129869	128853	130021	130122
		k=500 kN/mm	132050	129984	139822	128597	129811	128817	130016	130121
Eixo B			**Classe**	**Classe**	**Classe**	**Classe**	**Classe**	**Classe**	**Classe**	**Classe**
Alfa Pendular			**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
$Q_{méd}$ **(N)**	c=10 kN.s/m	k=40 kN/mm	131083	128349	142651	131737	128275	127550	129818	130120
		k=100 kN/mm	131083	128300	142523	131696	128162	127488	129812	130123
		k=500 kN/mm	131098	128253	142455	131673	128107	127456	129807	130122
	c=20 kN.s/m	k=40 kN/mm	131076	128328	142645	131738	128273	127550	129818	130120
		k=100 kN/mm	131082	128297	142522	131696	128162	127488	129812	130123
		k=500 kN/mm	131098	128253	142455	131673	128107	127456	129807	130122
Eixo C			**Classe**	**Classe**	**Classe**	**Classe**	**Classe**	**Classe**	**Classe**	**Classe**
Alfa Pendular			**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
$Q_{méd}$ **(N)**	c=10 kN.s/m	k=40 kN/mm	124362	131782	126914	125276	132808	130883	130442	130120
		k=100 kN/mm	124238	132021	126887	125197	132747	130828	130438	130122
		k=500 kN/mm	124191	132123	126876	125159	132714	130797	130433	130121
	c=20 kN.s/m	k=40 kN/mm	124370	131769	126916	125277	132805	130881	130442	130120
		k=100 kN/mm	124239	132019	126887	125197	132747	130828	130437	130122
		k=500 kN/mm	124191	132123	126876	125159	132714	130797	130433	130120
Eixo D			**Classe**	**Classe**	**Classe**	**Classe**	**Classe**	**Classe**	**Classe**	**Classe**
Alfa Pendular			**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
$Q_{méd}$ **(N)**	c=10 kN.s/m	k=40 kN/mm	123939	137135	129660	126032	133247	132066	130507	130121
		k=100 kN/mm	123824	137373	129614	125957	133193	132018	130503	130124
		k=500 kN/mm	123768	137478	129593	125922	133164	131991	130498	130123
	c=20 kN.s/m	k=40 kN/mm	123946	137130	129662	126033	133246	132064	130507	130121
		k=100 kN/mm	123826	137371	129614	125957	133192	132018	130503	130123
		k=500 kN/mm	123768	137478	129593	125922	133164	131991	130498	130122

No Capítulo 5 Anexo, são apresentados os valores do Quadro 2.11 graficamente, de forma a entender melhor a influência da rigidez e amortecimento das palmilhas para o Alfa Pendular. Pela análise dos resultados do Quadro 2.11, verifica-se que ao mudar a rigidez na palmilha mantendo o amortecimento, os valores da carga dinâmica de cada eixo não variam significativamente. A diferença percentual máxima foi de 0,27 %. Quando se analisa a influência do amortecimento das palmilhas mantendo-se a rigidez das palmilhas, constata-se, no Quadro 2.11 que não há uma influência na carga dinâmica significativa. A diferença percentual máxima foi de 0,02 %.

Comboio de Mercadorias

A mesma metodologia de análise foi feita para o comboio de mercadorias, dado que este apresenta parâmetros mecânicos que podem influenciar a resposta dinâmica sobre a via. Primeiramente foi feita uma análise da carga dinâmica fixando o valor do amortecimento das palmilhas em 10 kN.s/m e 20 kN.s/m, variando os valores da rigidez das palmilhas entre 40, 100 e 500 kN/mm. No Quadro 2.12 e nas Figuras 5.6 a 5.10 apresentam-se os valores obtidos, que representam a média da carga dinâmica dos dois eixos do comboio de mercadorias, ao fazer uma passagem pelos perfis da Figura 2.12 c).

Quadro 2.12 –Carga dinâmica para o comboio de mercadorias com diferentes tipos de palmilha

Eixo A			**Classe 1**	**Classe 2**	**Classe 3**	**Classe 4**	**Classe 5**	**Classe 6**	**Classe 7**	**Classe 8**
Comboio de Mercadorias										
$Q_{méd}$ **(N)**	c=10 kN.s/m	k=40 kN/mm	217201	216486	215912	214790	215551	215171	214289	214203
		k=100 kN/mm	217112	216303	215752	214712	215489	215127	214286	214205
		k=500 kN/mm	217068	216216	215674	214671	215455	215102	214280	214203
	c=20 kN.s/m	k=40 kN/mm	217203	216482	215907	214790	215553	215173	214289	214202
		k=100 kN/mm	217113	216302	215751	214712	215489	215127	214286	214205
		k=500 kN/mm	217068	216217	215674	214671	215455	215102	214280	214202
Eixo B			**Classe 1**	**Classe 2**	**Classe 3**	**Classe 4**	**Classe 5**	**Classe 6**	**Classe 7**	**Classe 8**
Comboio de Mercadorias										
$Q_{méd}$ **(N)**	c=10 kN.s/m	k=40 kN/mm	217294	216461	215631	215006	215596	215212	214310	214203
		k=100 kN/mm	217189	216385	215506	214957	215540	215171	214310	214206
		k=500 kN/mm	217136	216343	215444	214928	215508	215147	214305	214203
	c=20 kN.s/m	k=40 kN/mm	217296	216455	215624	215003	215596	215212	214310	214203
		k=100 kN/mm	217189	216384	215505	214957	215540	215171	214309	214205
		k=500 kN/mm	217136	216343	215444	214928	215508	215147	214305	214203

Após análise dos resultados indicados no Quadro 2.12, chega-se à mesma conclusão constatada para o Alfa Pendular. Mudando a rigidez na palmilha e mantendo o amortecimento, os valores da carga dinâmica de cada eixo não variam significativamente. A diferença percentual máxima foi de 0,12 %, valor residual. O mesmo acontece quando a rigidez da palmilha é fixada e se varia o amortecimento. Neste caso, a diferença percentual máxima foi ainda menor e igual a 0,0032 %.

2.8 CONCLUSÕES

Neste capítulo, são descritos os elementos constituintes da via-férrea balastrada e é feita uma referência relativa à modelação da via-férrea balastrada em uso para o estudo paramétrico. No estudo paramétrico são desenvolvidos diversos estudos para uma melhor perceção da influência da geometria/mecânica da via e do comboio na carga dinâmica.

Com o desenvolvimento do estudo paramétrico foi concluído que a velocidade do comboio e os perfis de irregularidades da via são os fatores que mais influenciam a carga dinâmica.

Estas conclusões são importantes para o estudo numérico do sistema de pesagem dinâmica, que será analisado no Capítulo 3.

3

APLICAÇÃO DO ALGORITMO PARA UM SISTEMA DE PESAGEM DINÂMICA

Neste capítulo começa por se descrever o algoritmo, inicialmente proposto por Costa [9] e posteriormente adaptado por Mosleh et al. [1], para a pesagem dinâmica de veículos ferroviários sobre a via. Depois, é feita uma aplicação desse algoritmo de pesagem dinâmica de veículos considerando-se vários cenários em termos de variação de velocidade e comboio. Por fim, testa-se o algoritmo tendo em conta dados realistas de uma via-férrea portuguesa, possíveis de obter com um sistema de monitorização constituídos por extensómetros nos carris da via.

3.1 DESCRIÇÃO DO ALGORITMO

Considere-se a passagem de uma massa móvel (M_s) suspensa ao longo da via cujo perfil de irregularidade pode ser gerado com base na Equação (2.23), como mostra a Figura 3.1.

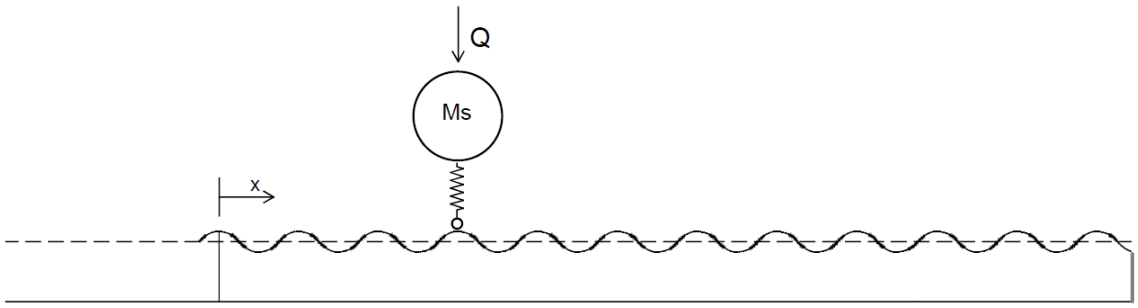


Figura 3.1 – Passagem da massa móvel por um perfil de irregularidade

Note-se que a carga avaliada pelo sistema de pesagem dinâmica pode ser composta por duas componentes: a componente quase – estática, que corresponde à distribuição do peso pelos diferentes rodados; a componente dinâmica, que se deve aos efeitos dinâmicos inercialmente incitados pelo comboio.

Quando se trata de via perfeita, a componente quase – estática é preponderante, dado que, tendo em conta o modelo apresentado em 2.6, a carga aplicada pelo rodado do comboio à via será aproximadamente constante ao longo do tempo e independente da velocidade do veículo ferroviário porque o perfil de irregularidades é como uma plataforma lisa e se considera as travessas apoiadas continuamente. No entanto em situação real mesmo em via perfeita, devido ao apoio discreto das travessas, a carga sobre a via apresenta uma parte dinâmica devida à excitação paramétrica.

O algoritmo proposto por Costa [9] e Mosleh et al. [1],e que se quer validar, pretende identificar a carga estática de um veículo ferroviário durante a sua circulação a uma determinada velocidade sobre uma via com irregularidade. Na Figura 3.2, apresentam-se as várias fases da metodologia desenvolvida em Matlab e que se descrevem de seguida.

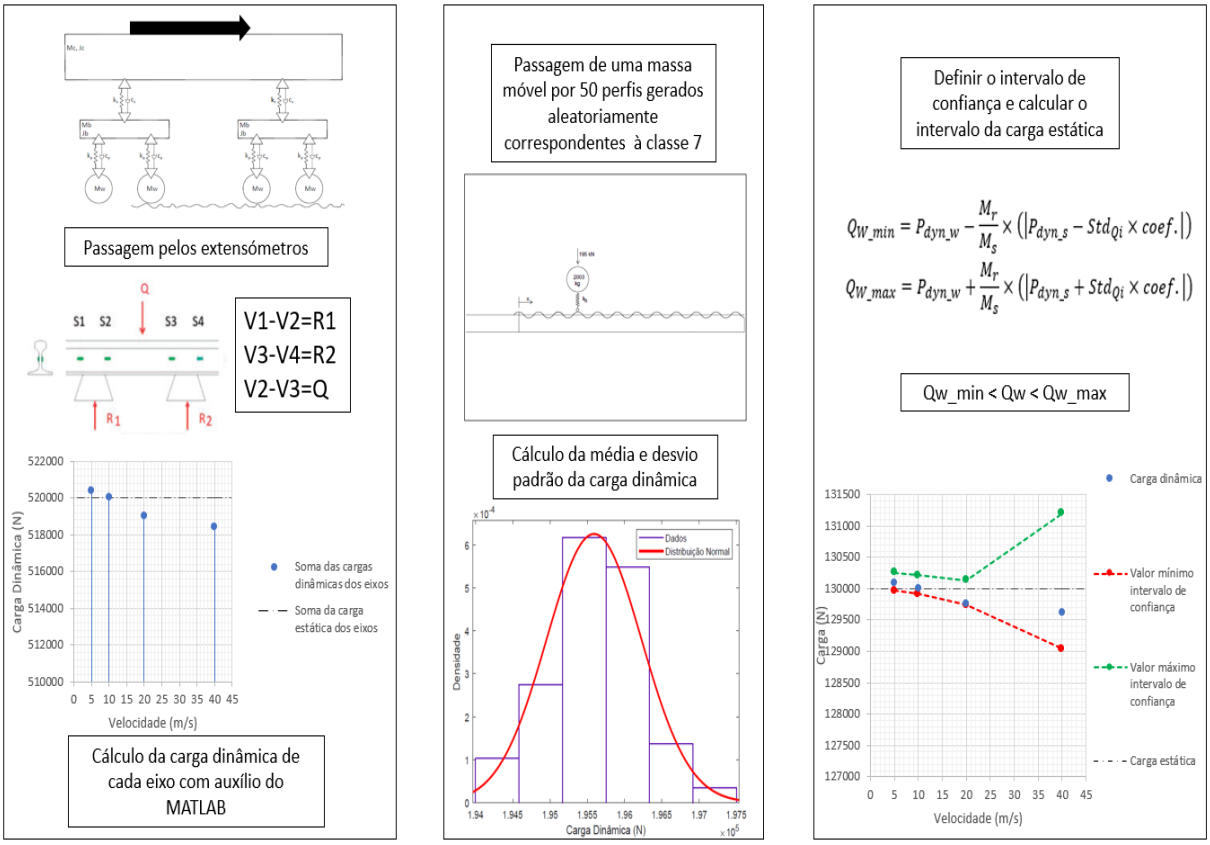


Figura 3.2 – Representação esquemática do método proposto

1ª Fase - Inicialmente considera-se a passagem de um comboio sobre um sistema de medição composto por seis pares de extensómetros (um em cada carril) numa via, medindo-se o esforço transverso (*V*) em cada carril. Conhecido o esforço transverso em duas posições consecutivas, calcula-se a carga dinâmica (*Q*) pela diferença entre os dois valores, como indicado no esquema da Figura 3.2.

2ª Fase - Com auxílio das funcionalidades do programa foi feita a distribuição normal dos valores da carga dinâmica de várias passagens da massa móvel, sendo posteriormente calculada a média e o desvio padrão das cargas dinâmicas resultantes.

3ª Fase - Com os valores da carga dinâmica dos comboios, desvio padrão e média da carga dinâmica da massa móvel calcula-se o intervalo de confiança onde se determina dentro de que valores a carga estática do comboio se encontra. Esta metodologia deve ser feita para cada tipo de comboio que circula sobre a via, para cada velocidade e para um determinado nível de irregularidade da via-férrea.

3.2 ESTUDO PARAMÉTRICO

Nesta parte do trabalho, apresenta-se um estudo paramétrico que pretende validar a metodologia descrita. Para isso, consideram-se o comboio Alfa Pendular e um comboio de mercadorias cujas características estão já indicadas no Quadro 2.2. Para ambos os comboios analisaram-se as velocidades de 5 m/s, 10 m/s, 20 m/s e 40 m/s aquando da passagem por uma via de classe 7.

FASE 1

Alfa Pendular

O perfil de via considerado na passagem do Alfa Pendular corresponde ao perfil de classe 7 da Figura 2.12 b).

Após a aplicação da primeira fase do procedimento do cálculo indicado na Figura 3.2 obtém-se, para cada velocidade, a soma das cargas dinâmicas dos eixos do comboio (Figura 3.3)

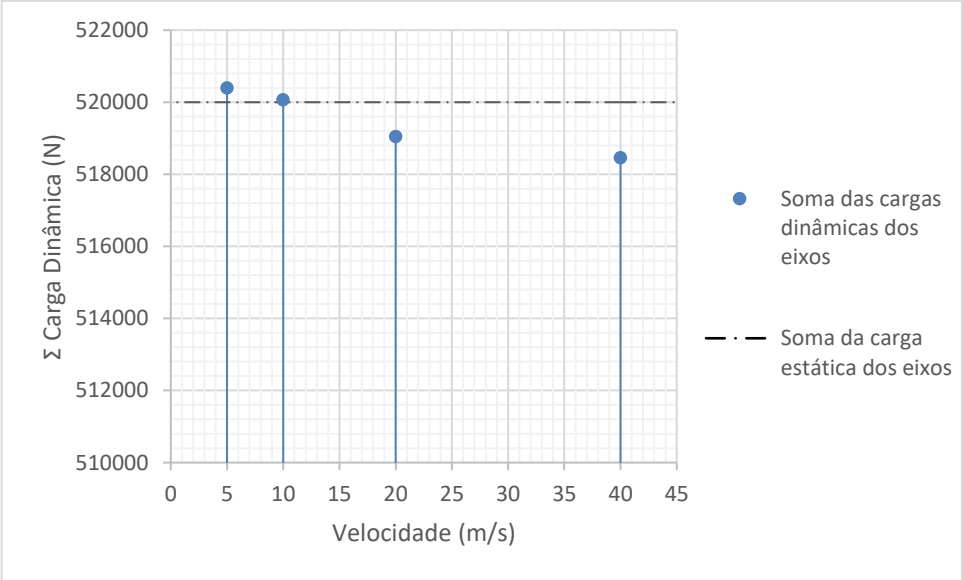


Figura 3.3 – Soma da carga estática e dinâmica para diferentes velocidades do Alfa Pendular

A partir da Figura 3.3 é possível verificar que, tendo em conta os dados comiserados, à medida que a velocidade vai aumentando, a carga dinâmica vai diminuindo. Este facto acontece devido à soma da carga dinâmica máxima dos quatro eixos do comboio deixando margem para algumas diferenças não pretendidas. Á medida que a velocidade do comboio aumenta, as cargas dinâmicas de cada eixo resultantes de uma passagem variam mais entre si, fazendo com que, ao somar a carga dinâmica dos quatro eixos, o somatório seja de menor valor comparado a passagens de velocidades mais baixas. No entanto, a diferença da carga dinâmica é reduzida, sendo que a diferença percentual entre o maior e o menor valor de carga dinâmica é de 0,37 %.

Os valores da soma da carga dinâmica obtidos são usados posteriormente para o cálculo do intervalo de confiança da carga estática, correspondendo a P_{dyn_w}.

Comboio de Mercadorias

O perfil de via considerado na passagem do comboio de mercadorias corresponde ao perfil de classe 7 da Figura 2.12 a). Na Figura 3.4 é possível verificar a soma da carga dinâmica e estática dos dois eixos do comboio de mercadorias.

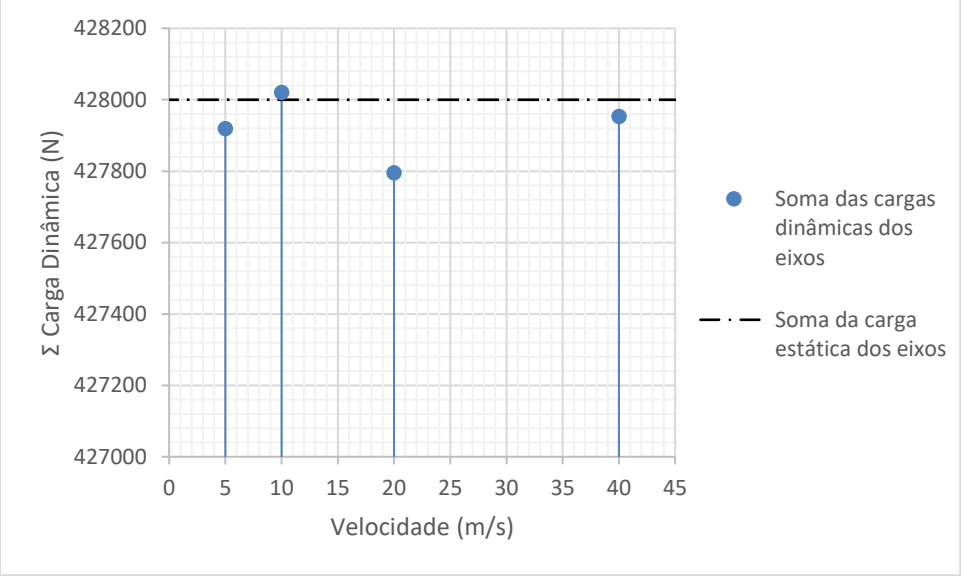


Figura 3.4 – Soma da carga estática e dinâmica para diferentes velocidades do comboio de mercadorias

A partir da Figura 3.4 verifica-se que a velocidade não afeta linearmente a carga dinâmica. A razão do sucedido, é devido a se estar a somar a carga máxima das seis posições dos extensómetros na passagem dos dois eixos do comboio pela via. No entanto, a diferença da carga dinâmica é reduzida, sendo que a diferença percentual entre o maior e o menor valor é de 0,05 %.

Os valores da soma da carga dinâmica obtidos são usados posteriormente para o cálculo do intervalo de confiança da carga estática, correspondendo a P_{dyn_w}.

FASE 2

Massa Móvel

Na segunda fase do algoritmo indicado na Figura 3.2, exige o cálculo dinâmico com carga móvel a passar sobre 50 perfis de irregularidade de via de classe 7 gerados. Considera-se as mesmas velocidades de circulação: 5 m/s, 10 m/s, 20 m/s e 40 m/s.

Considerando a massa do rodado, M_s, e a carga quase – estática, Q_s, na Figura 3.5 é representada a carga dinâmica média das 50 passagens da massa móvel pela via de classe 7, para as diferentes velocidades. Verifica-se que numa via perfeita, o aumento da velocidade não implica uma diferença significativa na carga avaliada, quando comparados com a carga quase - estática. Portanto, no caso de a via ser perfeitamente lisa, as cargas adquiridas pelo sistema de pesagem dinâmica são muito parecidas às cargas estáticas transmitidas pelos rodados ao carril. Contudo, isto já não é verdade quando se trata de uma via

real, onde a superfície perfeitamente lisa não é conseguida. A carga imposta pelo rodado sobre a via é dependente do desnível da mesma, o que dá origem a um aumento das cargas dinâmicas sobre as quase-estáticas. É de salientar que devido a este aumento de cargas de interação, o processo de degradação da via aumenta gradualmente consoante a quantidade de passagens do veículo ferroviário sobre a via.

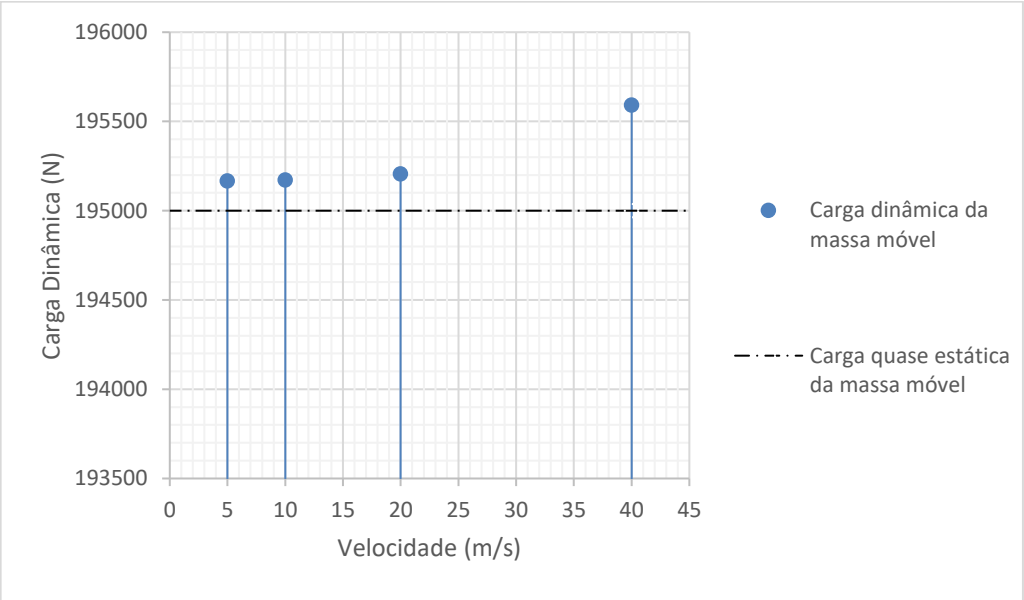
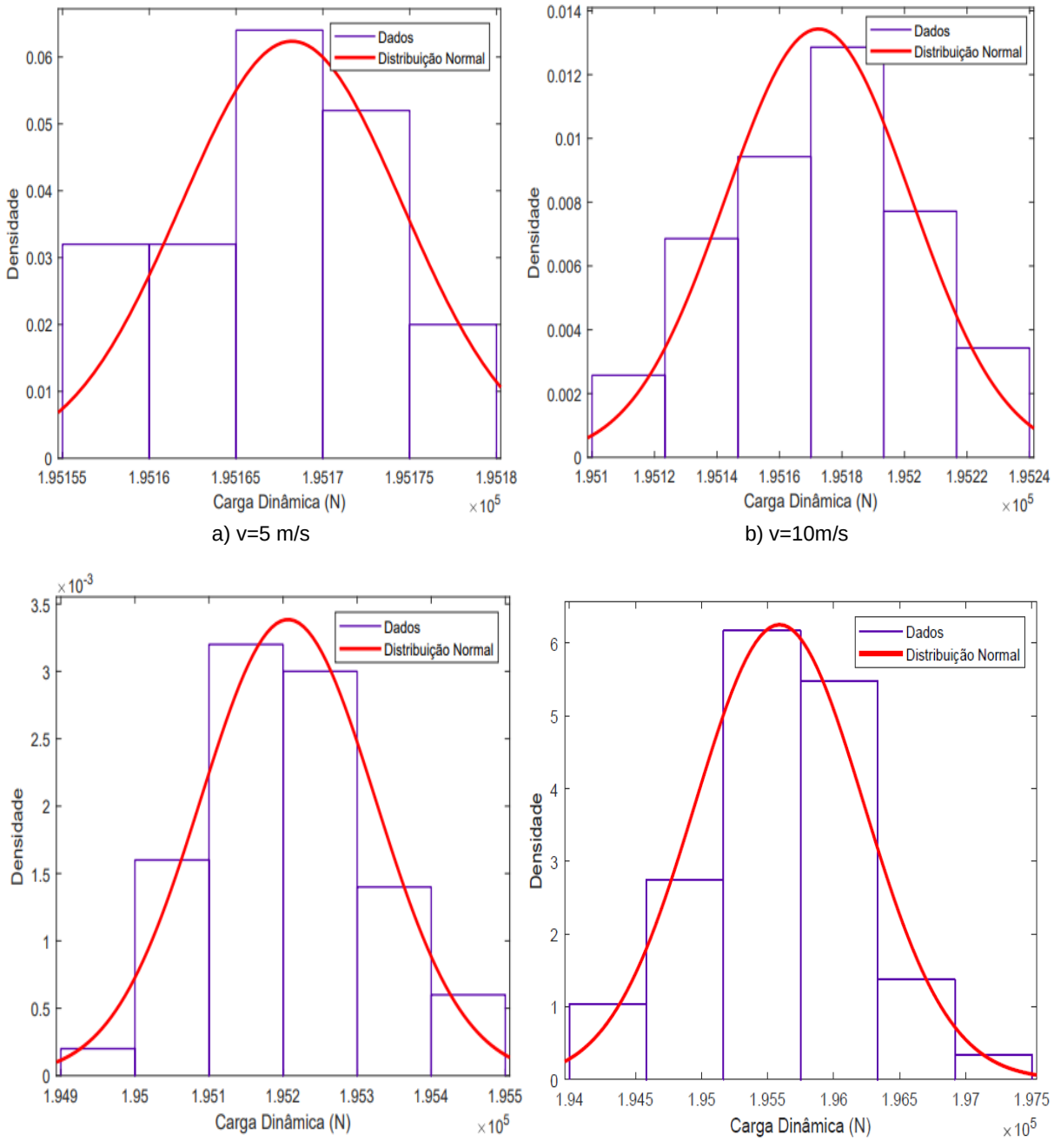


Figura 3.5 – Variação da carga dinâmica em relação à velocidade

Na Figura 3.5 é demonstrado a variação de carga dinâmica da massa móvel em relação à velocidade, sendo que a diferença percentual entre a carga dinâmica máxima e a carga quase - estática é de 0,30 %. Realçando que, estando a analisar a carga dinâmica em passagens por uma via de qualidade muito boa, a diferença entre carga dinâmica e estática não é muito acentuada.

A partir da análise da Figura 3.5, é claro que o valor médio da carga avaliada na passagem do rodado nos extensómetros está mais próximo do valor estático quando a velocidade da massa móvel é inferior. Além disso, as massas não suspensas do veículo também desempenham um papel relevante, uma vez que a massa é maior quando as cargas dinâmicas geradas devido ao desnível da via são maiores. Contudo, o desnível da via não é constante ao longo do tempo, pelo que são esperadas alterações no perfil de desnível da via, mesmo que o troço seja classificado na mesma classe.

De acordo com a 2ª Fase do esquema da Figura 3.2, a Figura 3.6 mostra a distribuição de cargas dinâmicas das 50 passagens da massa móvel pela via de classe 7, para as diferentes velocidades. De seguida é calculada a média e o desvio padrão da carga dinâmica de um único sistema de massa móvel (Figura 3.1) após a passagem por 50 perfis de irregularidades. Estes valores encontram-se no Quadro 3.1, seguido pelo seu processo de cálculo.



a) v=5 m/s

b) v=10m/s

c) v=20 m/s

d) v=40 m/s

Figura 3.6 – Distribuição normal das cargas dinâmicas para diferentes velocidades: a) 5 m/s; b) 10 m/s; c) 20 m/s; d) 40 m/s

Sendo o estudo realizado para uma via com irregularidades na Classe 7, os valores da carga dinâmica média estão próximos da carga estática, no entanto, a carga dinâmica vai aumentando à medida que a velocidade aumenta. Como é possível verificar no Quadro 3.1, à medida que a velocidade da massa móvel aumenta, o desvio padrão e a variância também aumentam.

Com a função da distribuição normal da Figura 3.6 é obtida a média e a variância das cargas dinâmicas para diferentes velocidades. De seguida, foi calculado o desvio padrão, com auxílio da Equação (3.1):

$$Std_{Qi} = \sqrt{Var} \tag{3.1}$$

sendo Std_{Qi} o desvio padrão e Var a variância.

Quadro 3.1 – Carga dinâmica resultante das 50 passagens da carga móvel para diferentes velocidades

Velocidade (v)	Variância (Var)	Desvio Padrão (Std_{Qi})	Média (N) (Q_{i-mean})
5 m/s	40,9317	6,39778868	195168
10 m/s	882,217	29,70213797	195172
20 m/s	13892,8	117,8677225	195207
40 m/s	414935	644,1544846	195592

FASE 3

De seguida é calculado o efeito da carga dinâmica (P_{dyn_s}) para um eixo que passa por 50 perfis. O efeito da carga dinâmica pode ser obtido subtraindo a carga estática (Q_s) ao valor médio da distribuição das cargas dinâmicas (Q_{i-mean}), como demonstrado na Equação (3.2).

$$P_{dyn_s} = Q_{i-mean} - Q_s \tag{3.2}$$

Assim, quando uma carruagem passa ao longo da via, a carga estática transmitida por cada eixo para a via (Q_w) pode ser estimada a partir da carga calculada de cada eixo do comboio (P_{dyn_w}) pelo sistema de pesagem dinâmica. Na Equação (3.3) é demonstrado o cálculo do intervalo de confiança de carga estática. Este cálculo é feito para o Alfa Pendular e para o comboio de mercadorias,

$$\begin{aligned} Q_{W_min} &= P_{dyn_w} - \frac{M_r}{M_s} \times \left(\left|P_{dyn_s} - Std_{Qi} \times coef.\right|\right) \\ Q_{W_max} &= P_{dyn_w} + \frac{M_r}{M_s} \times \left(\left|P_{dyn_s} + Std_{Qi} \times coef.\right|\right) \end{aligned} \tag{3.3}$$

sendo o coeficiente *coef.* considerado 1,96 [1], e M_r a massa do eixo sendo 1711 Kg para o Alfa Pendular e 1246,52 Kg para o comboio de mercadorias. Q_{W_min} e Q_{W_max} correspondem à carga estática mínima e máxima, respetivamente, do intervalo de confiança.

Como exemplo, apresenta-se o cálculo completo do intervalo de confiança para a passagem do sistema de massa móvel apresentado na Figura 3.1, à velocidade de 40 m/s com a função de distribuição normal demonstrado na Figura 3.6 d). Para a distribuição normal da passagem da massa móvel a 40 m/s, o valor médio (Q_{i-mean}) é de 195592 N e o desvio padrão (Std_{Qi}) é de 644,15. É de salientar que a carga quase - estática (Q_s) imposta pelo sistema de massa móvel é 195000 N, o que significa que existe uma diferença P_{dyn_s} = 592 N entre o valor da carga dinâmica médio e o valor da carga estática. Portanto, quando a carruagem do Alfa Pendular está a fazer uma passagem a uma velocidade de 40 m/s ao longo da via, a carga dinâmica medida (P_{dyn_w}) para o eixo A é de 129006,8 N como mostrado no Quadro 3.2. Assim sendo, a carga estática para o eixo A (Q_W) é calculada a partir da carga dinâmica medida para o eixo do Alfa Pendular (P_{dyn_w}=129006,8 N), subtrair do efeito da carga dinâmica para um eixo (P_{dyn_s}=592 N), considerando a massa do eixo do Alfa Pendular (M_r=1711 Kg) e a massa móvel (M_s=2003 Kg).

Os limites superior e inferior do intervalo de carga estática para o Alfa Pendular e para o comboio de mercadorias são calculados como demonstrado na Equação (3.3) e com os resultados no Quadro 3.2 e Quadro 3.3, respetivamente.

Quadro 3.2 – Intervalo de carga estática para o Alfa Pendular

	Eixo	P_{dyn_w} **(N)**	M_r **(Kg)**	M_s **(Kg)**	P_{dyn_s} **(N)**	Std_{Qi}	**Coef**	Q_{W_min} **(N)**	Q_{W_max} **(N)**
V=5 m/s	Eixo A	130100,2	1711	2003	168	6,39778868	1,96	129967,4029	130254,42
	Eixo B	130129,4	1711	2003	168	6,39778868	1,96	129996,6029	130283,62
	Eixo C	130052,6	1711	2003	168	6,39778868	1,96	129919,8029	130206,82
	Eixo D	130118,1	1711	2003	168	6,39778868	1,96	129985,3029	130272,32
	Eixo	P_{dyn_w} **(N)**	M_r **(Kg)**	M_s **(Kg)**	P_{dyn_s} **(N)**	Std_{Qi}	**Coef**	Q_{W_min} **(N)**	Q_{W_max} **(N)**
V=10 m/s	Eixo A	130096,6	1711	2003	172	29,70213797	1,96	129999,4037	130293,255
	Eixo B	130072,5	1711	2003	172	29,70213797	1,96	129975,3037	130269,155
	Eixo C	130027,7	1711	2003	172	29,70213797	1,96	129930,5037	130224,355
	Eixo D	129869,5	1711	2003	172	29,70213797	1,96	129772,3037	130066,155
	Eixo	P_{dyn_w} **(N)**	M_r **(Kg)**	M_s **(Kg)**	P_{dyn_s} **(N)**	Std_{Qi}	**Coef**	Q_{W_min} **(N)**	Q_{W_max} **(N)**
V=20 m/s	Eixo A	129534,1	1711	2003	207	117,8677225	1,96	129513,581	129908,265
	Eixo B	130014,5	1711	2003	207	117,8677225	1,96	129993,981	130388,665
	Eixo C	129758,4	1711	2003	207	117,8677225	1,96	129737,881	130132,565
	Eixo D	129742,9	1711	2003	207	117,8677225	1,96	129722,381	130117,065
	Eixo	P_{dyn_w} **(N)**	M_r **(Kg)**	M_s **(Kg)**	P_{dyn_s} **(N)**	Std_{Qi}	**Coef**	Q_{W_min} **(N)**	Q_{W_max} **(N)**
V=40 m/s	Eixo A	129006,8	1711	2003	592	644,1544846	1,96	128434,0098	130590,985
	Eixo B	130203,8	1711	2003	592	644,1544846	1,96	129631,0098	131787,985
	Eixo C	129173,7	1711	2003	592	644,1544846	1,96	128600,9098	130757,885
	Eixo D	130077,9	1711	2003	592	644,1544846	1,96	129505,1098	131662,085

Quadro 3.3 –Intervalo de carga estática para o comboio de mercadorias

	Eixo	P_{dyn_w} **(N)**	M_r **(Kg)**	M_s **(Kg)**	P_{dyn_s} **(N)**	Std_{Qi}	**Coef**	Q_{W_min} **(N)**	Q_{W_max} **(N)**
V=5 m/s	Eixo A	213985,7	1246,52	2003	168	6,39778868	1,96	213888,9529	214098,0546
	Eixo B	213933,3	1246,52	2003	168	6,39778868	1,96	213836,5529	214045,6546
	Eixo	P_{dyn_w} **(N)**	M_r **(Kg)**	M_s **(Kg)**	P_{dyn_s} **(N)**	Std_{Qi}	**Coef**	Q_{W_min} **(N)**	Q_{W_max} **(N)**
V=10 m/s	Eixo A	213985,3	1246,52	2003	172	29,70213797	1,96	213914,4893	214128,5696
	Eixo B	214034,4	1246,52	2003	172	29,70213797	1,96	213963,5893	214177,6696
	Eixo	P_{dyn_w} **(N)**	M_r **(Kg)**	M_s **(Kg)**	P_{dyn_s} **(N)**	Std_{Qi}	**Coef**	Q_{W_min} **(N)**	Q_{W_max} **(N)**
V=20 m/s	Eixo A	213786,7	1246,52	2003	207	117,8677225	1,96	213771,7513	214059,2919
	Eixo B	214008,4	1246,52	2003	207	117,8677225	1,96	213993,4513	214280,9919
	Eixo	P_{dyn_w} **(N)**	M_r **(Kg)**	M_s **(Kg)**	P_{dyn_s} **(N)**	Std_{Qi}	**Coef**	Q_{W_min} **(N)**	Q_{W_max} **(N)**
V=40 m/s	Eixo A	213567,1	1246,52	2003	592	644,1544846	1,96	213149,8034	214721,2311
	Eixo B	214385,6	1246,52	2003	592	644,1544846	1,96	213968,3034	215539,7311

Os valores de carga estática transmitida por cada rodado para a via (Q_w), devem estar inseridos no intervalo de confiança Q_{W_min} e Q_{W_max}. calculados na Equação (3.3). Nas Figuras 3.7 e 3.8, pode-se analisar que, para ambos os comboios, esse parâmetro é cumprido.

De maneira a entender em que valores se encontra o intervalo de confiança, foi elaborado um gráfico na Figura 3.7 e 3.8 que traduz os valores dos Quadros 3.2 e 3.3, respetivamente. Nas Figuras 3.7 e 3.8 os valores da carga dinâmica e do intervalo de confiança são a média das cargas dos eixos dos comboios.

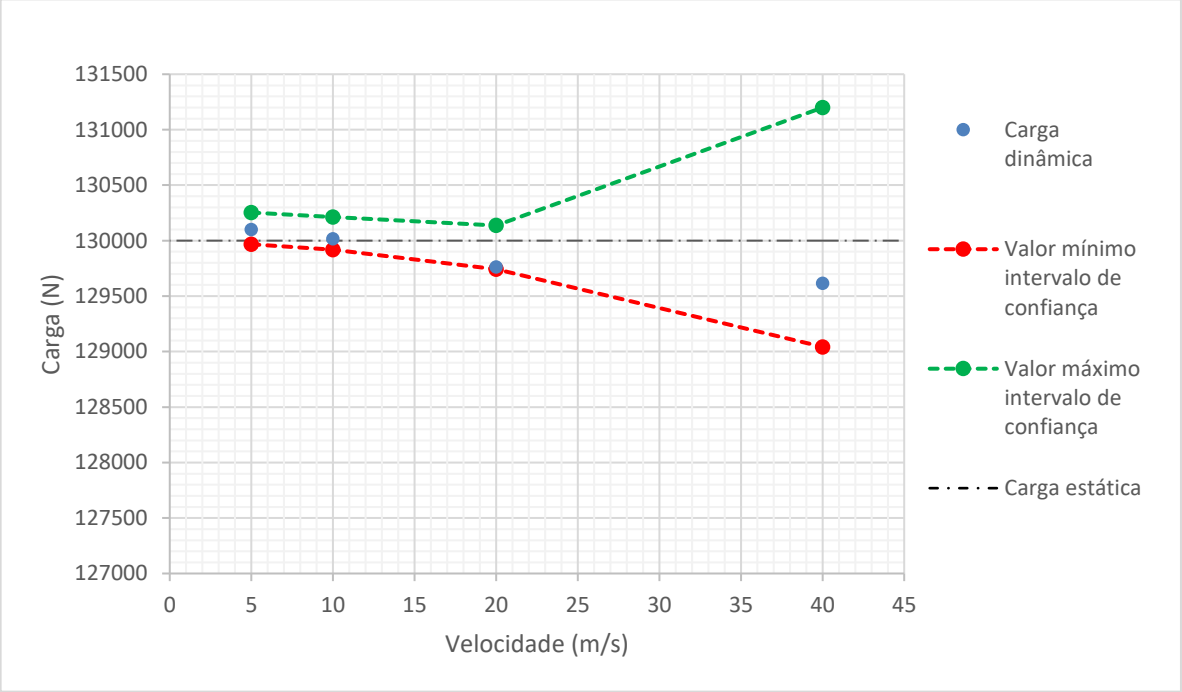


Figura 3.7 – Representação gráfica do intervalo de confiança (Alfa Pendular)

Mesmo que a velocidade não esteja diretamente relacionada ao cálculo do intervalo de confiança, está incluída no cálculo da carga dinâmica, que é um grande fator no cálculo da Equação (3.3). Por isso, com auxílio da Figura 3.7 é possível verificar que com o aumento da velocidade o valor do intervalo de confiança aumenta.

Note-se que as linhas de valor mínimo e máximo do intervalo de confiança são apenas indicativas, visto que o estudo foi feito apenas para as velocidades de 5 m/s, 10 m/s, 20 m/s e 40 m/s.

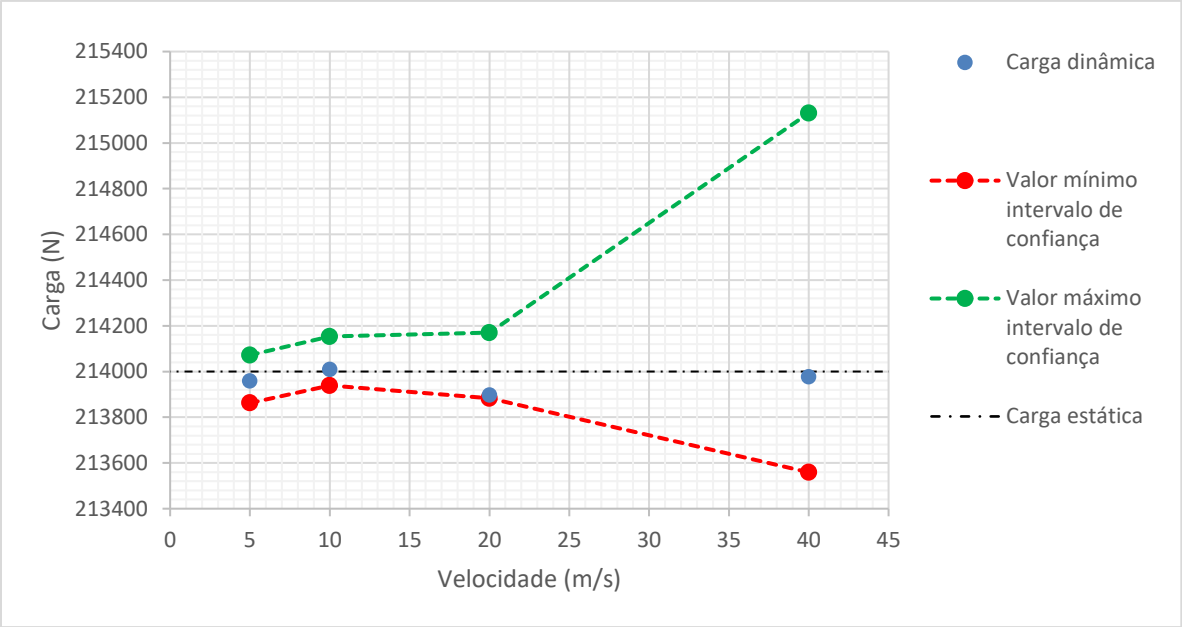


Figura 3.8 – Representação gráfica do intervalo de confiança (comboio de mercadorias)

Na Figura 3.8, verifica-se o mesmo que na Figura 3.7. Com o aumento da velocidade, o intervalo de confiança aumenta. Note-se que as linhas de valor mínimo e máximo do intervalo de confiança são apenas indicativas, visto que o estudo foi feito apenas para as velocidades de 5 m/s, 10 m/s, 20 m/s e 40 m/s.

Considera-se que este método de análise da carga estática foi bem-sucedido, visto que: 1) a carga dinâmica está inserida no intervalo de confiança, 2) a carga estática está inserida no intervalo de confiança, e 3) à medida que a velocidade aumenta, o intervalo de confiança também aumenta.

3.3 APLICAÇÃO A CASO REAL

3.3.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA PEDDIR

O sistema de pesagem dinâmica apresentado neste Capítulo baseia-se num projeto designado por PEDDIR: "Sistema de Pesagem Dinâmica e Deteção de Irregularidade dos Rodados". Este sistema está localizado na Linha Norte, mais concretamente em Estarreja. Na Figura 2.7 está representado um esboço de como o sistema opera. O objetivo principal do PEDDIR é o desenvolvimento de um sistema de monitorização de via lateral de baixo custo capaz de detetar impactos de defeitos nas rodas e de pesar o comboio em movimento. Com este sistema de monitorização pretende-se simplificar o trabalho do gestor das infraestruturas de avaliar se a carga aplicada à via pela passagem dos comboios está dentro dos regulamentos. A partir da medição das deformações nos elementos da superestrutura da via, as cargas estáticas e dinâmicas de cada eixo são avaliadas. Além disso, o sistema consegue identificar o número total de eixos, a geometria e a velocidade do comboio.

3.3.2 DADOS

Por razões de confidencialidade não se teve oportunidade de utilizar dados reais do sistema PEDDIR. Sendo assim, trabalha-se neste Capítulo com dados realísticos, simulando todos os aspetos geométricos da via localizada na Linha Norte localizada em Estarreja e do comboio Alfa Pendular (Quadro 2.2).

Com base na metodologia proposta no Capítulo 3.1, foram testados dados realísticos da passagem de um Alfa Pendular por uma via-férrea com dados reais da Rede Portuguesa de vias-férreas na passagem

da Linha Norte, em Estarreja. Mais detalhes em relação aos dados realísticos são disponibilizados por Mosleh et al. [2, 31].

Os dados realísticos representam o esforço transverso após a passagem do modelo de um comboio Alfa Pendular pelos extensómetros, como demonstra na Figura 2.7. Estes dados disponibilizam uma realidade que no estudo anterior não foi considerada, que é a diferença do perfil de irregularidades do carril da esquerda e do carril da direita da via. Sendo assim, é tido em consideração o esforço transverso do carril da esquerda e do carril da direita e consequentemente a carga dinâmica, calculada da mesma forma que na metodologia apresentada na Figura 3.2, ou seja, a diferença entre dois esforços transversos consecutivos resulta na carga dinâmica. Consoante os dados realísticos, o comboio Alfa Pendular tem uma carga quase – estática de Q_s =138940 N. Para este estudo são avaliadas as velocidades de V=10 m/s e de V= 20 m/s.

Para esta análise, são fornecidos os perfis de irregularidades dos dois carris, por isso, a metodologia vai ser aplicada ao carril esquerdo e ao carril direito, dividindo a carga estática (Q_s) em dois, resultando em carga estática do carril esquerdo, $Q_{s,esq} = 69470$ N e carga estática do carril direito $Q_{s,dir} = 69470$ N. Os perfis de irregularidades dos carris, representados na Figura 3.9, são característicos de uma via de qualidade geométrica de classe 7 (Quadro 2.1).

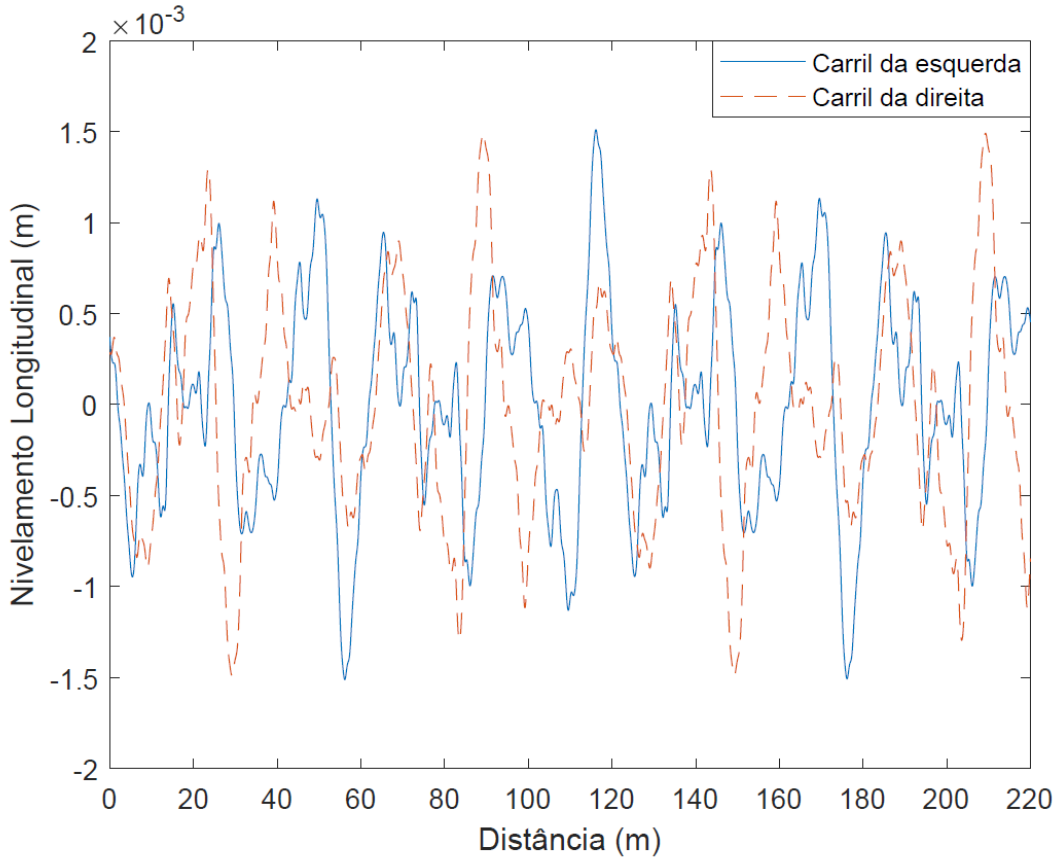


Figura 3.9 – Perfil de irregularidades total dos dados realísticos

Como é possível verificar na Figura 3.9, o perfil de irregularidades dos carris tem uma extensão de 220 m. Os perfis dos carris são diferentes um do outro, no entanto cumprem os parâmetros da geometria da via em que se encontram, notando que a amplitude máxima absoluta dos dois perfis ronda os 1,5 mm.

Considerando os perfis da Figura 3.9, é estudado um troço de 3,3 m compreendido entre 100,35 m e 103,65 m para os dois carris como representado na Figura 3.10.

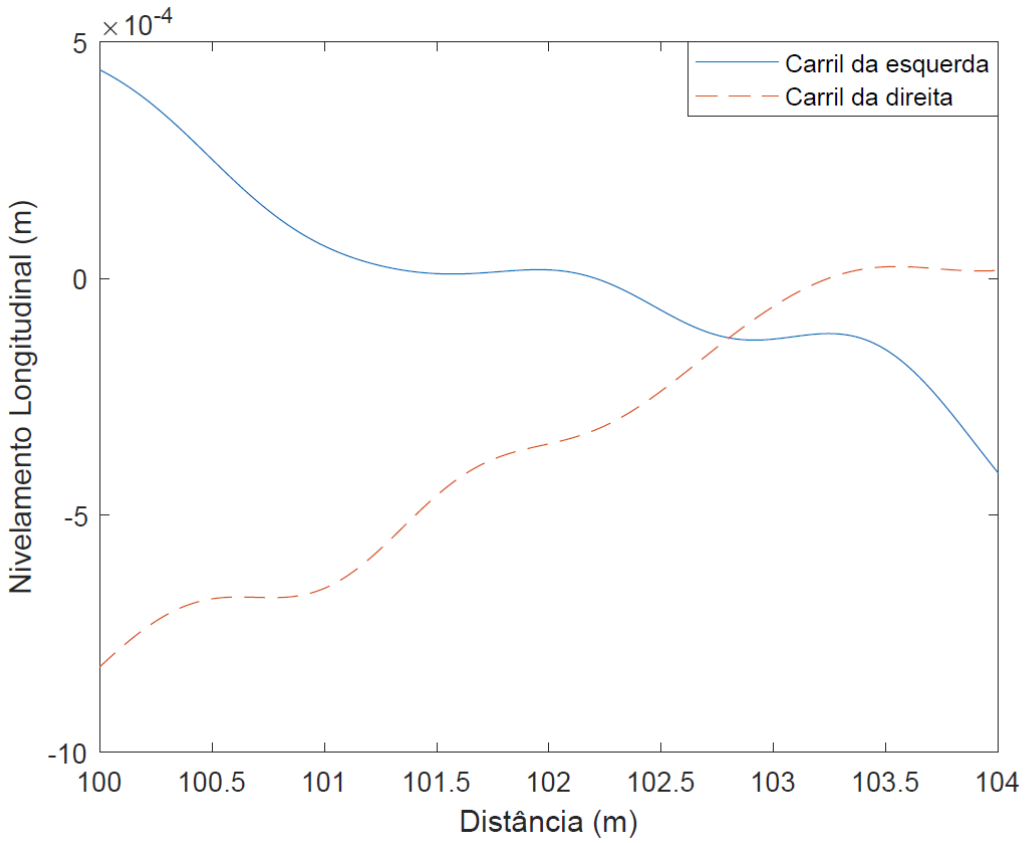
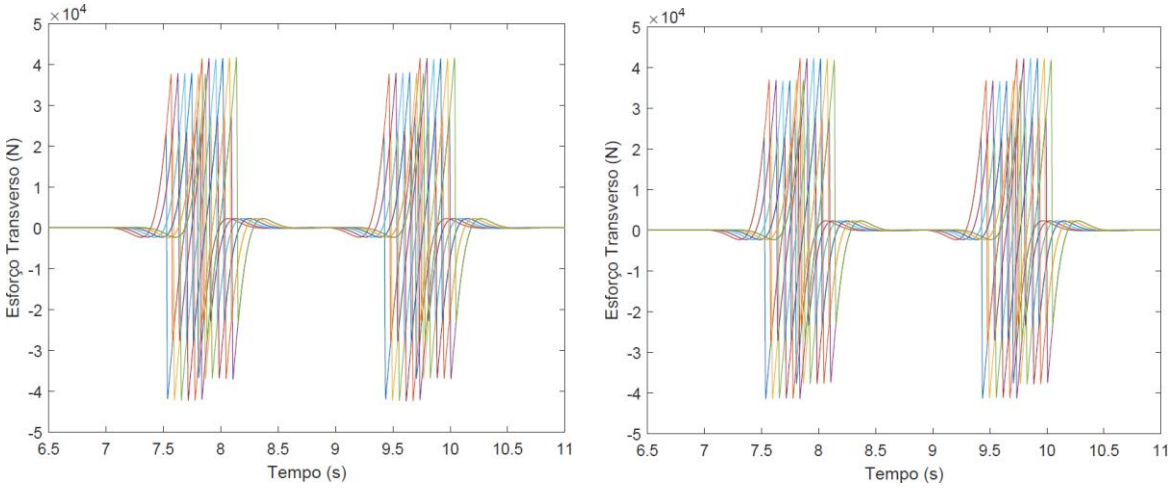


Figura 3.10 – Perfil de irregularidades do troço em estudo

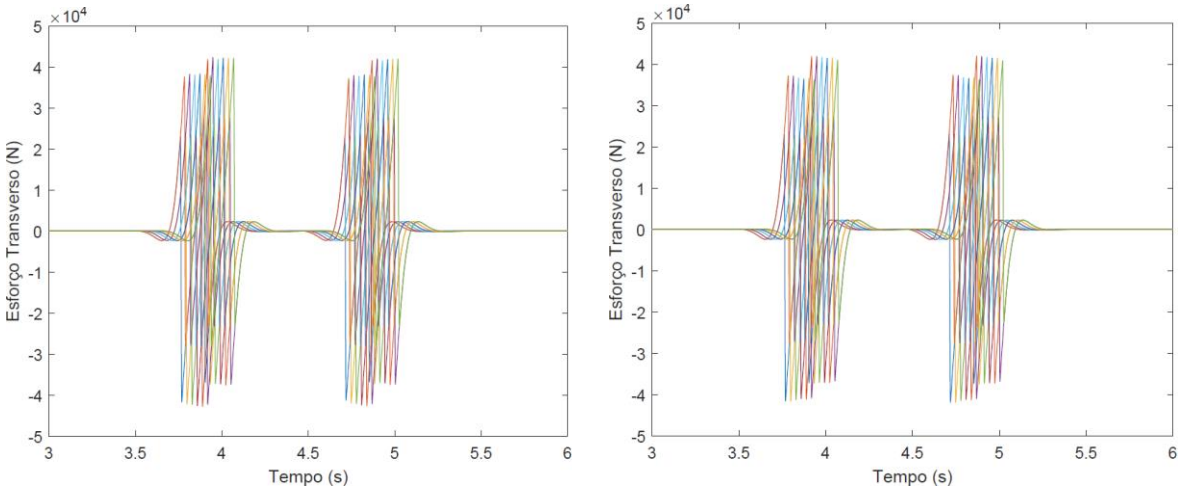
O troço representado na Figura 3.10 tem 12 extensómetros espaçados por 0,3 m em cada carril. O perfil do carril da esquerda está com o nivelamento em sentido descendente, enquanto no carril da direita ocorre o oposto. Apesar destas variações visíveis na Figura 3.10, é de notar que se está a analisar a Figura 3.9 com uma ampliação e consequente aumento na escala, estando-se a considerar décimas de milímetros na Figura 3.10. Também é de notar que não se está a analisar uma zona de nivelamento máximo ou mínimo para nenhum dos carris.

O esforço transverso aplicado pelo Alfa Pendular no troço da via para as velocidades de 10 m/s e de 20 m/s, ou seja, 36 km/h e 72 km/h está representado na Figura 3.11 e 3.12, respetivamente.



a) carril direita b) carril esquerda

Figura 3.11 – Esforço transverso na passagem do Alfa Pendular a 10 m/s a) carril direita; b) carril esquerda



a) carril direita b) carril esquerda

Figura 3.12 – Esforço transverso na passagem do Alfa Pendular a 20 m/s a) carril direita; b) carril esquerda

3.3.3 VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA DE PESAGEM DINÂMICA

A utilização dos dados realísticos tem como objetivo confirmar a 3ª Fase da metodologia, isto é, validar o intervalo de confiança desenvolvido no Capítulo 3.2. Posto isto, calculando a carga dinâmica a partir do esforço transverso, aplica-se essa carga dinâmica resultante à Equação (3.3) e verifica-se se a carga quase - estática inicialmente pressuposta está inserida no intervalo de confiança da carga estática. O comboio Alfa Pendular dos dados realísticos fornecidos tem uma carga quase – estática de Q_s =138940 N.

Com os valores do esforço transverso representados nas Figuras 3.11 e 3.12 é possível calcular a carga dinâmica. Note-se que o cálculo da carga dinâmica é a diferença entre dois esforços transversos consecutivos no mesmo momento, e não nos valores máximos detetados por cada extensómetro. Os valores usados no estudo numérico do Capítulo 3.2 são válidos para a aprovação dos dados realísticos, sendo que o modelo Alfa Pendular é o mesmo, modificando apenas a carga estática Q_s =138940 N.

No Quadro 3.4 são demonstrados os valores do intervalo estático da carga estática para cada carril da via, à velocidade de 10 m/s e 20 m/s em cada eixo do Alfa Pendular. A carga estática do carril esquerdo é $Q_{s,esq} = 69470$ N e a carga estática do carril direito é $Q_{s,dir} = 69470$ N.

Quadro 3.4 – Intervalo de carga estática para dados realísticos

V=10 m/s	**Carril Esquerdo**	**Eixo**	P_{dyn_w} **(N)**	M_r **(Kg)**	M_s **(Kg)**	P_{dyn_s} **(N)**	Std_{Qi}	**Coef**	$Q_{W_{esq},min}$ **(N)**	$Q_{W_{esq},max}$ **(N)**
		Eixo A	69407,357	1711	2003	172	29,70213	1,96	69310,1606	69604,011
		Eixo B	69443,067	1711	2003	172	29,70213	1,96	69345,8704	69639,72164
		Eixo C	69291,117	1711	2003	172	29,70213	1,96	69193,920	69487,771
		Eixo D	69502,133	1711	2003	172	29,70213	1,96	69404,9370	69698,7883
	Carril Direito	**Eixo**	P_{dyn_w} **(N)**	M_r **(Kg)**	M_s **(Kg)**	P_{dyn_s} **(N)**	Std_{Qi}	**Coef**	$Q_{W_{dir},min}$ **(N)**	$Q_{W_{dir},max}$ **(N)**
		Eixo A	69494,425	1711	2003	172	29,70213	1,96	69397,2287	69691,07997
		Eixo B	69482,625	1711	2003	172	29,70213	1,96	69385,4291	69679,2803
		Eixo C	69564,133	1711	2003	172	29,70213	1,96	69466,9370	69760,7883
		Eixo D	69308,133	1711	2003	172	29,70213	1,96	69210,9370	69504,7883
V=20 m/s	**Carril Esquerdo**	**Eixo**	P_{dyn_w} **(N)**	M_r **(Kg)**	M_s **(Kg)**	P_{dyn_s} **(N)**	Std_{Qi}	**Coef**	$Q_{W_{esq},min}$ **(N)**	$Q_{W_{esq},max}$ **(N)**
		Eixo A	69308,667	1711	2003	207	117,86772	1,96	69288,1477	69682,8321
		Eixo B	69349,725	1711	2003	207	117,86772	1,96	69329,2060	69723,8904
		Eixo C	69337,569	1711	2003	207	117,86772	1,96	69317,0497	69711,7341
		Eixo D	69382,167	1711	2003	207	117,86772	1,96	69361,6477	69756,3321
	Carril Direito	**Eixo**	P_{dyn_w} **(N)**	M_r **(Kg)**	M_s **(Kg)**	P_{dyn_s} **(N)**	Std_{Qi}	**Coef**	$Q_{W_{dir},min}$ **(N)**	$Q_{W_{dir},max}$ **(N)**
		Eixo A	69429,083	1711	2003	207	117,86772	1,96	69408,5643	69803,2488
		Eixo B	69397,083	1711	2003	207	117,86772	1,96	69376,5643	69771,2488
		Eixo C	69410,417	1711	2003	207	117,86772	1,96	69389,8977	69784,5821
		Eixo D	69374,167	1711	2003	207	117,86772	1,96	69353,6477	69748,3321

Após o cálculo do intervalo de carga estática com os valores da carga dinâmica resultantes dos dados realísticos, é de notar que os valores do intervalo da carga estática do carril esquerdo ($Q_{W_{esq},min}$ e $Q_{W_{\mathrm{esq}},max}$) e do carril direito ($Q_{W_{dir},min}$ e $Q_{W_{dir},max}$) se encontram entre o valor da carga quase - estática do Alfa Pendular por carril, $Q_{s,esq} = Q_{s,dir} = 69470$ N .

Sendo assim, com os resultados obtidos comprova-se que a metodologia adotada na presente dissertação pode ser usada para casos realísticos, solucionando assim a questão de saber a carga estática real de um comboio em movimento.

3.4 CONCLUSÕES

Neste Capítulo, é apresentado um algoritmo numérico para a pesagem dinâmica de veículos, que permite estimar um intervalo de confiança da carga estática de um comboio em movimento. Após um estudo paramétrico, é demonstrado graficamente o intervalo de confiança para um comboio de mercadorias e o Alfa Pendular, verificando que com o aumento da velocidade, o intervalo de confiança também aumenta.

A metodologia foi validada também com dados realísticos, que simula os aspetos geométricos da via localizada na Linha Norte localizada em Estarreja e do comboio Alfa Pendular. No final, a carga quase – estática do comboio encontra-se inserida no intervalo de confiança de carga estática, verificando assim que a metodologia aplicada nesta dissertação é válida para estimar a carga estática de um comboio em movimento.

4

CONCLUSÕES E PERSPETIVAS FUTURAS

Esta investigação centra-se em estudos numéricos para avaliar a influência da velocidade, da irregularidade do perfil, rigidez e amortecimento das palmilhas e rigidez de contacto na avaliação de cargas estáticas através de um sistema de pesagem dinâmica simples. Foram feitas simulações de perfis de irregularidades com base na FRA, e também avaliação de um caso real localizado em Estarreja. Estas simulações foram realizadas para as velocidades de 5 m/s, 10 m/s, 20 m/s e 40 m/s.

No Capítulo 2 foram descritos os elementos constituintes da via-férrea balastrada, a modelação usada e a sua fundamentação matemática, aplicação ao caso em estudo e análise de resultados. Descreveu-se a modelação da via-férrea balastrada, a modelação do veículo, a modelação da interação da via – veículo e a modelação dos perfis de irregularidades. Também no Capítulo 2, é feita a análise do estudo paramétrico, sendo ele dividido em 4 fases:

1) avaliação da influência da rigidez de contacto;
2) avaliação da influência da velocidade de circulação dos comboios nas cargas dinâmicas;
3) avaliação da influência dos perfis de irregularidade nas cargas dinâmicas;
4) avaliação da influência da rigidez e amortecimento das palmilhas nas cargas dinâmicas.

Estes estudos foram realizados para dois modelos de comboios, um comboio de passageiros (Alfa Pendular) e um comboio de mercadorias. Neste Capítulo foi verificado que:

- fixando a modelação dos comboios e alterando a rigidez de contacto, não afeta significativamente a carga dinâmica;
- em vias de menor qualidade geométrica, mudando a velocidade de circulação dos comboios, é observado uma diferença considerável da carga dinâmica;
- fixando a qualidade geométrica da via, mas mudando o perfil de irregularidades, a carga dinâmica sofre alterações à medida que a qualidade geométrica da via diminui;
- alterando a rigidez e amortecimento das palmilhas, não afeta a carga dinâmica de forma a ser um aspeto considerável para estudos futuros.

No Capítulo 3 é apresentada uma metodologia para um estudo de um sistema de pesagem dinâmica baseado no sistema PEDDIR localizado em Estarreja, de forma a obter um intervalo de confiança de carga estática de um comboio em movimento.

A metodologia foi testada, com sucesso, com dados realísticos de um Alfa Pendular a circular sobre uma via-férrea Portuguesa. Sendo assim, será interessante no futuro desenvolver a metodologia adotada nesta dissertação de forma a poder-se utilizar um sistema de pesagem dinâmica para qualquer tipo de comboio.

No futuro é esperado um desenvolvimento da metodologia para abranger mais modelos de via e comboios, de forma a conseguir estimar um intervalo de confiança de carga estática. Para isso, é necessário continuar a investigação na problemática da presente dissertação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Mosleh, A., P.A. Costa, and R. Calçada, *A new strategy to estimate static loads for the dynamic weighing in motion of railway vehicles.* Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2020. **234**(2): p. 183-200.

[2] Mosleh, A., Montenegro, Pedro; Alves Costa, Pedro; Calçada, Rui, *An approach for wheel flat detection of railway train wheels using envelope spectrum analysis.* Structure and Infrastructure Engineering, 2020: p. 1-20.

[3] Mayer, R., Poulikakos, Lily; Lees, A. R.; Heutschi, K.; Kalivoda, M.; Soltic, Patrik, *Reducing the environmental impact of road and rail vehicles.* Environmental Impact Assessment Review, 2012. **32**: p. 25–32.

[4] Molodova, M., Li, Zili; Núñez, Alfredo; Dollevoet, Rolf, *Automatic Detection of Squats in Railway Infrastructure.* IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2014.

[5] Bosso, N., A. Gugliotta, and N. Zampieri, *Wheel flat detection algorithm for onboard diagnostic.* Measurement, 2018. **123**: p. 193-202.

[6] Kanehara, H. and T. Fujioka, *Measuring rail/wheel contact points of running railway vehicles.* Wear, 2002. **253**(1): p. 275-283.

[7] Uhl, T., *The inverse identification problem and its technical application.* Archive of Applied Mechanics, 2007. **77**(5): p. 325-337.

[8] Fortunato, E., *Renovação de plataformas ferroviárias. Estudos relativos à capacidade de carga*. 2005.

[9] Costa, P.A. *Vibrações do sistema via-maciço induzidas por tráfego ferroviário : modelação numérica e validação experimental*. 2011.

[10] Johansson, A., Nielsen, Jens; Bolmsvik, Rikard; Karlström, Anders; Lundén, Roger, *Under sleeper pads—Influence on dynamic train–track interaction.* Wear, 2008. **265**: p. 1479-1487.

[11] Vale, C. *Influência da qualidade dos sistemas ferroviários no comportamento dinâmico e no planeamento da manutenção preventiva de vias de alta velocidade*. 2010.

[12] Paixão, A. and E. Fortunato, *Novas soluções de superstrutura de via para a Alta Velocidade Ferroviária - Comparação com a via balastrada tradicional*. 2009.

[13] Jiang, Y., B.K. Chen, and C. Thompson, *A comparison study of ride comfort indices between Sperling's method and EN 12299.* International Journal of Rail Transportation, 2019. **7**(4): p. 279-296.

[14] Montenegro, P.A., Calçada, Rui; Carvalho, Hermes; Bolkovoy, Alexander; Chebykin, Ivan, *Stability of a train running over the Volga river high-speed railway bridge during crosswinds.* Structure and Infrastructure Engineering, 2020. **16**(8): p. 1121-1137.

[15] Montenegro, P.A., Heleno, R.; Carvalho, H.; Calçada, R.; Baker, C. J., *A comparative study on the running safety of trains subjected to crosswinds simulated with different wind models.* Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2020. **207**: p. 104398.

[16] Neto, J., Pedro Aires; Vale, Cecília; Calçada, Rui, *Evaluation of the train running safety under crosswinds - a numerical study on the influence of the wind speed and orientation considering the normative Chinese Hat Model.* International Journal of Rail Transportation, 2020: p. 1-28.

[17] Montenegro, P.A., Carvalho, H.; Ribeiro, D.; Calçada, R.; Tokunaga, M.; Tanabe, M.; Zhai, W. M., *Assessment of train running safety on bridges: A literature review.* Engineering Structures, 2021. **241**: p. 112425.

[18] Forrest, J.A. and H.E.M. Hunt, *A three-dimensional tunnel model for calculation of train-induced ground vibration.* Journal of Sound and Vibration, 2006. **294**: p. 678-705.

[19] Sheng, X., C.J.C. Jones, and M. Petyt, *GROUND VIBRATION GENERATED BY A LOAD MOVING ALONG A RAILWAY TRACK.* Journal of Sound and Vibration, 1999. **228**(1): p. 129-156.

[20] Vostroukhov, A.V. and A. Metrikine, *Periodically supported beam on a visco-elastic layer as a model for dynamic analysis of a high-speed railway track.* International Journal of Solids and Structures, 2003. **40**: p. 5723-5752.

[21] Lombaert, G., Degrande, Geert; Kogut, Janusz; François, Stijn, *The experimental validation of a numerical model for the prediction of railway induced vibrations.* Journal of Sound and Vibration, 2006. **297**: p. 512-535.

[22] Takemiya, H. and X. Bian, *Substructure Simulation of Inhomogeneous Track and Layered Ground Dynamic Interaction under Train Passage.* Journal of Engineering Mechanics-asce, 2005. **131**: p. 699-711.

[23] Knothe, K.L. and S.L. Grassie, *Modelling of Railway Track and Vehicle/Track Interaction at High Frequencies.* Vehicle System Dynamics, 1993. **22**(3-4): p. 209-262.

[24] Sheng, X., C.J.C. Jones, and D.J. Thompson, *Responses of infinite periodic structures to moving or stationary harmonic loads.* Journal of Sound and Vibration, 2005. **282**(1): p. 125-149.

[25] Lombaert, G. and G. Degrande, *Ground-borne vibration due to static and dynamic axle loads of InterCity and high-speed trains.* Journal of Sound and Vibration, 2009. **319**: p. 1036-1066.

[26] Ricci, L., Nguyen, V. H.; Sab, K.; Duhamel, D.; Schmitt, L., *Dynamic behaviour of ballasted railway tracks: A discrete/continuous approach.* Comput. Struct., 2005. **83**(28–30): p. 2282–2292.

[27] EN1991-2. *Actions on Structures - Part2: General Actions - Traffic loads on bridges E.C.f. Standardization*. 2003. Brussels.

[28] Lombaert, G., G. Degrande, and D. Clouteau, *Numerical modelling of free field traffic-induced vibrations.* Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2000. **19**: p. 473-488.

[29] Sheng, X., C.J.C. Jones, and D. Thompson, *A comparison of a theoretical model for quasi-statically and dynamically induced environmental vibration from trains with measurements.* Journal of Sound and Vibration, 2003. **267**: p. 621-635.

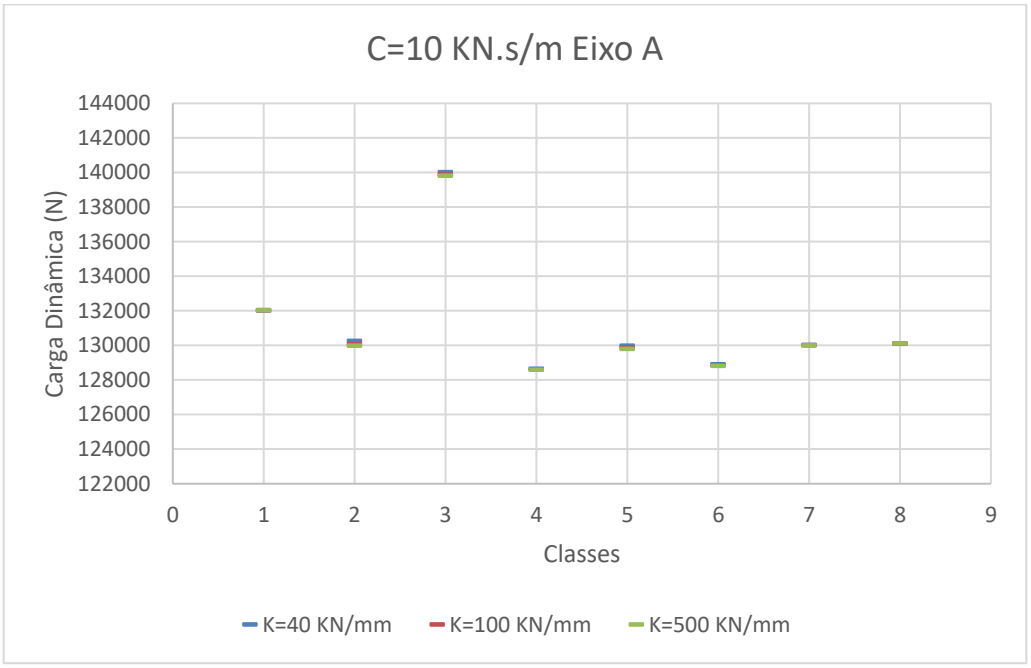
[30] Xia, H., Y.M. Cao, and G. De Roeck, *Theoretical modeling and characteristic analysis of moving-train induced ground vibrations.* Journal of Sound and Vibration, 2010. **329**: p. 819-832.

[31] Mosleh, A., Montenegro, Pedro Aires; Costa, Pedro Alves; Calçada, Rui, *Railway Vehicle Wheel Flat Detection with Multiple Records Using Spectral Kurtosis Analysis.* Applied Sciences, 2021. **11**(9): p. 4002.

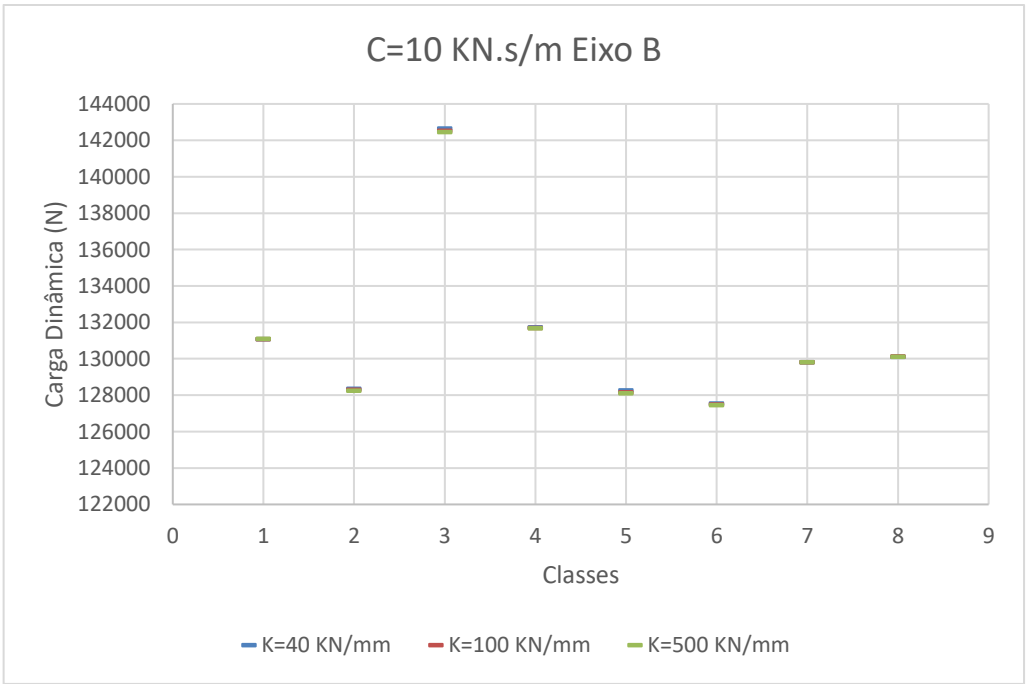
[32] Claus, H. and W. Schiehlen, *MODELING AND SIMULATION OF RAILWAY BOGIE STRUCTURAL VIBRATIONS.* Vehicle System Dynamics, 1998. **29**(sup1): p. 538-552.

5 ANEXOS

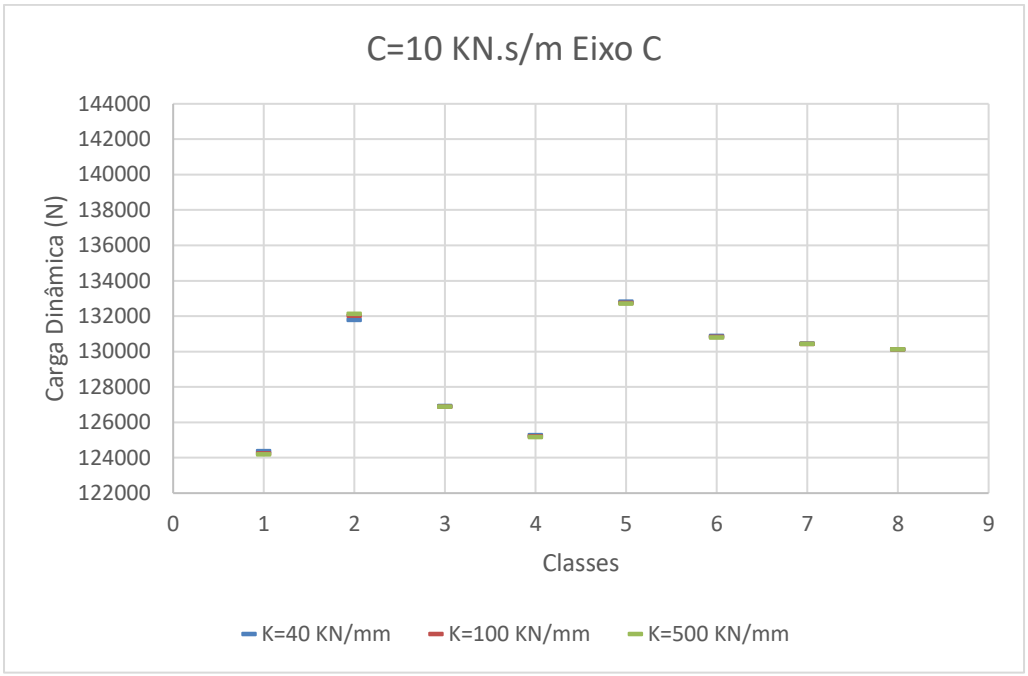
Apresenta-se em anexo os gráficos de apoio para um melhor entendimento do subcapítulo 2.7.5. Figuras relativas ao Quadro 2.11 (Figura 5.1 a Figura 5.5):



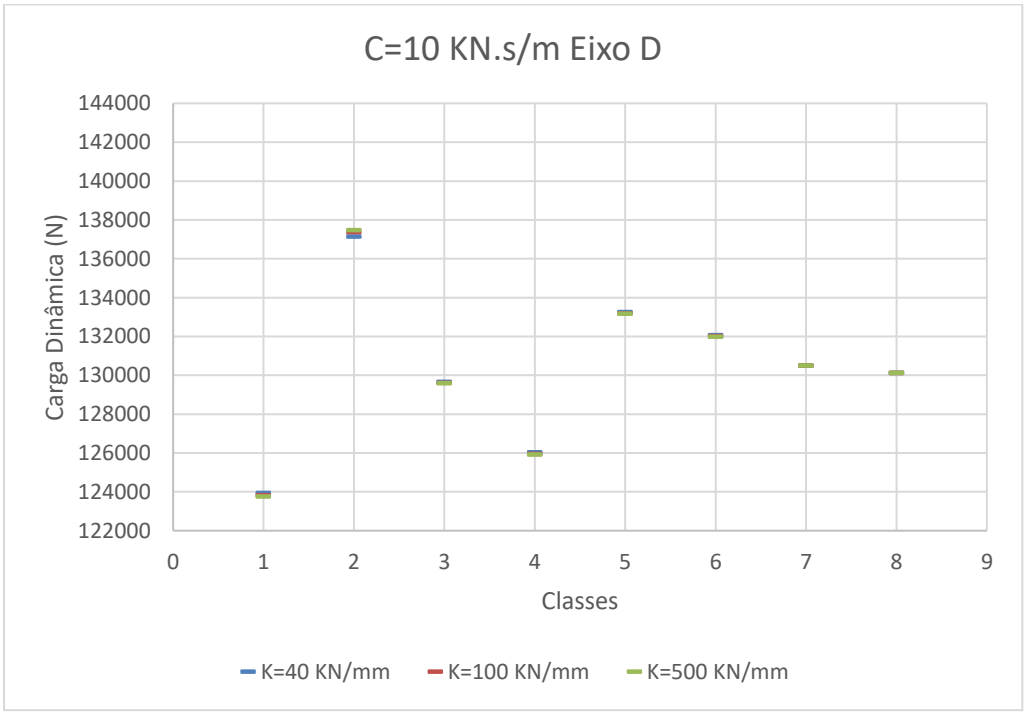
a)



b)

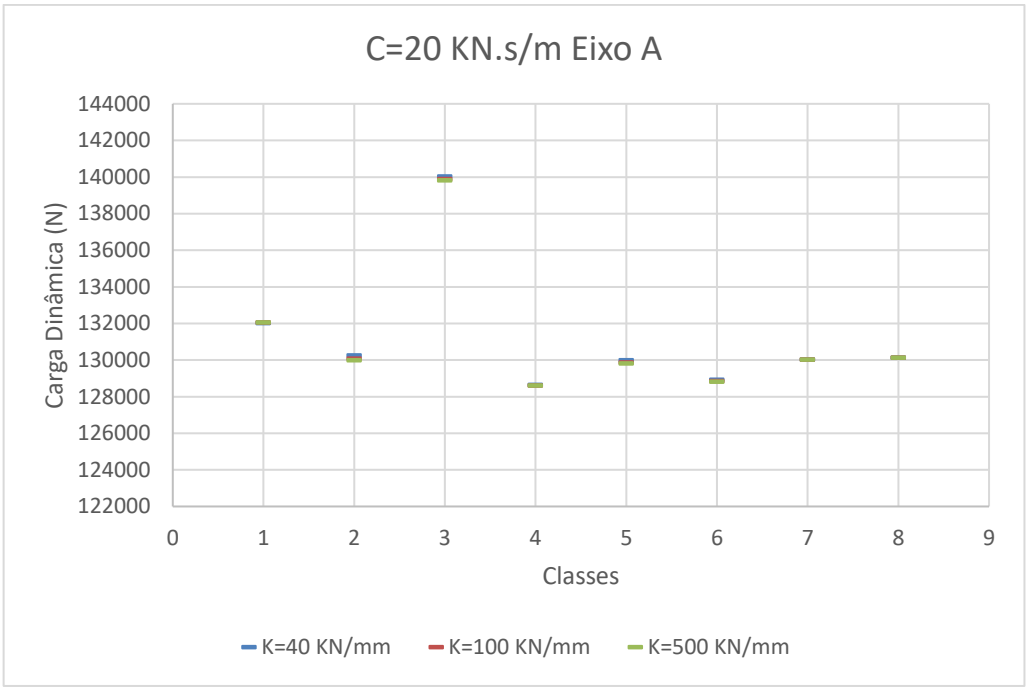


c)

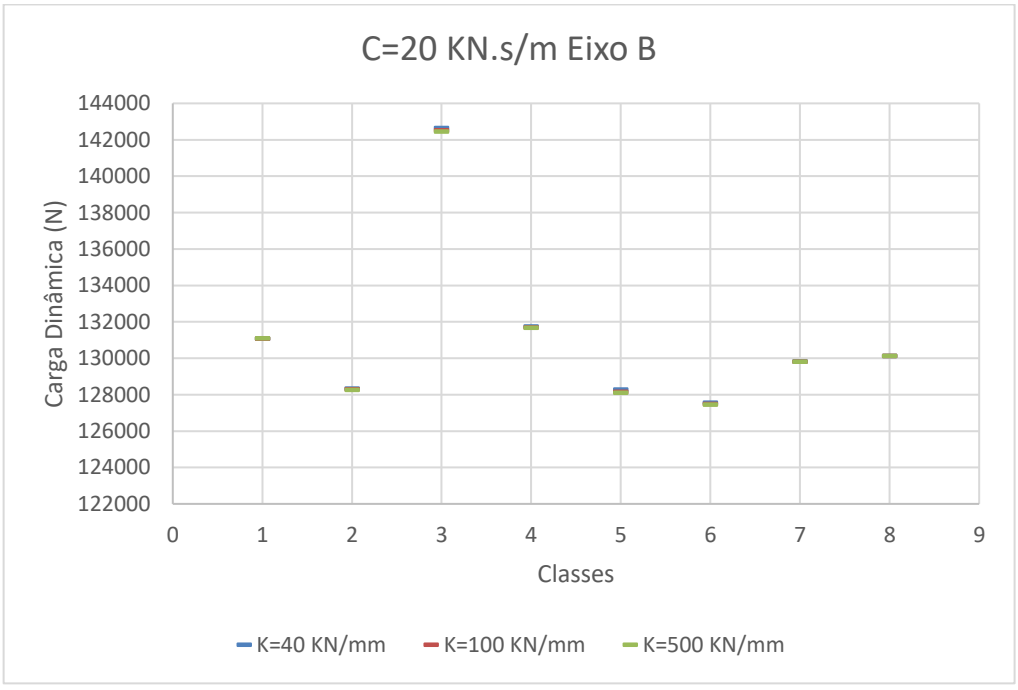


d)

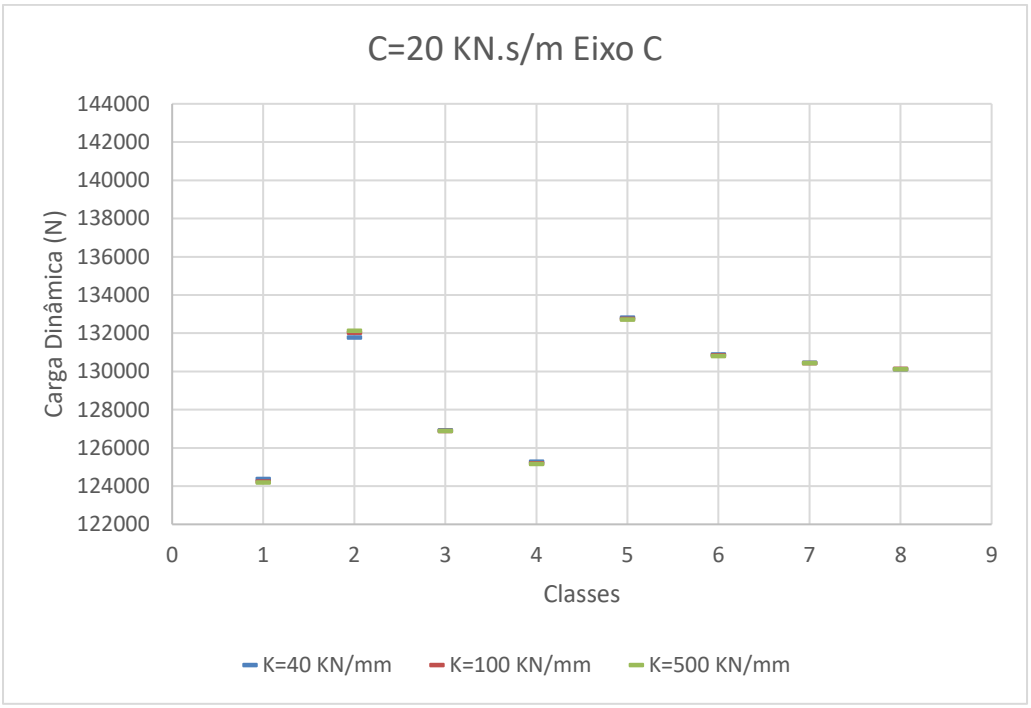
Figura 5.1 – Carga Dinâmica com amortecimento de 10 kN.s/m para diferentes tipos de rigidez (Alfa Pendular): a) Eixo A; b) Eixo B; c) Eixo C; d) Eixo D


C=20 KN.s/m Eixo A
Carga Dinâmica (N)
144000
142000
140000
138000
136000
134000
132000
130000
128000
126000
124000
122000
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
Classes
K=40 KN/mm
K=100 KN/mm
K=500 KN/mm

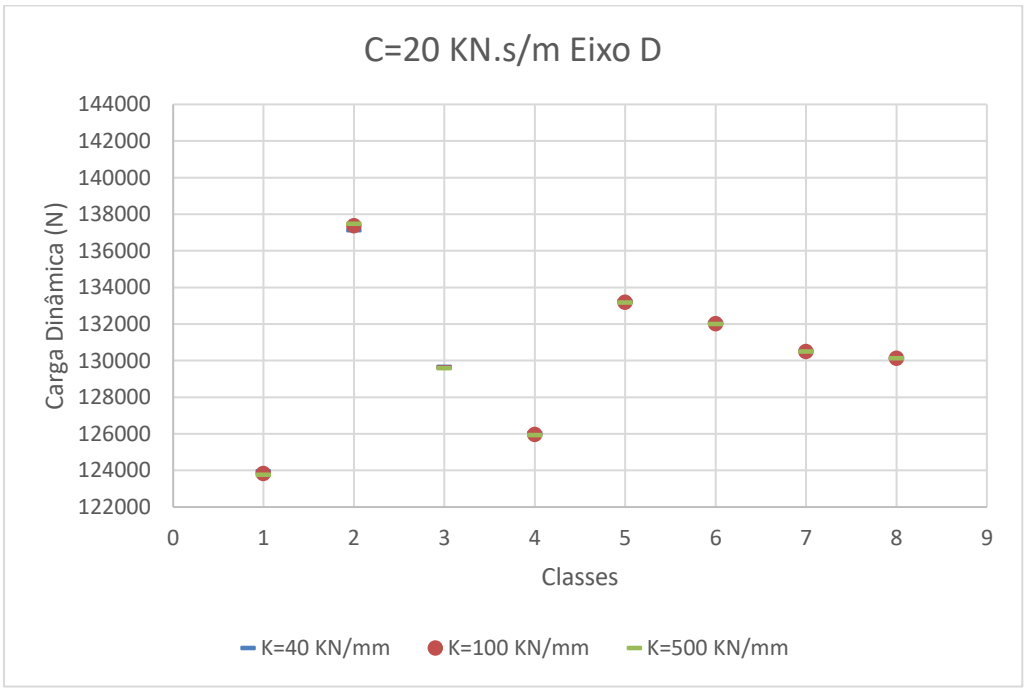
a)


C=20 KN.s/m Eixo B
Carga Dinâmica (N)
144000
142000
140000
138000
136000
134000
132000
130000
128000
126000
124000
122000
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
Classes
K=40 KN/mm
K=100 KN/mm
K=500 KN/mm

b)

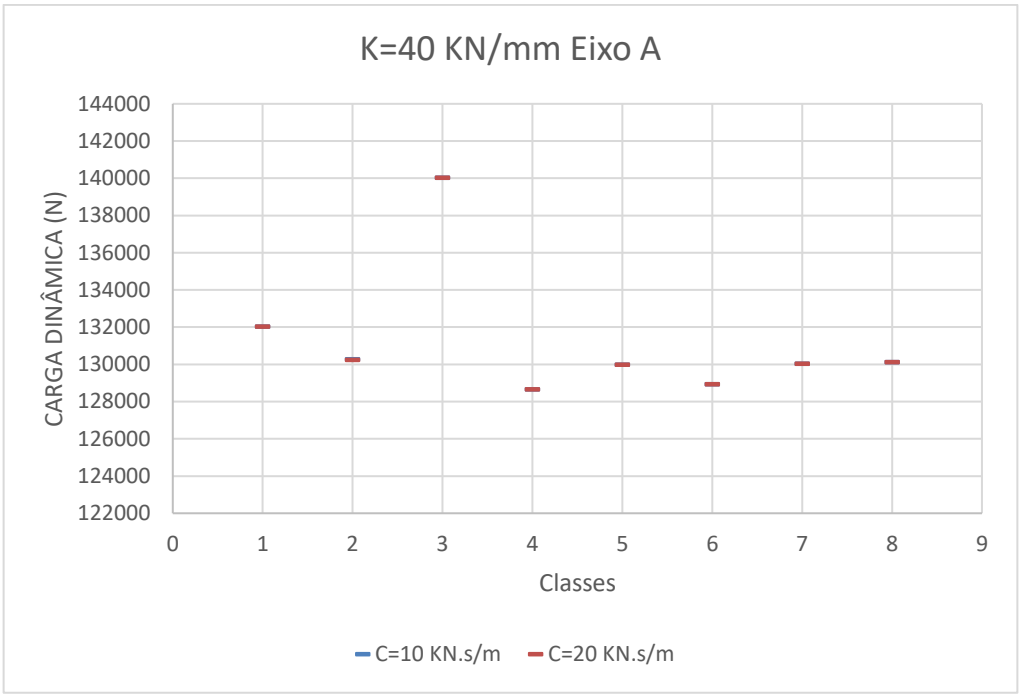


c)

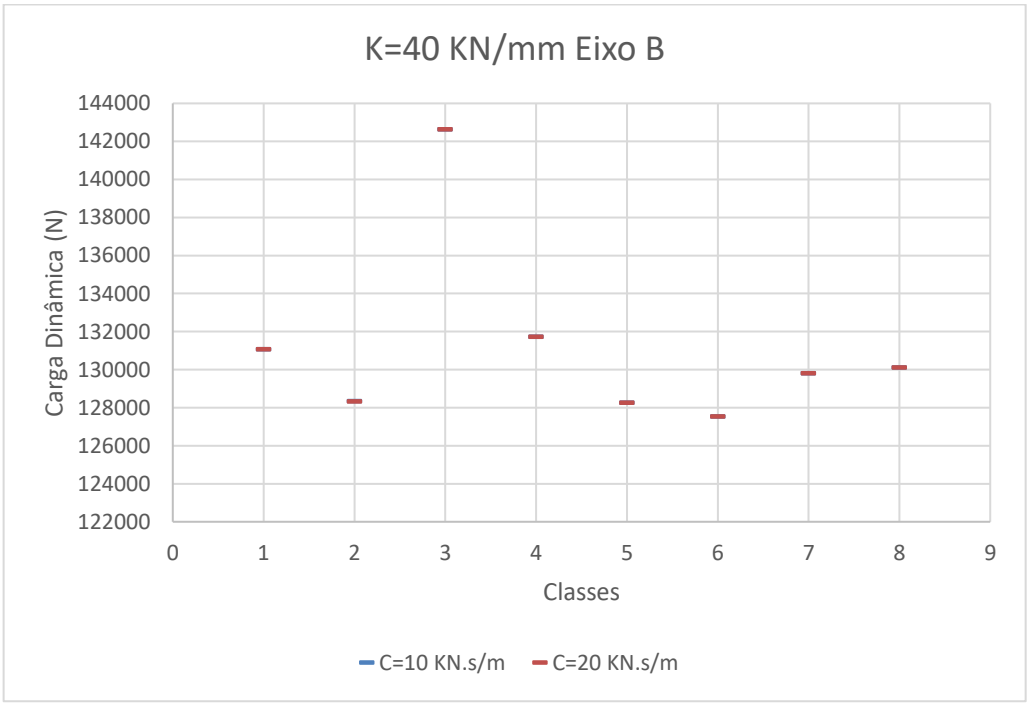


d)

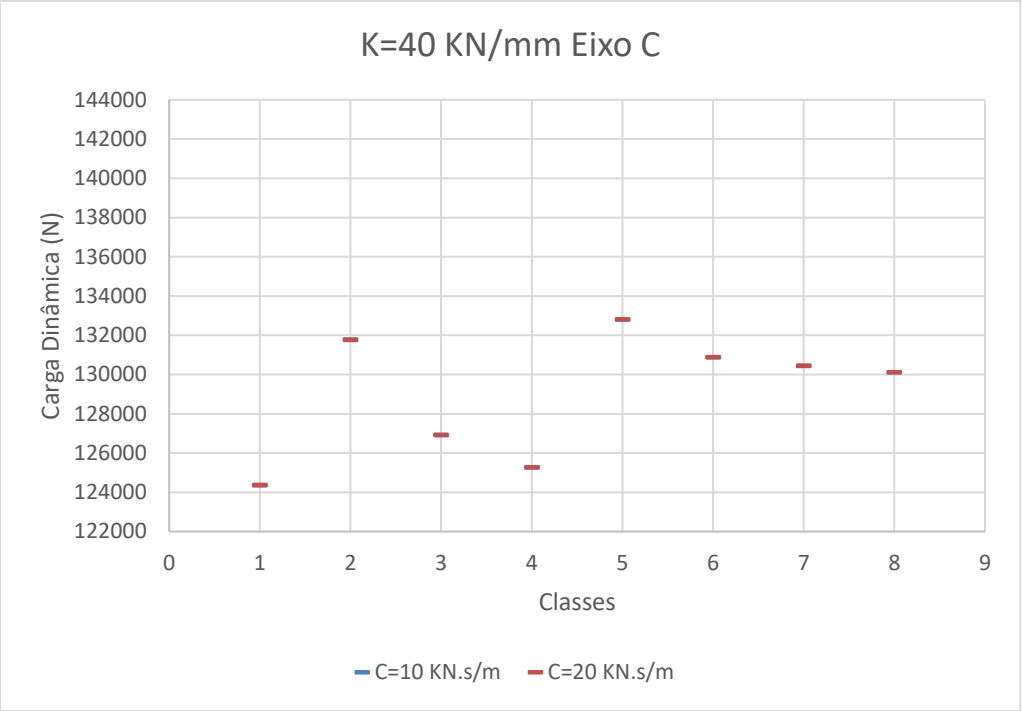
Figura 5.2 – Carga Dinâmica com amortecimento de 20 kN.s/m para diferentes tipos de rigidez (Alfa Pendular): a) Eixo A; b) Eixo B; c) Eixo C; d) Eixo D


K=40 KN/mm Eixo A
CARGA DINÂMICA (N)
144000
142000
140000
138000
136000
134000
132000
130000
128000
126000
124000
122000
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
Classes
C=10 KN.s/m
C=20 KN.s/m

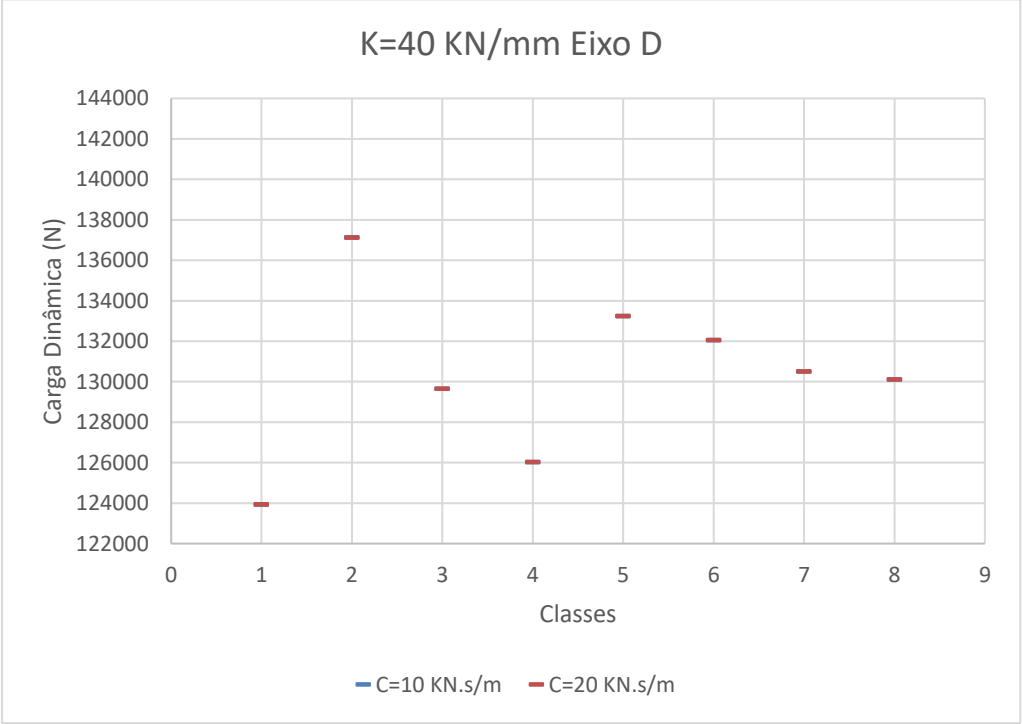
a)


K=40 KN/mm Eixo B
Carga Dinâmica (N)
144000
142000
140000
138000
136000
134000
132000
130000
128000
126000
124000
122000
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
Classes
C=10 KN.s/m
C=20 KN.s/m

b)

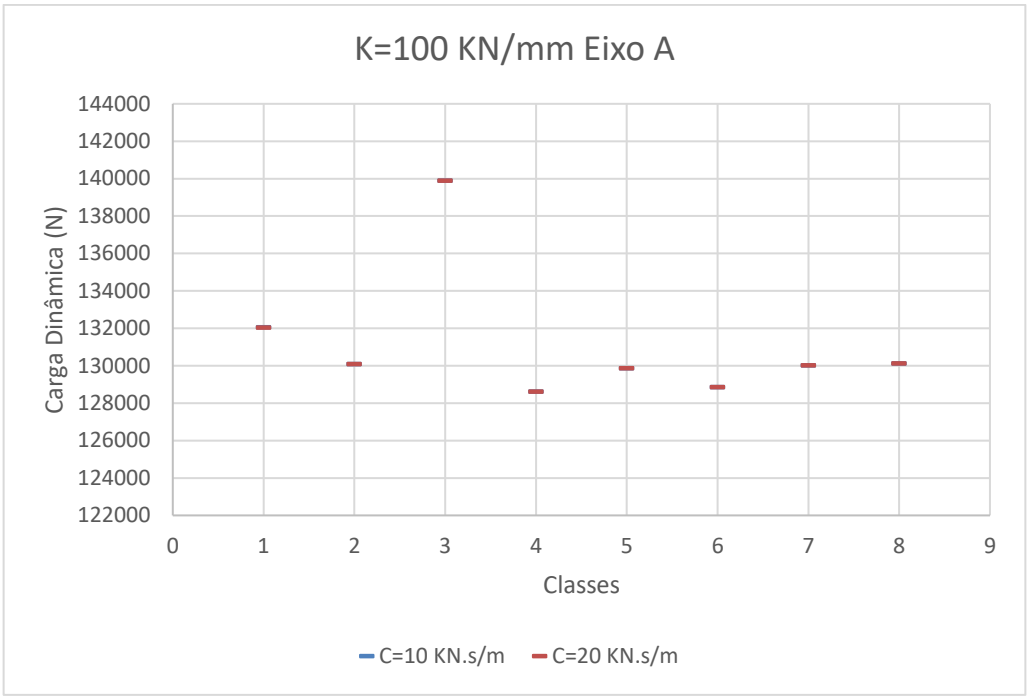


c)

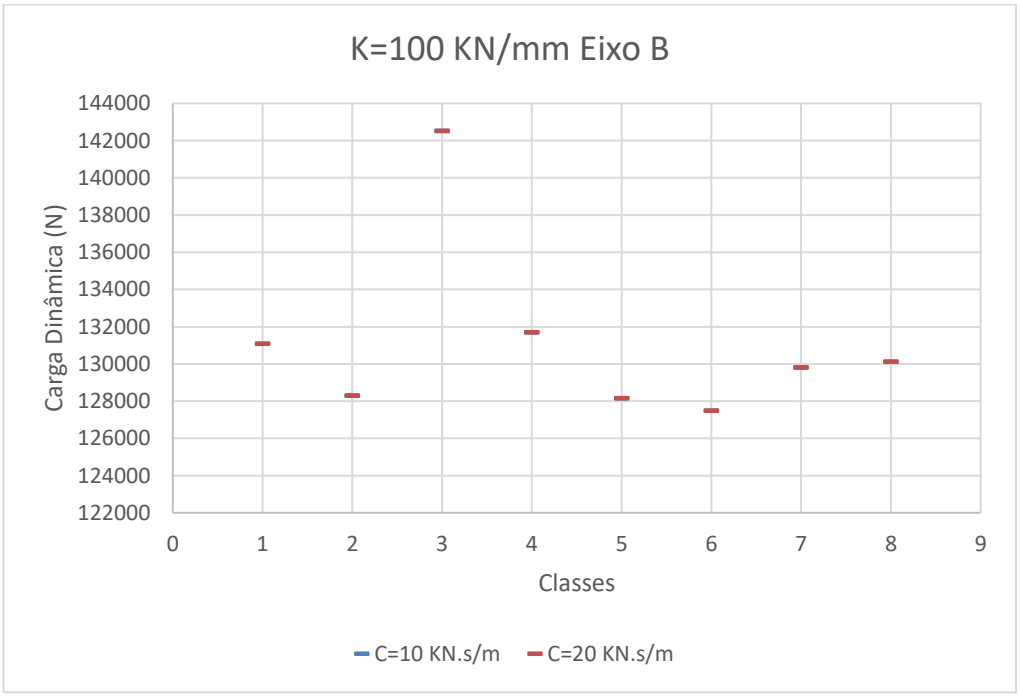


d)

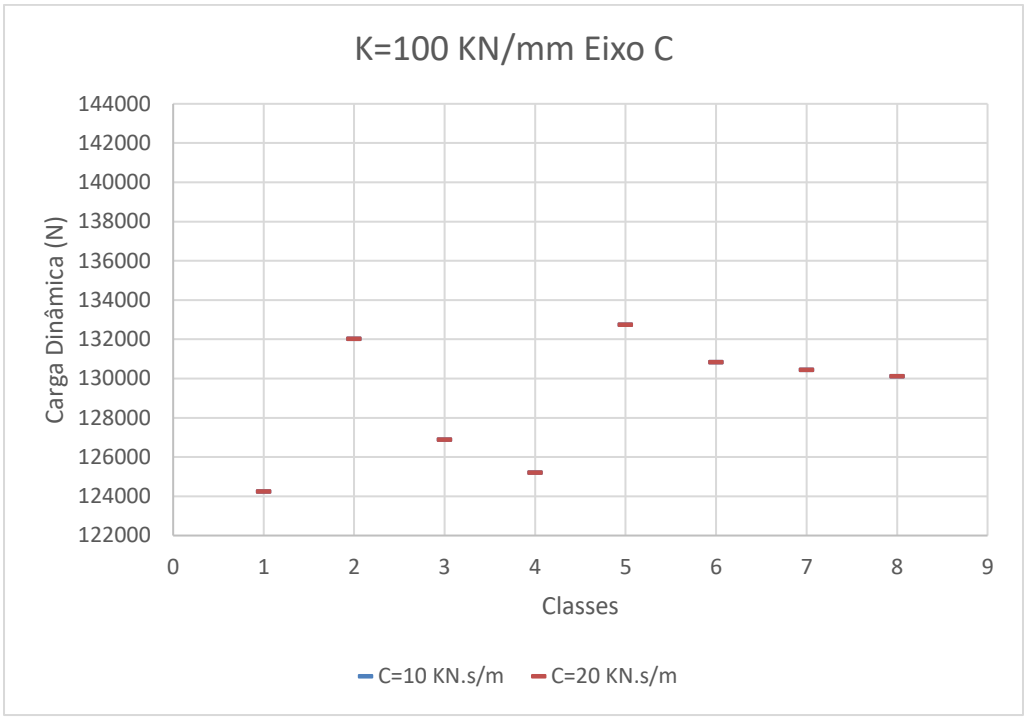
Figura 5.3 – Carga Dinâmica com rigidez de 40 kN/mm para diferentes tipos de amortecimento (Alfa Pendular): a) Eixo A; b) Eixo B; c) Eixo C; d) Eixo D


K=100 KN/mm Eixo A
Carga Dinâmica (N)
144000
142000
140000
138000
136000
134000
132000
130000
128000
126000
124000
122000
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
Classes
C=10 KN.s/m
C=20 KN.s/m

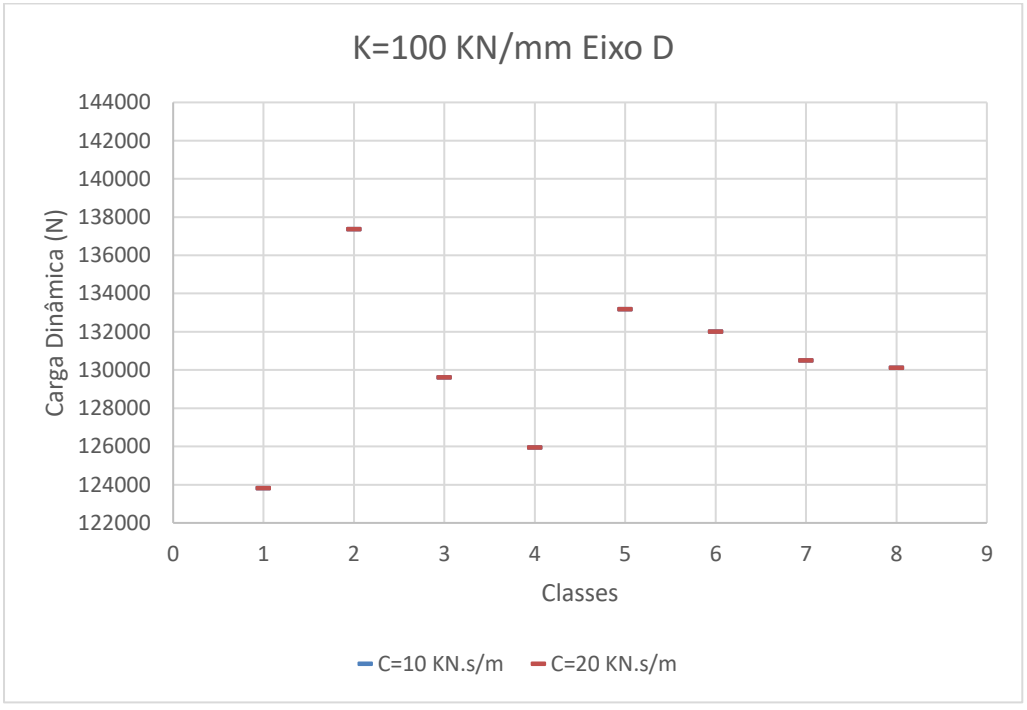
a)


K=100 KN/mm Eixo B
Carga Dinâmica (N)
144000
142000
140000
138000
136000
134000
132000
130000
128000
126000
124000
122000
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
Classes
C=10 KN.s/m
C=20 KN.s/m

b)

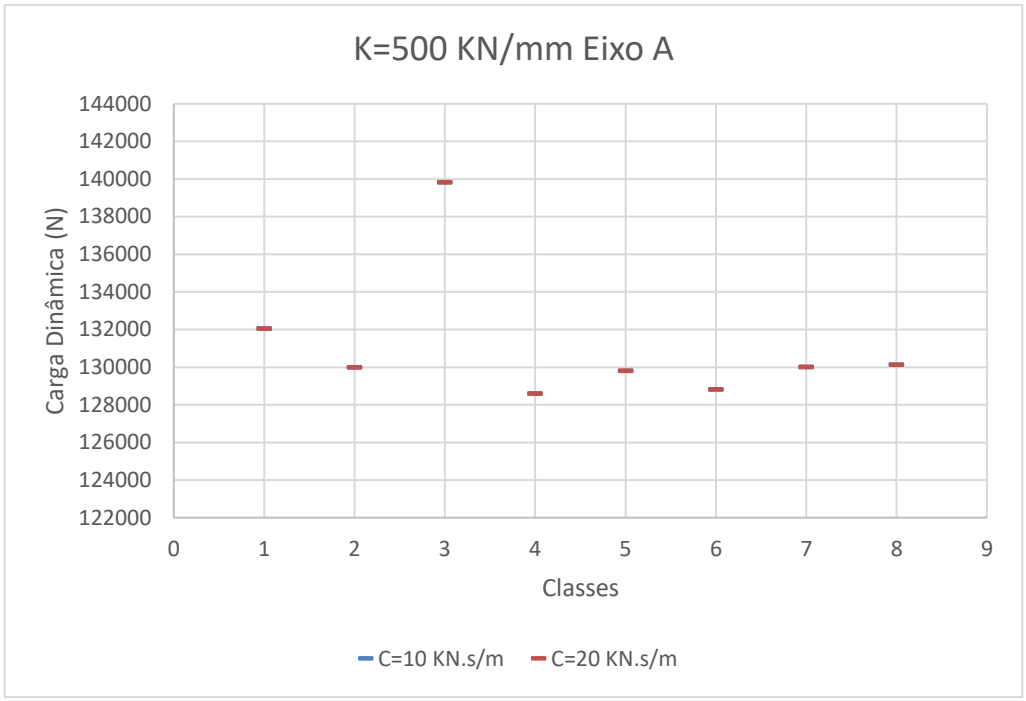


c)

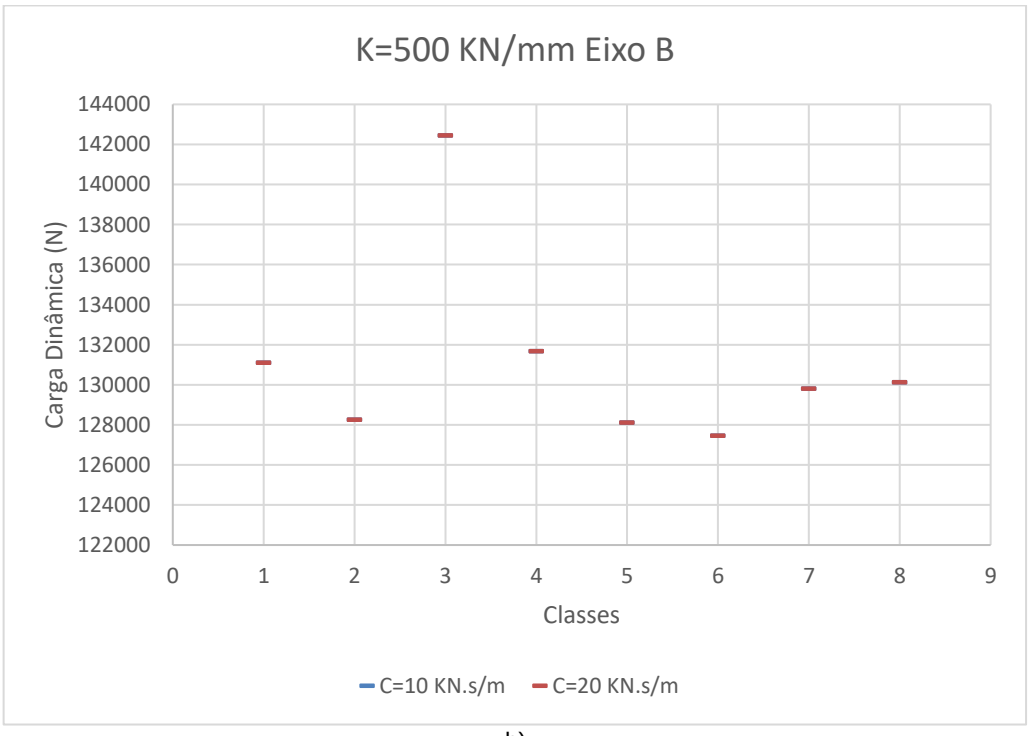


d)

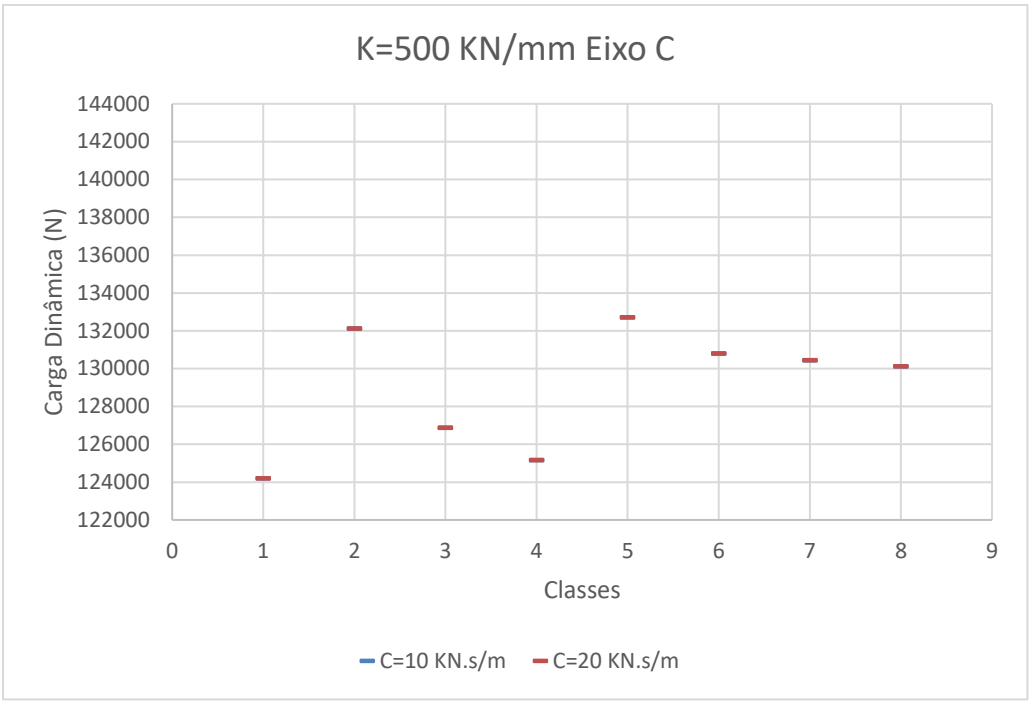
Figura 5.4 – Carga Dinâmica com rigidez de 100 kN/mm para diferentes tipos de amortecimento (Alfa Pendular): a) Eixo A; b) Eixo B; c) Eixo C; d) Eixo D


K=500 KN/mm Eixo A
Carga Dinâmica (N)
144000
142000
140000
138000
136000
134000
132000
130000
128000
126000
124000
122000
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
Classes
C=10 KN.s/m
C=20 KN.s/m

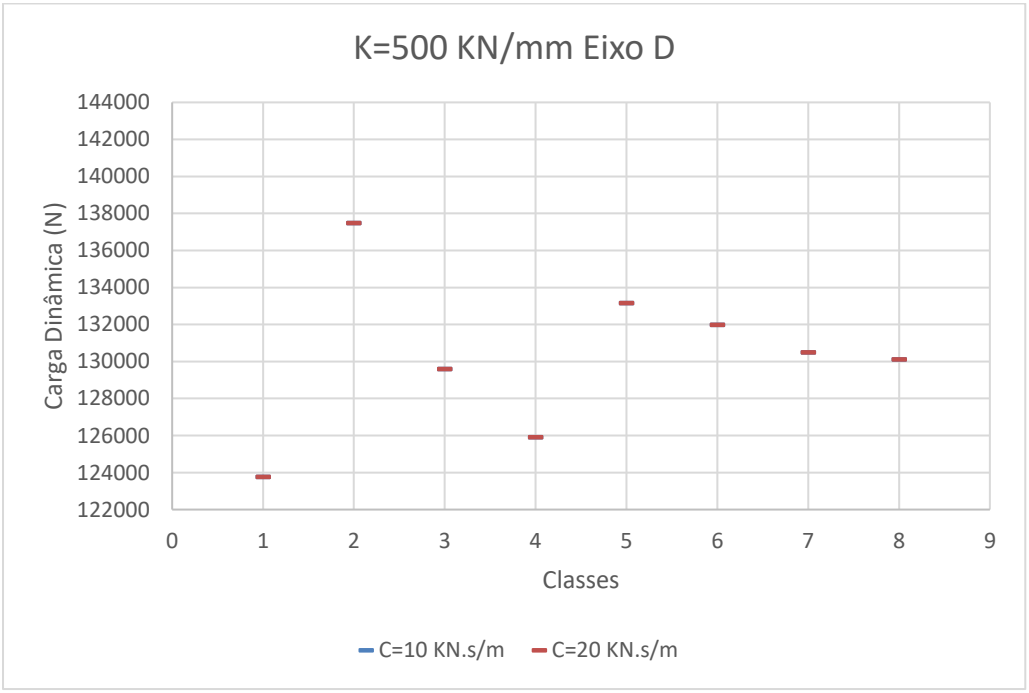
a)


K=500 KN/mm Eixo B
Carga Dinâmica (N)
144000
142000
140000
138000
136000
134000
132000
130000
128000
126000
124000
122000
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
Classes
C=10 KN.s/m
C=20 KN.s/m

b)



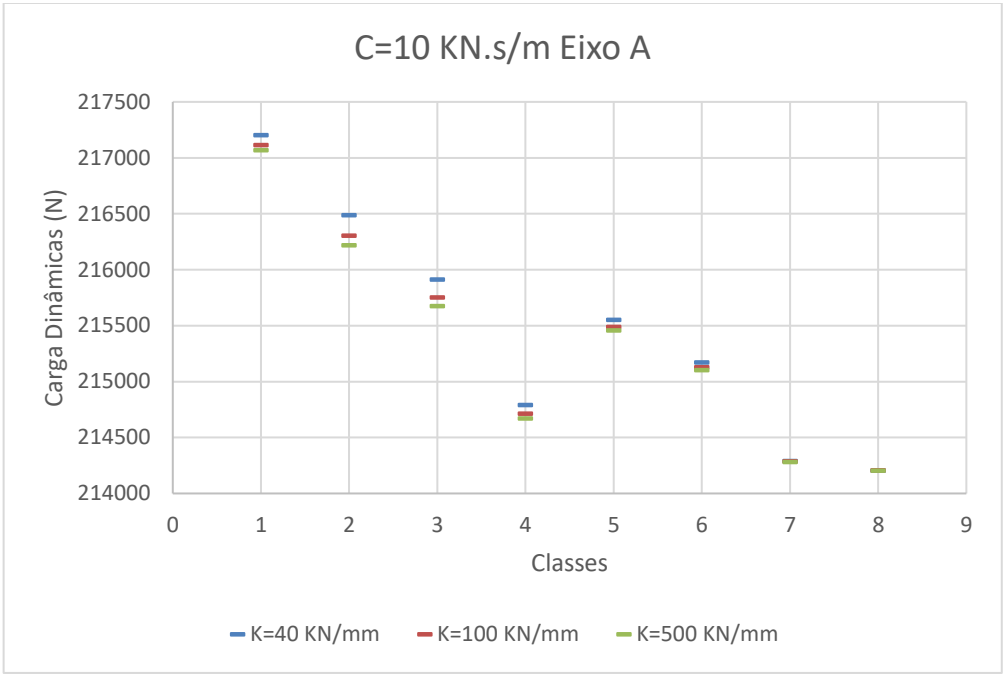
c)



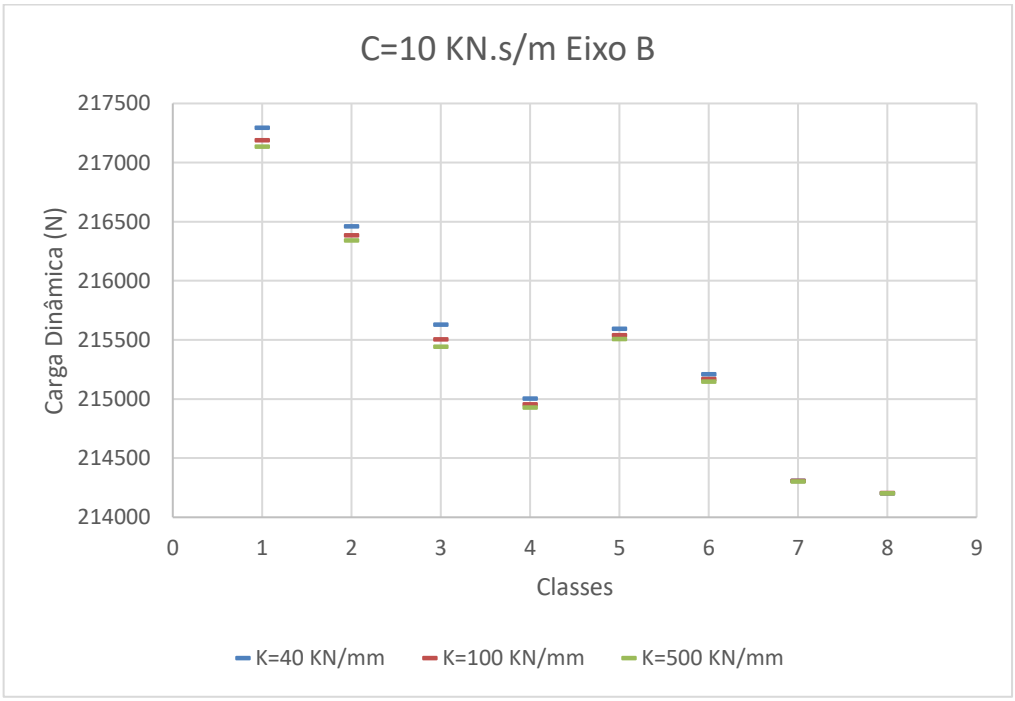
d)

Figura 5.5 – Carga Dinâmica com rigidez de 500 kN/mm para diferentes tipos de amortecimento (Alfa Pendular): a) Eixo A; b) Eixo B; c) Eixo C; d) Eixo D

Figuras relativas ao Quadro 2.12:

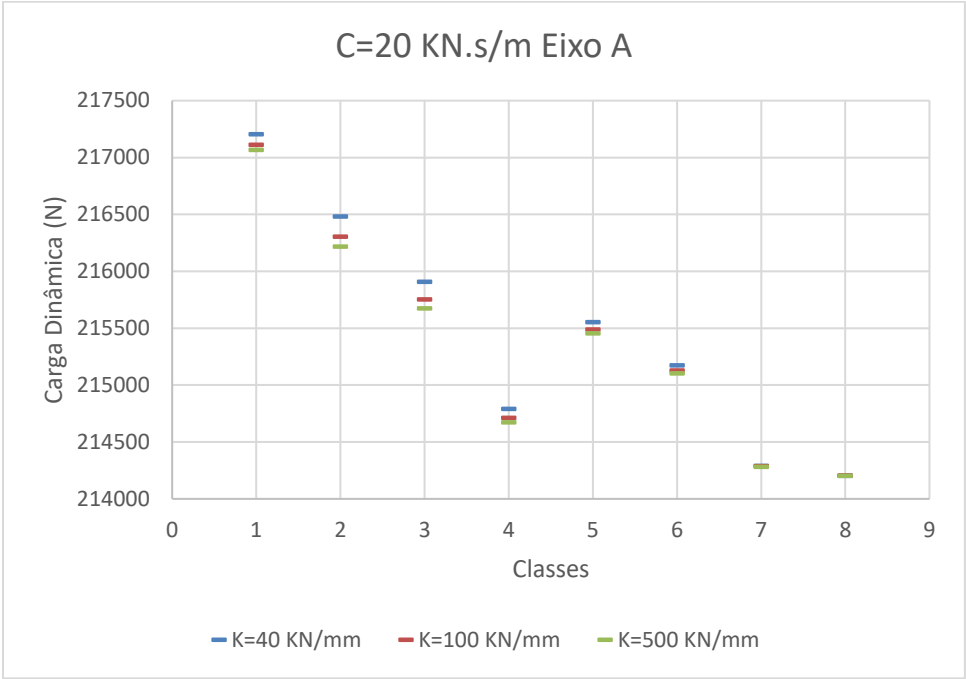


a)

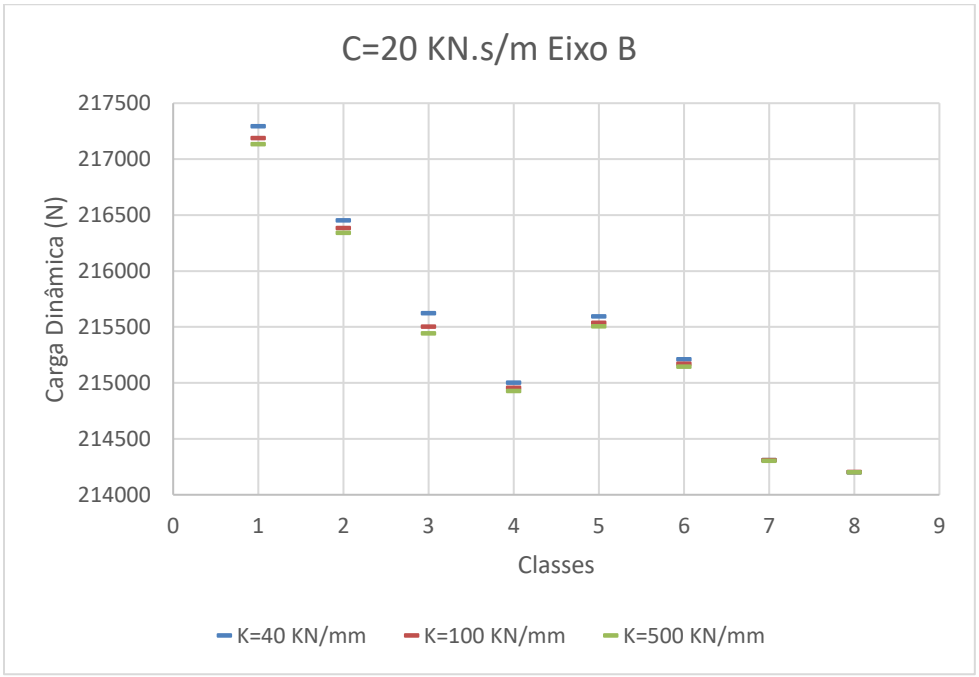


b)

Figura 5.6 – Carga Dinâmica com amortecimento de 10 kN.s/m para diferentes tipos de rigidez (comboio de mercadorias): a) Eixo A; b) Eixo B

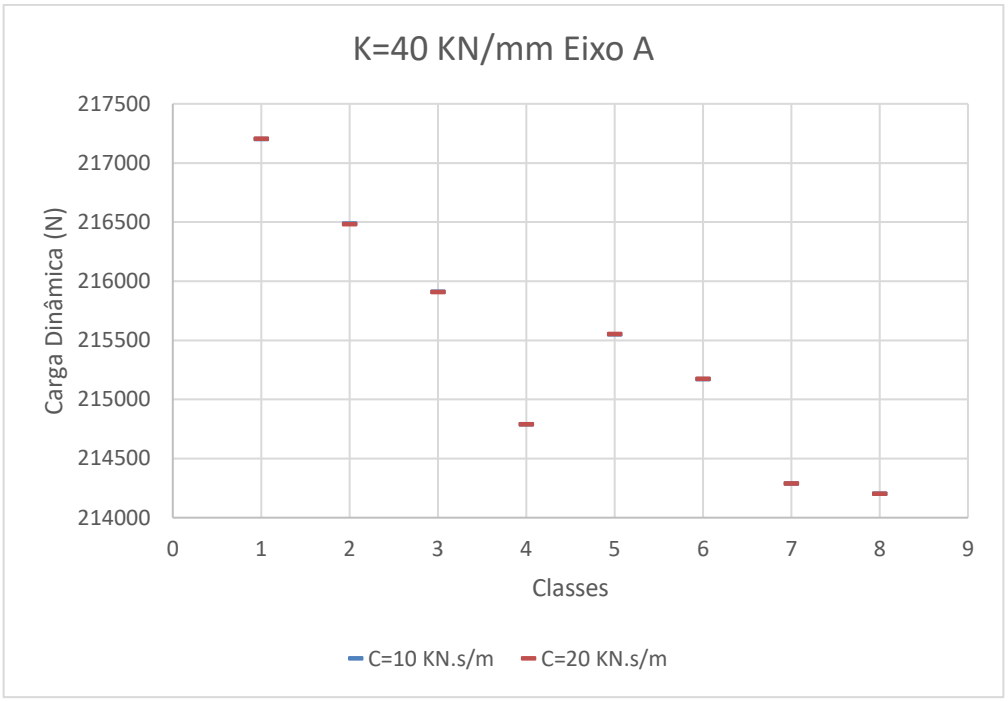


a)

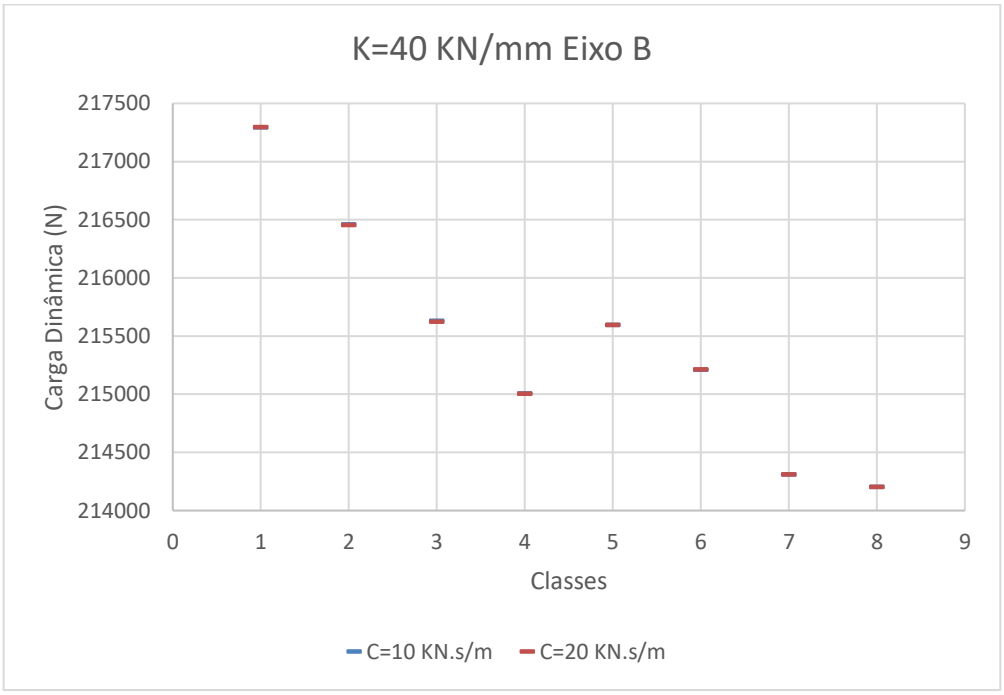


b)

Figura 5.7 – Carga Dinâmica com amortecimento de 20 kN.s/m para diferentes tipos de rigidez (comboio de mercadorias): a) Eixo A; b) Eixo B

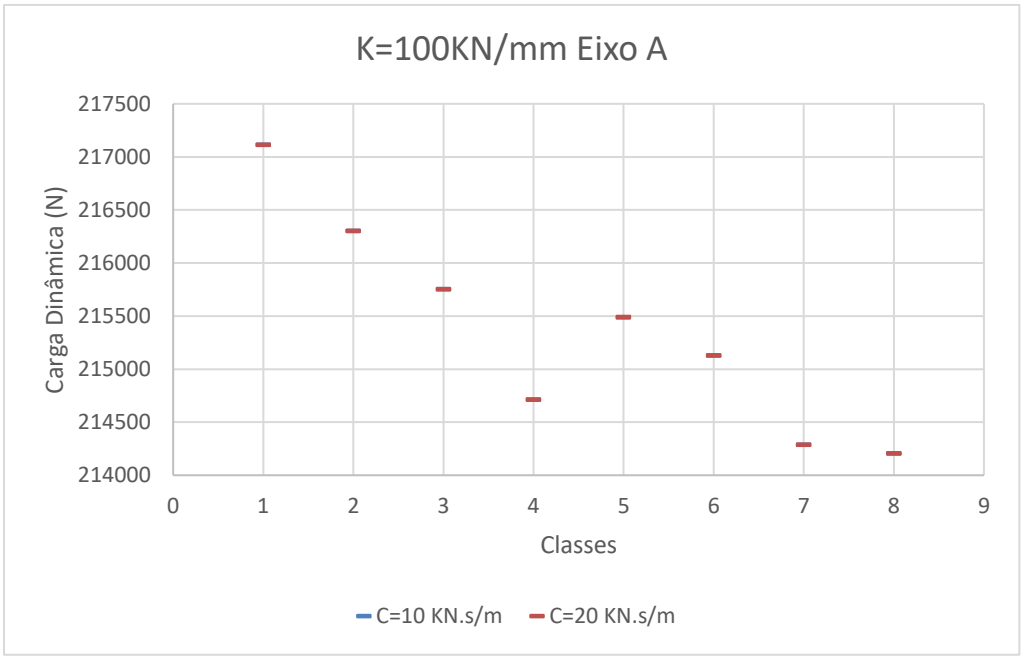


a)

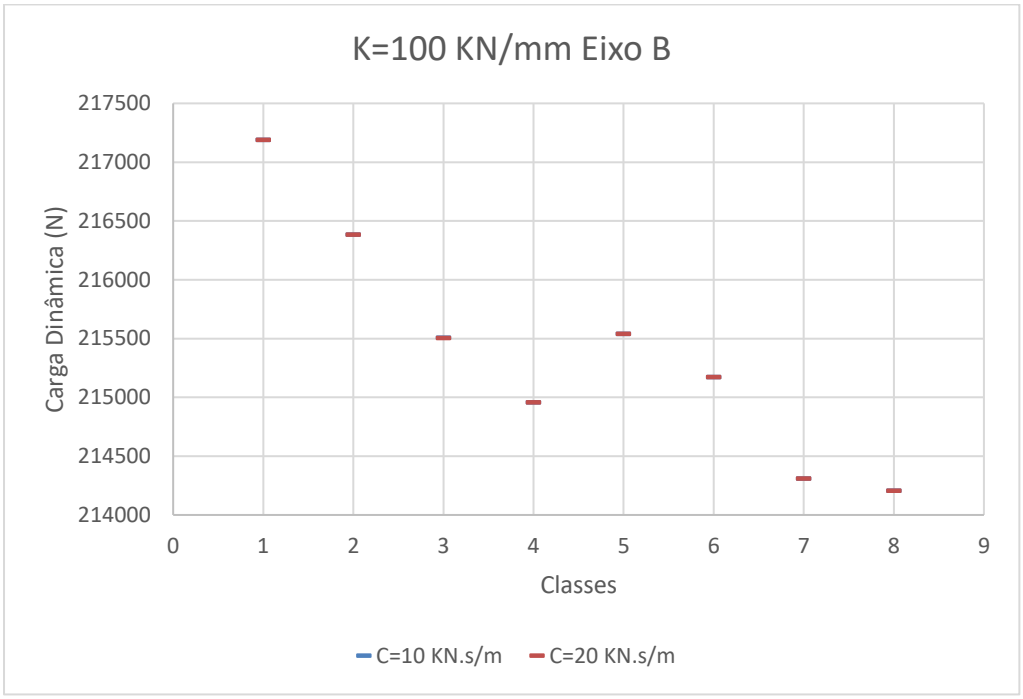


b)

Figura 5.8 – Carga Dinâmica com rigidez de 40 kN/mm para diferentes tipos de amortecimento (comboio de mercadorias a) Eixo A; b) Eixo B

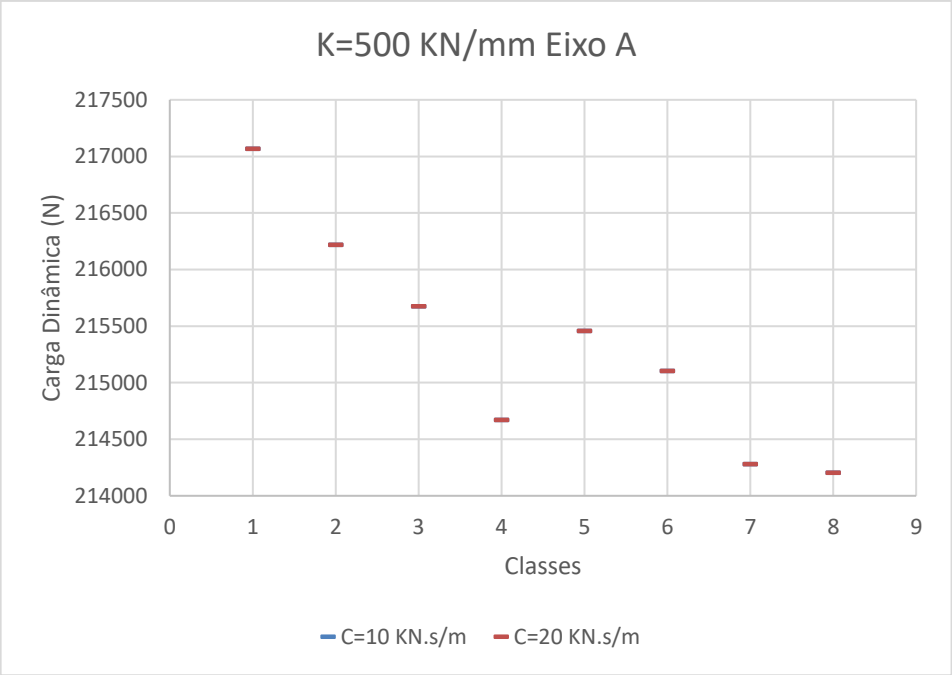


a)

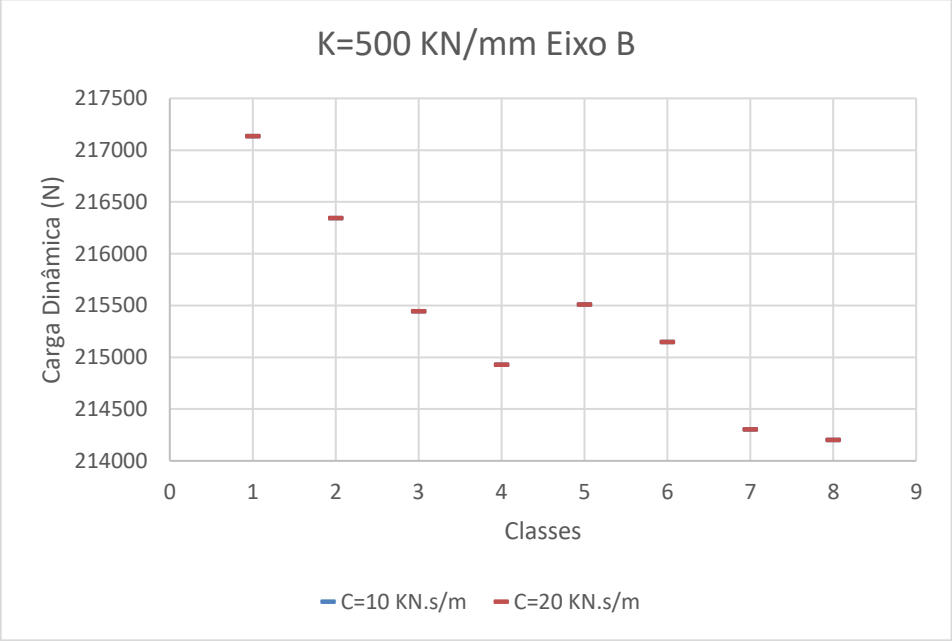


b)

Figura 5.9 – Carga Dinâmica com rigidez de 100 kN/mm para diferentes tipos de amortecimento (comboio de mercadorias a) Eixo A; b) Eixo B



a)



b)

Figura 5.10 – Carga Dinâmica com rigidez de 500 kN/mm para diferentes tipos de amortecimento (comboio de mercadorias a) Eixo A; b) Eixo B