



LABORATÓRIO NACIONAL  
DE ENGENHARIA CIVIL

# **CONTRIBUTOS PARA O CONHECIMENTO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE MATERIAIS DE BALASTRO E DA SUA RELEVÂNCIA PARA O DESEMPENHO DA VIA-FÉRREA**

Projeto LNEC de ID&I “Modelação do comportamento  
da camada de balastro ferroviário” – MODER-B2

Lisboa • maio 2021

**I&D** TRANSPORTES

RELATÓRIO 161/2021 – DT/NIT

## **Título**

**CONTRIBUTOS PARA O CONHECIMENTO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS  
DE MATERIAIS DE BALASTRO E DA SUA RELEVÂNCIA PARA O DESEMPENHO DA VIA-FÉRREA**

## **Autoria**

DEPARTAMENTO DE TRANSPORTES

### **Eduardo Fortunato**

Investigador Principal com Habilitação, Chefe do Núcleo de Infraestruturas de Transportes

### **André Paixão**

Investigador Auxiliar, Núcleo de Infraestruturas de Transportes

Copyright © LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL, I. P.

AV DO BRASIL 101 • 1700-066 LISBOA

e-mail: [lnec@lnec.pt](mailto:lnec@lnec.pt)

[www.lnec.pt](http://www.lnec.pt)

Relatório 161/2021

Proc. 0702/1102/19721

# CONTRIBUTOS PARA O CONHECIMENTO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE MATERIAIS DE BALASTRO E DA SUA RELEVÂNCIA PARA O DESEMPENHO DA VIA-FÉRREA

## Resumo

---

No âmbito Programa de Investigação e Inovação do LNEC 2013-2020 (P2I) e inserido no Programa de ID&I do Departamento de Transportes (DT), o Núcleo de Infraestruturas de Transportes tem vindo a desenvolver um projeto de ID&I designado por “Modelação do comportamento da camada de balastro ferroviário” e identificado pelo acrónimo MODER-B2 (*MODElling Railway Ballast Behaviour*).

Os objetivos deste projeto são: i) contribuir para o aumento da eficiência do transporte ferroviário através da aplicação de métodos de análise estrutural avançados e de modelos de comportamento da via-férrea robustos, que permitam otimizar o funcionamento da infraestrutura; e ii) contribuir para a sustentabilidade das vias-férreas, estudando em profundidade a aplicação de novos materiais e tecnologias, em função das suas propriedades físicas e mecânicas, integrados na estrutura da via-férrea.

Para concretizar esses objetivos têm-se desenvolvido diversos estudos baseados em experimentação laboratorial e na modelação física e modelação numérica avançada, com vista à caracterização de materiais e das estruturas que os integram. Os estudos têm incidido fundamentalmente sobre as propriedades e técnicas de caracterização dos materiais da camada de balastro e sobre o seu contributo para o desempenho da via-férrea, tendo em conta a sua importância em termos técnicos, económicos e ambientais, no ciclo de vida das infraestruturas ferroviárias.

Neste documento descrevem-se atividades e apresentam-se resultados obtidos em alguns dos estudos realizados no âmbito deste projeto.

Palavras-chave: Via-férrea / Balastro / Resistência Mecânica / Morfologia / Modelação física / Modelação numérica / Deformação permanente

## CONTRIBUTIONS TO THE KNOWLEDGE OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF BALLAST MATERIALS AND THEIR RELEVANCE TO RAILWAY TRACK PERFORMANCE

### Abstract

---

In the context of LNEC's Research and Innovation Programme for 2013-2020 (P2I) and the RD&I Programme of the Transportation Department, the Transport Infrastructures Unit has been developing the RD&I project entitled “Modelling Railway Ballast Behaviour” (MODER-B2).

The objectives of this project are: i) to contribute to the increase in rail transport efficiency through the application of advanced methods of structural analysis and of railway track behaviour models, which may allow for optimisation of the infrastructure; ii) to contribute to the sustainability of railway tracks,

studying in depth the application of new materials and technologies, which depend on their physical and mechanical properties, integrated into the track structure.

To achieve these objectives, several studies based on laboratory experimentation and on physical modelling and advanced numerical modelling have been developed, aiming at characterising the materials and the structures that integrate them. The studies have focused mainly on the properties and characterization techniques of ballast layer materials and on their contribution to railway track performance, taking into account their importance in technical, economic and environmental terms, in the life cycle of railway infrastructures.

This document describes activities and presents the results obtained in some of the studies carried out within the scope of this project.

Keywords:           Railway track / Ballast / Mechanical strength/ Morphology / Physical modelling /  
                          Numerical modelling / Permanent deformation

# Índice

1	Introdução .....	1
1.1	Enquadramento .....	1
1.2	Objetivos do projeto MODER-B2 .....	3
1.3	Contributos inovadores do projeto MODER-B2 .....	3
1.4	Metodologia .....	3
1.5	Resumo dos resultados obtidos desde o início do projeto .....	4
2	Estudos para elaboração de modelos digitais de partículas .....	9
2.1	Contextualização .....	9
2.2	Digitalização mecânica por contacto .....	10
2.3	Digitalização recorrendo a equipamento <i>laser</i> .....	11
2.4	Digitalização por fotogrametria a curta distância .....	16
3	Estudos para desenvolvimento de métodos de avaliação da morfologia de partículas .....	22
3.1	Introdução .....	22
3.2	Avaliação da evolução da morfologia durante ensaios de desgaste e de fragmentação ..	24
3.3	Avaliação da evolução da morfologia durante sucessivos ensaios de desgaste .....	30
4	Estudos para avaliação do desgaste de partículas com recurso a modelação numérica por elementos discretos .....	37
5	Estudos para o desenvolvimento de modelos numéricos contínuos de análise estrutural da via-férrea .....	42
5.1	Aspetos gerais .....	42
5.2	Interação travessa-balastro .....	47
5.3	Interação roda-carril .....	49
5.4	Condições de fronteira .....	50
5.5	Leis de comportamento dos materiais da subestrutura .....	51
5.5.1	Comportamento resiliente de materiais granulares .....	51
5.5.2	Deformação permanente de materiais granulares .....	53
5.6	Validação da resposta resiliente no modelo numérico através da monitorização do comportamento dinâmico da via-férrea .....	59
5.6.1	Descrição do caso de estudo e do respetivo modelo numérico .....	59
5.6.2	Solicitações associadas ao tráfego ferroviário .....	61
5.7	Validação da deformação permanente no modelo numérico através da monitorização de um modelo físico da via-férrea .....	63
5.7.1	Descrição do modelo físico e respetivos resultados de ensaio .....	63
5.7.2	Descrição do modelo numérico e respetivos resultados .....	65
6	Estudos para o desenvolvimento de modelos numéricos discretos para análise do comportamento estrutural da camada de balastro .....	68
7	Estudos de modelação numérica do comportamento dinâmico da via-férrea .....	72
7.1	Comportamento resiliente .....	72
7.1.1	Influência do comportamento resiliente não linear da camada de balastro na resposta dinâmica da via .....	72
7.1.2	Influência da velocidade de circulação na resposta dinâmica da via .....	76
7.1.3	Influência de defeitos de geometria na resposta dinâmica da via .....	79
7.2	Comportamento de longo prazo .....	84
8	Estudos experimentais de avaliação das características do balastro contaminado .....	89
9	Estudos de caracterização de materiais alternativos para camada de balastro ferroviário .....	94
9.1	Introdução .....	94

9.2	Avaliação da resistência e da deformabilidade do meio particulado .....	95
9.3	Avaliação da resistência das partículas à rotura por esmagamento .....	102
9.4	Avaliação da morfologia das partículas recorrendo a técnicas de caracterização automatizada.....	104
9.4.1	Análise da morfologia com recurso a técnicas bidimensionais de processamento de imagens .....	104
9.4.2	Análise tridimensional da morfologia e respetiva evolução com recurso à fotogrametria e ensaios de desgaste.....	107
10	Considerações finais .....	123
	Referências bibliográficas .....	125

## Índice de figuras

Figura 2.1 – Digitalização por contacto: a) <i>scanner Roland Modela MDX 20</i> do <i>FabLab</i> ; b) moldes de uma partícula; c) digitalização do molde de uma partícula (Jerónimo; <i>et al.</i> ; 2020) .....	10
Figura 2.2 – Digitalização por <i>scanner</i> : a) equipamento portátil <i>EXAScan</i> da <i>Creaform</i> ; b) partícula sobre uma mesa com alvos refletores; c) modelo digital da partícula; d) detalhe do modelo digital (Jerónimo; <i>et al.</i> ; 2020).....	12
Figura 2.3 – Digitalização de uma partícula com o <i>laser scanner</i> : a) partícula; b) resolução de 0, mm; c) resolução de 0,5 mm; d) resolução de 1,0 mm (Jerónimo; <i>et al.</i> ; 2020) .....	13
Figura 2.4 – Aspectos de digitalização por <i>scanner</i> : a) equipamento de furação das partículas; b) partícula furada; (c) pedestal para apoio das partículas e biombo de alvos refletores (Jerónimo; <i>et al.</i> ; 2020) .....	13
Figura 2.5 – Modelos digitais de uma partícula: a) partícula apoiada numa mesa e submetida a 3 varrimentos; b) partícula apoiada no pedestal e submetida a um único varrimento (Jerónimo; <i>et al.</i> ; 2020) .....	14
Figura 2.6 – Exemplo de representações digitais de duas partículas obtidas com o <i>scanner</i> mecânico (vermelho) e com o <i>laser scanner</i> (azul): a) diversas vistas da partícula 1; b) diversas vistas da partícula 2 (Jerónimo; <i>et al.</i> ; 2020).....	15
Figura 2.7 – Exemplo da representação das diferenças entre o modelo digital obtido pelo <i>laser scanner</i> e o modelo digital obtido pelo <i>scanner</i> mecânico: (a) partícula 1; (b) partícula 2 (Jerónimo; <i>et al.</i> ; 2020) .....	15
Figura 2.8 – Fotogrametria: a) configuração da sessão fotográfica; b) posicionamento da câmara, combinação de imagens e reconstrução esparsa (Paixão; <i>et al.</i> ; 2018a).....	17
Figura 2.9 – Fotogrametria: a) reconstrução densa; b) malha gerada (Paixão; <i>et al.</i> ; 2018a).....	17
Figura 2.10 – Resultados obtidos com o <i>laser scanner</i> e com a fotogrametria: a) partícula de balastro; b) modelo digital com indicação de desvios entre as malhas (cores azuladas indicam que a malha da fotogrametria está dentro da malha do <i>laser scanner</i> ) (Paixão; <i>et al.</i> ; 2018a) .....	18
Figura 2.11 – Desvios entre a reconstrução de uma partícula por fotogrametria e por varrimento a <i>laser</i> utilizando: a) 108 imagens; b) 72 imagens; c) 36 imagens (Paixão; <i>et al.</i> ; 2018a)..	19
Figura 2.12 – Desvios entre a reconstrução fotogramétrica e o varrimento <i>laser</i> de uma partícula: a) partícula de granito original; b) partícula pintada de preto fosco (Paixão; <i>et al.</i> ; 2018a) ..	20
Figura 3.1 – Características morfológicas de uma partícula de balastro (Guo; <i>et al.</i> ; 2019).....	22
Figura 3.2 – Aspeto dos equipamentos de ensaio: a) Los Angeles; b) micro-Deval .....	23
Figura 3.3 – Partículas de balastro granítico utilizadas no estudo (Jerónimo; 2014) .....	24
Figura 3.4 – Equipamentos para determinação do volume e das dimensões das partículas: a) proveta; b) balança ; c) paquímetro (Jerónimo; 2014).....	24
Figura 3.5 – Exemplo de uma partículas de balastro (a) e respetivo modelo digital (b) obtido no 3DReshaper (Jerónimo; 2014).....	25
Figura 3.6 – Relação entre o volume das partículas medido por imersão e o volume calculado a partir dos modelos digitais (Jerónimo; <i>et al.</i> ; 2020) .....	25
Figura 3.7 – Comparação entre a uma partícula e a respetiva réplica em PLA obtida por impressão 3D, em 3 vistas distintas (Jerónimo; <i>et al.</i> ; 2020).....	25
Figura 3.8 – Amostras de balastro no final dos ensaios: a) Los Angeles; b) micro-Deval (Jerónimo; <i>et al.</i> ; 2020) .....	26
Figura 3.9 – Relação entre o volume das partículas medido por imersão e o volume calculado a partir dos modelos digitais, após os ensaios (Jerónimo; <i>et al.</i> ; 2020) .....	27
Figura 3.10 – Variação volumétrica determinada a partir dos modelos digitais elaborados antes e após os ensaios: a) micro-Deval; b) Los Angeles (Jerónimo; <i>et al.</i> ; 2020) .....	27
Figura 3.11 – Partículas antes e após os ensaios micro-Deval e Los Angeles (Jerónimo; <i>et al.</i> ; 2020) .....	28
Figura 3.12 – Comparação das malhas antes e após os ensaios: a) Los Angeles (partícula 7); b) micro-Deval (partícula 1).....	28

Figura 3.13 – Determinação digital das dimensões de uma partícula: a) dimensão máxima (L); b) dimensão mínima (S) (Jerónimo; <i>et al.</i> ; 2020).....	29
Figura 3.14 – Esfericidade das partículas antes e após os ensaios de fragmentação e de desgaste determinada por análise numérica dos modelos digitais (Jerónimo; <i>et al.</i> ; 2020) .....	30
Figura 3.15 – Aspeto de algumas partículas: a) após 2000 revoluções; b) após 14 000 revoluções (b) (Afonso; 2019) .....	31
Figura 3.16 – Alinhamento dos modelos (a); inspeção da partícula (b); avaliação da evolução da morfologia (c) .....	32
Figura 3.17 – Produção de material passado no peneiro de 1,6 mm (% em massa) ao longo de cada um dos ensaios (a) e perda de massa relativa de 10 partículas do 1º ensaio (b) .....	33
Figura 3.18 – Diferenças das malhas da partícula 1 (0 vs. 2000; 2000 vs. 14 000 e 0 vs. 14 000) .....	33
Figura 3.19 – Aspetos da partícula 1 após 2000 e 14 000 revoluções .....	33
Figura 3.20 – Análise dos modelos da partícula 1 (inicial em cima e final em baixo) pela ferramenta de cálculo automático .....	34
Figura 3.21 – Evolução e respetiva classificação modificada (Blott; Pye; 2008) das formas das partículas analisadas. ....	35
Figura 4.1 – Forças normais medidas no grupo principal de partículas durante o ensaio, com malha das partículas de 300 e 3 000 triângulos: a) médias; b) máximas .....	39
Figura 4.2 – Modelação do ensaio: a) velocidade de translação absoluta; b) força normal; c) energia de impacto.....	39
Figura 4.3 – Resultados no grupo principal de partículas durante a modelação do ensaio: a) tensão média; b) intensidade do impacto médio .....	40
Figura 4.4 – Distribuição de tensões numa partícula com superfície discretizada por triângulos: a) 3000; b) 300 .....	40
Figura 4.5 – Intensidade de desgaste da superfície de uma partícula, obtida por análise fotogramétrica antes e depois do ensaio de micro-Deval .....	41
Figura 5.1 – Representação dos sistemas estruturais considerados na modelação (a) e esquema do modelo tridimensional da via-férrea (b) (Varandas; 2013; Paixão; <i>et al.</i> ; 2018c) .....	43
Figura 5.2 – Representação do modelo por elementos finitos da superestrutura da via: a) perfil longitudinal; b) perfil transversal (Varandas; 2013) .....	43
Figura 5.3 – Modelo do veículo, representado por um bogie e meia caixa .....	44
Figura 5.4 – Vista na direção longitudinal da travessa da interação travessa-balastro (Varandas; 2013) .....	47
Figura 5.5 – Sistema de eixos para o contacto vertical (Varandas; 2013) .....	48
Figura 5.6 – Vista na direção transversal da travessa da interação travessa-balastro (Varandas; 2013) .....	48
Figura 5.7 – Representação do método da fronteira absorvente com amortecedores (Varandas; 2013) .....	50
Figura 5.8 – Substituição da camada inferior por um sistema de molas e amortecedores (Varandas; 2013) .....	51
Figura 5.9 – Relação $E_r - \theta$ (Varandas; 2013) .....	53
Figura 5.10 – Deformações permanentes do balastro (componentes deviatóricas e volumétricas) para duas pressões de confinamento consideradas, $\sigma_c$ . Comparação entre os resultados dos ensaios triaxiais (Suiker; 2002) e a resposta do modelo recalibrado (Varandas; <i>et al.</i> ; 2020) .....	57
Figura 5.11 – Deformações permanentes deviatóricas e volumétricas do sub-balastro para duas pressões de confinamento consideradas, $\sigma_c$ . Comparação entre os resultados dos ensaios triaxiais (Suiker; 2002) e a resposta do modelo recalibrado (Varandas; <i>et al.</i> ; 2020) .....	58
Figura 5.12 – Deformações vertical permanentes do balastro para $\sigma_c = -41,3$ kPa (a) e $\sigma_c = -68,9$ kPa (b) (Varandas; <i>et al.</i> ; 2020).....	58
Figura 5.13 – Características do modelo: a) esquema da secção transversal; b) representação tridimensional e respetiva malha de elementos finitos (Paixão; 2014; Paixão; <i>et al.</i> ; 2016b) .....	61

Figura 5.14 – Representação esquemática da distribuição de eixos (em m) e respetiva carga (em kN) dos comboios de passageiros considerados no estudo: a) Alfa Pendular: b) Intercidades.....	62
Figura 5.15 – Deslocamentos verticais do carril (a e b) e acelerações verticais das travessas (c e d) devido à passagem dos bogies dianteiros do Alfa Pendular (AP) e Intercidades (IC) (Paixão; <i>et al.</i> ; 2016b).....	62
Figura 5.16 – Modelo físico construído no LNEC: a) Esquema (vista frontal e lateral); b) (vista frontal e lateral)(Simões; 2015; Varandas; <i>et al.</i> ; 2020) .....	64
Figura 5.17 – Assentamentos medidos na travessa durante o ensaio de carregamento cíclico: a) escala linear; escala logarítmica (Varandas; <i>et al.</i> ; 2020).....	64
Figura 5.18 – Comparação entre o assentamento médio da travessa medido experimentalmente e o estimado com o <i>Pegasus</i> , considerando o comportamento linear e não linear (Varandas; <i>et al.</i> ; 2020) .....	66
Figura 5.19 – Níveis de tensão vertical na malha deformada em 3D (deslocamentos ampliados 15 vezes) numa secção ao longo da direção longitudinal da travessa, após 500 000 ciclos de carga, para a fase de carregamento mínimo (4 kN) (a) e carregamento máximo (98 kN) (b) (Varandas; <i>et al.</i> ; 2020) .....	67
Figura 6.1 – Exemplo de testes de modelação por DEM: a) partículas de balastro sob carregamento; b) rede de forças de contacto estabelecida entre partículas no interior de uma porção de balastro (Fortunato; <i>et al.</i> ; 2020).....	69
Figura 6.2 – Exemplo de resultados de cálculos efetuados para calibração das propriedades do balastro nos modelos DEM: a) modelação de um ensaio triaxial; b) modelos de contactos entre partículas (Fortunato; <i>et al.</i> ; 2020) .....	69
Figura 6.3 – Modelação de um ensaio de carga com placa: a) aspeto do modelo; b) resultado da modelação (Fortunato; <i>et al.</i> ; 2020).....	69
Figura 6.4 – Modelação por DEM de uma travessa sobre balastro: a) modelo sob carregamento; b) rede de forças de contacto estabelecida entre partículas no interior de uma porção de balastro (Fortunato; <i>et al.</i> ; 2020).....	70
Figura 6.5 – Modelação de um trecho de via-férrea por DEM: a) fundação e camada de balastro; b) fundação, camada de balastro e 4 travessas (Fortunato; <i>et al.</i> ; 2020) .....	70
Figura 6.6 – Forças de contacto entre partículas no modelo (corte na direção transversal da via na zona da travessa número 4): a) força normal, peso da via; b) força normal, carregamento do veículo; c) força tangencial, peso da via; d) força tangencial, carregamento do veículo (Fortunato; <i>et al.</i> ; 2020) .....	71
Figura 7.1 – Deslocamentos verticais obtidos nos casos de comportamento linear e não linear: a) Alfa Pendular (AP); b) Intercidades (IC) (Paixão; <i>et al.</i> ; 2016b) .....	73
Figura 7.2 – Posição dos elementos selecionados na análise (Paixão; <i>et al.</i> ; 2016b).....	73
Figura 7.3 – Variação de $p$ e $q$ , nas posições A a F identificadas na Figura 7.2, considerando o comportamento resiliente linear e não-linear do balastro à passagem do Alfa Pendular (AP) e do Intercidades (IC) (Paixão; <i>et al.</i> ; 2016b).....	74
Figura 7.4 – Tensão vertical de pico obtida na camada de balastro (Paixão; <i>et al.</i> ; 2016b) .....	75
Figura 7.5 – Módulo resiliente máximo obtido na camada de balastro (Paixão; <i>et al.</i> ; 2016b) .....	75
Figura 7.6 – Evolução das deflexões dinâmicas do carril durante a passagem do veículo a distintas velocidades, considerando o comportamento elástico linear (preto) e não linear (vermelho) do balastro (Varandas; <i>et al.</i> ; 2016d) .....	77
Figura 7.7 – Trajetória de tensões no espaço $p - q$ , nos elementos A, B e C, durante a passagem do veículo a distintas velocidades (Varandas; <i>et al.</i> ; 2016d) .....	77
Figura 7.8 – Evolução das tensões no elemento A durante a passagem do veículo a velocidades de: a) 220 km/h; b) 350 km/h (Varandas; <i>et al.</i> ; 2016d) .....	78
Figura 7.9 – Rotação das tensões principais em função da velocidade do veículo: a) definição dos ângulos $\alpha_x$ e $\alpha_y$ em perfil longitudinal e transversal; b) variação da rotação das tensões nos elementos D, E e F do balastro (Varandas; <i>et al.</i> ; 2016d).....	79
Figura 7.10 – Esquema representativo de uma zona de transição entre a terra e um viaduto (Paixão; 2014) .....	80

Figura 7.11 – Geometria inicial do carril com assentamento diferencial de 1 mm (Varandas; <i>et al.</i> ; 2014) .....	81
Figura 7.12 – Forças de contacto entre as travessas e o balastro no estado inicial (Varandas; <i>et al.</i> ; 2014) .....	81
Figura 7.13 – Forças verticais máximas de contacto entre as travessas e o balastro devido à passagem do veículo (Varandas; <i>et al.</i> ; 2014) .....	82
Figura 7.14 – Evolução das tensões normais no interior da camada de balastro (Ponto A da Figura 7.2), durante a passagem de um bogie do Alfa Pendular (Varandas; <i>et al.</i> ; 2014) .....	83
Figura 7.15 – Valor máximo da tensão de corte, $q$ , no interior da camada de balastro (Ponto A) ao longo do desenvolvimento da via (Varandas; <i>et al.</i> ; 2014).....	83
Figura 7.16 – Representação do sistema balastro/fundação do modelo da via com 29 travessas, respetiva malha de elementos finitos e sistema de eixos (Varandas; <i>et al.</i> ; 2020).....	84
Figura 7.17 – Assentamento calculado no topo do balastro, sob o centro ( <i>center</i> ) e sob a extremidade ( <i>tip</i> ) da travessa central do modelo, considerando LS A e LS B (Varandas; <i>et al.</i> ; 2020) .....	86
Figura 7.18 – Vistas 3D do sistema balastro/solo carregado pelo bogie da locomotiva: a) $N=1$ ; b) $N=30\ 000$ (deslocamentos ampliados 60 vezes) (Varandas; <i>et al.</i> ; 2020).....	87
Figura 7.19 – Deslocamentos da travessa exclusivamente devido à passagem da locomotiva: a) na extremidade; b) no centro (Varandas; <i>et al.</i> ; 2020) .....	88
Figura 7.20 – Histórico de tensões normais na zona superior da camada de balastro decorrente da passagem da locomotiva, em dois locais sob a travessa, para $N = 1$ e $N = 30\ 000$ (Varandas; <i>et al.</i> ; 2020) .....	88
Figura 8.1 – Materiais utilizados nos ensaios: a) curvas granulométricas; b) aspeto do balastro limpo; c) aspeto do balastro contaminado (Costa; <i>et al.</i> ; 2017) .....	90
Figura 8.2 – Aspeto de um provete de balastro pronto para ensaio (Costa; <i>et al.</i> ; 2017) .....	90
Figura 8.3 – Valores do módulo resiliente dos materiais ensaiados em função da: a) pressão de confinamento; b) tensão deviatórica (Costa; <i>et al.</i> ; 2017) .....	92
Figura 8.4 – Deformação permanente acumulada (Costa; <i>et al.</i> ; 2017) .....	92
Figura 8.5 – Degradação das partículas avaliada após os ensaios de deformação permanente: a) balastro limpo; b) balastro contaminado (Costa; <i>et al.</i> ; 2017) .....	93
Figura 9.1 – Aspeto dos materiais estudados: a) ASIC; b) agregado de granito (Delgado; <i>et al.</i> ; 2019c) .....	95
Figura 9.2 – Curvas granulométricas dos materiais ensaiados (Delgado; <i>et al.</i> ; 2019c) .....	96
Figura 9.3 – Sequência para moldagem dos provetes de balastro em escala reduzida no âmbito dos ensaios triaxiais cíclicos: (a) colocação do material; (b) vedação do molde com a colocação do <i>top-cap</i> e aplicação do vácuo; (c) provete; (d) instalação dos LVDT axiais; (e) detalhe da fixação dos LVDT no <i>top-cap</i> ; e (f) provete na câmara triaxial para início do condicionamento/compactação (Delgado; <i>et al.</i> ; 2019c).....	97
Figura 9.4 – Resistência ao corte em ensaio triaxial do ASIC e do agregado de granito: a) curvas tensão-deformação; b) tensão deviatórica na rotura em função da tensão de confinamento efetiva .....	98
Figura 9.5 – Deformação vertical permanente (Delgado; <i>et al.</i> ; 2021b) .....	100
Figura 9.6 – Deformação vertical permanente (Delgado; <i>et al.</i> ; 2021b) .....	101
Figura 9.7 – Grau de fracturação ( $B_g$ ) para o ASIC e para o agregado de granito, após ensaios de deformação permanente de longo prazo (Delgado; <i>et al.</i> ; 2021b) .....	101
Figura 9.8 – Módulo resiliente dos materiais estudados, antes e após os ensaios de deformação permanente (Delgado; <i>et al.</i> ; 2021b) .....	102
Figura 9.9 – Ensaio de resistência ao esmagamento de partículas: a) equipamento utilizado (LNEC); b) detalhe de um dos ensaios realizados (Delgado; <i>et al.</i> ; 2021b) .....	103
Figura 9.10 – Resistência à rotura de partículas individuais de granito e de ASIC em função do diâmetro médio (Delgado; <i>et al.</i> ; 2021b) .....	104
Figura 9.11 – Equipamento AIMS da UFRJ (Delgado; <i>et al.</i> ; 2019e) .....	105
Figura 9.12 – Partículas analisadas (exemplos com diâmetro nominal de 22,4 mm): a) imagens macroscópicas; b) imagens microscópicas da superfície (microscópio do AIMS); c)	

imagens bidimensionais (fotos AIMS) (Delgado; Viana da Fonseca; Fortunato; <i>et al.</i> ; 2019b) .....	105
Figura 9.13 – Classificação das partículas de ASIC e granito com recurso ao AIMS: a) esfericidade; b) textura superficial; c) angularidade (Delgado; <i>et al.</i> ; 2019e) .....	106
Figura 9.14 – Partículas estudadas: a) ASIC; b) Granito (Paixão; Fortunato; 2021) .....	107
Figura 9.15 – Histogramas de massa (a), volume (b) e área (c) das partículas estudadas (Paixão; Fortunato; 2021) .....	108
Figura 9.16 – Evolução da produção de massa passada no peneiro 1,6 mm (em % da massa do provete) (Paixão; Fortunato; 2021) .....	109
Figura 9.17 – Perda de massa (real) e de volume (estimado a partir das malhas 3D) das partículas no ensaio de micro-Deval (Paixão; Fortunato; 2021) .....	110
Figura 9.18 – Classificação da morfologia das partículas e respetiva evolução ao longo do ensaio (Paixão; Fortunato; 2021) .....	110
Figura 9.19 – Função de distribuição acumulada (FDA) dos índices $p$ , $q$ , $S/L$ e $F$ (Paixão; Fortunato; 2021) .....	111
Figura 9.20 – Exemplo da reconstrução de uma partícula recorrendo às harmónicas esféricas ( $l = 30$ ) (Paixão; Fortunato; 2021) .....	113
Figura 9.21 – Índices $FI3DN$ , $AI3DN$ e $MT3DN$ para 0, 2000 e 14 000 revoluções (Paixão; Fortunato; 2021) .....	114
Figura 9.22 – Função de distribuição acumulada (FDA) para 0, 2000 e 14 000 revoluções dos índices: a) $FI3DN$ ; b) $AI3DN$ ; c) $MT3DN$ (Paixão; Fortunato; 2021) .....	115
Figura 9.23 – Histogramas normalizados do raio de aspereza para as revoluções: a) 0; b) 2000; c) 14 000; d) todas (Paixão; Fortunato; 2021) .....	116
Figura 9.24 – Alterações nos histogramas normalizados do raio de aspereza (Paixão; Fortunato; 2021) .....	117
Figura 9.25 – Exemplo da sobreposição das malhas inicial e final nas posições em que foi aplicado o algoritmo de distância de Hausdorff a) partícula de ASIC; b) partícula de granito (Paixão; Fortunato; 2021) .....	118
Figura 9.26 – Mediana dos histogramas normalizados das distâncias calculadas na sequência do desgaste da superfície: a) entre 0 e 2000 revoluções; b) 0 e 14 000 revoluções (Paixão; Fortunato; 2021) .....	118
Figura 9.27 – Histogramas normalizados do raio de aspereza em escala logarítmica (Paixão; Fortunato; 2021) .....	119
Figura 9.28 – Exemplo de curvatura (a) e valores de desgaste (b) calculados numa partícula (Paixão; Fortunato; 2021) .....	120
Figura 9.29 – Exemplo de zonas evidenciando maior desgaste e raios de aspereza mais curtos: a) partícula de ASIC; b) partícula de granito (Paixão; Fortunato; 2021) .....	120
Figura 9.30 – Histogramas 2D normalizados de curvatura e desgaste: a) 0 a 2000 revoluções; b) 0 a 14 000 revoluções (Paixão; Fortunato; 2021) .....	122

## Índice de quadros

Quadro 4.1 – Parâmetros físicos e parâmetros de contacto entre os materiais.....	38
Quadro 5.1 – Parâmetros os materiais após a recalibração (Varandas; <i>et al.</i> ; 2020).....	59
Quadro 5.2 – Propriedades dos geomateriais (Paixão; <i>et al.</i> ; 2014) .....	60
Quadro 5.3 – Propriedades dos geomateriais do modelo.....	65
Quadro 7.1 – Propriedades dos geomateriais da fundação da via (Varandas; <i>et al.</i> ; 2014) .....	80
Quadro 7.2 – Propriedades dos materiais de balastro e sub-balastro no modelo de comportamento $K - \theta$ (Varandas; <i>et al.</i> ; 2014) .....	80
Quadro 8.1 – Valores de tensão aplicados nos ensaios (Costa; <i>et al.</i> ; 2017) .....	91
Quadro 9.1 – Propriedades dos agregados estudados (Delgado; 2019) .....	94
Quadro 9.2 – Condições experimentais e parâmetros mecânicos obtidos dos ensaios triaxiais monotónicos.....	97
Quadro 9.3 – Parâmetros dos provetes dos ensaios de deformação permanente .....	99

# 1 | Introdução

## 1.1 Enquadramento

No sentido de tornar mais sustentável o transporte de passageiros e de mercadorias, assiste-se atualmente, de forma generalizada, a importantes estímulos no sentido de promover a utilização do transporte ferroviário. Mas é também notório o esforço de tornar este meio de transporte mais eficiente, em particular aumentando a taxa de utilização das vias-férreas, permitindo a circulação a velocidades mais elevadas e recorrendo a maiores cargas por eixo, nomeadamente para o transporte de mercadorias.

Em face da sua utilização, a via-férrea degrada-se, nomeadamente no que se refere à diminuição da sua qualidade geométrica e ao aparecimento de danos nos elementos que a constituem. A taxa de degradação da via-férrea balastrada depende de vários fatores, tais como as características do tráfego (cargas por eixo e velocidades de operação), a qualidade geométrica da via (amplitude e densidade dos defeitos), a qualidade e as condições iniciais de colocação dos materiais das diversas camadas, a influência de fatores externos (condições atmosféricas e agentes erosivos) e a frequência e qualidade das ações de manutenção.

Parte dessa evolução negativa deve-se ao comportamento da camada de balastro, a qual, com frequência, é responsável por significativos custos associados a trabalhos de manutenção e reabilitação, que condicionam a regular operação das linhas.

A camada de balastro recebe os elevados esforços transmitidos pelas travessas, e tem como principal função a sua atenuação e distribuição, reduzindo assim as tensões transmitidas às camadas inferiores. Normalmente, a camada de balastro é constituída por partículas de rocha, com granulometria uniforme, e tem uma espessura mínima entre 20 a 40 cm sob a face inferior das travessas. A interação entre as partículas confere à camada uma elevada resistência à compressão, essencialmente na direção vertical. As forças horizontais que atuam sobre a via (transversais e longitudinais) são equilibradas pelo imbricamento das partículas de balastro e pelo atrito que se gera entre estas e as travessas. De certo modo, o balastro permite o encastramento parcial das travessas, fornecendo estabilidade à superestrutura da via-férrea. Assim, a camada de balastro está sujeita a importantes solicitações, o que permite sugerir que esta é uma das aplicações mais exigentes a que os agregados estão sujeitos, no âmbito da sua utilização em obras de engenharia civil.

A camada de balastro contribui para a drenagem da via, uma vez que permite a percolação da água entre as partículas. Pelo facto de ser constituída por um material resiliente, fornece à via uma capacidade de dissipar energia e atenuar vibrações que resultam da passagem de veículos. É de referir, ainda, outras funções secundárias do balastro, que se traduzem pela inibição do crescimento de vegetação e isolamento elétrico entre os carris.

Sendo o balastro constituído por partículas grosseiras de dimensões semelhantes, é possível efetuar o rearranjo da estrutura da camada, o que facilita as tarefas de manutenção e a reposição da qualidade geométrica da via. Esta faculdade facilita também as operações de colocação e remoção do balastro e dos outros elementos constituintes da via-férrea.

Quando a camada de balastro se deteriora, nomeadamente pela alteração da sua geometria, da granulometria e da compacidade do material que a constitui, o seu funcionamento fica comprometido. Em particular, a alteração da granulometria do material pode resultar: i) da fragmentação e do desgaste das partículas causados por ações mecânicas durante as obras de construção, de conservação e de reabilitação, e pelas tensões decorrentes de cargas impostas pelos comboios; ii) do desgaste provocado por ações físicas e químicas associadas ao meio ambiente; iii) da migração de partículas finas, quer das que se depositam na via quer das que ascendem da fundação. Estes fenómenos podem conduzir à contaminação do balastro com material fino, o que leva à sua colmatação, à perda das suas características, nomeadamente de resiliência e de permeabilidade e, conseqüentemente, à impossibilidade de esta camada desempenhar as funções para que é dimensionada (Fortunato; 2005; Fortunato; 2016).

Assim, o agregado natural utilizado na camada de balastro é uma das matérias-primas mais bem controladas. Aspetos como a distribuição granulométrica, a compacidade do meio granular e a resistência mecânica e a morfologia das partículas são determinantes para garantir um comportamento resiliente e estável da camada.

Enquadrado no Programa de Investigação e Inovação do LNEC 2013-2020 (P2I), o Núcleo de Infraestruturas de Transportes do Departamento de Transportes tem vindo a desenvolver um projeto de ID&I designado por “Modelação do comportamento da camada de balastro ferroviário” e identificado pelo acrónimo MODER-B2 (*MODElling Railway Ballast Behaviour*). O projeto em questão insere-se no Eixo programático “E1 - Património Construído, Gestão Patrimonial de Infraestruturas”, nas Temáticas prioritárias T1, T2 e T9 da matriz programática da Estratégia de Investigação e Inovação (E2I) do LNEC; e na Linha prioritária L12 - “Avaliação do comportamento de soluções inovadoras para melhoria do desempenho estrutural de infraestruturas de transportes”, do Programa de ID&I do DT (2013-2020).

No âmbito deste projeto, com vista a melhor conhecer o comportamento da via-férrea balastrada e a promover a utilização de novos materiais, em particular considerando o novo paradigma da economia circular, tem-se utilizado uma abordagem integrada que contempla, nomeadamente, o desenvolvimento e utilização de técnicas avançadas de caracterização de materiais e estruturas, a modelação numérica da via-férrea, recorrendo a modelos avançados, calibrados com base na análise da resposta estrutural de modelos físicos e de vias-férreas em operação.

É de referir que o desenvolvimento deste projeto tem vindo a contar com a colaboração de outros setores do LNEC, designadamente, o Centro de Instrumentação Científica, bem como de entidades externas, nomeadamente, o Centro do Saber da Ferrovia (CSF) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), o ISCTE - Instituto Universitário de Lisboa, a Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, a Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), a

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (POLI-USP) e diversas empresas privadas, as quais são referidas, quando oportuno, ao longo deste documento.

## **1.2 Objetivos do projeto MODER-B2**

Os objetivos deste projeto são: i) contribuir para o aumento da eficiência do transporte ferroviário através da aplicação de métodos de análise estrutural avançados e de modelos de comportamento da via-férrea robustos, que permitam otimizar o funcionamento da infraestrutura; e b) contribuir para a sustentabilidade das vias-férreas, estudando em profundidade a aplicação de novos materiais e tecnologias, em função das suas propriedades físicas e mecânicas, integrados na estrutura da via-férrea.

## **1.3 Contributos inovadores do projeto MODER-B2**

Com o desenvolvimento deste projeto pretende-se, especificamente, dar contributos para:

- a) Obter um conhecimento mais robusto sobre a resposta global da via-férrea com base em trabalhos experimentais e em análises avançadas dos dados relativos à evolução da qualidade geométrica de vias em operação, contribuindo assim para uma previsão mais precisa do seu comportamento a longo-prazo com recurso a leis de degradação mais representativas do real comportamento da estrutura;
- b) Obter e desenvolver novas competências relativas à construção, instrumentação e monitorização de modelos físicos de vias-férreas construídos em laboratório e, assim, alcançar uma compreensão mais aprofundada sobre a influência de novos materiais e tecnologias no comportamento estrutural da via-férrea;
- c) Contribuir para o dimensionamento de vias-férreas mais eficientes e sustentáveis, utilizando materiais e tecnologias inovadoras, assim como modelos numéricos existentes e explorando novas capacidades destes, de modo a estabelecer linhas orientadoras que visem reduzir o custo de ciclo de vida da infraestrutura.

## **1.4 Metodologia**

O projeto em causa tem previsto um conjunto de tarefas que foram estabelecidas com vista a atingir os objetivos anteriormente referidos, nomeadamente.

- 1) Pesquisa e revisão bibliográfica – direcionada, nomeadamente, para: comportamento e evolução da degradação de vias-férreas; utilização de materiais alternativos em camadas de via-férrea; técnicas recentes de modelação física e numérica.
- 2) Análise de dados de geometria da via obtidos em campanhas de auscultação periódicas – recolha e análise de informação relativa à qualidade geométrica de vias existentes em operação, para caracterizar a evolução geométrica utilizando métodos e algoritmos desenvolvidos anteriormente pela equipa de investigação.

- 3) Modelação física da via-férrea utilizando materiais e tecnologias inovadoras – construção, instrumentação e monitorização de modelos físicos parciais da via-férrea em laboratório, numa instalação experimental de ensaios no LNEC/DT para caracterizar o comportamento estrutural de várias configurações de via-férrea quando sujeitas a vários milhões de ciclos de carga. Esta tarefa inclui a necessidade de, previamente, se caracterizarem em laboratório os materiais a utilizar nos modelos físicos.
- 4) Calibração de leis de degradação – agregação de informação resultante da análise da degradação da qualidade geométrica de vias-férreas existentes (tarefa 2) e de resultados da evolução de diferentes configurações estruturais de via testadas em modelos físicos (tarefa 3). Esta tarefa inclui a calibração de algumas formulações e o desenvolvimento de outras visando reproduzir os resultados obtidos em 3.
- 5) Modelação numérica do comportamento da via-férrea:
  - a) Modelos discretos: modelação numérica do comportamento da camada de balastro utilizando o método dos elementos discretos (DEM). O início desta tarefa inclui a elaboração de uma biblioteca digital de partículas, considerando as suas propriedades físicas e mecânicas determinadas em laboratório. A resposta de modelos simples será calibrada através dos resultados obtidos em ensaios laboratoriais, o que deverá permitir o desenvolvimento de modelos mais complexos para reproduzir a via-férrea. Antevê-se a possibilidade de utilizar os resultados obtidos para calibrar as leis de degradação do balastro.
  - b) Modelos contínuos: utilização e desenvolvimento de técnicas de modelação numérica, empregando métodos de elementos contínuos (MEF, MDF), para modelar diversos aspetos do comportamento dinâmico e de longo prazo da infraestrutura ferroviária, considerando a interação dinâmica veículo-via, e avaliar a adequação das soluções estruturais inovadoras testadas em modelos físicos. Serão incorporados nos modelos numéricos as leis de degradação calibradas na atividade anterior.
- 6) Estabelecimento de recomendações sobre materiais e tecnologias inovadoras – com a integração da informação resultante das tarefas anteriores, pretende-se discutir e sintetizar a informação de forma a ser possível coligir elementos que traduzam a experiência adquirida durante estes estudos.
- 7) Divulgação de resultados – disseminação de resultados através dos meios usuais, nomeadamente, relatórios técnicos, trabalhos académicos, artigos em revistas com revisão por pares, capítulos em livros, comunicações em reuniões científicas da especialidade.

## **1.5 Resumo dos resultados obtidos desde o início do projeto**

As atividades e estudos desenvolvidos desde o início deste projeto de investigação permitiram atualizar conhecimentos, construir equipamentos e sistemas, desenvolver aplicações informáticas, desenvolver modelos físicos e numéricos, elaborar diversos documentos e participar em alguns eventos técnico-científicos de relevo. Destes resultados destacam-se:

a) Protótipos:

1. um sistema de aquisição de dados – descrito em (Paixão; Fortunato; 2016);
2. uma aplicação específica em ambiente *LabView* para controlo de ensaios – descrito em (Paixão; Fortunato; 2016);
3. um sistema de ensaios não destrutivos para caracterização da via-férrea – descrito em (Fortunato; Paixão; 2016);
4. um modelo físico para ensaio – descrito em (Fortunato; Paixão; 2016);
5. métodos para criar modelos digitais de partículas – descritos na secção 2 | deste relatório
6. uma aplicação específica em ambiente *MATLAB* para avaliar a morfologia de partículas – descritos na secção 3 | e na secção 8 | deste relatório
7. uma aplicação específica em ambiente *MATLAB* para cálculo estrutural da via-férrea (implementação de diversas novas funcionalidades num programa de cálculo estrutural existente) – descrito na secção 5 | deste relatório

b) Relatórios Técnicos

1. Estudos experimentais e numéricos sobre o comportamento estrutural da via-férrea no âmbito do projeto MODER-B2 (Fortunato; Paixão; 2016)
2. Sistemas de controlo e monitorização de ensaios de cargas cíclicas no âmbito do projeto MODER-B2 (Paixão; Fortunato; 2016)

c) Capítulos de livros

1. Análise comparada de um agregado de escória de aciaria como material alternativo para lastro de vias férreas do tipo “heavy haul” por meio de ensaios triaxiais (Delgado; Viana da Fonseca; Fortunato; *et al.*; 2019a)
2. Modelação numérica avançada do comportamento estrutural de vias-férreas (Fortunato; Paixão; Varandas; 2021)

d) Artigos em revistas com revisão por pares:

1. Caracterização e modelação numérica da rugosidade de descontinuidades rochosas (Ramos; Fortunato; Resende; *et al.*; 2014)
2. Rock joint topography: three-dimensional scanning and numerical analysis (Resende; Muralha; Ramos; *et al.*; 2015)
3. Photogrammetry for digital reconstruction of railway ballast particles – A cost-efficient method (Paixão; Resende; Fortunato; 2018a)
4. Mechanical behavior of inert steel slag ballast for heavy haul rail track: laboratory evaluation (Delgado; Viana da Fonseca; Fortunato; *et al.*; 2019c)
5. Particle morphology's influence on the rail ballast behaviour of a steel slag aggregate (Delgado; Viana da Fonseca; Fortunato; *et al.*; 2019e)
6. An assessment of contact and laser-based scanning of rock particles for railway ballast (Jerónimo; Resende; Fortunato; 2020)

7. Long-term deformation of railway tracks considering train-track interaction and non-linear resilient behaviour of aggregates - a 3D FEM implementation (Varandas; Paixão; Fortunato; *et al.*; 2020)
  8. Abrasion evolution of steel furnace slag aggregate for railway ballast: 3D morphology analysis of scanned particles by close-range photogrammetry (Paixão; Fortunato; 2021)
  9. Geomechanical assessment of an inert steel slag aggregate as an alternative ballast material for heavy haul rail tracks (Delgado; Viana da Fonseca; Fortunato; *et al.*; 2021b)
- e) Comunicações a congressos:
1. Influência da subestrutura no desempenho da via-férrea (Fortunato; Paixão; 2014)
  2. Evaluation of ballast fouling using GPR (Fontul; Fortunato; De Chiara; 2014)
  3. Characterisation and numerical modelling of the geometry of rock joints (Resende; Ramos; Muralha; *et al.*; 2014)
  4. Non-linear behaviour of geomaterials in railway tracks under different loading conditions (Paixão; Varandas; Fortunato; *et al.*; 2016a)
  5. A Numerical Study on the Stress Changes in the Ballast due to Train Passages (Varandas; Paixão; Fortunato; *et al.*; 2016a)
  6. Estudo do contacto e fecho em descontinuidades rochosas através de digitalização tridimensional (Resende; Muralha; Ramos; *et al.*; 2016)
  7. Sistema de aplicação de cargas cíclicas para estudo do comportamento da via-férrea (Santos; Paixão; Fortunato; *et al.*; 2016)
  8. Some results on the properties and behavior of railway ballast (Fortunato; Paixão; Fontul; *et al.*; 2017)
  9. A proposal for molding of reduced scale ballast samples for repeated load triaxial tests (Delgado; Viana da Fonseca; Fortunato; *et al.*; 2017)
  10. Large-scale triaxial apparatus for railroad ballast material (Costa; Mota; Fortunato; *et al.*; 2017)
  11. Comportamento do lastro ferroviário de agregado de escória de aciaria sob carregamento triaxial monotónico (Delgado; Viana da Fonseca; Fortunato; *et al.*; 2018b)
  12. Comportamento estrutural de um trecho rodoviário construído com agregado siderúrgico inerte para construção (ASIC) (Fortunato; Roque; Gomes Correia; 2018)
  13. Análise comparada de um agregado de escória de aciaria como material alternativo para lastro de vias férreas por meio de ensaios triaxiais monotónicos e cíclicos (Delgado; Viana da Fonseca; Fortunato; *et al.*; 2018c)
  14. Railway ballast behaviour of steel furnace slag aggregate under monotonic triaxial load (Delgado; Viana da Fonseca; Fortunato; *et al.*; 2018a)
  15. Calibration of a high-cycle accumulation model for granular materials of railway track layers using tests of variable cyclic load amplitudes (Varandas; Paixão; Fortunato; *et al.*; 2018)
  16. Aproveitamento de escórias de aciaria em infraestruturas de transportes - estudos e aplicações em Portugal e no Brasil (Delgado; Viana da Fonseca; Fortunato; *et al.*; 2019d)
  17. Stress-strain analysis of heavy haul rail track with steel slag ballast by laboratory tests and numerical simulations (Delgado; Viana da Fonseca; Fortunato; 2021a)

18. Evaluation of ballast particle degradation under micro-Deval testing using photogrammetry (Paixão; Afonso; Delgado; *et al.*; 2021)
  19. Avaliação da degradação de partículas de balastro ferroviário no ensaio de micro-Deval recorrendo à fotogrametria (Paixão; Afonso; Fortunato; 2021) (aceite para publicação)
  20. Effects of Parallel Gradation Scaling Technique on Permanent Deformation of a Ballast Material (Delgado; Viana da Fonseca; Fortunato; *et al.*; 2022a) (aceite para publicação)
  21. Discrete element modelling of micro-Deval testing of steel slag ballast: the effect of particle discretisation on energy evaluation (Paim; Fortunato; Paixão; 2022) (aceite para publicação)
  22. Numerical study on the influence of long-term deformation of the railway tracks on the evolution of the track stiffness (Varandas; Paixão; Fortunato; *et al.*; 2022) (aceite para publicação)
  23. Influência da Resistência das Partículas no Desempenho de um Agregado Siderúrgico Inerte como Lastro de Vias Férreas (Delgado; Viana da Fonseca; Fortunato; *et al.*; 2022b) (aceite para publicação)
- f) Teses e Programas de Investigação:
1. (Jerónimo; 2014) “Caracterização Mecânica, Digitalização Volumétrica e Modelação Numérica de Partículas Rochosas para Balastro Ferroviário”. Tese de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
  2. (Cerdeiral; 2014) “Influência da Substrutura na Evolução da Degradação da Qualidade Geométrica da Via-férrea”. Tese de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
  3. (Ribeiro; 2015) “Estudos sobre métodos não destrutivos de caracterização do comportamento dinâmico da via-férrea com diversos tipos de fundação”. Tese de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
  4. (Simões; 2015) “Caracterização de materiais da subestrutura da via-férrea com aplicação de cargas cíclicas”. Tese de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
  5. (Fortunato; 2016) Comportamento estrutural de vias-férreas balastradas. Contributos para melhorar a eficiência e a qualidade da operação. Programa de Investigação e Programa de Pós-Graduação. TPI 82, Teses e Programas de Investigação LNEC. Lisboa: LNEC. 255 p. (ISBN 978-972-49-2280-5).
  6. (Afonso; 2019). “Caracterização mecânica e digitalização tridimensional na análise de partículas granulares de geomateriais”. Tese de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
  7. (Delgado; 2019) “Geomecânica de um agregado siderúrgico inerte como material alternativo para lastro de vias-férreas do tipo heavy haul”. Tese de doutoramento. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
  8. (Cardoso; 2020) “Análise da resistência mecânica de partículas de balastro ferroviário em ensaios de compressão”. Tese de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

g) Participação em eventos:

1. Participação numa mesa-redonda no âmbito da “Smart Maintenance and Analysis of Transport Infrastructure (SMARTRAIL) Final Conference”. Ljubljana, Eslovénia, 25-26 ago. 2014.
2. Participação numa mesa-redonda sobre Trens de Alta Velocidade, no âmbito do XVII COBRAMSEG - Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica e VII Congresso Luso-Brasileiro de Geotecnia. Goiânia, Brasil, 9-13 de set. 2014.
3. Palestra no âmbito do XVII COBRAMSEG - Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica e VII Congresso Luso-Brasileiro de Geotecnia. Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Sociedade Portuguesa de Geotecnia. Título: Reutilização de Materiais em Aterros de Ferrovia. Goiânia, Brasil, 11 set. 2014.
4. Palestra nas “Jornadas de técnicas de Gestão de Resíduos: Eficiência na utilização de recursos”. Título: “Aplicação de borracha reciclada de pneus em infraestruturas de transportes. Aspectos da via-férrea”. Moviter e Laboratório Nacional de Engenharia Civil. LNEC, Lisboa, 7 março de 2017.
5. Palestra no “1º Simpósio IME - Aplicação do agregado siderúrgico em projetos de infraestrutura de transportes”. Título: “Utilização de agregados siderúrgicos em infraestruturas de transportes - Estudos e aplicações realizados em Portugal”. Instituto Militar de Engenharia do Brasil. Rio de Janeiro, Brasil, 15 de dezembro de 2017.
6. Palestra na Universidade de São Paulo. Título: “Aplicação de materiais não tradicionais em infraestruturas de transporte - Uma contribuição para a sustentabilidade na construção”. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, Brasil, 18 de outubro de 2019.

Neste documento descrevem-se sumariamente algumas tarefas e sintetizam-se resultados obtidos até à data nos estudos realizados no âmbito deste projeto. Nos documentos listados anteriormente é apresentada informação pormenorizada sobre cada estudo, respetivos resultados e referências bibliográficas relevantes. Nos dois relatórios técnicos identificados na lista anterior apresentaram-se outras atividades e resultados obtidos no âmbito deste projeto (Fortunato; Paixão; 2016; Paixão; Fortunato; 2016).

## 2 | Estudos para elaboração de modelos digitais de partículas

### 2.1 Contextualização

O custo, as capacidades técnicas e a facilidade de utilização dos dispositivos de digitalização evoluíram muito nos últimos anos. O desenvolvimento intensivo de ferramentas relacionadas com a visão computacional, a maior facilidade de armazenamento digital e a maior capacidade de processamento permitem a geração, a manipulação e o tratamento de nuvens de pontos e malhas com dimensões cada vez maiores e mais complexas. Atualmente, a digitalização tridimensional de objetos naturais, como partículas de balastro, pode ser realizada com precisão submilimétrica, resultando em modelos 3D com milhões de vértices e facetas. As descrições da geometria da partícula podem ser utilizadas para calcular parâmetros clássicos, como esfericidade e fatores de forma, ou novos parâmetros que requerem descrição completa por meio de imagem automatizada ou algoritmos de processamento de malhas, para alimentar simulações numéricas de elementos discretos (Guo; Zhao; Markine; *et al.*; 2020) ou para avaliar o desgaste de partículas resultantes de ensaios de laboratório ou da utilização em serviço nas infraestruturas (Fortunato; 2016).

A maioria dos métodos de reconstrução de geometria segue sequências semelhantes. Em primeiro lugar, os dispositivos e respetivos algoritmos de digitalização produzem uma lista de coordenadas espaciais dos pontos na superfície externa do objeto - uma nuvem de pontos - por meio de um dos vários métodos, como um sensor mecânico, por contacto, ou por tomografia computadorizada, *laser scanning* ou fotogrametria, sem contacto (Zhao; Zhang; Huang; *et al.*; 2020). Dependendo do método utilizado, propriedades como cor, radiância e temperatura também podem estar associados às coordenadas espaciais. Em seguida, são desenvolvidas várias operações na nuvem de pontos, nomeadamente: análise visual e numérica; limpeza de pontos errados (por exemplo, artefactos de fundo ou resultantes de reflexos de superfície); interpolação ou redução do número de pontos; preenchimento de vazios (por interpolação); controle de qualidade. Finalmente, por meio de um algoritmo, pode ser produzida uma malha a partir da nuvem de pontos, geralmente composta de triângulos.

No âmbito deste projeto analisaram-se vários métodos de digitalização de partículas, e utilizaram-se alguns deles, nomeadamente:

- a) *Scanner* mecânico de contacto, *Roland Modela MDX-20* do *FabLab*
- b) *Laser scanner* portátil, *EXAscan* da *Creaform*
- c) Fotogrametria a curta distância

## 2.2 Digitalização mecânica por contacto

O primeiro equipamento utilizado foi o *scanner Roland Modela MDX-20* pertencente ao *FabLab*<sup>i</sup> de Lisboa, que o disponibilizou, a título gracioso, para alguns estudos desenvolvidos no âmbito deste projeto. O *Roland Modela MDX-20*, representado na Figura 2.1, pode ser utilizado como fresadora de precisão, reproduzindo com grande fidelidade superfícies numéricas tridimensionais em formato *CAD/CAM* (da terminologia inglesa, *Computer-Aided Design/Computer-Aided Manufacturing*) para materiais como plástico, madeira ou mesmo alumínio. Porém para este trabalho a característica mais relevante é a de digitalizar objetos tridimensionais através de uma agulha piezoelétrica de grande sensibilidade que permite uma resolução até 0,05 mm no plano horizontal e 0,025 mm na vertical. A área máxima de trabalho do aparelho é de 203,2×152,4 mm<sup>2</sup> e a altura máxima de 60,5 mm; no entanto, as dimensões podem ser ajustadas às de objetos de menores dimensões através do *software* de controlo do processo, *Dr. Picza*<sup>ii</sup>. A agulha piezoelétrica faz varrimentos paralelos da área pré-estabelecida e baixa até tocar o objeto, sendo assim possível obter as coordenadas de cada ponto que simultaneamente é representado no *Dr. Picza*. O número de pontos por peça depende das dimensões da peça e da resolução escolhida, sendo este último parâmetro merecedor de especial atenção, pois sempre que a resolução duplica, o tempo de leitura aumenta aproximadamente quatro vezes (Ramos; *et al.*; 2014). No tratamento das malhas de pontos foi utilizado diverso *software* (*Meshmixer*; *Rhinoceros*; *CloudCompare*; *GOM Inspect*; *Meshroom*) (Jerónimo; 2014; Paixão; *et al.*; 2018a).

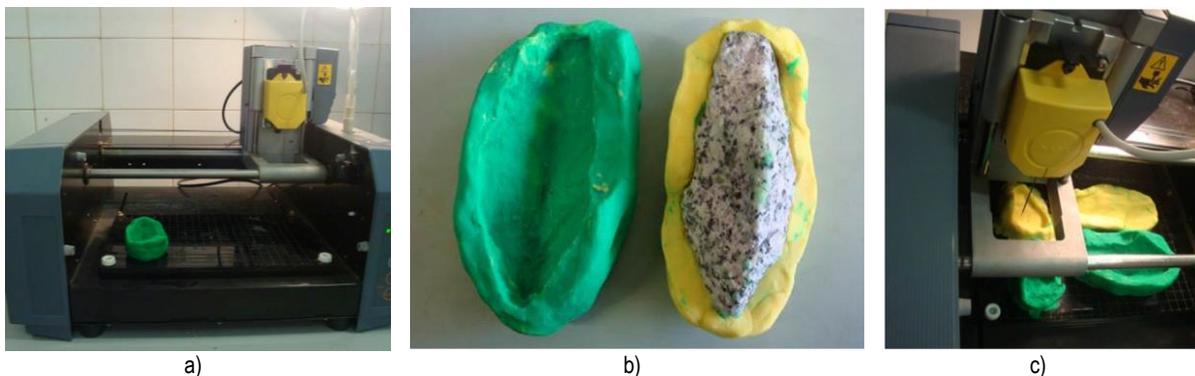


Figura 2.1 – Digitalização por contacto: a) *scanner Roland Modela MDX 20* do *FabLab*; b) moldes de uma partícula; c) digitalização do molde de uma partícula (Jerónimo; *et al.*; 2020)

Neste projeto o *Roland Modela MDX-20* foi utilizado na digitalização de quatro moldes (negativos) feitos em plasticina, onde estavam impressas as características de duas partículas de balastro. Foi decidido digitalizar moldes porque como a agulha do equipamento apenas se move verticalmente ao longo do plano horizontal, e as partículas de balastro têm formato irregular e reentrâncias, a digitalização teria

---

<sup>i</sup> *FabLab* é o termo abreviado de *Fabrication Laboratory* utilizado para designar uma pequena oficina oferecendo ferramentas para fabricação digital numa ótica de “Faça-você-mesmo” (*Do It Yourself - DIY*).

<sup>ii</sup> <https://www.rolanddga.com/support/products/software>

que ser feita em vários planos para captar a forma completa das partículas. Esses planos seriam posteriormente compatibilizados recorrendo a um software de modelação 3D. Para evitar a junção de várias superfícies, o que pode consumir muito tempo e introduzir erros, decidiu-se construir moldes físicos (negativos) das partículas.

### 2.3 Digitalização recorrendo a equipamento *laser*

Devido à colaboração da empresa *GEOTRILHO*, a título gracioso, foi possível neste projeto recorrer também a uma ferramenta de digitalização tecnologicamente mais avançada, o *laser scanner* portátil *EXAscan* da *Creaform*. Esta ferramenta é equipada com três câmaras de alta-definição (resolução superior a 1440x1080 pixéis), um emissor *laser* e oito leds localizados em torno das câmaras, que permitem digitalizações de grande rigor.

O *EXAscan* tem uma resolução de 0,05 mm e uma exatidão superior a 0,04 mm, permitindo digitalizar superfícies com grande detalhe (para efeitos da aplicação em Eng.<sup>a</sup> Civil) e textura e objetos de pequenas dimensões, como é o caso das partículas de balastro. Entenda-se como exatidão do equipamento, o somatório da exatidão pontual e volumétrica, ou seja, o raio máximo que se desenvolve em torno do ponto real e o máximo de erro acumulado por metro linear digitalizado.

O *EXAscan* destaca-se por não necessitar de um sistema de referência externo, sendo a sua localização alcançada com a ajuda de alvos retrorrefletores. Trata-se de adesivos que podem ser colocados no objeto ou na área envolvente, formando um padrão irregular com uma distância entre eles de sensivelmente 100 mm. No início do processo os alvos são reconhecidos pelo *scanner* e é gerado um sistema de referência, pelo que importa que a posição destes permaneça constante ao longo da digitalização. Os feixes refletidos pelos alvos são captados pelas câmaras, e por triangulação é possível obter a localização do equipamento em tempo real. Assim, impõe-se que o feixe incida, no mínimo, em três alvos ao mesmo tempo. A luz refletida pela superfície digitalizada é também captada pelas câmaras. O software integrante do *EXAscan*, o *VXelements*<sup>i</sup>, transforma-a numa malha de triângulos muito pormenorizada, que representam o objeto em 3D e em tempo real, guardando a informação num ficheiro no formato *.CSF (Coordinate System File)*.

Após a digitalização, é exportado um ficheiro no formato *.STL* pelo *VXelements*, com as faces da malha. O ficheiro criado é importado no programa *3DReshaper*<sup>ii</sup>, um *software* da empresa *Hexagon Metrology*, onde cada objeto é guardado no formato *.RSH*, extensão associada ao software, e em seguida faz-se o processamento dos dados. Quando é exportado o ficheiro *.STL* no *VXelements*, os pontos referem-se ao sistema de coordenadas definido pelo *EXAscan*. Este equipamento considera o centro de coordenadas coincidente com o centro do equipamento aquando do início da digitalização. No *3DReshaper* pode-se redefinir um novo sistema de coordenadas com a origem no objeto.

---

<sup>i</sup> <https://www.creaform3d.com/>

<sup>ii</sup> <https://www.3dreshaper.com/>

No início destes estudos foram realizados vários testes com o equipamento para verificar a viabilidade da solução e otimizar o processo de digitalização. Num desses testes foi colocada uma partícula de balastro granítico sobre uma mesa com alvos refletivos e foi sujeita a um processo de digitalização com resolução de 0,2 mm (Figura 2.2). Ao longo do procedimento foi verificado que o *laser* foi refratado por quartzitos graníticos, gerando vazios na malha triangular. Foi necessário proceder ao tratamento dessas pequenas áreas da malha, o que foi feito pulverizando-a com uma mistura contendo um pó de grão fino e uniforme. Após a secagem, esse spray cria uma fina película na superfície, tornando-a opaca. Deve-se notar que o pó, embora formando uma película fina, pode introduzir um pequeno erro na medição do tamanho das partículas. Além disso, impede a captação de informações relativas à cor dos pontos da superfície.

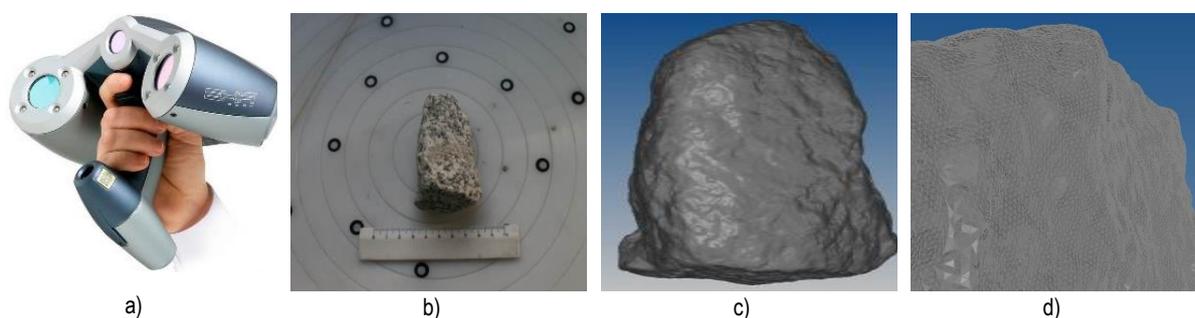


Figura 2.2 – Digitalização por *scanner*: a) equipamento portátil EXAscan da Creafarm; b) partícula sobre uma mesa com alvos refletivos; c) modelo digital da partícula; d) detalhe do modelo digital (Jerónimo; *et al.*; 2020)

O processo de digitalização com resolução de 0,2 mm teve duração de aproximadamente duas horas, que incluiu calibração de temperatura, pressão atmosférica e luminosidade do equipamento. A digitalização com resolução de 0,2 mm requer um movimento muito controlado e lento do *scanner*, caso contrário, a malha terá “vazios” correspondentes a regiões onde não é capturada nenhuma informação. Este nível de resolução forneceu detalhes ao nível da “textura rugosa” (maior pormenor) da partícula (Hyslip; Vallejo; 1997) (Figura 2.2d).

Como a partícula foi colocada sobre uma superfície, ela foi digitalizada por fases, após sucessivas rotações sobre aquela, até completar o processo. Foram obtidas três malhas separadas com regiões comuns, tendo que ser manipuladas para se obter uma única malha. Como o processo de digitalização recorrendo ao equipamento *laser* era lento e com várias etapas, foram realizadas melhorias para torná-lo mais versátil, viabilizando a aplicação a um maior número de partículas. Foram testados diferentes níveis de resolução para avaliar até que ponto a qualidade obtida ainda poderia ser considerada adequada. Como esperado, quanto menor a resolução, mais rápido o processo: duas horas para resolução de 0,2 mm, uma hora para resolução de 0,5 mm e 30 min para resolução de 1 mm. Obviamente que com resolução mais baixa, o nível de detalhe degrada-se, em particular nas arestas da partícula onde os algoritmos de geração automática de malha interpolam entre os pontos disponíveis e não reproduzem as variações abruptas da geometria. Em relação à textura da superfície, com resolução de 0,5 mm, foi ainda possível captar detalhes da “textura lisa” (menor pormenor); com

resolução de 1,0 mm, só foi possível reproduzir as formas mais gerais da partícula, como se pode constatar na Figura 2.3. Em relação ao volume da partícula calculado a partir da malha numérica, a diferença obtida entre as resoluções de 0,2 mm e de 1,0 mm foi inferior a 1%.

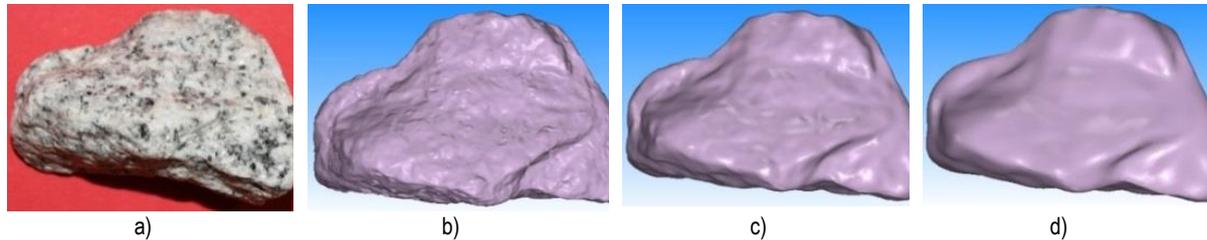


Figura 2.3 – Digitalização de uma partícula com o *laser scanner*: a) partícula; b) resolução de 0, mm; c) resolução de 0,5 mm; d) resolução de 1,0 mm (Jerónimo; *et al.*; 2020)

Uma segunda melhoria no procedimento foi a construção de um pedestal de suporte para elevar a partícula e permitir que toda a superfície estivesse livre de obstáculos e fosse digitalizada de uma só vez, o que tem duas vantagens: um único varrimento é suficiente para cobrir toda a partícula, e a malha gerada inclui a malha inteira, portanto, não é necessário o pós-processamento de junção de malhas parciais da superfície numa única malha da partícula. O suporte é constituído por uma barra de aço com 5,0 mm de diâmetro e uma base de PVC, tendo o conjunto cerca de 150 mm de altura. Antes do processo de digitalização, é perfurado um orifício circular de 10 mm de profundidade numa das faces mais regulares, usando equipamento mecânico Figura 2.4a. O furo é executado numa superfície plana da partícula Figura 2.4b, para reduzir desvios em relação à realidade na reconstrução dessa parte da malha com o *software* de modelação 3D. Como a partícula deixou de estar colocada sobre uma mesa, foi montado um biombo com alvos refletivos Figura 2.4c.

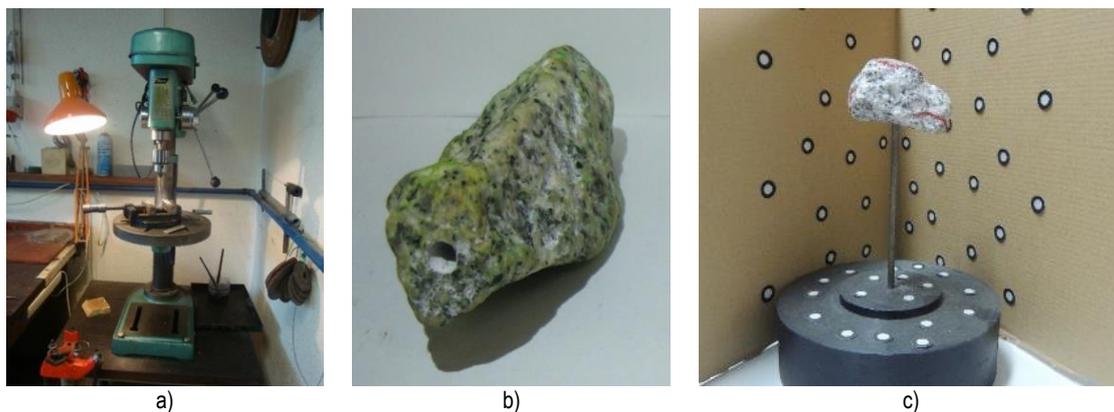


Figura 2.4 – Aspectos de digitalização por *scanner*: a) equipamento de furação das partículas; b) partícula furada; (c) pedestal para apoio das partículas e biombo de alvos refletivos (Jerónimo; *et al.*; 2020)

A Figura 2.5 mostra os modelos digitais de uma partícula apoiada numa mesa e submetida a três varrimentos e da mesma partícula apoiada no pedestal e submetida a um único varrimento. Aparentemente, as malhas parecem semelhantes, mas a densidade da malha é diferente e o volume difere em cerca de 5%. O varrimento completo da partícula numa única fase foi considerado mais rigoroso, quando comparado com as medições de volume de laboratório. A digitalização com um único varrimento com o pedestal reduz também o tempo de processamento de 30 para 15 minutos, usando a resolução de 1,0 mm. Um tempo de edição da malha muito mais curto também aumenta muito a produtividade. A grande desvantagem deste procedimento é a necessidade de perfurar a partícula.

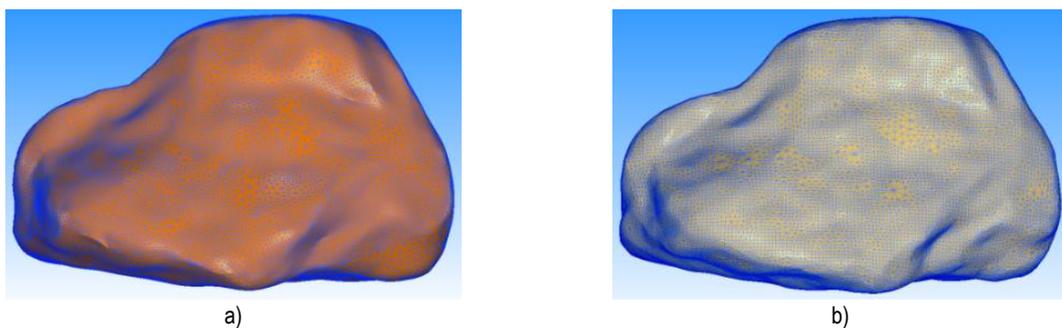


Figura 2.5 – Modelos digitais de uma partícula: a) partícula apoiada numa mesa e submetida a 3 varrimentos; b) partícula apoiada no pedestal e submetida a um único varrimento (Jerónimo; *et al.*; 2020)

No âmbito deste projeto comparou-se os resultados obtidos com o *laser scanner* com os obtidos com o *scanner* mecânico de contacto, tendo-se concluído, nomeadamente que:

- Ambos os métodos são eficazes na captura da geometria das partículas (Figura 2.6).
- Os modelos digitais produzidos por ambos os métodos são semelhantes; as diferenças entre as geometrias dos modelos digitais obtidas por cada um dos *scanners* em geral é inferior a 1 ou 2 mm, em cada ponto dos modelos (Figura 2.7); em geral, os volumes diferem em menos de 3%, tomando como referência o volume obtido com o *laser scanner*.
- O *scanner* mecânico é um equipamento de custo acessível, produz uma malha de grande precisão e os resultados não são afetados pela existência de minerais transparentes ou refletores. Embora o processo de scan mecânico possa ser executado sem supervisão, leva mais tempo, a junção de malhas é mais difícil e introduz erros, o tamanho da partícula a analisar é limitado e não se obtém informação relacionada com a cor. A digitalização baseada no contacto pode ser vantajosa quando: o orçamento disponível é baixo (em particular se houver acesso a um *Fablab*); é reduzido o número de partículas a serem digitalizadas; não é necessário captar pormenores com dimensão inferior a 0,5 mm; é suficiente uma captura monocromática; não é necessário um tratamento pormenorizado da malha de pontos nem o recurso a algoritmos muito sofisticados.
- A digitalização a *laser* não necessita de artefactos auxiliares como os moldes das partículas, as reentrâncias das partículas de balastro podem ser digitalizadas com maior facilidade, permite obter

uma malha quase final, que é disponibilizada pelo *software* do equipamento, e fornece informações sobre as cores das partículas recorrendo à câmara incorporada no sistema.

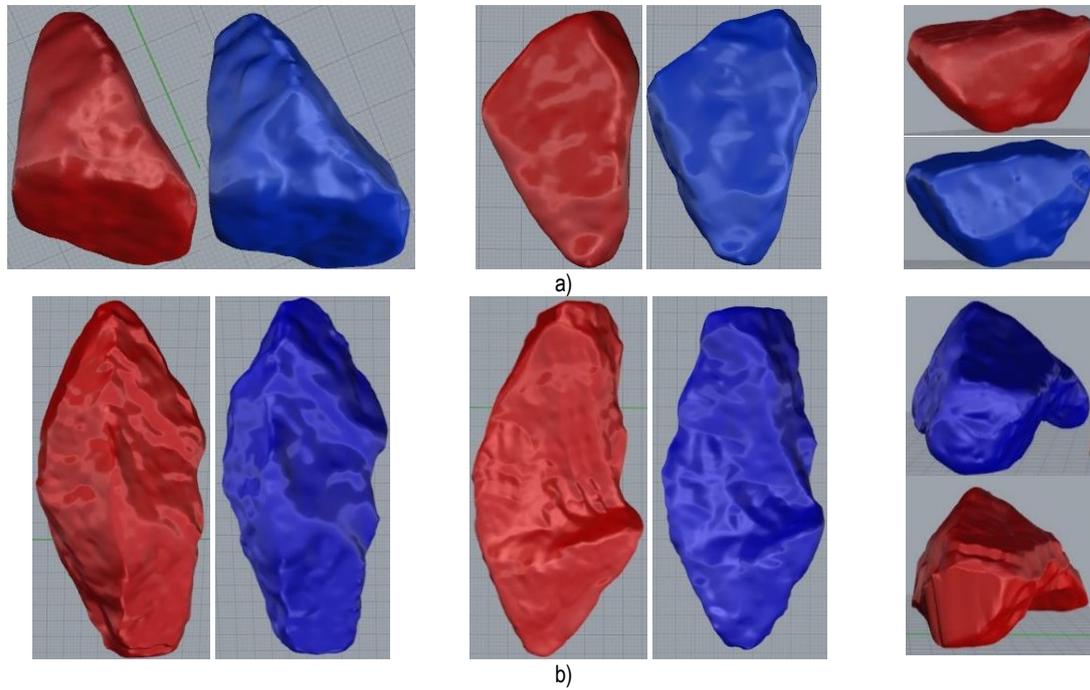


Figura 2.6 – Exemplo de representações digitais de duas partículas obtidas com o *scanner* mecânico (vermelho) e com o *laser scanner* (azul): a) diversas vistas da partícula 1; b) diversas vistas da partícula 2 (Jerónimo; *et al.*; 2020)

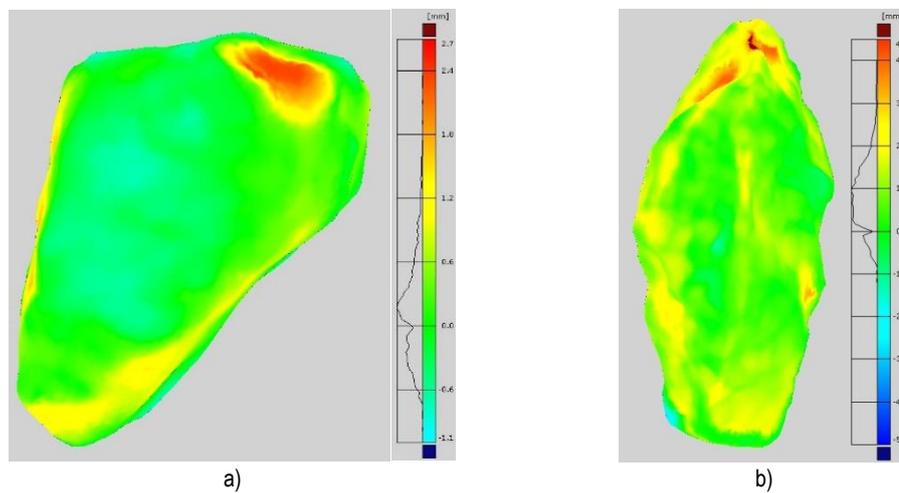


Figura 2.7 – Exemplo da representação das diferenças entre o modelo digital obtido pelo *laser scanner* e o modelo digital obtido pelo *scanner* mecânico: (a) partícula 1; (b) partícula 2 (Jerónimo; *et al.*; 2020)

## 2.4 Digitalização por fotogrametria a curta distância

No que se refere às técnicas de fotogrametria, elas baseiam-se em informações captadas em fotografia, nomeadamente procedendo à reconstrução da informação tridimensional a partir de duas ou mais fotografias. Em geral, os programas informáticos atualmente disponíveis para reconstrução tridimensional por fotogrametria recorrem a uma técnica designada por *Structure from Motion* (SfM), do domínio científico da visão computacional. Esta consiste em estimar a forma tridimensional de objetos com base em sequências de imagens bidimensionais obtidas de diferentes orientações, relativamente ao objeto. As imagens são analisadas e, através da deteção da posição de singularidades comuns, é determinada a posição e orientação da câmara em cada foto. Em seguida, as imagens são comparadas e são mapeados em 3D os pixels de singularidades partilhadas, conduzindo a uma nuvem de pontos que pode conter também informações de cor. Embora a fotogrametria seja considerada um método passivo, a iluminação pode ser manipulada usando fontes de luz ou refletores para se obter iluminação uniforme e eliminar sombras. A exigência de boas condições de iluminação é uma das desvantagens do método de fotogrametria; a outra é que o esforço computacional necessário no processo de determinação das singularidades comuns entre as várias imagens para gerar a nuvem de pontos das mesmas é considerável e aumenta de forma exponencial com o número de imagens e com o detalhe requerido para a digitalização. Relativamente a este último aspeto, os desenvolvimentos em *software* específico nesta área têm vindo a tirar partido do sucessivo aumento de capacidade de computação paralela, a custos cada vez mais baixos, tanto das unidades centrais de processamento (*CPU*), como das unidades de processamento gráfico (*GPU*), permitindo ultrapassar esta desvantagem de forma cada vez mais eficiente. De qualquer forma, nas aplicações desenvolvidas relativamente às partículas de balastro, essas desvantagens são compensadas pelo baixo custo relativo do método, rapidez e facilidade de utilização e exatidão alcançada.

No âmbito deste projeto desenvolveu-se um método que recorre à fotogrametria para obter modelos digitais de partículas rochosas, nomeadamente de materiais que constituem a camada de balastro ferroviário. Neste método, procede-se à captura de imagens de partículas que são colocadas individualmente num pedestal, pintado com tinta fosca para evitar reflexos, que se encontra fixo a uma mesa giratória (Figura 2.8a). São capturadas imagens em torno da partícula, sequencialmente em incrementos de 10°, até perfazer 360°. Este processo é repetido para cada uma das três posições da câmara em altura, como esquematizado na Figura 2.8. Assim, são capturadas 3×36=108 imagens de modo a obter uma cobertura geral de cada partícula. Nos estudos realizados no âmbito deste projeto utilizou-se o seguinte equipamento: câmara *Canon EOS 80D*, 24.2 Megapixéis, com sensor de imagem CMOS de 22,3 mm × 14,9 mm; objetiva *Canon EF 50mm f/1,8 STM*; filtro polarizador; *iPhone 6* com aplicação *Canon Camera Connect*<sup>i</sup> para controlo remoto da câmara; candeeiros articulados com luz difusa; tripé; base rotativa com marcação predefinida de 10° e com pedestal incorporado; fundo em papel branco.

---

<sup>i</sup> <https://www.canon.pt/apps/canon-camera-connect/>

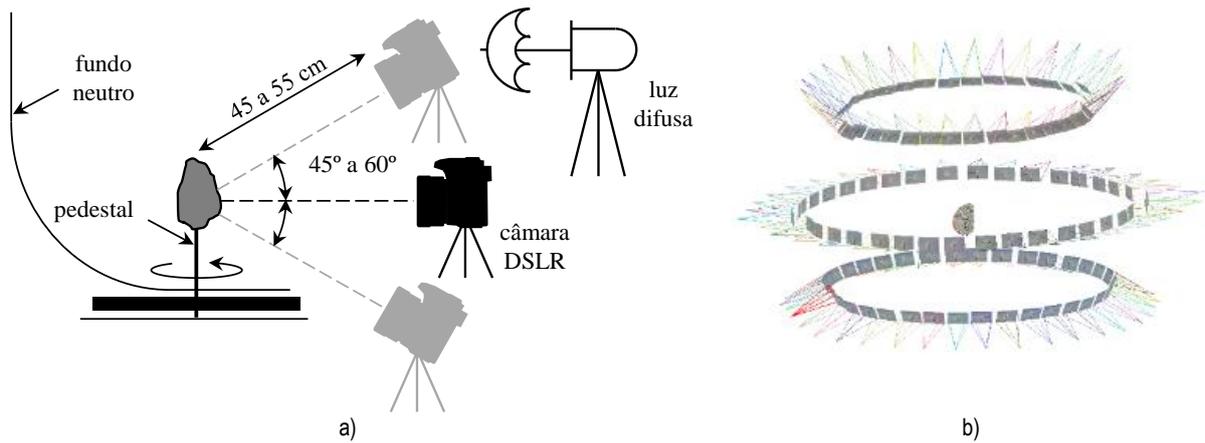


Figura 2.8 – Fotogrametria: a) configuração da sessão fotográfica; b) posicionamento da câmera, combinação de imagens e reconstrução esparsa (Paixão; *et al.*; 2018a)

Na reconstrução digital das partículas (Figura 2.9) recorreu-se a dois programas distintos: no primeiro, o *VisualSfm* (Wu; 2013), é gerada a nuvem de pontos densa a partir das 108 imagens de cada partícula; posteriormente, no segundo, o *MeshLab*<sup>ii</sup> (Cignoni; Callieri; Corsini; *et al.*; 2008), realiza-se a limpeza dessa nuvem (quando necessário), aplica-se a escala adequada e gera-se a malha triangular tridimensional, como descrito em maior detalhe em (Afonso; 2019).

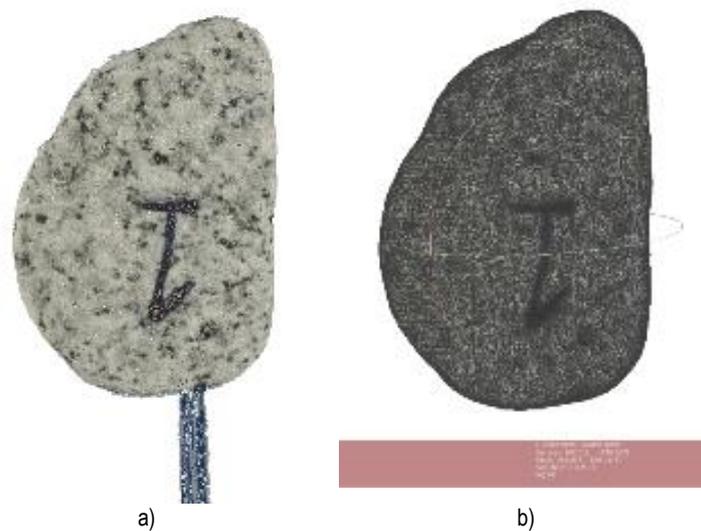


Figura 2.9 – Fotogrametria: a) reconstrução densa; b) malha gerada (Paixão; *et al.*; 2018a)

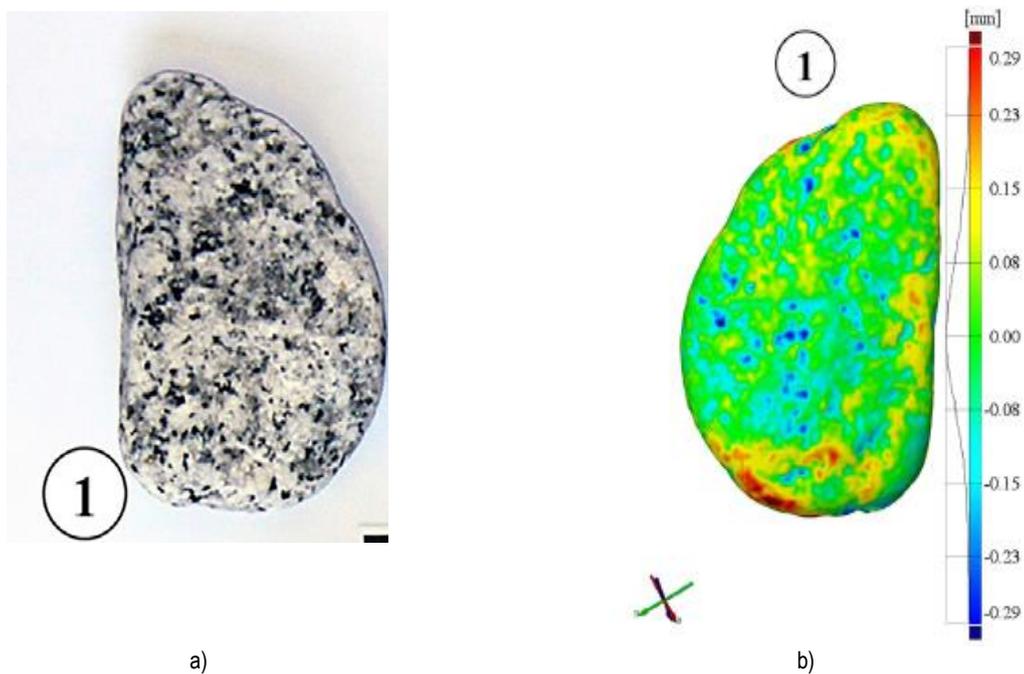
O método da fotogrametria foi aplicado a uma amostra de partículas de balastro que tinham sido anteriormente digitalizadas pelo *laser scanner* e compararam-se os resultados obtidos com ambos os

<sup>i</sup> <http://ccwu.me/vsfm/>

<sup>ii</sup> <https://www.meshlab.net/>

métodos. Foram também examinados os potenciais pontos fracos identificados no método da fotogrametria, nomeadamente o desempenho utilizando partículas com menor contraste de cor na superfície e a sensibilidade à redução do número de imagens.

Na Figura 2.10 apresenta-se, como exemplo, para uma partícula de balastro, os desvios entre as malhas obtidas pelo *laser scanner* (considerada como referência) e pela fotogrametria (utilizando 108 fotografias por partícula), recorrendo à versão de utilização livre do *software GOM Inspect<sup>i</sup>*. Da análise global dos resultados obtidos com ambos os métodos, para um conjunto de 18 partículas analisadas no âmbito de um dos estudos deste projeto (Paixão; *et al.*; 2018a), concluiu-se que: as diferenças máximas foram inferiores a 1 mm; mais de 50% da área da superfície das partículas evidenciou diferenças inferiores a 0,1 mm; o desvio padrão médio das diferenças foi de cerca de 0,1 mm.



**Figura 2.10 – Resultados obtidos com o *laser scanner* e com a fotogrametria: a) partícula de balastro; b) modelo digital com indicação de desvios entre as malhas (cores azuladas indicam que a malha da fotogrametria está dentro da malha do *laser scanner*) (Paixão; *et al.*; 2018a)**

Considerando a partícula apresentada na Figura 2.10, foi analisado qual o número mínimo de fotografias necessárias para obter uma malha detalhada das partículas. Utilizando apenas 2/3 das imagens (72 fotos), foi obtida uma malha com tamanho e qualidade equivalentes. Utilizando 1/3, ou seja, 36 das 108 imagens, o tamanho da nuvem de pontos passou de 276 379 para 257 320 - uma redução de 6,9% - mas a diminuição na qualidade da malha foi muito pequena (Figura 2.11). Com 1/6 das imagens (19 fotos), o algoritmo de fotogrametria não foi capaz de reconstruir a superfície.

<sup>i</sup> <https://www.gom.com/3d-software/gom-inspect.html>

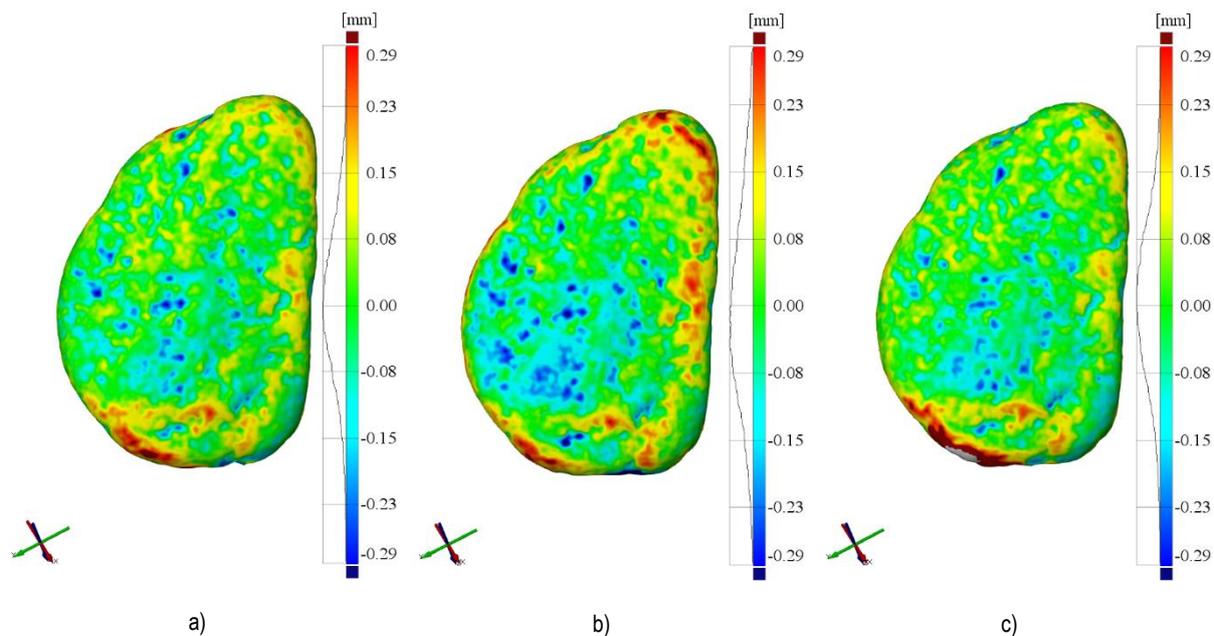


Figura 2.11 – Desvios entre a reconstrução de uma partícula por fotogrametria e por varrimento a *laser* utilizando: a) 108 imagens; b) 72 imagens; c) 36 imagens (Paixão; *et al.*; 2018a)

Outra questão relevante que foi analisada durante os estudos está relacionada com a eventual influência do padrão de cor da superfície da partícula fotografada. Considerando que as partículas de granito têm uma superfície muito rica em termos de padrão de cores, colocou-se a dado momento a questão se essa característica explicaria parte do sucesso e confiabilidade do método de fotogrametria, o que levantou dúvidas sobre a generalização do método para partículas de outro tipo de rochas, como calcário ou basalto. Apesar de ser possível aplicar uma substância que provoque uma coloração permanente ou lavável nessas rochas para facilitar o processo, os autores testaram a sua influência e avaliaram a fiabilidade do processo de digitalização para partículas com pouco ou nenhum contraste de cor na superfície.

Com este objetivo, uma das partículas foi pintada com tinta preta fosca e foi digitalizada novamente. A partícula selecionada tinha uma superfície irregular e com arestas proeminentes, constituindo, assim, um cenário mais desafiador. Surpreendentemente, a nuvem de pontos produzida para a partícula pintada de preto tinha 54% mais pontos, mas tinha um pouco mais de “ruído”, particularmente em algumas arestas, exigindo um esforço de limpeza da nuvem de pontos antes da reconstrução da malha. Apesar do aumento no desvio de pico positivo e negativo em relação à referência de varrimento a *laser*, os valores ficaram ainda abaixo de 1 mm (Figura 2.12). A influência do número de imagens também foi testada na partícula pintada: não foi possível criar uma nuvem de pontos completa com 72 ou menos imagens. Isso sugere que o padrão da partícula influencia o número mínimo necessário de imagens e deve ser ajustado caso a caso. Outro resultado interessante surgiu quando a mesma partícula foi pintada com uma tinta azul brilhante, pois não foi possível gerar a nuvem de pontos. Provavelmente, isso ocorreu devido às mudanças no padrão de reflexão brilhante conforme a partícula girava, o que dificultava a detecção automática e a correspondência de imagem.

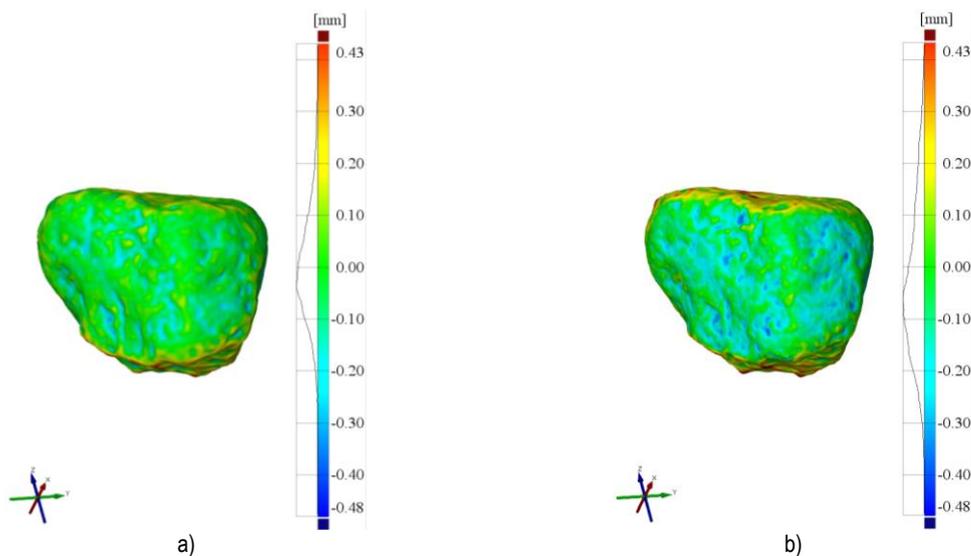


Figura 2.12 – Desvios entre a reconstrução fotogramétrica e o varrimento *laser* de uma partícula: a) partícula de granito original; b) partícula pintada de preto fosco (Paixão; *et al.*; 2018a)

Os estudos realizados permitiram concluir que o desempenho da fotogrametria foi muito bom: a precisão submilimétrica foi alcançada com equipamentos e *software* significativamente mais baratos do que aqueles utilizados no âmbito da digitalização por *laser scanner* (custo do sistema de fotogrametria da ordem de um décimo); a precisão obtida está dentro dos limites relatados por outros autores, usando configurações de fotogrametria comparáveis

A duração do processo de digitalização, desde o início até à obtenção da malha final, é de aproximadamente uma hora por partícula em ambos os métodos, mas pode diferir devido ao tamanho da partícula, mineralogia e capacidade computacional.

O método da fotogrametria requer mais conhecimentos específicos para configurar a sessão de fotografia e configurar o *software* para geração da nuvem de pontos e reconstrução de malha. No entanto, uma vez concluída a configuração, o método pode ser executado por um operador menos qualificado. A sessão de fotografia e os estágios de processamento são propensos ao processamento por lote, em paralelo, aumentando a produtividade para cerca de 2 partículas por hora, de acordo com a experiência adquirida.

Ainda assim, foram identificadas oportunidades de melhorar os resultados obtidos com a aplicação do método, nomeadamente: alterando a forma de apoiar as partículas durante a sessão fotográfica, já que os maiores desvios identificados correspondem ao local onde foi realizada a furação da partícula para que pudesse ser colocada sobre o suporte; automatizando o processo de captura de imagens, reduzindo drasticamente a intervenção do operador durante essa fase do processo, à semelhança do que tem sido aplicado noutros estudos para digitalizar elementos de menor dimensão; melhorando a iluminação, através de técnicas já identificadas, de forma a que seja ainda mais uniforme e estável; no que se refere à obtenção das fotografias, é possível melhorar a nitidez geral das imagens,

nomeadamente através de multifoco ou recorrendo a lentes *tilt-shift*, as etapas computacionalmente pesadas, como cálculo do posicionamento da câmara, reconstrução da nuvem de pontos e geração da malha, podem ser realizadas localmente ou em recursos *cloud*, sendo que ambas as opções beneficiam do aumento da capacidade da unidade de processamento gráfico (GPU).

Para além da obtenção de forma rigorosa de modelos digitais de partículas para constituir bibliotecas que podem ser utilizadas em simulações numéricas do comportamento estrutural com modelos de elementos discretos, a reconstituição 3D por fotogrametria permite, como se abordará de seguida, proceder à medição rigorosa e replicável do volume, da área da superfície e da rugosidade das partículas, possibilitando, nomeadamente, avaliar quantitativamente o desgaste e a fragmentação decorrente de ensaios ou do funcionamento das estruturas onde essas partículas estão inseridas.

### 3 | Estudos para desenvolvimento de métodos de avaliação da morfologia de partículas

#### 3.1 Introdução

Os agregados utilizados na camada de balastro são das matérias-primas mais bem controladas. As forças de compressão e o atrito entre partículas, o atrito entre estas e as travessas e o imbricamento, são as principais ações mecânicas resultantes das cargas impostas pelos veículos e decorrentes das intervenções de manutenção pesada. A forma cúbica, faces rugosas e arestas pronunciadas favorecem o imbricamento, evitando movimentos de rotação ou de translação significativos das partículas, resultando numa maior estabilidade da camada e menos forças de contacto entre as partículas (aumentando os pontos de contacto).

Assim, a morfologia das partículas de balastro ferroviário é um aspeto importante que afeta o desempenho mecânico desta camada (Guo; Markine; Zhang; *et al.*; 2019). As propriedades mecânicas e geométricas usualmente exigidas às partículas de balastro são definidas em normativos específicos, considerando procedimentos de caracterização bem estabelecidos. Os requisitos de resistência mecânica usualmente exigidos garantem que este material não sofre degradação excessiva e preserva parâmetros morfológicos adequados ao longo de seu ciclo de vida. No entanto, tradicionalmente, a caracterização da morfologia das partículas de balastro é realizada de acordo com abordagens empíricas e procedimentos manuais que frequentemente são subjetivos, propensos a erros humanos, redutores das características tridimensionais das partículas e não aproveitam nem o conhecimento mais recente, nem métodos automatizados atualmente disponíveis. Exemplo disso é a medição manual das dimensões que tradicionalmente são utilizadas para classificar morfológicamente as partículas.

Na análise da morfologia das partículas é usual considerarem-se três subescalas: forma (ou esfericidade), angularidade e textura (Figura 3.1).

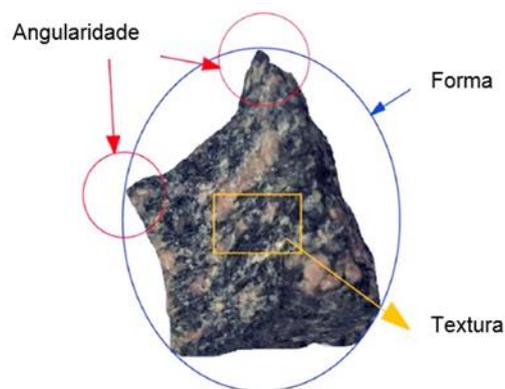


Figura 3.1 – Características morfológicas de uma partícula de balastro (Guo; *et al.*; 2019)

Alguns avanços recentes no tratamento e análise de imagens digitais, com o suporte de meios técnicos avançados, têm permitido tornar mais fiáveis as medições e aprofundar o conhecimento relativamente a vários aspetos, incluindo: distribuição do tamanho da partícula; volume e área de superfície; forma (esfericidade ( $\Psi$ ); fator de forma ( $F$ )); índice de angularidade; índice de textura. Atualmente, estão disponíveis vários tipos de equipamentos para digitalização que podem auxiliar na caracterização da morfologia das partículas. Para além dos métodos de caracterização bidimensional da morfologia das partículas com base em técnicas de processamento automático de imagens, como o *AIMS* (*Aggregate Image Measurement System*) (Gates; Masad; Pyle; *et al.*; 2011) ou o *UIAIA* (*University of Illinois Aggregate Image Analyzer*) (Rao; Tutumluer; 2000; Moaveni; Mahmoud; Ortiz; *et al.*; 2014), têm sido realizados estudos recorrendo a métodos de digitalização tridimensional de partículas que, por exemplo, recorrem à tomografia computadorizada ou a métodos como os referidos nas secções 2.2 a 2.4.

As partículas de balastro degradam-se essencialmente de uma das seguintes maneiras (Raymond; Diyaljee; 1979): (i) fragmentação das partículas em partes semelhantes; (ii) quebra de arestas vivas; (iii) polimento de irregularidades superficiais; e (iv) quebra e arredondamento das partículas nos pontos de contacto.

Para estudar a evolução da morfologia das partículas, alguns autores têm utilizado os ensaios de fragmentação e de desgaste, nomeadamente ensaios de Los Angeles (CEN; 2020) e de micro-Deval (CEN; 2011), respetivamente (Figura 3.2), para simular um processo acelerado de degradação dos agregados (Moaveni; Qian; Boler; *et al.*; 2014; Deiros; Combe; Emeriault; *et al.*; 2019). No âmbito deste projeto desenvolveram-se também vários estudos para avaliar a evolução da morfologia de partículas de balastro recorrendo a esses ensaios.



Figura 3.2 – Aspeto dos equipamentos de ensaio: a) Los Angeles; b) micro-Deval

### 3.2 Avaliação da evolução da morfologia durante ensaios de desgaste e de fragmentação

Num primeiro estudo (Jerónimo; 2014) selecionaram-se diversas partículas de balastro granítico (Figura 3.3) e procedeu-se à avaliação do seu volume e das suas dimensões pelos métodos tradicionais (Figura 3.4). Em seguida digitalizaram-se as partículas com recurso ao *laser scanner* portátil *EXAscán* da *Creaform* referido na secção 2.3 (Figura 3.5) e determinaram-se os volumes e dimensões dos modelos digitais obtidos. Validou-se a precisão do método de digitalização por comparação entre as dimensões e os volumes das partículas e dos respetivos modelos digitais (Figura 3.6). Foi possível, inclusive, a partir dos modelos digitais de partículas, reconstituir algumas delas, através de impressão 3D em PLA (ácido polilático, um plástico biodegradável que depois de seco ganha resistência), e comparar essas réplicas com as respetivas partículas reais (Figura 3.7).



Figura 3.3 – Partículas de balastro granítico utilizadas no estudo (Jerónimo; 2014)

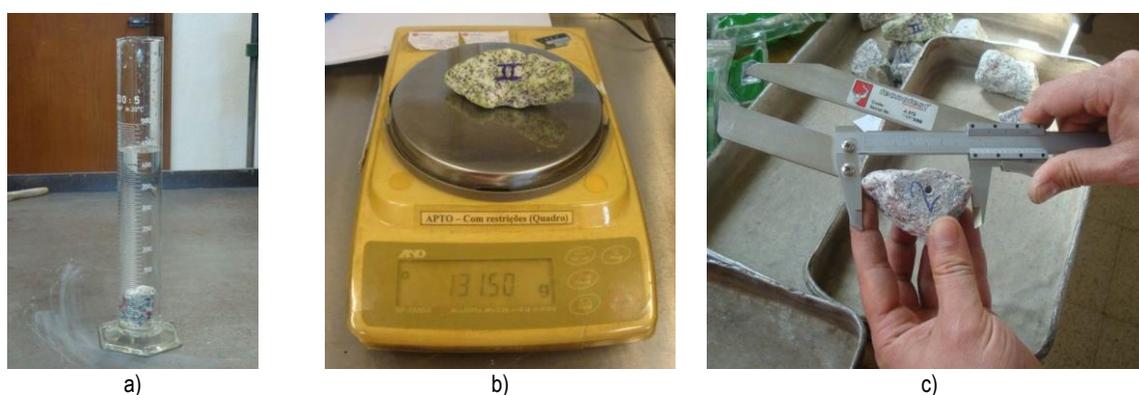


Figura 3.4 – Equipamentos para determinação do volume e das dimensões das partículas: a) proveta; b) balança; c) paquímetro (Jerónimo; 2014)

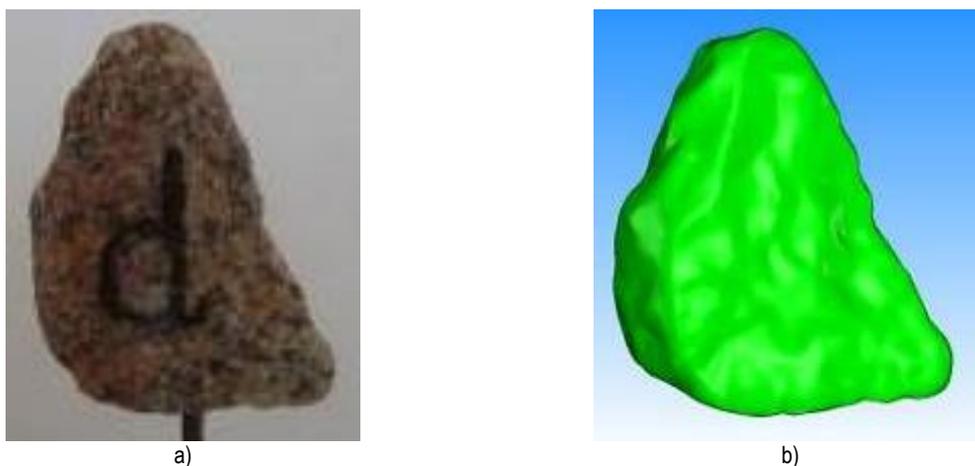


Figura 3.5 – Exemplo de uma partículas de balastro (a) e respetivo modelo digital (b) obtido no 3DReshaper (Jerónimo; 2014)

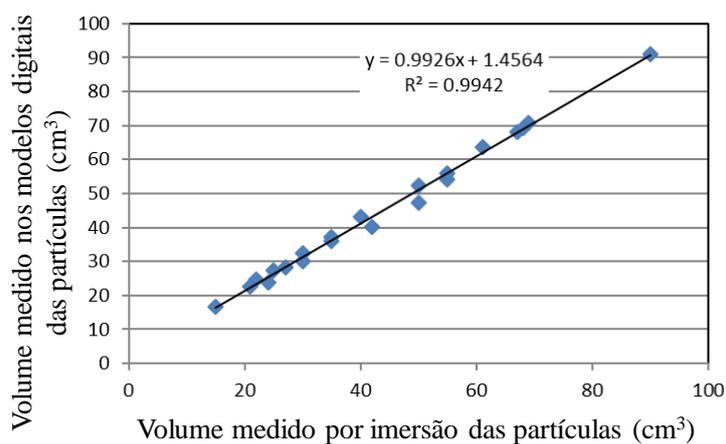


Figura 3.6 – Relação entre o volume das partículas medido por imersão e o volume calculado a partir dos modelos digitais (Jerónimo; *et al.*; 2020)

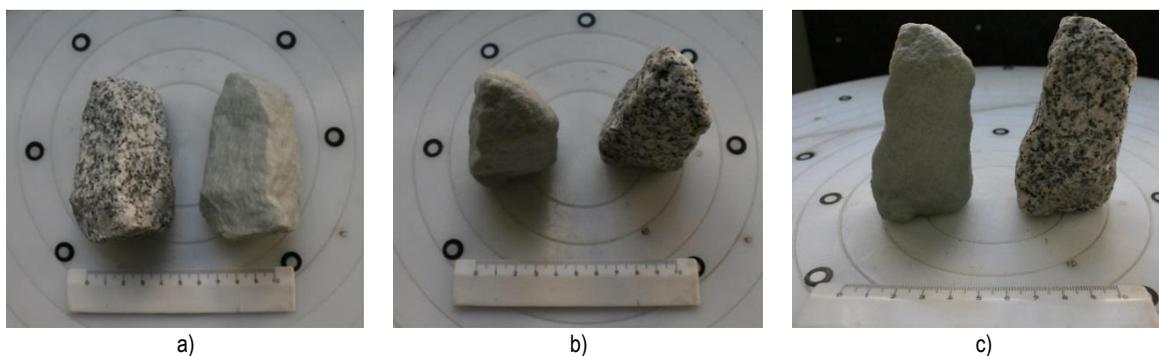


Figura 3.7 – Comparação entre a uma partícula e a respetiva réplica em PLA obtida por impressão 3D, em 3 vistas distintas (Jerónimo; *et al.*; 2020)

O conjunto de partículas em análise (21 partículas) foi dividido em dois subconjuntos, sendo que um deles foi sujeito a ensaio de fragmentação de Los Angeles – EN 1097-2 (CEN; 2020) e o outro a ensaio de desgaste de micro-Deval – EN 1097-1 (CEN; 2011), de forma a simular, de forma acelerada, a degradação das partículas de balastro. Antes de realizar os ensaios houve que identificar as partículas em análise, pois elas foram sujeitas a ensaio juntamente com outras partículas (e esferas de aço no caso do ensaio de Los Angeles), de forma a cumprir os protocolos das normas de ambos os ensaios. Para proceder à identificação fotografaram-se as partículas, pintaram-se, desenharam-se letras e números e colocou-se plasticina de distintas cores nos orifícios que foram realizados em cada uma das partículas para as suportar num pedestal durante a digitalização (ver Figura 2.4b).

Como esperado, as partículas perderam parte de seu volume durante os ensaios, gerando material fino, como se observa na (Figura 3.8). O valor do coeficiente de Los Angeles da amostra testada foi 16 e o valor do coeficiente micro-Deval foi de 7, o que confirma que, em termos de resistência, o material é adequado para uma camada de balastro. Sendo mais agressivo, o ensaio de Los Angeles fragmentou as partículas, resultando na destruição de quatro das onze partículas. No ensaio de micro-Deval, não ocorreu fragmentação, mas as partículas ficaram mais arredondadas.



Figura 3.8 – Amostras de balastro no final dos ensaios: a) Los Angeles; b) micro-Deval (Jerónimo; *et al.*; 2020)

O Índice de Achatamento, obtido com a norma NP EN 933-3 (CEN; 2008; 2012) e o Índice de Forma, obtido com a norma NP EN 933-4 (CEN; 2008) da amostra inicial (21 partículas) eram de 9% e de 15%, respetivamente. Após os ensaios ambos os índices diminuíram 7%.

Após os ensaios, as partículas foram novamente medidas e digitalizadas e voltou a confirmar-se que era possível estimar de forma adequada o volume a partir dos novos modelos digitais (Figura 3.9), quando comparado com o volume medido por imersão das partículas.

Como se constata da análise da Figura 3.10, durante os ensaios o volume das partículas alterou-se significativamente, em particular decorrente do ensaio de Los Angeles, durante o qual quatro das partículas ficaram destruídas. De facto, a sobreposição dos modelos digitais obtidos antes e após os ensaios permite concluir que ocorreram alterações significativas das partículas (Figura 3.11).

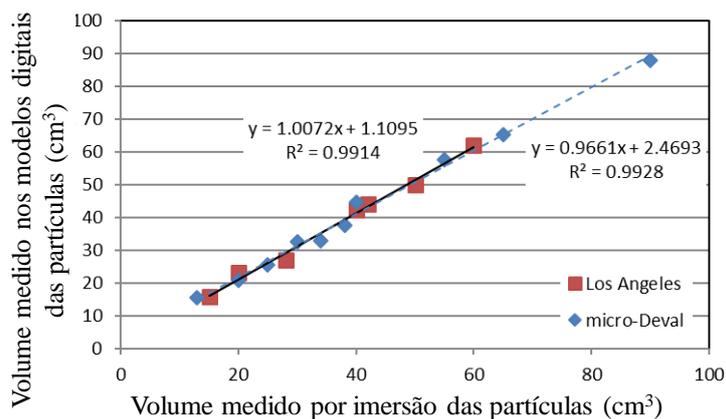


Figura 3.9 – Relação entre o volume das partículas medido por imersão e o volume calculado a partir dos modelos digitais, após os ensaios (Jerónimo; *et al.*; 2020)

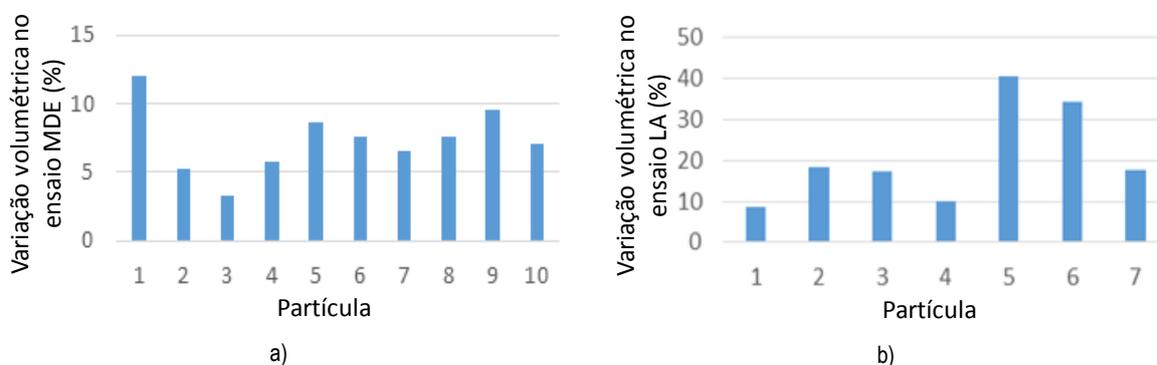


Figura 3.10 – Variação volumétrica determinada a partir dos modelos digitais elaborados antes e após os ensaios: a) micro-Deval; b) Los Angeles (Jerónimo; *et al.*; 2020)

Na Figura 3.12 apresenta-se um exemplo da quantificação da diferença em cada ponto dos modelos (recorrendo ao *software GOM Inspect*) decorrente dos ensaios de Los Angeles e micro-Deval em partículas que sofreram grande degradação durante os ensaios. No ensaio micro-Deval, a maioria das partículas sofreu uma erosão nos cantos e nas arestas, o que confirma a observação visual de que as partículas adquirem uma forma mais arredondada. No ensaio de Los Angeles, embora também haja erosão nos cantos e nas arestas, muitas das partículas perderam pedaços maiores nas regiões proeminentes. Assim, é compreensível que as partículas que foram submetidas ao ensaio de Los Angeles exibam diferenças maiores em relação ao modelo inicial.

A conclusão é de que a comparação entre as digitalizações da mesma partícula, obtidas antes e após o ensaio, permite detetar e quantificar a diferença de geometria e volume devido ao desgaste e quebra, de uma forma que não era possível com os métodos tradicionais, que só podiam quantificar a perda de volume/massa e a mudança qualitativa da forma. Podem, assim, ser exploradas análises mais sofisticadas, como o cálculo de esfericidade, entre outros parâmetros.

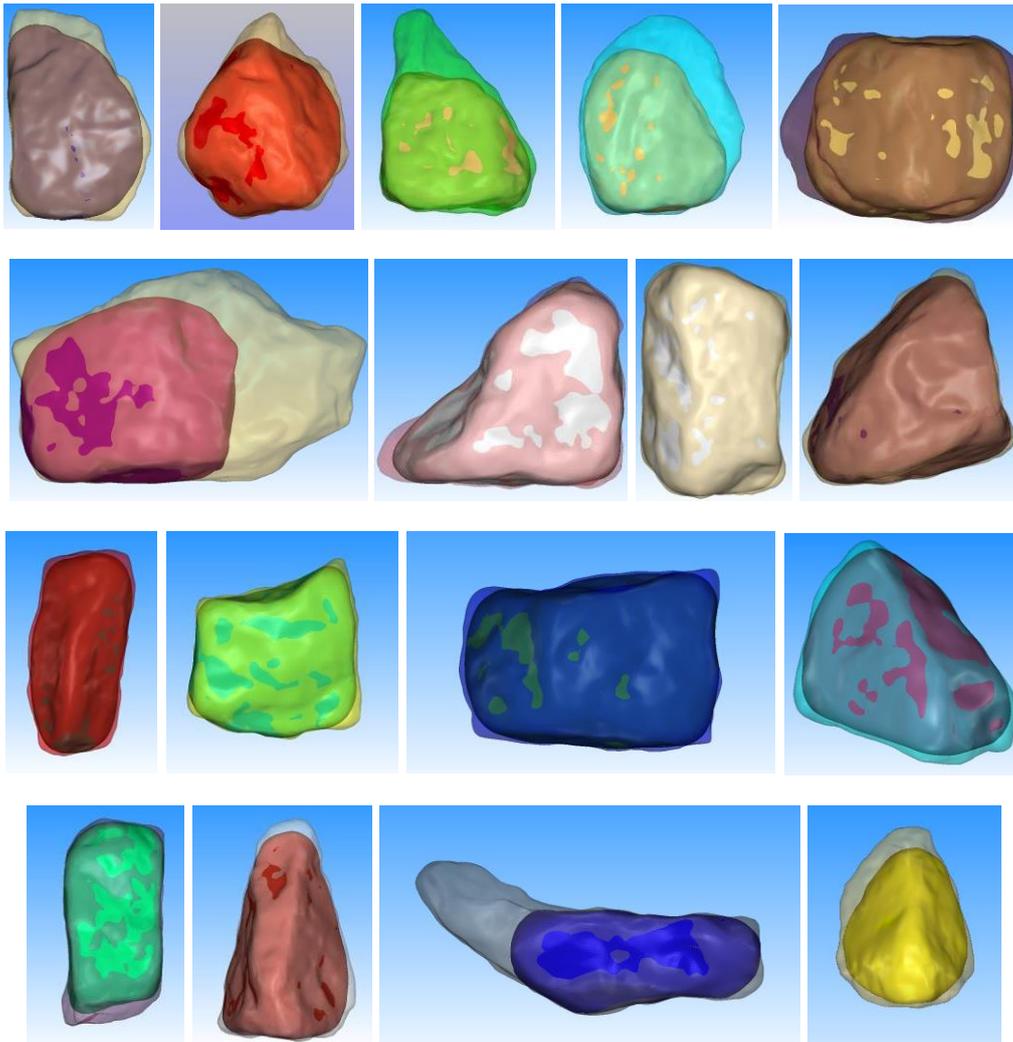


Figura 3.11 – Partículas antes e após os ensaios micro-Deval e Los Angeles (Jerónimo; et al.; 2020)

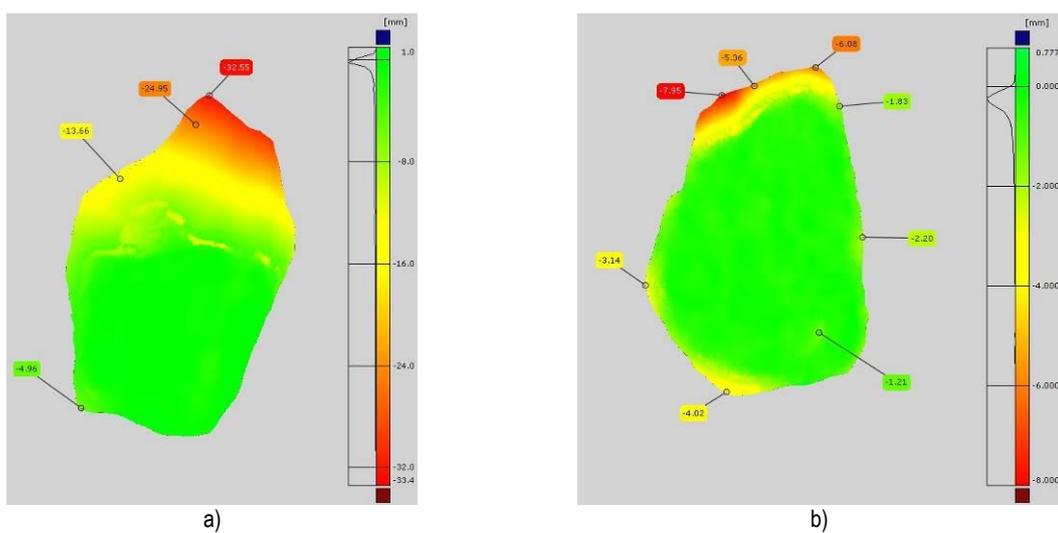


Figura 3.12 – Comparação das malhas antes e após os ensaios: a) Los Angeles (partícula 7); b) micro-Deval (partícula 1)

A esfericidade das partículas,  $\Psi$ , pode ser estimada a partir da seguinte expressão (Rodríguez; Edeskär; Knutsson; 2013):

$$\Psi = \frac{12,8 \sqrt[3]{(S/I)^2 (I/L)}}{1+(S/I)(1+(I/L))+6 \sqrt{1+(S/I)^2 (1+(I/L)^2)}} \quad (1)$$

onde  $L$ ,  $I$  e  $S$  são as dimensões medidas segundo os eixos maior (“comprimento”), intermédio (“largura”) e menor (“espessura”) da partícula (Krumbein; 1941). Da análise da expressão anterior, destacam-se duas razões,  $S/I$  e  $I/L$ , que correspondem, respetivamente, à razão de achatamento ( $p$ ) e à razão de alongamento ( $q$ ). Por sua vez, o fator de forma ( $F$ ) pode ser definido como o quociente entre a razão de achatamento e a razão de alongamento. Uma partícula cúbica ou esférica tem um fator de forma de valor unitário; uma partícula laminar tem um fator de forma superior à unidade; numa partícula alongada e fina, este fator é menor que a unidade (Uthus; Hoff; Horvli; 2005). Uma esfera toma o valor unitário e máximo do parâmetro esfericidade,  $\Psi$ .

As dimensões das partículas foram medidas antes e após os ensaios na direção dos eixos maior, intermédio e menor de cada uma das malhas digitais usando o *software GOM Inspect* (Figura 3.13), permitindo assim o cálculo da esfericidade em ambas as situações.

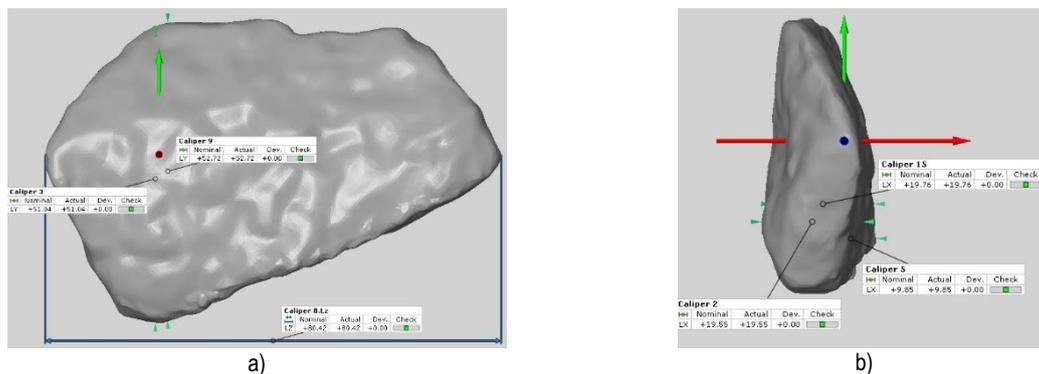


Figura 3.13 – Determinação digital das dimensões de uma partícula: a) dimensão máxima (L); b) dimensão mínima (S) (Jerónimo; *et al.*; 2020)

A relação entre o valor de esfericidade calculado antes e após os ensaios de fragmentação e desgaste é apresentada na Figura 3.14. Este índice não variou significativamente, principalmente nas partículas que foram submetidas ao ensaio micro-Deval. Embora a amostra em análise seja relativamente pequena, os dados permitem várias conclusões. Em primeiro lugar, a percentagem de partículas com forma cúbica (Uthus; *et al.*; 2005) é relativamente baixa para uma camada de balastro ferroviário, o que é uma consequência do facto de as partículas terem sido escolhidas para representar a diversidade de formas que podem ser encontradas num material de balastro. Em segundo lugar, o grau de esfericidade das partículas variou muito pouco com os ensaios mecânicos; e não há um padrão de alteração associado aos diferentes ensaios; este aspeto voltará a ser discutido na secção 9.4.2. Terceiro, o

modelo digital e a subsequente análise numérica das coordenadas da malha do modelo permitiram determinar com eficiência os parâmetros geométricos das partículas de balastro, eliminando erros típicos decorrentes da medição manual tradicional (Folk; 1955).

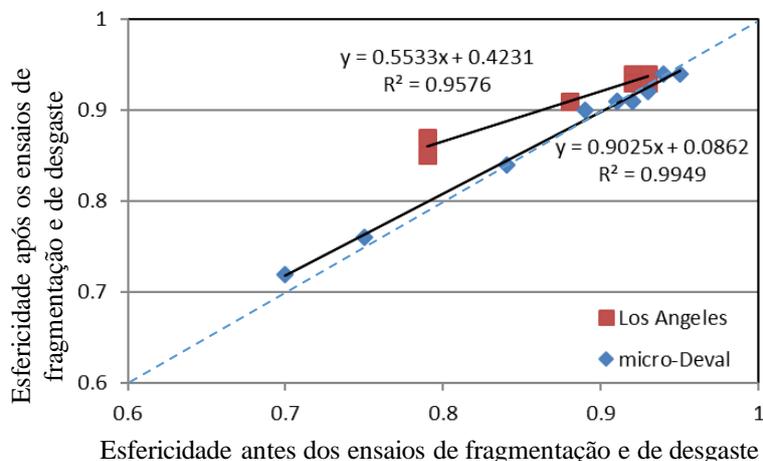


Figura 3.14 – Esfericidade das partículas antes e após os ensaios de fragmentação e de desgaste determinada por análise numérica dos modelos digitais (Jerónimo; *et al.*; 2020)

### 3.3 Avaliação da evolução da morfologia durante sucessivos ensaios de desgaste

Num outro estudo (Afonso; 2019), a morfologia de partículas de balastro granítico foi avaliada sucessivamente na sequência da realização de três fases do ensaio de micro-Deval. Para analisar as respetivas alterações de morfologia recorreu-se ao método da fotogrametria referido na secção 2.4. Foram ensaiadas 30 partículas, tendo havido a preocupação de obter uma representação heterogénea da forma das partículas.

No procedimento do ensaio de micro-Deval introduziram-se duas alterações ao estabelecido no anexo A da norma EN 1097-1 (CEN; 2011), no que se refere ao ensaio de balastro ferroviário. A primeira alteração foi a não adição de água ao provete durante o ensaio, ou seja, realizando o ensaio a seco, à luz do estabelecido no Anexo B da mesma norma. Esta alteração teve como objetivo simular a situação real o mais fielmente possível e para ser possível comparar os resultados com futuros trabalhos de modelação numérica recorrendo ao método dos elementos discretos, de acordo com o que será referido na secção 4 |. A segunda diferença tratou-se da interrupção do ensaio numa fase intermédia (após 2 mil revoluções do tambor, rev., de um total de 14 mil) para pesar e digitalizar as partículas selecionadas. Assim, desta alteração resultaram três momentos de digitalização das partículas por fotogrametria: i) no estado inicial destas, antes do ensaio; ii) numa fase intermédia do ensaio; iii) após a conclusão do ensaio. No final do ensaio, as frações dos provetes foram pesadas para se determinar o valor de micro-Deval a seco para balastro,  $M_{DS,RB}$ . Para que fosse possível distinguir as partículas nas diversas fases do procedimento, dado o elevado desgaste conferido pelo ensaio, estas foram pintadas com *spray*

(Figura 3.15). A evolução mássica das partículas foi acompanhada ao longo do trabalho, nas três fases do ensaio de micro-Deval, utilizando numa balança de elevada precisão (0,0001 g).



Figura 3.15 – Aspeto de algumas partículas: a) após 2000 revoluções; b) após 14 000 revoluções (b) (Afonso; 2019)

Foram construídos, no total, 3x30 modelos digitais (em média, com cerca de 270 000 vértices e 540 000 faces), recorrendo a um total de 9720 imagens capturadas. Para elucidar quanto ao detalhe das digitalizações que este método possibilitou, com o equipamento fotográfico indicado, refira-se que em termos de densidade de pontos da nuvem e de vértices por área de superfície se obteve, em média, valores superiores a 80 pontos/mm<sup>2</sup> e a 30 vértices/mm<sup>2</sup>, respetivamente. Outro aspeto importante foi a possibilidade de se poder estimar o valor da densidade específica de cada partícula, pois conhecia-se o seu peso real e volume digital. O valor médio da densidade específica das partículas analisadas, assim obtido, foi de 2,74 g/cm<sup>3</sup>. Recorrendo ao ensaio de determinação da massa volúmica para aquele conjunto de partículas selecionadas, utilizando o método do cesto imerso, como estabelecido na norma EN 1097-6 (CEN; 2013b), obteve-se um valor de 2,73 g/cm<sup>3</sup>, o que corresponde a uma diferença de apenas 0,4% relativamente ao valor anterior.

Após a conclusão do ensaio de micro-Deval, das sessões de fotogrametria e da reconstrução das partículas, relativamente a todas as fases, foi possível avaliar a evolução da morfologia daquelas através da análise e comparação dos modelos tridimensionais que foram construídos. À semelhança do estudo apresentado no ponto anterior, nesta tarefa também foi utilizado o *software GOM Inspect* que permite comparar malhas tridimensionais e contém algumas funcionalidades de alinhamento automático e de cálculo de distâncias entre as malhas que facilitam o seu manuseamento (Figura 3.16a), tornando-o numa ferramenta particularmente útil para a comparação das malhas geradas e, conseqüentemente, para a análise do desgaste sofrido pelas partículas durante o ensaio. As comparações foram feitas para cada partícula, entre a situação inicial (0 rev.) e após 2000 rev. (0 vs. 2000), entre este estado e a situação final após 14 000 rev. (2000 vs. 14 000), e entre o estado inicial e o final (0 vs. 14 000). A Figura 3.16b representa um exemplo da inspeção feita pelo programa, calculando as distâncias entre a partícula inicial e a partícula final (Figura 3.16c).

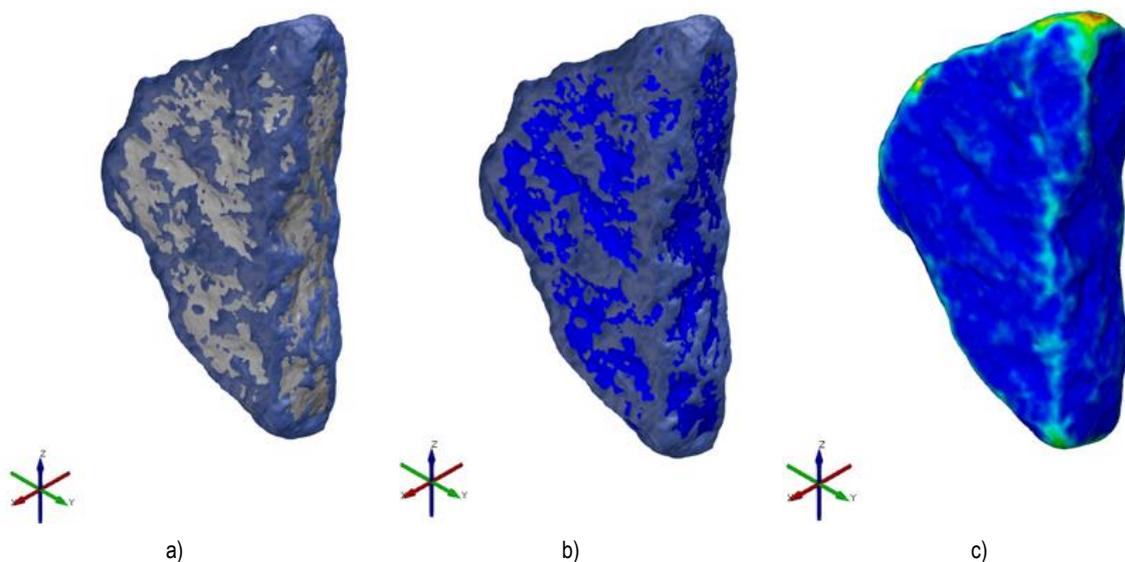


Figura 3.16 – Alinhamento dos modelos (a); inspeção da partícula (b); avaliação da evolução da morfologia (c)

O valor de micro-Deval a seco,  $M_{DS,RB}$ , obtido nos provetes foi de 3. Para se ter uma referência da influência da presença de água, foi também realizado um ensaio seguindo o procedimento normal da norma (CEN; 2011) para determinar o valor de micro-Deval húmido para balastro,  $M_{DS,RB}$ , ou seja, adicionando  $(2 \pm 0,05)$  l de água. Neste último obteve-se um valor mais elevado de  $M_{DS,RB} = 7$ , como seria expectável. No que se refere aos resultados dos três ensaios a seco, a massa acumulada das partículas de dimensão inferior a 1,6 mm encontra-se indicada na Figura 3.17a, onde se pode observar um ritmo mais elevado de produção de material de menor dimensão na fase inicial (0,0497 g/rev.) do que na fase seguinte (0,0183 g/rev.), o que constitui um resultado característico deste ensaio (Bach; 2013; Deiros; *et al.*; 2019): inicialmente as partículas apresentam vértices e arestas salientes e alguma rugosidade que são primeiramente removidas no início do ensaio. As partículas que foram rastreadas apresentaram um comportamento de degradação análogo. A título de exemplo, na Figura 3.17b apresenta-se a percentagem de massa perdida de 10 partículas rastreadas num dos ensaios realizados. Na Figura 3.18 apresenta-se um exemplo de comparação de modelos digitais de uma das partículas onde é sobreposto um mapa de cores que corresponde ao desgaste sofrido por essa partícula (a escala de cores corresponde à distância entre duas malhas relativas a fases diferentes do ensaio). Na Figura 3.19 apresenta-se o aspeto real dessa partícula, nas respetivas fases, identificando-se as zonas que sofreram maior desgaste.

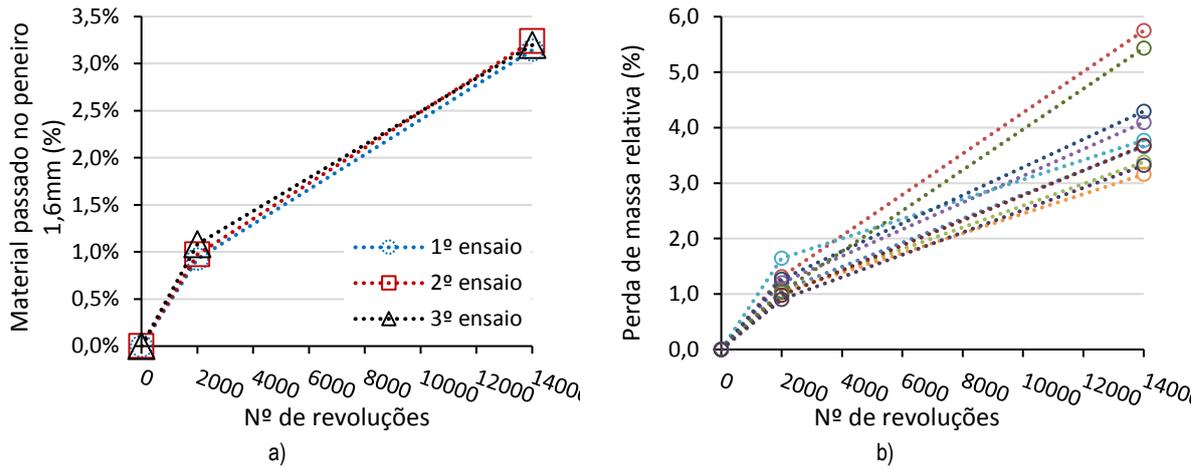


Figura 3.17 – Produção de material passado no peneiro de 1,6 mm (% em massa) ao longo de cada um dos ensaios (a) e perda de massa relativa de 10 partículas do 1º ensaio (b)

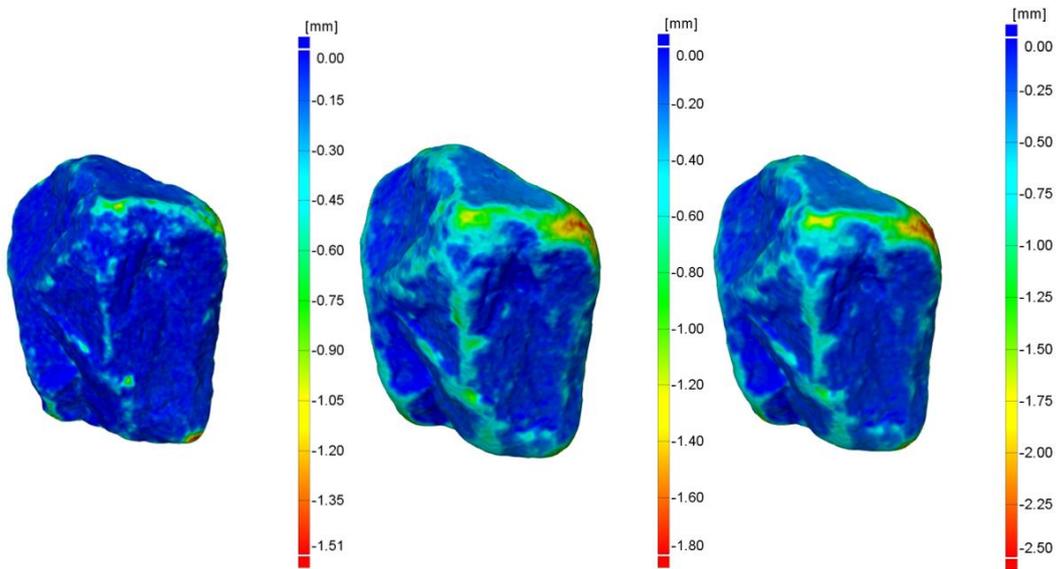


Figura 3.18 – Diferenças das malhas da partícula 1 (0 vs. 2000; 2000 vs. 14 000 e 0 vs. 14 000)



Figura 3.19 – Aspetos da partícula 1 após 2000 e 14 000 revoluções

No que se refere à análise da morfologia das partículas, de forma a eliminar os erros típicos introduzidos nesses tipos de medições (Folk; 1955), foi utilizada uma ferramenta de medição digital, desenvolvida no âmbito deste projeto em ambiente *MATLAB* (Paixão; 2019), que garante a medição automatizada, sem intervenção do utilizador, de vários parâmetros referidos anteriormente. Entre outros, esta ferramenta determina as dimensões máxima ( $L$ ), intermédia ( $I$ ) e menor ( $S$ ) (Krumbein; 1941), o volume ( $V$ ), a área da superfície ( $A$ ), o parâmetro de esfericidade ( $\Psi$  - conforme definido por Wadell (1932), considerando o volume e a área da superfície do modelo digital da partícula) e os rácios de achatamento ( $p = S/I$ ), de alongamento ( $q = I/L$ ), de equidimensionalidade ( $S/L$ ) (Blott; Pye; 2008) e o fator de forma ( $F = p/q$ ) (Aschenbrenner; 1956), mencionados anteriormente. Na Figura 3.20 apresenta-se o exemplo da análise da partícula 1 usando essa ferramenta. Para classificar as partículas quanto à sua morfologia, foi utilizada a proposta de Blott e Pye (2008), apresentando-se na Figura 3.21 a evolução da morfologia de todas as partículas selecionadas num diagrama de *Zingg* modificado.

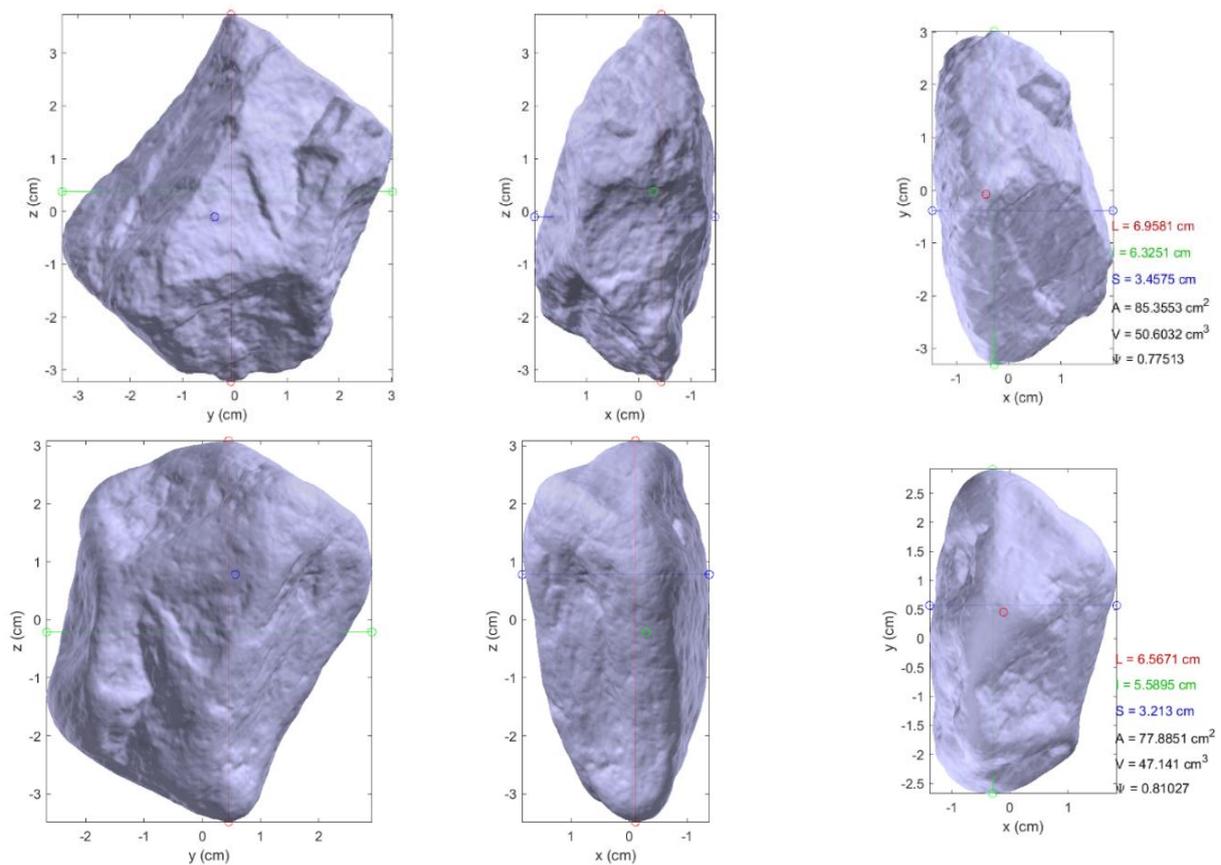


Figura 3.20 – Análise dos modelos da partícula 1 (inicial em cima e final em baixo) pela ferramenta de cálculo automático

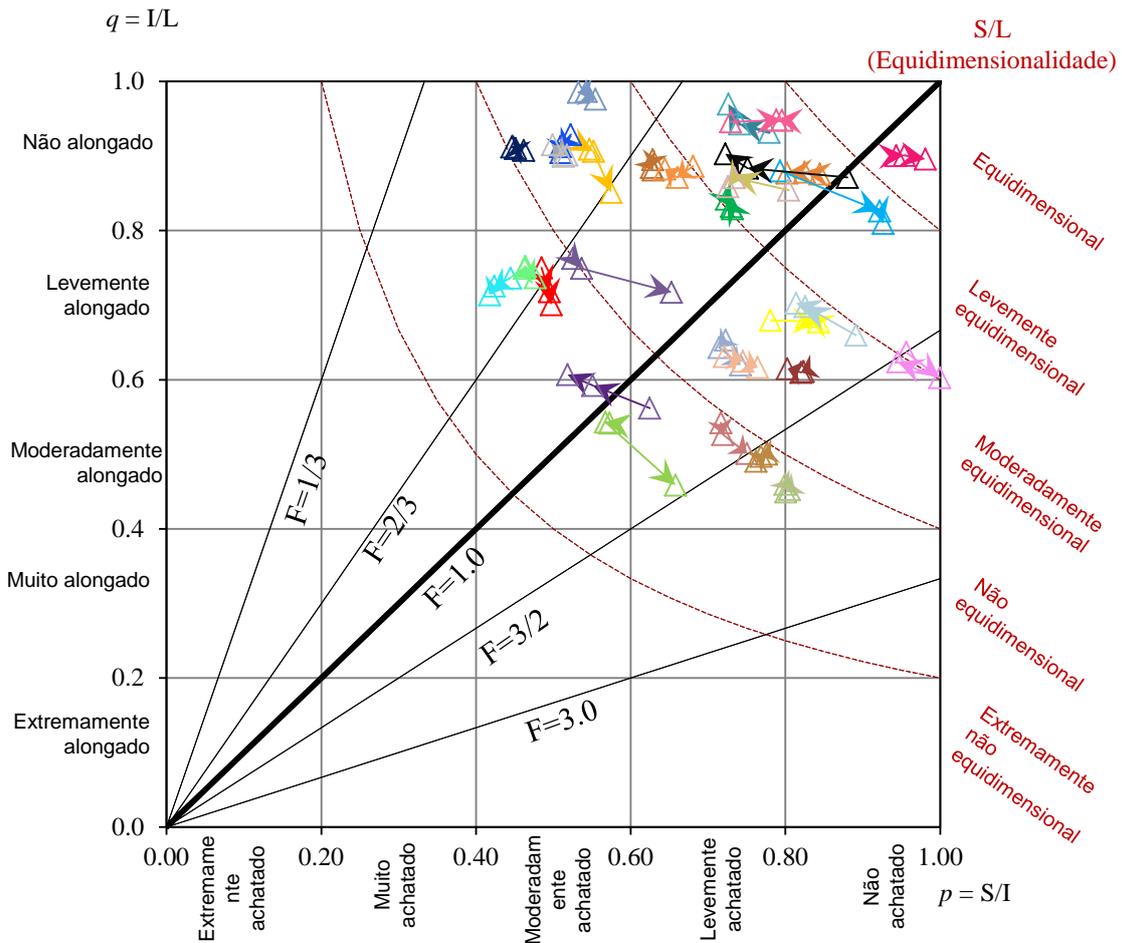


Figura 3.21 – Evolução e respetiva classificação modificada (Blott; Pye; 2008) das formas das partículas analisadas

Da análise da Figura 3.21 verifica-se que a maioria das partículas não alterou significativamente a sua classificação morfológica e, na generalidade, manteve-se o mesmo nível de heterogeneidade de classificações das partículas, ou seja, desde moderadamente alongadas e achatadas até não alongadas e não achatadas e desde não equidimensionais até equidimensionais, com fatores de forma entre 0,49 e 1,78. No entanto, identificaram-se seis partículas que apresentaram um percurso relativamente maior, no que respeita à migração dos rácios  $p$  e  $q$ , e que alteraram a sua classificação ao longo do ensaio. Visualmente, esta evolução seria difícil de identificar e a eventual medição manual das dimensões  $L$ ,  $I$  e  $S$  poderia conduzir a classificações bastante distintas das obtidas, uma vez que estas são tradicionalmente determinadas recorrendo a um paquímetro.

No que se refere à esfericidade ( $\Psi$ ) das partículas, este parâmetro variou dentro dos seguintes intervalos: [0,64; 0,85] na avaliação inicial; [0,66; 0,87] após 2 mil rev.; [0,69; 0,89] após 14 mil rev.. Assim, após concluído o ensaio, a amplitude do intervalo diminuiu, mas os valores dos respetivos limites aumentaram. Este aumento deveu-se ao desgaste dentro do tambor que conduziu a formas de partículas cada vez mais próximas da forma de uma esfera (portanto valores de esfericidade mais próximos da unidade). Este tipo de evolução é característico do efeito da erosão dos agregados por

rolamento (Domokos; Jerolmack; Sipos; *et al.*; 2014). Também se verificou que a evolução da razão de achatamento foi superior à evolução da razão de alongamento. O intervalo de variação da razão de achatamento foi [-0,15; 0,13] e o intervalo de variação da razão de alongamento foi [- 0,08; 0,05]. Estas variações foram obtidas através do cálculo da diferença entre os valores das razões finais e iniciais.

## 4 | Estudos para avaliação do desgaste de partículas com recurso a modelação numérica por elementos discretos

Em face dos desenvolvimentos verificados ao nível do desempenho computacional e das ferramentas disponíveis, atualmente é possível simular, com tempos de cálculo compatíveis com a atividade de investigação, o comportamento de materiais granulares utilizando programas de cálculo que recorrem a exigentes métodos computacionais. Um desses exemplos é o método dos elementos discretos (em inglês, *Discrete Element Method* - DEM) (Cundall; Strack; 1979), que se apresenta como uma alternativa de grande potencial aos métodos contínuos, uma vez que permite uma abordagem micromecânica.

Nos últimos anos, o DEM tem-se mostrado uma importante ferramenta numérica para analisar o comportamento do material granular normalmente utilizado na camada de balastro. A capacidade de avaliar a distribuição de forças entre as partículas, considerando as suas dimensões e forma, e a respetiva evolução devido à fragmentação e ao desgaste, é um dos aspetos mais interessantes deste tipo de modelação numérica. Com procedimentos de calibração apropriados, os modelos DEM podem fornecer informações realistas sobre o meio particulado, particularmente no que diz respeito às forças de contacto entre as partículas e as consequentes deformações do meio particulado. Esta informação é interessante para modelar o comportamento da camada de balastro sob a ação do tráfego (Lim; McDowell; 2005; Lobo-Guerrero; Vallejo; 2006; Huang; Tutumluer; 2011; Aikawa; 2013; Guo; *et al.*; 2020).

Por outro lado, este tipo de abordagem permite modelar ensaios atualmente utilizados na avaliação da resistência de partículas rochosas, como é o caso do ensaio micro-Deval, e compreender como evolui a sua morfologia quando submetidas a ações mecânicas (Deiros; Voivret; Combe; *et al.*; 2016; Wu; Wang; Hou; *et al.*; 2018). Esta informação é útil para a seleção de materiais a serem utilizados na camada de balastro e para parametrizar adequadamente os modelos numéricos de análise estrutural da via-férrea.

Neste projeto utilizou-se o DEM, numa primeira fase, para modelar o ensaio micro-Deval em partículas de agregado siderúrgico, com designação de ASIC, que foram estudadas com o intuito de serem utilizadas na camada de balastro (ver secção 8 ). Além da análise do comportamento global do material e da avaliação da energia de impacto, analisou-se o efeito do nível de discretização da superfície das partículas sobre o sistema de forças atuantes durante a simulação e procurou-se relacionar as zonas de máxima tensão na superfície com a evolução da morfologia dessas partículas resultante de um ensaio verdadeiro, avaliada por análise fotogramétrica.

Devido à colaboração da empresa ESSS – *Engineering Simulation and Scientific Software* Ltda., a título gracioso, foi possível utilizar o *software* de elementos discretos ROCKY<sup>i</sup>. A vantagem deste *software*,

---

<sup>i</sup> <https://rocky.esss.co/>

quando comparado com outros disponíveis no mercado, reside no facto de poder tirar partido da capacidade de computação de sistemas multi-GPU, em particular de equipamentos do fabricante *Nvidia* com elevada capacidade de operações com dupla precisão no sistema de ponto flutuante (formato numérico digital que ocupa 64 bits na memória do computador - FP64).

O meio particulado foi gerado com este *software*, que permite realizar simulações com DEM em 3D e importar a geometria das partículas no formato .STL. Estão implementados no *software* vários modelos físicos de forças de contacto normais e tangenciais. Neste estudo foram considerados para as forças normal e tangencial os modelos de contacto *Hertzian Spring Dashpot* e *Mindlin-Deresiewicz*, respetivamente. O modelo de resistência ao rolamento escolhido foi o Tipo 3 (Ai; Chen; Rotter; *et al.*; 2011).

Na modelação considerou-se a geometria do equipamento de ensaio e foi considerada uma velocidade angular constante de 100 rotações/minuto. A duração total de cada simulação foi de 10 segundos. Foram utilizadas versões simplificadas (por decimação) dos modelos de 27 partículas obtidos por fotogrametria. Dessas partículas, 14 tinham dimensões entre 31,5 e 40 mm e 13 entre 40 e 50 mm. A partir deste conjunto foram geradas artificialmente outras partículas para constituir dois grupos, denominados principal e secundário. O principal, que é o foco da análise, possui 27 partículas distintas (as originais), sendo a superfície de cada uma formada por uma malha com 3 000 triângulos. O grupo secundário consistia de 72 partículas, cada uma com uma superfície formada por uma malha de 50 triângulos. As partículas neste grupo foram usadas apenas para manter a massa de material que o protocolo de ensaio requer. Numa segunda fase, a malha da superfície de cada partícula do grupo principal foi simplificada para apenas 300 triângulos, com o objetivo de avaliar a influência desse aspeto nos resultados.

As propriedades dos materiais utilizados nas simulações do ensaio micro-Deval (material do equipamento de ensaio e partículas de agregado siderúrgico) são apresentadas no Quadro 4.1 . Os valores do módulo de Young e do coeficiente de Poisson estabelecidos para as partículas de ASIC foram obtidos de estudo anterior (Delgado; 2019). Os valores de atrito estático e atrito dinâmico foram obtidos por retroanálise no próprio *software*, para um coeficiente de restituição de 0,3, com base no valor encontrado por Huang (2010).

**Quadro 4.1 – Parâmetros físicos e parâmetros de contacto entre os materiais**

Parâmetro	Balastro	
	ASIC	Aço
Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	3200	7850
Módulo de Young (GPa)	0,05	200
Coeficiente de Poisson	0,2	0,3
Atrito estático com ASIC	0,7	0,3
Atrito dinâmico com ASIC	0,7	0,3
Coeficiente de restituição com ASIC	0,3	0,3

A alteração no nível de discretização da superfície das partículas não conduziu a mudanças perceptíveis na gama de variação das forças de contacto, em geral, conforme se verifica na Figura 4.1. O valor médio da força normal para o principal grupo de partículas nas duas simulações foi cerca de 5 N; o valor máximo foi de cerca de 30 N.

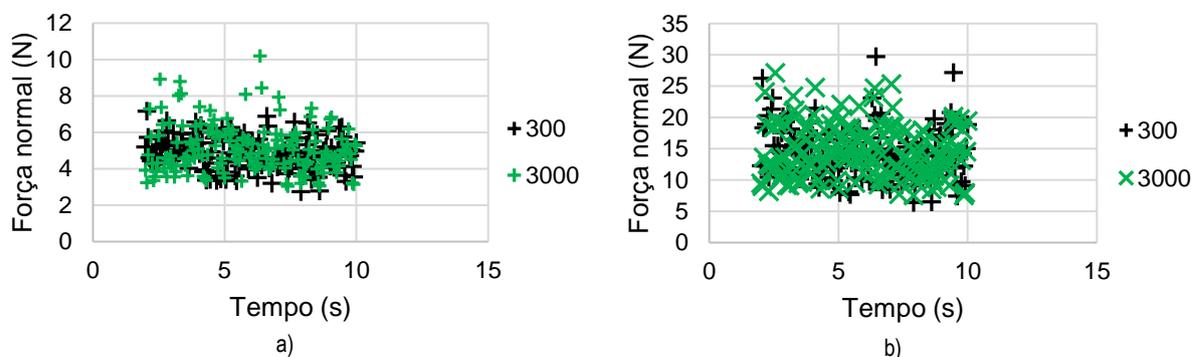


Figura 4.1 – Forças normais medidas no grupo principal de partículas durante o ensaio, com malha das partículas de 300 e 3 000 triângulos: a) médias; b) máximas

Na Figura 4.2a observa-se que a velocidade de translação das partículas é máxima quando caem livremente, principalmente no instante antes de atingirem o tambor ou outra partícula (a escala de cores varia entre 0 m/s, a azul, e 1,5 m/s, a vermelho). A força normal máxima só ocorre quando a partícula está em movimento circular, conforme mostrado na Figura 4.2b, em consequência da força centrípeta que altera a direção de seu movimento. O pico de energia de impacto ocorre no momento da colisão da partícula com o tambor conforme se identifica na Figura 4.2c.

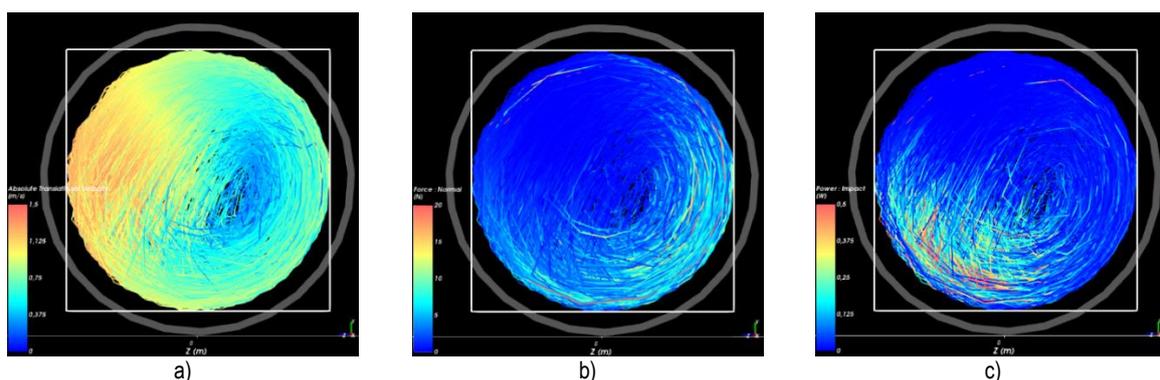


Figura 4.2 – Modelação do ensaio: a) velocidade de translação absoluta; b) força normal; c) energia de impacto

Foram analisados os resultados tendo em conta as dimensões das partículas e verificou-se que existe uma grande influência do nível de discretização da superfície das partículas no valor da tensão normal e na intensidade do impacto. De acordo com a Figura 4.3a ocorre um aumento de cerca de seis vezes

no valor da tensão média com o aumento do refinamento da malha. Esse aumento também é verificado no trabalho realizado pelas forças de contacto durante a colisão, que aumentou na ordem de dez vezes, conforme mostra a Figura 4.3b, que se refere à intensidade do impacto sofrido pelas partículas.

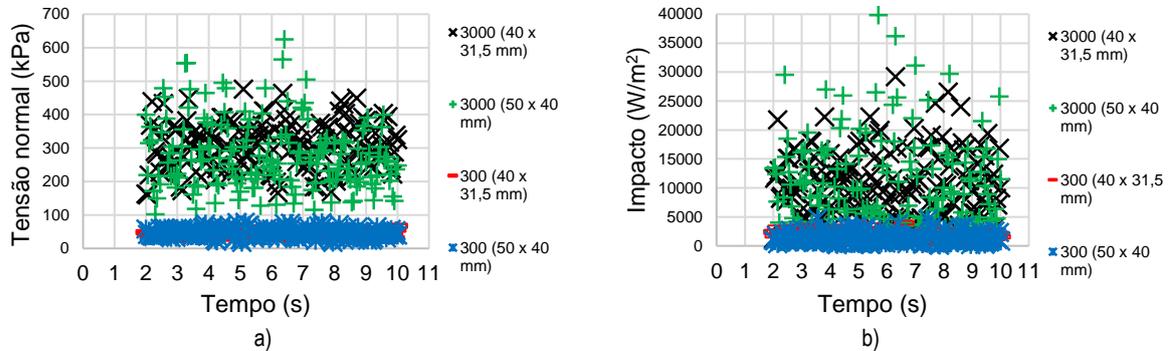


Figura 4.3 – Resultados no grupo principal de partículas durante a modelação do ensaio: a) tensão média; b) intensidade do impacto médio

A Figura 4.4 mostra a diferença na tensão normal numa das partículas com a variação na discretização da superfície. Uma malha de 3000 triângulos, Figura 4.4a, conduz a valores de tensão de até 300 kPa em áreas mais restritas das arestas. Uma malha de 300 triângulos, Figura 4.4b, mostra zonas de tensões relativamente altas que cobrem áreas relativamente grandes da partícula, mas cujo valor absoluto é inferior ao mencionado anteriormente (valor máximo de cerca de 120 kPa), devido à área de contacto ser maior.

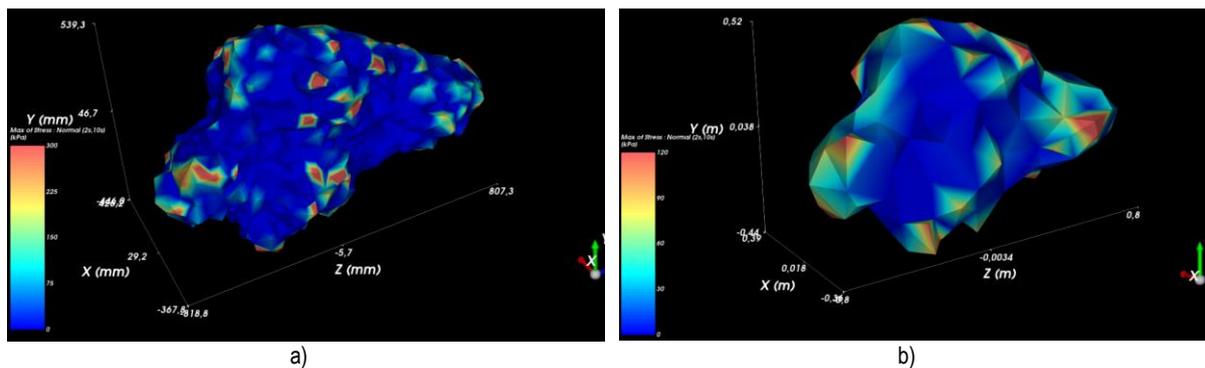


Figura 4.4 – Distribuição de tensões numa partícula com superfície discretizada por triângulos: a) 3000; b) 300

A Figura 4.5 mostra a intensidade de desgaste da superfície de uma mesma partícula, devido ao teste de micro-Deval, obtida a partir da análise fotogramétrica antes e após o teste. Nota-se similaridade entre as regiões de desgaste obtidas no ensaio real e as zonas com tensões máximas calculadas na simulação numérica realizada com a malha de 3000 triângulos (Figura 4.4a).

A Modelação DEM do ensaio de micro-Deval mostrou-se capaz de captar o comportamento macro do material, em particular no que se refere à interação das partículas entre si e com o tambor, e quanto à

concordância entre as áreas obtidas na simulação onde ocorrem maiores tensões e áreas com degradação observada no material ensaiado.

O refinamento da malha da superfície de cada partícula produz alterações importantes na tensão e no impacto nas partículas devido a alterações nas suas condições de contorno. Esse aumento deve-se à redução da área de cada triângulo. O refinamento da malha permitiu mostrar, com razoável aproximação, as áreas de maior incidência de degradação do material, o que mostra que é possível representar a degradação das partículas resultante do ensaio real. Porém, será necessário realizar novos estudos para validar as simulações com dados de ensaio com menor número de rotações e analisar as respectivas tensões máximas nas arestas. Assim, este tipo de simulação parece ter potencial para ajudar a analisar o comportamento do balastro e a sua degradação sob ações mecânicas.

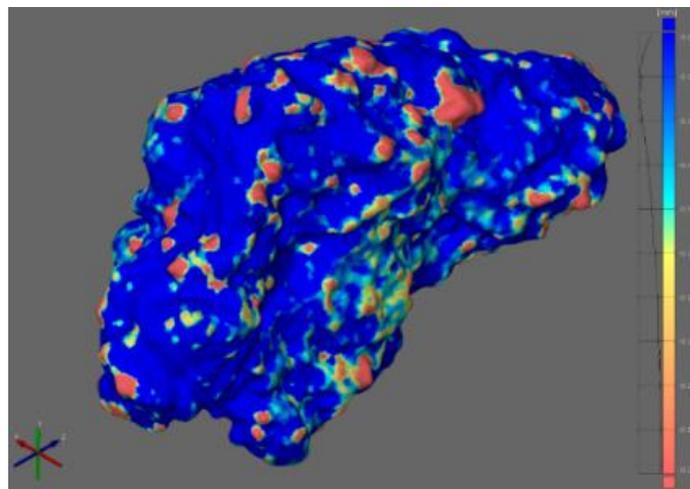


Figura 4.5 – Intensidade de desgaste da superfície de uma partícula, obtida por análise fotogramétrica antes e depois do ensaio de micro-Deval

## 5 | Estudos para o desenvolvimento de modelos numéricos contínuos de análise estrutural da via-férrea

### 5.1 Aspetos gerais

No âmbito deste projeto tem vindo a ser desenvolvido, em parceria com a Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, uma aplicação de cálculo estrutural da via-férrea, designada por *Pegasus* (Varandas; 2013). O programa é desenvolvido em ambiente MATLAB (2013) e tem sido melhorado e validado pela equipa do projeto com resultados experimentais obtidos em vários estudos de monitorização do comportamento de vias-férreas em operação (Varandas; Paixão; Fortunato; *et al.*; 2014; Paixão; Varandas; Fortunato; *et al.*; 2016b; Varandas; Hölscher; Silva; 2016c; Varandas; Paixão; Fortunato; 2017; Paixão; Varandas; Fortunato; *et al.*; 2018c) e em ensaios laboratoriais sobre modelos físicos à escala real (Varandas; *et al.*; 2020). Destaca-se o facto de esta ferramenta permitir desenvolver análises dinâmicas tridimensionais da resposta estrutural da via-férrea e da sua subestrutura, considerando geometrias relativamente complexas e incorporando, de forma inovadora, vários aspetos em simultâneo, tais como:

- a) o perfil geométrico do posicionamento dos carris ao longo da via e defeitos de pequeno comprimento de onda da superfície do carril;
- b) eventuais anomalias relativas a situações de travessas suspensas (ausência de contacto entre a face inferior das travessas e a camadas de balastro);
- c) a interação dinâmica entre os veículos-ferroviários e a via-férrea;
- d) o contacto não linear entre as travessas e a camada de balastro;
- e) o comportamento resiliente não linear das camadas granulares de balastro e de sub-balastro;
- f) o comportamento de deformação permanente das camadas de balastro e da subestrutura.

A Figura 5.1a mostra uma perspetiva dos três sistemas estruturais distintos (mas acoplados) considerados nos modelos construídos com o *Pegasus*, nomeadamente: i) o veículo; ii) a superestrutura da via, composta por carris, travessas e palmilhas de carril; iii) a subestrutura, constituída pelas camadas de balastro, sub-balastro e de solo de fundação, modeladas com estratificação horizontal (Figura 5.1b). Estes sistemas interagem entre si através de forças de interação entre os rodados e os carris e entre as travessas e a camada de balastro.

Os carris e as travessas são modelados por elementos de viga Euler-Bernoulli, permitindo considerar de forma suficientemente precisa a rigidez à flexão desses elementos, com esforço computacional mais reduzido do que o que seria necessário se se considerasse a teoria do modelo de viga de Timoshenko-Ehrenfest. São considerados cinco graus de liberdade por nó: três translações e duas rotações. Não é considerada a rotação de torção. Os carris são ligados às travessas através de elementos viscoelásticos tridimensionais do tipo mola-amortecedor, que representam as palmilhas de carril. A

Figura 5.2 mostra uma representação qualitativa da discretização típica da modelação por elementos finitos da via-férrea.

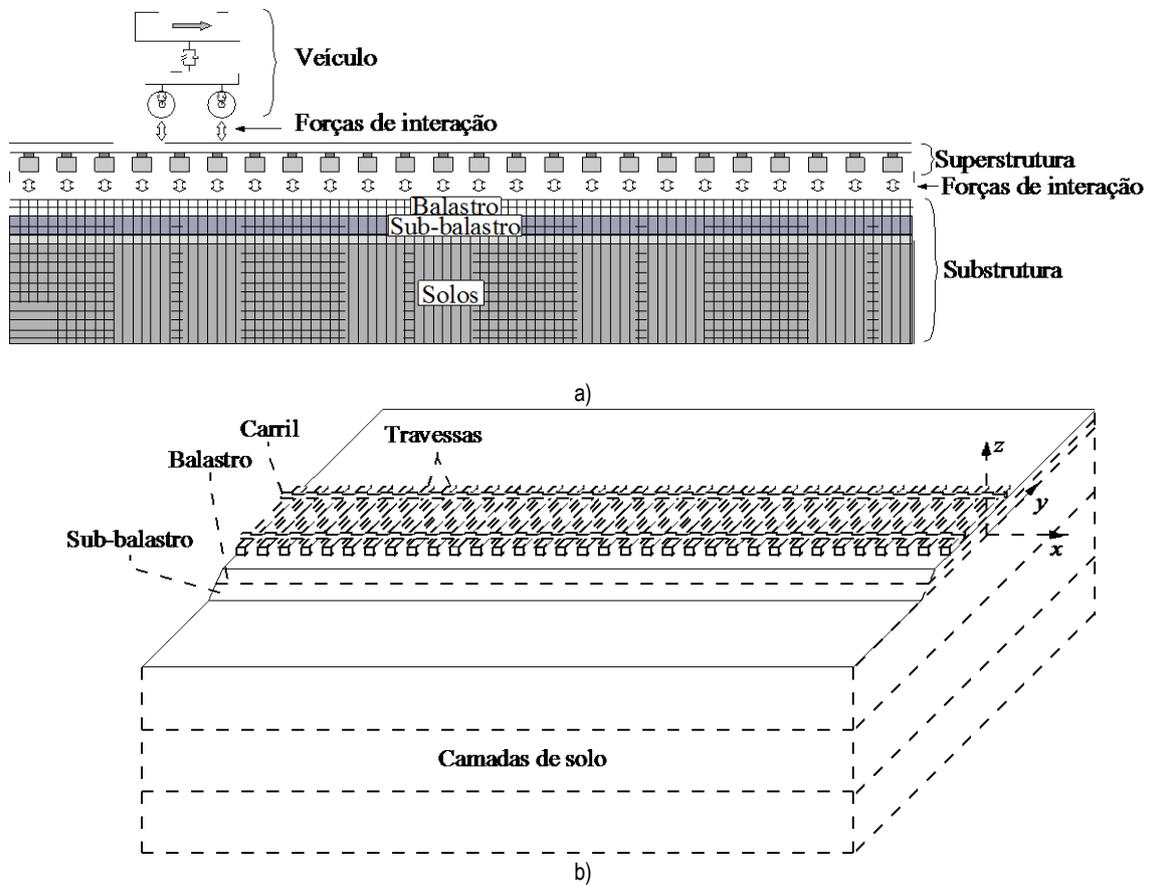


Figura 5.1 – Representação dos sistemas estruturais considerados na modelação (a) e esquema do modelo tridimensional da via-férrea (b) (Varandas; 2013; Paixão; et al.; 2018c)

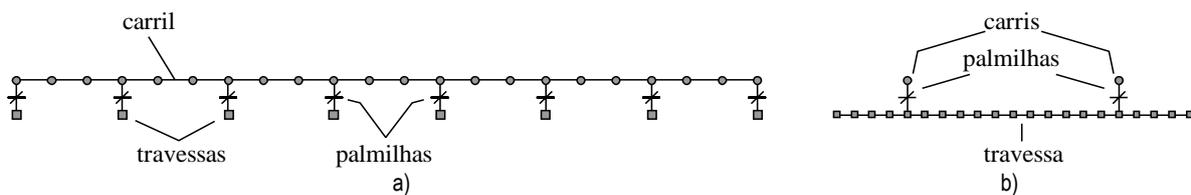


Figura 5.2 – Representação do modelo por elementos finitos da superestrutura da via: a) perfil longitudinal; b) perfil transversal (Varandas; 2013)

O sistema subestrutura da via é discretizado recorrendo a elementos sólidos hexaédricos de oito nós (Bathe; 1996), com três graus de liberdade de translação por nó.

Em relação ao veículo, este pode ser representado por cargas móveis de valor constante, ou por uma associação de corpos rígidos, ligados por molas e amortecedores, representando um bogie (estrutura mecânica constituída por dois eixos e por um sistema de amortecimento) do veículo e meia caixa

suspensa sobre o mesmo (Figura 5.3), com oito graus de liberdade: quatro translações e quatro rotações.

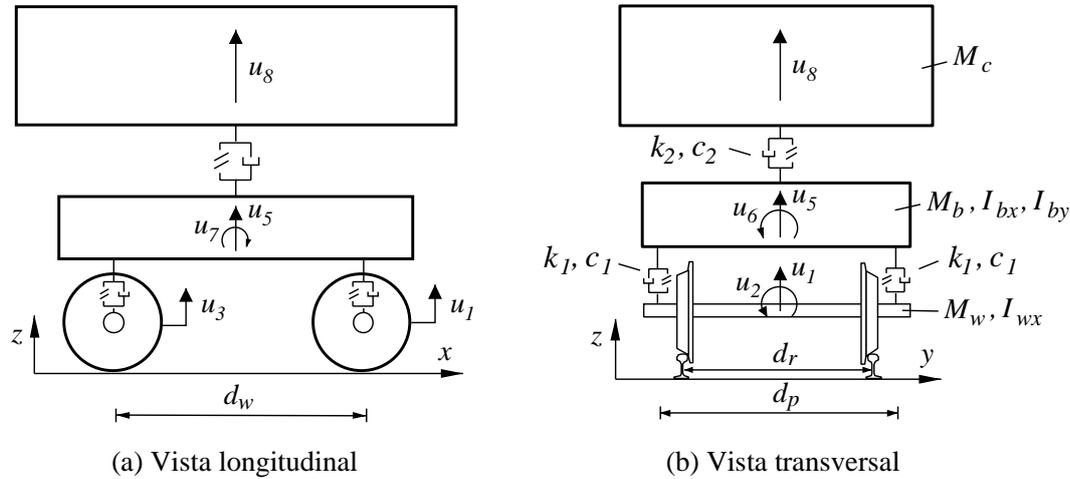


Figura 5.3 – Modelo do veículo, representado por um bogie e meia caixa

De acordo com a Figura 5.3,  $u_1, u_3, u_5$  e  $u_8$  são translações verticais do eixo dianteiro, do eixo traseiro, do bogie e da caixa, respetivamente, e  $u_2, u_4$  e  $u_6$  são rotações do eixo dianteiro, do eixo traseiro e do bogie, respetivamente, e  $u_7$  é a rotação do bogie em torno do eixo horizontal normal ao movimento.  $I_{bx}$  e  $I_{by}$  são as inércias de massa da bogie segundo os eixos transversal longitudinal e transversal, respetivamente.  $I_{wx}$  é a inércia de massa do eixo segundo o eixo longitudinal.  $M_w, M_b$  e  $M_c$  são as massas do eixo, da bogie e da caixa, respetivamente. A matriz de rigidez do veículo  $K_v$  relativa aos oito graus de liberdade, é assim definida:

$$K_v = \begin{bmatrix} 2k_1 & 0 & 0 & 0 & -2k_1 & 0 & d_w k_1 & 0 \\ 0 & \frac{d_p^2 k_1}{2} & 0 & 0 & 0 & \frac{-d_p^2 k_1}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2k_1 & 0 & -2k_1 & 0 & -d_w k_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{d_p^2 k_1}{2} & 0 & \frac{-d_p^2 k_1}{2} & 0 & 0 \\ -2k_1 & 0 & -2k_1 & 0 & 4k_1 + k_2 & 0 & 0 & -k_2 \\ 0 & \frac{-d_p^2 k_1}{2} & 0 & \frac{-d_p^2 k_1}{2} & 0 & d_p^2 k_1 & 0 & 0 \\ d_w k_1 & 0 & -d_w k_1 & 0 & 0 & 0 & d_w^2 k_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -k_2 & 0 & 0 & k_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

onde  $k_1$  e  $k_2$  são os valores da rigidez da suspensão primária e da secundária, de acordo com a Figura 5.3. A matriz de amortecimento  $C_v$  é obtida de forma idêntica, substituindo  $k_1$  e  $k_2$  por  $c_1$  e  $c_2$ , respetivamente. A matriz de massa  $M_v$  é uma matriz diagonal com as correspondentes massas e momentos de inércia de acordo com os graus de liberdade de translação e rotação.

Para a caracterização deste tipo de modelação do veículo também é necessário definir: o raio das rodas, a distância entre eixos e a distância entre as suspensões primárias do mesmo eixo.

O veículo interage com a superestrutura da via através de forças verticais de interação roda-carril, não sendo considerados os movimentos horizontal e de lacete dos eixos e do bogie.

As equações acopladas de movimento dos sistemas do veículo, da superestrutura e da subestrutura da via são:

$$\begin{cases} \mathbf{K}_v \mathbf{u}_v + \mathbf{C}_v \mathbf{v}_v + \mathbf{M}_v \mathbf{a}_v = \mathbf{f}_{g,v} + \mathbf{f}_{a,w} \\ \mathbf{K}_t \mathbf{u}_t + \mathbf{C}_t \mathbf{v}_t + \mathbf{M}_t \mathbf{a}_t = \mathbf{f}_{g,t} - \mathbf{f}_{a,w} + \mathbf{f}_{a,b} \\ \mathbf{K}_s \mathbf{u}_s + \mathbf{C}_s \mathbf{v}_s + \mathbf{M}_s \mathbf{a}_s = \mathbf{f}_{g,s} - \mathbf{f}_{a,b} \end{cases} \quad (3)$$

onde os índices  $v$ ,  $t$  e  $s$  se referem aos sistemas do veículo, da superestrutura e da subestrutura, respetivamente.  $\mathbf{K}$ ,  $\mathbf{C}$  e  $\mathbf{M}$  representam a rigidez global, as matrizes de amortecimento e de massa dos sistemas estruturais;  $\mathbf{u}$ ,  $\mathbf{v}$  e  $\mathbf{a}$  são, respetivamente, os vetores dos deslocamentos nodais, velocidades e acelerações;  $\mathbf{f}_{g,v}$ ,  $\mathbf{f}_{g,t}$  e  $\mathbf{f}_{g,s}$  são os vetores das forças de gravidade relativas aos sistemas do veículo, da superestrutura e da subestrutura;  $\mathbf{f}_{a,w}$  é o vetor das forças de interação entre as rodas e os carris e  $\mathbf{f}_{a,b}$  é o vetor das forças de interação entre as travessas e o balastro.

Todas as matrizes são obtidas pelo método de “assemblagem” tradicional para elementos finitos. A massa é agrupada nos nós dos elementos finitos, resultando em matrizes de massa diagonais. A via-férrea é modelada com um comportamento linear, mas o sistema da subestrutura pode incluir elementos com comportamento não linear, pelo que a matriz de rigidez deste sistema pode variar durante o procedimento de integração, de acordo com a relação tensão-deformação não linear, como descrito mais adiante. As matrizes de amortecimento  $\mathbf{C}_t$  e  $\mathbf{C}_s$  representam o amortecimento de Rayleigh (Clough; Penzien; 1993) do sistema da via e do sistema da subestrutura, respetivamente. Para o efeito, é considerada uma matriz de rigidez linear equivalente ( $K_{s.lin}$ ) para o sistema da subestrutura, resultando em matrizes de amortecimento constantes:

$$\mathbf{C}_s = a_0 \mathbf{M}_s + a_1 (\mathbf{K}_{s.lin}) \quad (4)$$

Os parâmetros  $a_0$  e  $a_1$  são determinados de acordo com:

$$\begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{bmatrix} = \frac{2\xi}{\omega_1 + \omega_2} \begin{bmatrix} \omega_1 \omega_2 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

onde  $\xi$  é o fator de amortecimento selecionado para duas frequências angulares  $\omega_1$  e  $\omega_2$ .

A matriz de rigidez linear equivalente,  $K_{s.lin}$ , é construída assumindo valores típicos para os parâmetros que definem as relações constitutivas linear-elásticas equivalentes dos elementos do sistema da subestrutura com comportamento não-linear.

No que se refere à integração numérica no tempo das equações diferenciais, como as apresentadas na Eq. (3), ela pode ser realizada no *Pegasus* com recurso a um método de integração designado de misto - implícito-explícito – que foi desenvolvido com o objetivo de melhorar a eficiência do cálculo (Varandas; *et al.*; 2017). Esta abordagem combina os métodos de integração implícita de Newmark e de integração explícita proposta por Zhai (1996).

De facto, em geral, os métodos implícitos permitem a utilização de passos de tempo de integração maiores, quando comparados com os métodos explícitos, mas naqueles o esforço de computação

necessário aumenta substancialmente com um grande número de graus de liberdade devido à necessidade de resolver simultaneamente um grande número de equações. Por outro lado, os métodos explícitos não requerem a inversão da matriz de rigidez, sendo basicamente compostos por operações matriciais simples, desde que a matriz de massa permaneça diagonal (Belytschko; 1976; Zhai; 1996).

Atendendo aos três sistemas estruturais independentes, embora acoplados (Eq. 3), considerados nos modelos construídos com o *Pegasus*, é possível selecionar de forma direta o método de integração mais adequado para cada um deles, com o objetivo de diminuir o esforço computacional sem reduzir a precisão. Assim, para resolver as equações relativas à subestrutura ferroviária, que usualmente contemplam várias centenas de milhares de graus de liberdade associados aos elementos sólidos 3D, é utilizado um método explícito descrito por Zhai (1996). Este método é condicionalmente estável e o passo de integração terá que ser menor do que um valor crítico para a convergência da solução ( $\Delta t \leq \Delta t_{crit}$ ) (Hughes; 2012). O intervalo de tempo necessário é pequeno, sendo normalmente diretamente dependente do tamanho dos elementos finitos e da velocidade das ondas de propagação. Uma boa estimativa do intervalo de tempo máximo permitido usando este método é dada por:

$$\Delta t_{crit} = 0,5 \times \min(L_{e,i}/v_{p,i}) \quad (6)$$

em que  $L_{e,i}$  é o menor comprimento característico do elemento  $i$ , e  $v_{p,i}$  é a correspondente velocidade de propagação de ondas primárias (Belytschko; 1976; Hughes; 2012). Para elementos de viga o comprimento característico corresponde ao comprimento do elemento e para elementos sólidos hexaédricos de oito nós corresponde ao comprimento mínimo das faces. Para elementos viga, a velocidade  $v_p$  é determinada por:

$$v_p = \sqrt{E/\rho} \quad (7)$$

onde  $E$  é o módulo de Young e  $\rho$  é a massa volúmica. Para elementos sólidos, a velocidade  $v_p$  pode ser estimada por:

$$v_p = \sqrt{M/\rho} \quad (8)$$

em que  $M$  é o módulo edométrico, definido por:

$$M = E(1 - \nu)/((1 + \nu)(1 - 2\nu)) \quad (9)$$

onde  $\nu$  é o coeficiente de Poisson.

A formulação básica de integração explícita utilizada no *Pegasus* para resolver o sistema de equações apresentado na Eq. (3) para determinar os deslocamentos e as velocidades conhecendo o movimento de dois instantes anteriores pode ser escrito da seguinte forma (Zhai; 1996):

$$\mathbf{u}_n = \mathbf{u}_{n-1} + \mathbf{v}_{n-1}\Delta t + \left(\frac{1}{2} + \psi\right)\mathbf{a}_{n-1}\Delta t^2 - \psi\mathbf{a}_{n-2}\Delta t^2 \quad (10)$$

$$\mathbf{v}_n = \mathbf{v}_{n-1} + (1 + \varphi)\mathbf{a}_{n-1}\Delta t - \varphi\mathbf{a}_{n-2}\Delta t \quad (11)$$

em que o subscrito  $n$  se refere ao instante atual.

No que se refere ao sistema de superestrutura da via, este é basicamente composto por elementos de viga, corresponde a um modelo por elementos finitos muito menor quando comparado com o modelo da subestrutura. Deste ponto de vista, ambos os esquemas de integração são viáveis. No entanto, em geral, o sistema da superestrutura da via é mais rígido, pois inclui elementos de aço (carris e fixações) e betão (travessas), em vez de agregados e solos. De acordo com a Eq. (6), a utilização de um método explícito conduziria a um intervalo de tempo muito pequeno, da ordem de  $10^{-5}$  s, pelo que se opta por um método implícito, como o método Newmark- $\beta$ , para resolver o sistema de superestrutura da via.

Para o sistema do veículo, por ser um modelo pequeno e não rígido em comparação com os outros dois sistemas, ambos os esquemas seriam adequados, optando-se, devido à sua simplicidade, pelo referido esquema explícito.

## 5.2 Interação travessa-balastro

As forças de interação entre as travessas e a camada de balastro subjacente são devidas ao contacto entre a base da travessa e o balastro subjacente e ao atrito entre as faces laterais da travessa e o balastro confinante. As forças de interação são não lineares devido à distinção de contacto *on/off* conforme descrito em (Varandas; *et al.*; 2016c).

A análise de interação travessa-balastro é limitada ao carregamento vertical do comboio (Figura 5.4) apesar de também ocorrer interação horizontal, devido sobretudo ao atrito de Coulomb na base da travessa e à pressão normal exercida pelo balastro na face lateral da travessa. Uma vez que a resposta estrutural é geralmente dominada pela componente vertical, apenas se considera a interação na direção vertical devido à pressão normal exercida na base da travessa e ao atrito entre as faces laterais das travessas e balastro. O movimento horizontal da superestrutura da via é restringido através de molas e amortecedores horizontais, que não afetam a resposta vertical, apenas visando manter a posição.

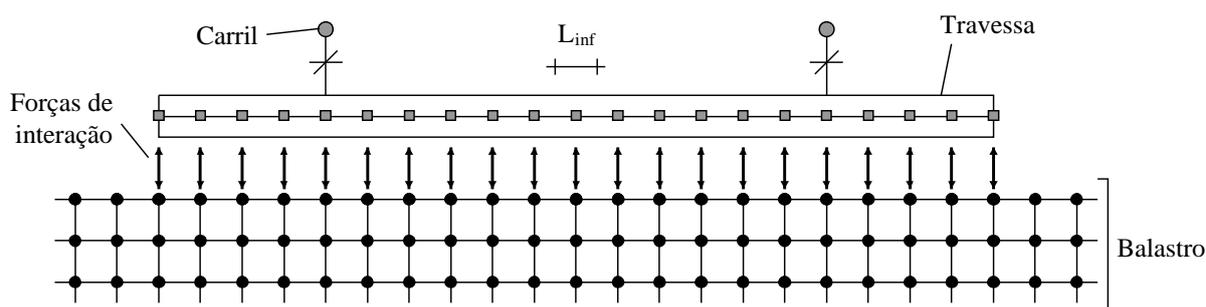


Figura 5.4 – Vista na direção longitudinal da travessa da interação travessa-balastro (Varandas; 2013)

Na direção vertical, a pressão normal entre a travessa e o balastro é assumida como sendo proporcional à diferença entre o deslocamento vertical da base da travessa e a face inferior da camada de balastro, seguindo a formulação de penalty para problemas de contacto (Bhatti; 2006). A força de contacto é determinada por  $K_c d$ , onde  $K_c$  é um parâmetro de contacto e  $d$  é a diferença dos deslocamentos

verticais. Por outro lado, o atrito vertical entre as faces laterais da travessa e o balastro é equiparado a um amortecedor, dado por  $C_c d$ , onde  $C_c$  é o parâmetro de atrito e  $d$  a velocidade relativa entre faces.

Assim, a força de interação vertical entre dois nós sobrepostos, um pertencendo ao sistema superestrutura ( $t$ ) e outro pertencendo ao sistema subestrutura ( $s$ ), é determinada por:

$$f_{a.b.i} = \begin{cases} k_{c,i}(u_{t,i} - u_{s,i} - h_i) + c_{c,i}(v_{t,i} - v_{s,i}) & \text{em caso de contacto} \\ c_{c,i}(v_{t,i} - v_{s,i}) & \text{caso não ocorra contacto} \end{cases} \quad (12)$$

onde  $f_{a.b.i}$  é a força de interação vertical entre os nós  $t.i$  e  $s.i$ ,  $k_c$  e  $c_c$  correspondem aos parâmetros de contacto e atrito, respetivamente,  $u_t$  e  $u_s$  correspondem aos deslocamentos verticais,  $v_t$  e  $v_s$  correspondem às velocidades verticais e  $h_i$  é a eventual ausência de contacto entre estes dois nós (por exemplo, folgas sob as travessas). A Figura 5.5 representa o sistema de eixos adotado para a definição dos deslocamentos nodais e do eventual não contacto.

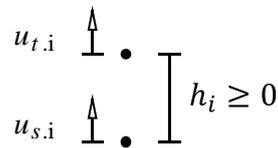


Figura 5.5 – Sistema de eixos para o contacto vertical (Varandas; 2013)

Como as travessas são modeladas como elementos de viga, a largura da travessa não é representada na malha correspondente de elementos finitos. A Figura 5.6 mostra, na direção transversal da travessa, a interação travessa-balastro, onde  $B$  é a largura da travessa.

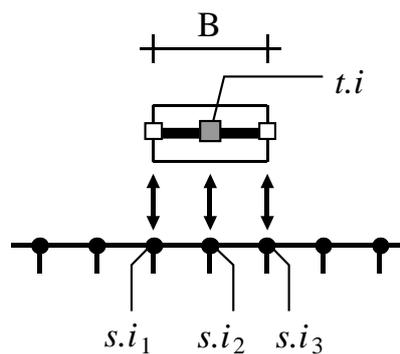


Figura 5.6 – Vista na direção transversal da travessa da interação travessa-balastro (Varandas; 2013)

É de notar que para cada nó da travessa ( $t.i$ ), existem três (ou mais) nós correspondentes ao balastro sob a correspondente largura da travessa (nós  $s.i_1$  a  $s.i_3$ ). É assumido que a travessa tem rigidez

infinita na sua direção transversal (direção da largura) e é possível definir forças de interação entre o nó  $t.i$ , da travessa, e cada um dos nós inferiores ( $s.i_1$ ,  $s.i_2$  e  $s.i_3$ ).

Os valores do parâmetro de contacto  $K_c$  e do parâmetro de atrito  $C_c$  têm de ser determinados analiticamente. Assumindo que o valor de interpenetração vertical entre o contacto travessa-balastro durante a passagem de um comboio é da ordem de 0,01 mm, assumindo-se assim uma influencia muito limitada da interpenetração da travessa-balastro no cálculo dos deslocamentos totais do sistema. Considerando uma largura da travessa de 0,25 m e um carregamento típico de um comboio, o valor resultante de  $K_c$  é de 6,25 GN/m<sup>2</sup> e um valor representativo do parâmetro de atrito  $C_c$  é 2,5 kNs/m<sup>2</sup>. A transposição dos parâmetros de contacto e atrito global para parâmetros equivalentes aplicados a cada nó, é realizado através a seguinte formulação:

$$k_{c,i} = K_c L_{inf}/n \quad (13)$$

$$c_{c,i} = C_c L_{inf}/n \quad (14)$$

onde  $L_{inf}$  é o comprimento de influência do nó  $i$  na direção longitudinal da travessa, como representado na Figura 5.4, e  $n$  é o número do nó pertencente à correspondente malha do balastro ao longo da largura da travessa (no caso representado na Figura 5.6,  $n = 3$ ).

### 5.3 Interação roda-carril

As forças de interação roda-carril são determinadas com recurso à teoria de Hertz para metais com amortecimento histerético (Timoshenko; Goodier; 1969; Lankarani; Nikravesh; 1990):

$$f_{a.w,j} = \begin{cases} k_w \delta_j^{1.5} + c_w \dot{\delta}_j & \text{em caso de contacto} \\ 0 & \text{caso não ocorra contacto} \end{cases} \quad (15)$$

em que  $k_w$  é o coeficiente de rigidez,  $c_w$  é o coeficiente de amortecimento,  $\delta_j$  é a indentação do rodado  $j$  e  $\dot{\delta}_j$  é a velocidade da indentação dos sólidos em contacto. A indentação  $\delta_j$  é calculada da seguinte forma:

$$\delta_j = u_{v,j} - u_{t,j} \quad (16)$$

onde  $u_{v,j}$  é o deslocamento do ponto de contacto da roda  $j$  com o carril e  $u_{t,j}$  é o deslocamento do carril na posição da roda  $j$ . O deslocamento  $u_{t,j}$  quando a roda se localiza entre dois nós da malha de elementos finitos dos carris é obtido pelas rotações e translações dos correspondentes nós e pelas funções de interpolação. O deslocamento  $u_{v,j}$  é calculado a partir do movimento do eixo (translação e rotação) e do raio da roda. Exemplificando para a roda direita do eixo dianteiro, o deslocamento correspondente  $u_{v,j}$  é obtido por:

$$u_{v,j} = u_1 - \frac{d_r}{2} \sin(u_2) + R_w (\cos(u_2) - 1) \quad (17)$$

onde  $u_1$  e  $u_2$  são o deslocamento vertical e a rotação do eixo dianteiro, respetivamente,  $d_r$  corresponde à distância entre carris e  $R_w$  é o raio da roda.

## 5.4 Condições de fronteira

Nas fronteiras laterais do modelo é considerado o Método da Fronteira Absorvente (MFA) através da introdução de amortecedores viscoelásticos nos nós das fronteiras para absorverem as ondas refletidas, decorrentes da análise dinâmica (Lysmer; Kuhlemeyer; 1969; Kouroussis; Verlinden; Conti; 2011), de acordo com o que é normal em análises dinâmicas similares (Banimahd; 2008; Shan; Albers; Savidis; 2013). As constantes de amortecimento na fronteira, representados na Figura 5.7, são determinadas a partir da velocidade de onda do solo substituído (Lysmer; Kuhlemeyer; 1969):

$$c_{rd.p} = \rho v_p A \quad (18)$$

$$c_{rd.s} = \rho v_s A \quad (19)$$

onde  $c_{rd.p}$  e  $c_{rd.s}$  são, respetivamente, as constantes de amortecimentos na direção longitudinal e transversal,  $\rho$  é a massa volúmica,  $v_p$  e  $v_s$  são as velocidades de ondas primárias e secundárias do solo substituído, respetivamente, e  $A$  é a área de influência do nó da malha de elementos finitos.

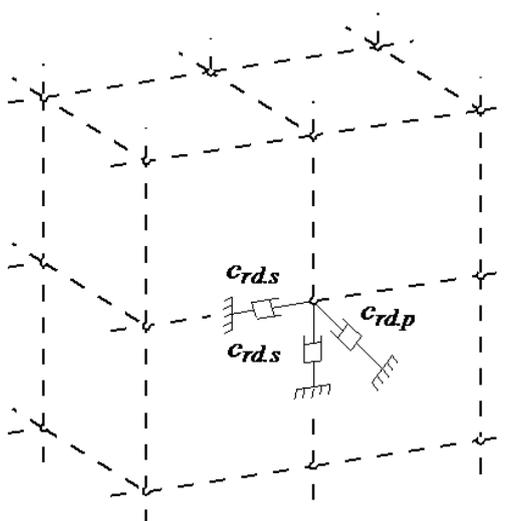


Figura 5.7 – Representação do método da fronteira absorvente com amortecedores (Varandas; 2013)

Quando a camada mais inferior está suficientemente profunda em comparação com o nível da via, é possível substituir parte ou a totalidade da sua espessura por uma fundação viscoelástica do tipo Winkler (1867). Este procedimento reduz significativamente o tamanho do modelo de elementos finitos e, conseqüentemente, o esforço de cálculo. A Figura 5.8 mostra esquematicamente o procedimento no qual uma quarta camada de solo é substituída por um sistema de molas e amortecedores.

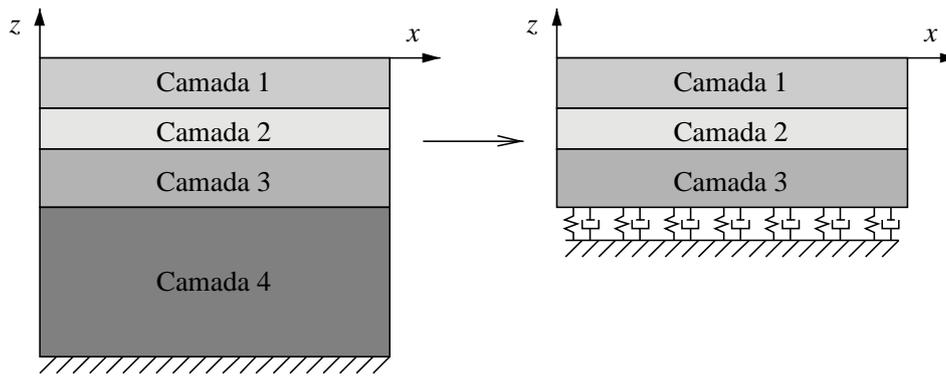


Figura 5.8 – Substituição da camada inferior por um sistema de molas e amortecedores (Varandas; 2013)

Esta abordagem pode não assegurar a total dissipação de energia, porque os amortecedores são regulados para uma dada velocidade de onda e as ondas têm de se propagar na direção perpendicular à respetiva face da fronteira do modelo. Portanto, é necessário construir um modelo de elementos finitos suficientemente grande, onde as condições de fronteira absorventes irão ser colocadas suficientemente longe da região carregada. Contudo, a substituição de uma espessura de solo por uma camada viscoelástica assume uma simplificação: as tensões horizontais dentro da espessura de solo removido e as causadas pelo carregamento dinâmico são desprezadas. Esta simplificação apenas é aplicável se o solo substituído estiver suficientemente distante da região carregada.

As constantes elásticas das molas da substituição de uma espessura de solo inferior, são determinadas por:

$$k_p = \frac{MA}{H} \quad (20)$$

$$k_s = \frac{GA}{H} \quad (21)$$

onde  $k_p$  e  $k_s$  são as constantes elásticas da direção vertical e horizontal das molas, respetivamente,  $M$  é o módulo oedométrico,  $G$  corresponde ao módulo distorcional,  $A$  é a área de influência do nó da malha de elementos finitos e  $H$  é a espessura de solo substituído. A consideração de molas nos nós nas condições de fronteira laterais do modelo também é possível com o *Pegasus* considerando uma formulação análoga.

## 5.5 Leis de comportamento dos materiais da subestrutura

### 5.5.1 Comportamento resiliente de materiais granulares

Na aplicação *Pegasus* existem disponíveis dois modelos constitutivos para representar a natureza resiliente dos materiais granulares que constituem o sistema da subestrutura: (i) o modelo linear elástico de Hooke e (ii) o modelo elástico não linear  $K - \theta$  (Brown; Pell; 1967).

A relação tensão-deformação linear-elástica tridimensional da Lei de Hooke é assim escrita na forma matricial no sistema de coordenadas cartesianas:

$$\sigma = \mathbf{D}\varepsilon \quad (22)$$

onde  $\sigma$  e  $\varepsilon$  são, respetivamente, o vetor das tensões e o tensor das deformações, na forma:

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \end{bmatrix} \quad \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{bmatrix} \quad (23)$$

e  $\mathbf{D}$  é a matriz de rigidez, considerada constante, independentemente das tensões e deformações aplicadas ao material. No caso de meios isotrópicos, a matriz de rigidez é definida por dois parâmetros, que tradicionalmente são o módulo de Young ( $E$ ) e o coeficiente de Poisson ( $\nu$ ), obtendo-se:

$$\mathbf{D} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (24)$$

O modelo  $K - \theta$  é dos mais utilizados para descrever o comportamento resiliente não linear dos materiais granulares não ligados. Este foi desenvolvido para aproximar os resultados de ensaios realizados sob pressão de confinamento constante e expressa a dependência do módulo resiliente em relação à soma das tensões principais, de acordo com:

$$E_r = K_1 \left( \frac{\theta}{\theta_0} \right)^{K_2} \quad (25)$$

onde  $\theta$  (primeiro invariante das tensões) é a soma das tensões principais (considerando o valor positivo para a compressão),  $\theta_0$  é uma tensão de referência, usualmente igual a 100 kPa, e  $K_1$  e  $K_2$  são parâmetros do material. Nesta formulação o coeficiente de Poisson é o terceiro parâmetro do material e é assumido constante.

A matriz de rigidez,  $\mathbf{D}$ , é obtida substituindo o módulo de Young,  $E$ , pelo módulo resiliente  $E_r$ , que depende não linearmente da soma das tensões normais. O modelo  $K - \theta$  é definido apenas sob condições de compressão. No entanto, durante o carregamento dinâmico, e particularmente na superfície da camada de balastro, podem ocorrer tensões de tração, pelo que a relação  $E_r - \theta$  é aqui estendida às situações de tração, admitindo um valor mínimo constante para o módulo resiliente. Este valor mínimo pode ser definido como o mínimo necessário para manter as tensões de tração num valor pequeno aceitável (Allaart; 1992). Na Figura 5.9 apresenta-se a relação  $E_r - \theta$  adotada.

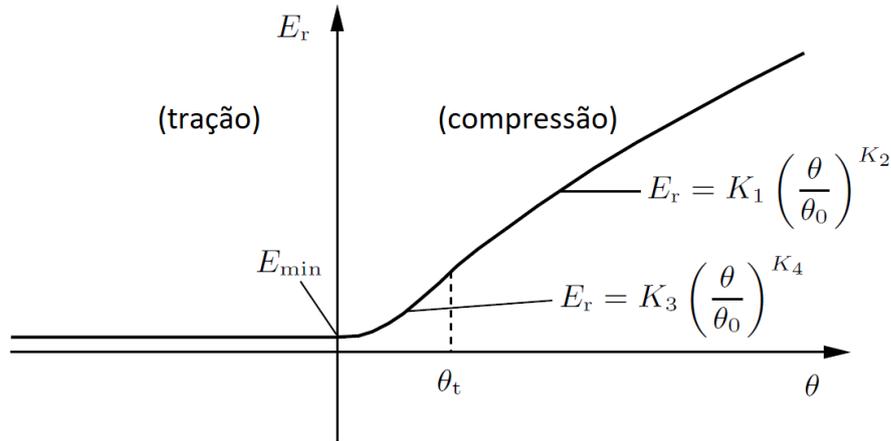


Figura 5.9 – Relação  $E_r - \theta$  (Varandas; 2013)

A correspondente expressão matemática desta relação é:

$$E_r(\theta) = \begin{cases} E_{\min}, & \text{se } \theta < 0 \\ E_{\min} + K_3 \left(\frac{\theta}{\theta_0}\right)^{K_4}, & \text{se } 0 \leq \theta < \theta_t \\ K_1 \left(\frac{\theta}{\theta_0}\right)^{K_2}, & \text{se } \theta \geq \theta_t \end{cases} \quad (26)$$

O ramo de transição entre  $\theta = 0$  e  $\theta = \theta_t$  assegura uma transição suave entre o ramo constante do lado da tração e o modelo  $K - \theta$  assumido para  $\theta \geq \theta_t$ . Este ramo de transição é definido pelos parâmetros  $K_3$  e  $K_4$ . Conhecendo os parâmetros do modelo  $K - \theta$  ( $K_1$  e  $K_2$ ), o valor mínimo do módulo resiliente ( $E_{\min}$ ), e assumindo um valor para  $\theta_t$ , que deve ser razoavelmente pequeno (cerca de 10 kPa), e atendendo a que:

$$K_1 \left(\frac{\theta_t}{\theta_0}\right)^{K_2} > E_{\min} \quad (27)$$

Os parâmetros  $K_3$  e  $K_4$  são determinados para garantir que a curva  $E_r - \theta$  é da classe  $C_1$ :

$$K_3 = \frac{K_1 \left(\frac{\theta_t}{\theta_0}\right)^{K_2} - E_{\min}}{K_1 \left(\frac{\theta_t}{\theta_0}\right)^{K_4}} \quad (28)$$

$$K_4 = \frac{K_1 K_2 \left(\frac{\theta_t}{\theta_0}\right)^{K_2}}{K_1 \left(\frac{\theta_t}{\theta_0}\right)^{K_2} - E_{\min}} \quad (29)$$

## 5.5.2 Deformação permanente de materiais granulares

### 5.5.2.1 Aspectos gerais

Os programas de cálculo que permitem desenvolver modelos numéricos de análise estrutural têm evoluído substancialmente e são cada vez mais difundidos. No entanto, em geral, essas ferramentas

não são desenvolvidas especificamente para análise de vias-férreas, pelo que não permitem estimar adequadamente o comportamento de longo prazo destas estruturas, em particular quando se pretende fazer análises dinâmicas que contemplem a interação veículo-via. Esta limitação deve-se, nomeadamente, à dificuldade de implementar modelos matemáticos compatíveis com tempos de cálculo que não sejam excessivamente longos, representativos da resposta manifestamente não-linear do sistema, não só devido ao comportamento não-linear resultante da interação entre os rodados e os carris e entre as travessas e a camada de balastro, mas também decorrente do comportamento elasto-plástico dos materiais que constituem as camadas de apoio.

Nestas circunstâncias, no âmbito deste projeto implementou-se no *Pegasus* um modelo de deformação permanente de materiais granulares, com vista a representar adequadamente, entre outros, os materiais de balastro e de sub-balastro, quando sujeitos a cargas quasi-estáticas e dinâmicas dos veículos ferroviários (Varandas; *et al.*; 2020). De facto, o contributo destas camadas, em particular do balastro, para a deformação permanente da via pode ser muito significativo (Selig; Waters; 1994). Este aspeto é particularmente relevante na análise de situações onde ocorrem amplificações da resposta dinâmica do sistema veículo-via, nomeadamente em trechos de via com defeitos de geometria de via e irregularidades no carril. Exemplo disso são, por exemplo, as zonas em que ocorre transição do apoio da superestrutura, zonas com defeitos de carril, aparelhos de mudança de via e juntas de carril com defeito.

A equipa do projeto selecionou o modelo desenvolvido por Suiker e Borst (2003), o qual permite calcular a envolvente das máximas deformações plásticas geradas durante o processo de carga cíclica. A acumulação de deformações é dividida em dois mecanismos distintos, a componente de corte e a componente volumétrica, que são tratadas separadamente. Este modelo foi parametrizado e calibrado por Suiker (2002), com base em resultados de ensaios triaxiais realizados sobre materiais granulares de balastro e sub-balastro e foi posteriormente implementado num modelo numérico estático 2D (Suiker; Borst; 2003).

### 5.5.2.2 Descrição do modelo

O modelo constitutivo é descrito na convenção de tensões utilizadas na mecânica (compressão é negativa), embora o invariante da tensão normal média ( $p$ ) siga a definição geotécnica clássica, sendo positiva na compressão. Isso faz com que ambos os invariantes  $p$  e a tensão deviatórica  $q$  sejam positivos:

$$p = \frac{1}{3}(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) \quad (30)$$

$$q = \sqrt{\frac{1}{2}((\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2) + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)} \quad (31)$$

A tensão devida apenas à carga geostática é identificada pelo subscrito "geo", e a tensão devida apenas ao carregamento do comboio, excluindo, portanto, a componente geostática, é identificada pelo subscrito "cyc":  $\sigma_{cyc}(t) = \sigma(t) - \sigma_{geo}$ . Nas equações apresentadas, as letras em negrito são utilizadas para tensores/vetores.

As deformações volumétricas e deviatóricas, que serão abordadas de seguida, são definidas respetivamente a partir de:

$$\epsilon_v = \epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z \quad (32)$$

$$\epsilon_q = \sqrt{\frac{2}{9}(\epsilon_x - \epsilon_y)^2(\epsilon_y - \epsilon_z)^2(\epsilon_x - \epsilon_z)^2 + \frac{4}{3}(\epsilon_{xy}^2 + \epsilon_{yz}^2 + \epsilon_{xz}^2)} \quad (33)$$

O modelo de deformação selecionado estima a deformação permanente tridimensional  $\epsilon^p$  causada por cada ciclo de carregamento, não fornecendo informações sobre o desenvolvimento da deformação permanente dentro de cada processo de carregamento cíclico. O desenvolvimento do modelo é baseado na teoria clássica da plasticidade (superfícies de cedência, lei de fluxo, endurecimento, plasticidade associada), onde a superfície de cedência, ou *shakedown*, corresponde ao cone de Drucker-Prager, com superfície de compressão.

O modelo parte do princípio de que a densificação causada pelo carregamento cíclico se deve a dois mecanismos: (i) de compactação volumétrica do material e (ii) de deslizamento por atrito das partículas. Esses dois mecanismos podem-se desenvolver simultaneamente.

O incremento de deformação permanente,  $\Delta\epsilon^p$ , gerado num determinado processo de carregamento cíclico é, portanto, obtido por:

$$\Delta\epsilon^p = \Delta\epsilon_q^p m_f + \Delta\epsilon_v^p m_c \quad (34)$$

onde  $\Delta\epsilon_q^p$  é a amplitude do incremento na deformação permanente deviatórica,  $\Delta\epsilon_v^p$  é a amplitude do incremento na deformação volumétrica permanente,  $m_f$  é o tensor que define a direção do fluxo plástico deviatórico e  $m_c$  é o tensor corresponde ao fluxo plástico volumétrico.

O sobrescrito *p* nas equações anteriores refere-se a permanente. Atendendo a que todas as deformações neste modelo de acumulação são permanentes, por simplificação esta referência será de seguida omitida. A amplitude incremental da deformação deviatórica é obtida por:

$$\Delta\epsilon_q = \alpha_f \left\langle \left( \frac{q}{p} \right)_{cyc} - h_f(\epsilon_q) \right\rangle^{\gamma_f} \quad (35)$$

sendo  $\alpha_f$  e  $\gamma_f$  parâmetros do modelo,  $\left( \frac{q}{p} \right)_{cyc}$  é o valor de pico de  $q/p$ , devido apenas à carga do comboio, e  $h_f(\epsilon_q)$  é a função de evolução do *shakedown* do mecanismo de fricção, sendo  $\epsilon_q$  a deformação deviatórica total acumulada (o parâmetro de histórico do mecanismo friccional). A amplitude incremental da deformação volumétrica é calculada por:

$$\Delta\epsilon_v = \Delta\epsilon_{v,c} + d_f(\epsilon_q)\Delta\epsilon_q \quad (36)$$

onde:

$$\Delta\epsilon_{v,c} = -\alpha_c \left\langle \left( \frac{p}{p_0} \right)_{cyc} - h_c(\epsilon_{v,c}) \right\rangle^{\gamma_c} \quad (37)$$

sendo,  $\Delta\epsilon_{v,c}$  a amplitude da deformação volumétrica devido apenas ao mecanismo de compactação,  $\left(\frac{p}{p_0}\right)_{cyc}$  o valor de pico de  $p/p_0$  novamente apenas considerando o carregamento do comboio, e  $d_f(\epsilon_q)$  uma função que define a quantidade de dilatação/contração mobilizada durante a deformação por deslizamento friccional de partículas ( $\Delta\epsilon_q$ ).  $\alpha_c$  e  $\gamma_c$  são parâmetros do modelo. A pressão  $p_0$  é um parâmetro do modelo que define a consolidação inicial do material granular, e  $h_c(\epsilon_{v,c})$  é a função de evolução do *shakedown* do mecanismo de compactação, sendo  $\epsilon_{v,c}$  a deformação volumétrica total acumulada causada pela compactação volumétrica (o parâmetro de histórico do mecanismo de compactação). O símbolo  $\langle \rangle$  representa os parênteses angulares de Macaulay, definido por  $\langle x \rangle = x$  se  $x > 0$  e, caso contrário,  $\langle x \rangle = 0$ .

As funções de evolução de *shakedown* e a função  $d_f$  são determinadas por:

$$h_f(\epsilon_q) = h_0 + (h_m - h_0) \left( 1 - \exp \left( -\eta_f (\epsilon_q - \epsilon_{q,0}) \right) \right) \quad (38)$$

$$h_c(\epsilon_{v,c}) = 1 + \eta_c (\epsilon_{v,c} - \epsilon_{v,c,0}) \quad (39)$$

$$d_f(\epsilon_q) = d_0 + (d_m - d_0) \left( 1 - \exp \left( -\zeta_f (\epsilon_q - \epsilon_{q,0}) \right) \right) \quad (40)$$

sendo,  $h_0$ ,  $h_m$ ,  $\eta_f$ ,  $\eta_c$ ,  $d_0$ ,  $d_m$  e  $\zeta_f$  parâmetros do modelo, e  $\epsilon_{q,0}$ ,  $\epsilon_{v,c,0}$ , deformações permanentes que ocorrem antes de se iniciar o processo de carregamento cíclico, por exemplo devido a consolidação.

As direções da acumulação estão definidas no modelo de acordo com:

$$m_f = \frac{3s_{cyc}}{2q_{cyc}} \quad (41)$$

$$m_c = \frac{\delta}{3} \quad (42)$$

onde  $s_{cyc}$  é o tensor das tensões deviatóricas cíclicas ( $s = \sigma - (-p)\delta$ ), e  $\delta$  é o delta de Kronecker. Neste modelo, as deformações deviatóricas permanentes desenvolvem-se, portanto, de acordo com a teoria do *shakedown*, com três possíveis estágios de comportamento: elástico puro (sem deformações permanentes), se  $\left(\frac{q}{p}\right)_{cyc} \leq h_0$ ; com uma acumulação gradual de deformação permanente que tende para um valor limite/estável (*shakedown*), se  $h_0 \leq \left(\frac{q}{p}\right)_{cyc} \leq h_m$ ; ou com um acumular contínuo/constante da deformação permanente com o número de ciclos de carga, correspondendo à situação habitualmente designada por *ratcheting*, se  $\left(\frac{q}{p}\right)_{cyc} \geq h_m$ .

As deformações volumétricas permanentes devido ao mecanismo de compactação podem ser nulas ou tender para um valor limite (*shakedown*), dependendo se  $\hat{p}_{cyc}$  for menor ou maior que  $p_0$ , respectivamente. Supõe-se que o imbricamento das partículas impede o desenvolvimento de *ratcheting* no mecanismo de compactação.

Após uma análise dos procedimentos adotados por Suiker (2002) na calibração do modelo, foi decidido proceder à recalibração do mesmo, atendendo a diversas razões concetuais e práticas (Varandas; et al.; 2020). Na Figura 5.10 e na Figura 5.11 apresenta-se os resultados da referida recalibração.

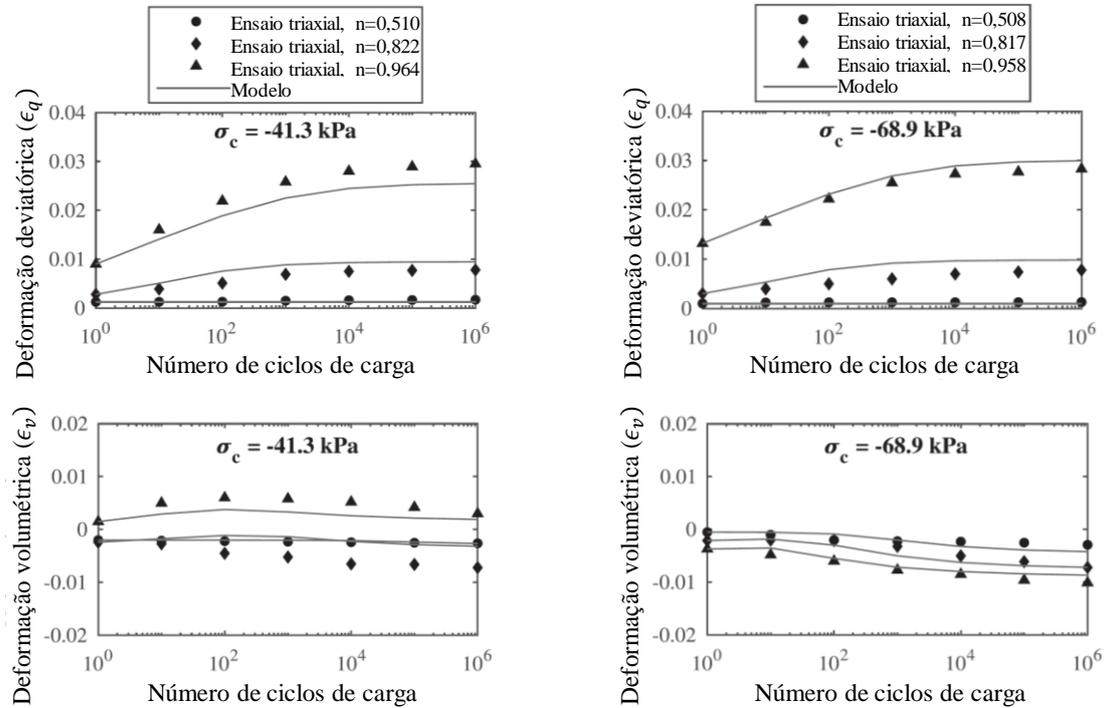


Figura 5.10 – Deformações permanentes do balastro (componentes deviatóricas e volumétricas) para duas pressões de confinamento consideradas,  $\sigma_c$ . Comparação entre os resultados dos ensaios triaxiais (Suiker; 2002) e a resposta do modelo recalibrado (Varandas; et al.; 2020)

Da análise das figuras, conclui-se que existe uma concordância geral entre as estimativas numéricas e a resposta medida nos ensaios. A maior imprecisão ocorre na deformação volumétrica calculada para o material de balastro, principalmente no caso em que  $\sigma_c = -41,3$  kPa, como aliás acontecia na calibração original, nomeadamente porque, para elevados níveis de tensão, este material revelou uma tendência dilatante, em particular para a referida tensão de confinamento e  $n = 0,964$ , e esse comportamento não foi considerado no modelo de densificação cíclica (Suiker; Borst; 2003). Após esta recalibração, foi possível, nomeadamente, obter a aproximação do modelo a partir do primeiro ciclo de carga e uma melhor estimativa da deformação permanente a longo prazo, quando comparada com os resultados que consideravam a calibração original.

Na Figura 5.12 apresenta-se a deformação vertical para o balastro, definida como positiva na compressão ( $\epsilon_1 = -\epsilon_v/3 + \epsilon_q$ ). Pode-se observar que, apesar das imprecisões acima referidas em termos de deformação volumétrica estimada para o balastro, a resposta estimada em termos de deformação vertical total está em boa concordância com a medida. Conclui-se que a deformação plástica do balastro é dominada pelo mecanismo de fricção, sendo que o mecanismo de compactação hidrostática desempenha um papel menor neste caso.

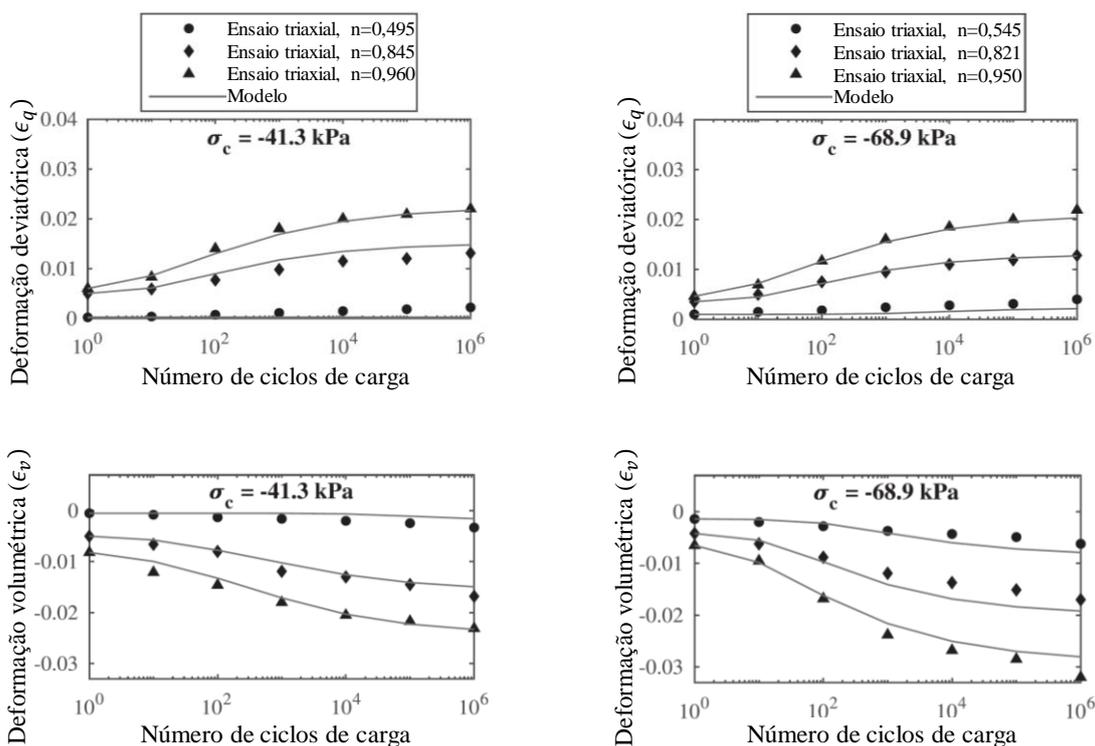


Figura 5.11 – Deformações permanentes deviatórias e volumétricas do sub-balastro para duas pressões de confinamento consideradas,  $\sigma_c$ . Comparação entre os resultados dos ensaios triaxiais (Suiker; 2002) e a resposta do modelo recalibrado (Varandas; *et al.*; 2020)

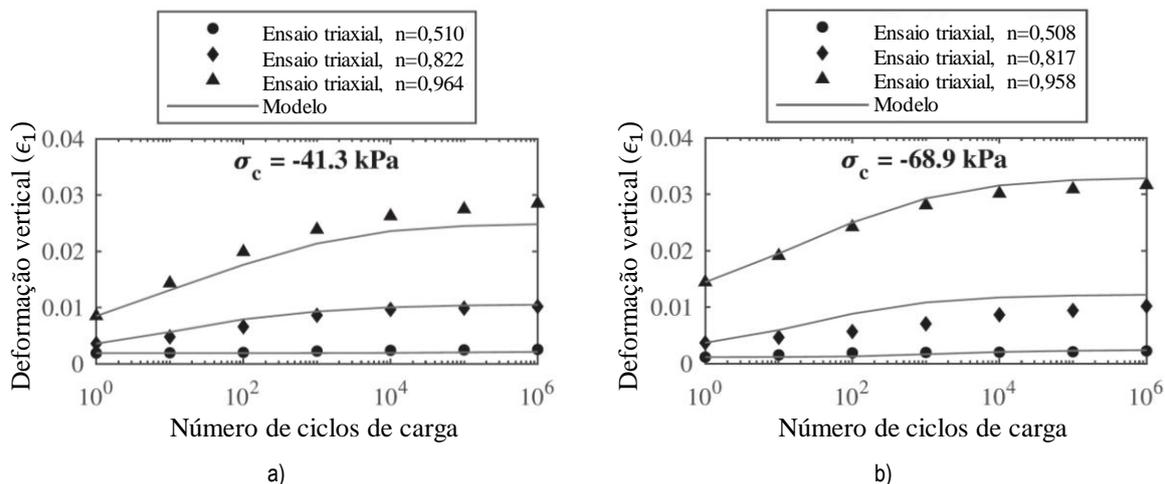


Figura 5.12 – Deformações vertical permanentes do balastro para  $\sigma_c = -41,3$  kPa (a) e  $\sigma_c = -68,9$  kPa (b) (Varandas; *et al.*; 2020)

No Quadro 5.1 apresentam-se os valores dos parâmetros para o balastro e para o sub-balastro após a recalibração, considerando  $p_{num} = -2,5$  kPa.

Quadro 5.1 – Parâmetros os materiais após a recalibração (Varandas; *et al.*; 2020)

Parâmetro	Balastro	Sub-balastro
$\alpha_f$	$2,14 \times 10^{-3}$	$1,28 \times 10^{-3}$
$\gamma_f$	2,34	3,84
$\eta_f$	150	68
$h_0$	1,00	0,80
$h_m$	1,95	1,95
$p_0$ (kPa)	49	41
$\alpha_c$	$1,5 \times 10^{-6}$	$2,0 \times 10^{-6}$
$\gamma_c$	4,40	5,26
$\eta_c$	312	195
$d_0 (= d_m)$	0,20	-0,59
$p_{num}$ (kPa)	-2,5	-2,5

Na implementação numérica do modelo constitutivo na aplicação *Pegasus*, para calcular as deformações permanentes em 3D das camadas de apoio da via (balastro e sub-balastro), decorrentes da passagem do tráfego, e para simular o efeito de compactação dessas camadas, recorreu-se a uma metodologia eficiente em termos de tempo de cálculo, a qual está descrita em pormenor em (Varandas; *et al.*; 2020).

## 5.6 Validação da resposta resiliente no modelo numérico através da monitorização do comportamento dinâmico da via-férrea

### 5.6.1 Descrição do caso de estudo e do respetivo modelo numérico

O caso de estudo adotado na validação do modelo foi um trecho de via-férrea construído sobre um aterro de 4,5 m de altura, incluído numa via-férrea na Linha do Sul, em Portugal, – designada por Variante de Alcácer (Paixão; *et al.*; 2016b). A via, aberta ao tráfego no final de 2010, permite tráfego misto, com carga máxima por eixo de 25 t e velocidade máxima de circulação de 220 km/h para comboios de passageiros. Trata-se de uma via única balastrada (Figura 5.13a), de Bitola Ibérica

(1668 mm), com carris do tipo barra longa soldada UIC60, apoiados em travessas monobloco de betão, espaçadas de 0,6 m, com sistemas de fixação Vossloh W14 e com palmilhas de carril do tipo Zw700/148/165, com rigidez estática secante de 50 a 70 kN/mm, medida entre 18 e 68 kN, de acordo com a informação do fabricante. As camadas de balastro e de sub-balastro foram construídas com agregado granítico britado. A camada de leito foi construída com agregado britado de granulometria extensa (ABGE) de origem calcária (Fortunato; Paixão; Fontul; 2012). O terreno natural, classificado como QS2 de acordo com a especificação 719R da UIC (2008), sobre o qual foram construídos os aterros é, essencialmente, uma areia fina monogranular que proporciona boas condições de fundação.

O modelo numérico desenvolvido consiste numa malha de 1074 elementos de viga e 1031 nós para modelar a superestrutura da via, e 32 032 elementos sólidos com 39 486 nós para representar a subestrutura (Figura 5.13b). Os carris foram modelados com uma rigidez de flexão vertical de 6380 kNm<sup>2</sup>, rigidez de flexão transversal de 1076 kNm<sup>2</sup> e massa de 60,3 kg/m. As 45 travessas, modeladas com módulo de Young de 30 GPa e densidade de 1950 kg/m<sup>3</sup> (massa total de 322 kg), foram consideradas como prismas retangulares de 2,6 m por 0,30 m, com altura equivalente de 0,212 m. A rigidez e o amortecimento das palmilhas de carril foram estimados através de resultados de ensaios de recetância realizados na via, que conduziram a valores de 160 kN/mm e 17 kNs/m, respetivamente (Paixão; Fortunato; Calçada; 2014). As propriedades dos geomateriais da subestrutura estão apresentadas no Quadro 5.2. Inicialmente, todos os materiais foram considerados com comportamento elástico linear.

Quadro 5.2 – Propriedades dos geomateriais (Paixão; *et al.*; 2014)

	Módulo de Young	Coefficiente de Poisson	Amortecimento*	Densidade	Espessura
Geomateriais	$E$ (MPa)	$\nu$ (-)	$\xi$ (%)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$H$ (m)
Balastro	130	0,20	3	1530	0,3
Sub-balastro	200	0,30	3	1935	0,3
Leito de via	1000	0,30	3	1935	0,2
Solo de aterro	100	0,30	3	2040	4,5

\*Coeficientes de amortecimento para frequências de 2 Hz e 100 Hz, de acordo com o conceito de amortecimento de Rayleigh.

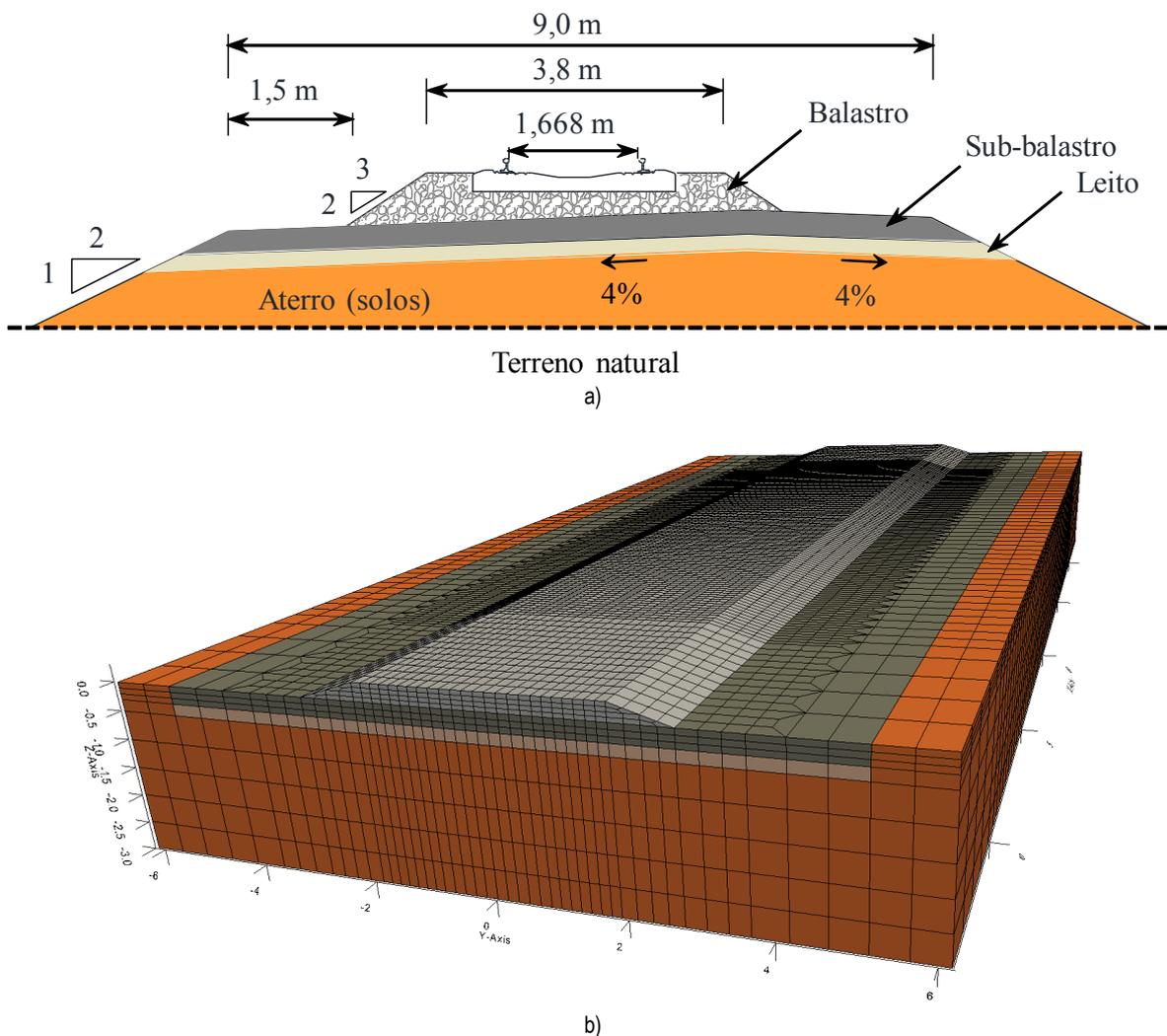


Figura 5.13 – Características do modelo: a) esquema da secção transversal; b) representação tridimensional e respetiva malha de elementos finitos (Paixão; 2014; Paixão; *et al.*; 2016b)

## 5.6.2 Solicitações associadas ao tráfego ferroviário

Com o objetivo de avaliar a influência de distintas condições de carga na resposta estrutural da via, foram considerados na análise dois tipos de comboios de passageiros (Figura 5.14): a) um veículo de passageiros basculante com tração integrada, o Alfa Pendular, com velocidade de circulação de 220 km/h e com carga média por eixo de 133 kN; b) uma locomotiva que reboca o serviço interurbano, a locomotiva da classe 5600 da Siemens, circulando a 200 km/h, com carga por eixo de 213,4 kN. Foram modelados apenas os bogies dianteiros, recorrendo a parâmetros apresentados em (Calçada; 1995; Ribeiro; Calçada; Delgado; *et al.*; 2013).

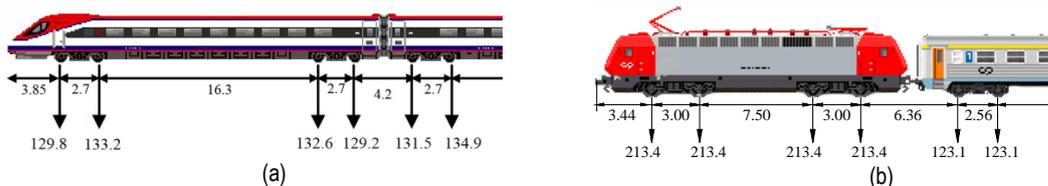


Figura 5.14 – Representação esquemática da distribuição de eixos (em m) e respetiva carga (em kN) dos comboios de passageiros considerados no estudo: a) Alfa Pendular; b) Intercidades

Na Figura 5.15 apresentam-se os resultados experimentais e os numéricos relativos aos deslocamentos verticais do carril (a e b) e às acelerações verticais das travessas (c e d) à passagem do Alfa Pendular (AP) e do Intercidades (IC) na secção em estudo. Os deslocamentos do carril e as acelerações das travessas foram medidas utilizando transdutores de deslocamentos do tipo PSD (*Position Sensitive Device*) com *laser* e com acelerómetros do tipo piezoelétrico, respetivamente, descritos em (Paixão; *et al.*; 2014). Os sinais da aceleração (numéricos e experimentais) foram filtrados por um filtro passa-baixo Chebyshev do tipo II com frequência de corte de 80 Hz. A comparação dos resultados sugere que o modelo é adequado para simular o comportamento da via, em particular no que se refere às acelerações medidas nas travessas.

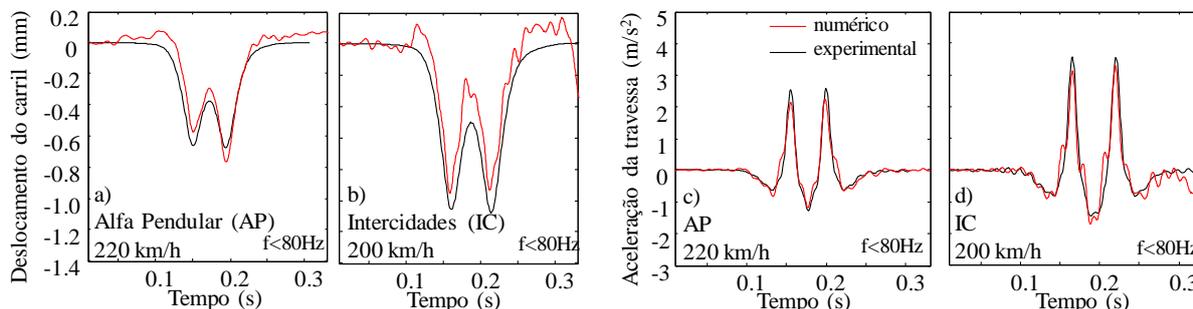


Figura 5.15 – Deslocamentos verticais do carril (a e b) e acelerações verticais das travessas (c e d) devido à passagem dos bogies dianteiros do Alfa Pendular (AP) e Intercidades (IC) (Paixão; *et al.*; 2016b)

As maiores diferenças nos deslocamentos são, provavelmente, devidas à grande variabilidade que normalmente se obtém na medição deste tipo de grandeza, mesmo para condições de carga semelhantes, como ficou evidenciado em estudos anteriores (Paixão; *et al.*; 2014).

Simulações realizadas pelos autores em estudos anteriores, assumindo distintos valores para o módulo de deformabilidade do balastro, nomeadamente 100 MPa e 160 MPa, conduziram a valores de deslocamentos e acelerações similares. Em particular, a redução para 100 MPa resultou num aumento de 4% no deslocamento do carril e o valor de 160 MPa conduziu a reduções de 2% e 3% no caso do Alfa Pendular e do Intercidades, respetivamente.

## 5.7 Validação da deformação permanente no modelo numérico através da monitorização de um modelo físico da via-férrea

### 5.7.1 Descrição do modelo físico e respetivos resultados de ensaio

Para validar o modelo numérico relativamente à avaliação da deformação permanente da via-férrea sob carregamento cíclico recorreu-se aos resultados de um ensaio realizado num modelo físico construído no LNEC, com apoio da empresa Mota-Engil, apresentado em (Fortunato; Paixão; 2016).

Os ensaios compreenderam o carregamento cíclico de uma travessa monobloco de betão, com bitola ibérica, colocada numa camada de balastro, com fundação construída de acordo com os atuais requisitos de subestruturas de via-férrea convencional. Na Figura 5.16 apresenta-se esquemas do modelo e aspetos do ensaio. As paredes metálicas confinantes dos geomateriais foram concebidas para minimizar o atrito entre os solos/agregados e as paredes. As camadas de leito e de sub-balastro foram adequadamente compactadas durante a fase de construção com um compactador vibratório. O sub-balastro foi compactado em subcamadas de 0,05 m. A camada de balastro foi compactada com um compactador vibratório e com o martelo vibrador *Cobra TTe* (Simões; 2015).

O carregamento produzido por um atuador hidráulico foi transmitido à travessa por uma viga de aço. Os deslocamentos foram medidos com vários LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*) posicionados nas posições 1 a 9, conforme apresentado na Figura 5.16: posições 1 a 4 nos carris; posições 5 a 8 na travessa e posição 9 na base do atuador.

A solitação, que simulava a carga de um eixo ferroviário, foi aplicada  $5,5 \times 10^5$  vezes, com uma frequência de 1 Hz. A carga máxima aplicada pelo atuador foi de 100 kN e a carga mínima foi de 4 kN, para evitar impactos na travessa. Assumindo uma transmissão máxima típica do eixo para a travessa carregada de 50%, a carga de 100 kN correspondeu a uma carga por eixo de aproximadamente 190 kN. Após uma fase inicial de assentamento rápido medido na travessa (média das quatro posições medidas), a taxa de deformação permanente diminuiu para próximo de zero, correspondendo a *shakedown* (Figura 5.17a).

A representação em escala logarítmica, na (Figura 5.17b), mostra, entretanto, que para  $N > 10^5$  os assentamentos continuam progredindo a uma taxa aproximadamente log-linear. Uma interrupção do ensaio para substituição do atuador, devido a avaria, provocou um pequeno “salto” na curva de assentamentos antes do ciclo  $1 \times 10^5$ .

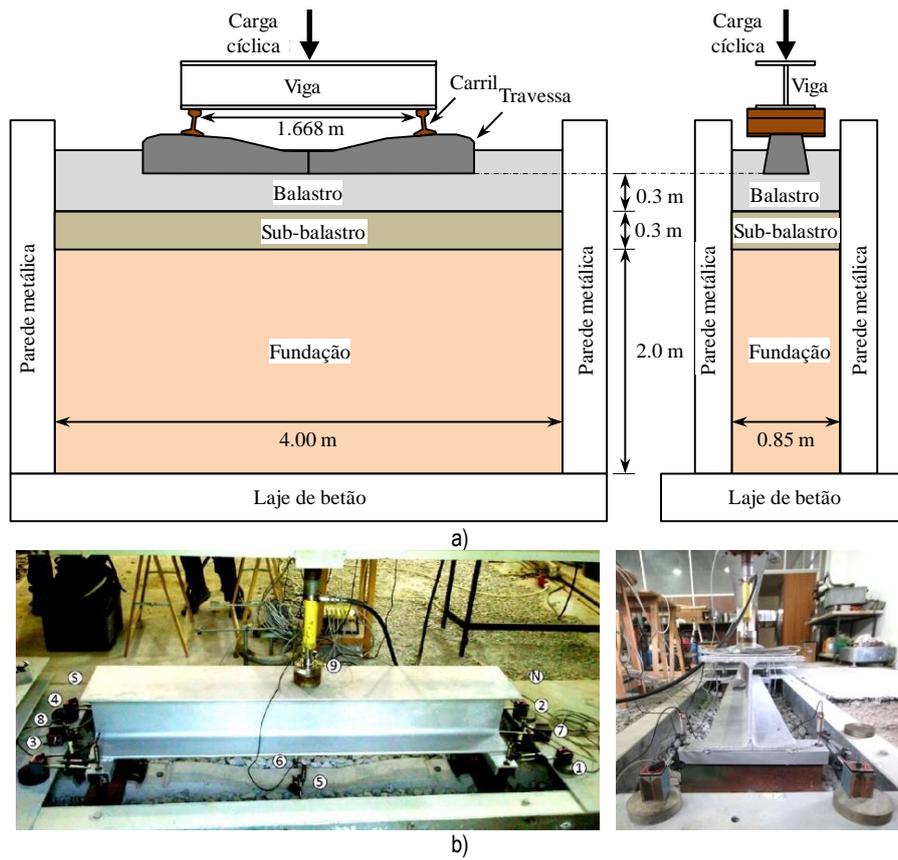


Figura 5.16 – Modelo físico construído no LNEC: a) Esquema (vista frontal e lateral); b) (vista frontal e lateral)(Simões; 2015; Varandas; et al.; 2020)

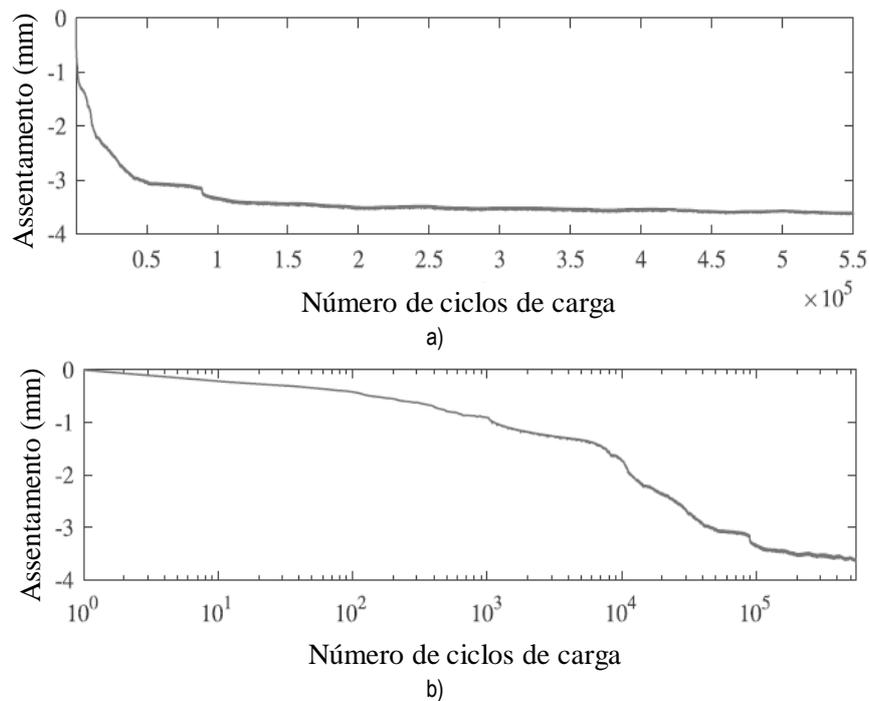


Figura 5.17 – Assentamentos medidos na travessa durante o ensaio de carregamento cíclico: a) escala linear; escala logarítmica (Varandas; et al.; 2020)

## 5.7.2 Descrição do modelo numérico e respetivos resultados

Para tentar reproduzir os resultados do ensaio referido anteriormente, construiu-se um modelo numérico reproduzindo as dimensões apresentadas na Figura 5.16:  $4,00 \times 0,85 \times 2,60 \text{ m}^3$ . Os nós das fronteiras laterais são impedidos de se moverem na direção normal em relação ao plano da parede e os nós do fundo são fixos. As propriedades adotadas para os geomateriais das camadas da via são apresentadas no Quadro 5.3. Os materiais de balastro e de sub-balastro são representados alternativamente por um modelo constitutivo linear e um não linear. A superestrutura da via é composta por carril UIC60E1, travessa monobloco de betão (assumida como prisma retangulares com 2,6 m de comprimento, 0,30 m de largura, 0,19 m de altura e 322 kg) e sistema de fixação Vossloh W14 com palmilhas Zw700/148/165 com valor de rigidez vertical de 160 kN/mm e amortecimento constante de 9,6 kNs/m.

Quadro 5.3 – Propriedades dos geomateriais do modelo

Camada	H (m)	$\rho$ (t/m <sup>3</sup> )	$\nu$ (-)	E (MPa)	$K_1$ (MPa)	$K_2$ (-)	$E_{min}$ (MPa)
Balastro (linear)	0,3	1,73	0,20	130			
Balastro (não linear)	0,3	1,73	0,20	-	110	0,6	16
Sub-balastro (linear)	0,3	2,20	0,25	200			
Sub-balastro (não linear)	0,3	2,20	0,25	-	155	0,5	30
Leito	0,2	2,20	0,25	350			
Fundação	4,0	2,04	0,25	250			

Os parâmetros do modelo de deformação permanente adotados são os que foram apresentados no Quadro 5.1.

Na Figura 5.18 são apresentados os assentamentos médios da travessa obtidos no ensaio do modelo físico e os obtidos pelo modelo numérico, considerando quer o modelo constitutivo não linear (Figura 5.18a) quer o modelo constitutivo linear (Figura 5.18b), para o balastro e para o sub-balastro. Da análise das figuras pode concluir-se que, apesar de existirem algumas diferenças entre os resultados medidos e os calculados, em particular no início do ensaio, os valores obtidos pelo modelo numérico que considera o comportamento não-linear dos materiais, constituem uma boa aproximação aos resultados experimentais, justificando assim a necessidade de considerar essa não linearidade na análise estrutural da via.

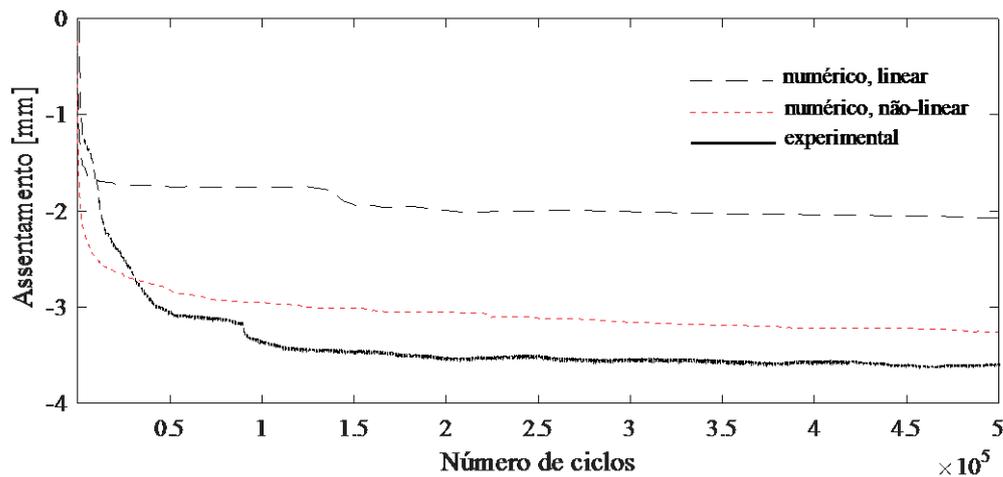


Figura 5.18 – Comparação entre o assentamento médio da travessa medido experimentalmente e o estimado com o *Pegasus*, considerando o comportamento linear e não linear (Varandas; *et al.*; 2020)

A diferença em termos de taxa de assentamento inicial pode ter sido causada por imprecisões de carregamento que ocorreram no estágio inicial do ensaio experimental. Além disso, estudos anteriores relataram alguma imprevisibilidade nas taxas de deformação de agregados não ligados durante os primeiros ciclos de carregamento, o que pode ser causado por diferentes condições iniciais das camadas de agregados (por exemplo em termos de densidade) e pela variabilidade intrínseca no arranjo de partículas e aleatoriedade dos pontos de contacto estabelecidos entre as partículas de balastro e a parte inferior da travessa. Por esse motivo, outros autores calibraram modelos de deformação plástica de agregados não ligados, separando a influência dos primeiros ciclos de carregamento (Lekarp; Dawson; 1998; Ba; Tinjum; Fall; 2015). Acresce que, no que se refere à gestão de ativos no âmbito da via-férrea, é mais importante poder prever adequadamente o comportamento a longo prazo, do que a deformação associada aos primeiros ciclos de carga, que muitas vezes resultam da circulação de equipamentos de construção e de estabilização da via, e que podem ser facilmente corrigidas, ainda no âmbito dos contratos de construção ou manutenção, antes mesmo da abertura da linha ao tráfego.

Na Figura 5.19 apresentam-se níveis de tensão vertical na malha de elementos finitos deformada em 3D (deslocamentos ampliados 15 vezes) numa secção ao longo da direção longitudinal da travessa, após 500 mil ciclos de carga, para a situação de carregamento mínimo, de 4 kN (Figura 5.19a), e de carregamento máximo, de 98 kN (Figura 5.19b). É notória a concentração de tensões sob a travessa, na zona central, atingindo cerca de 83 kPa durante a fase de carga mínima e cerca de 182 kPa durante a fase de carga máxima. A forma da deformada evidencia que a deformação gradual e permanente das camadas de balastro e de sub-balastro causa um apoio desigual da travessa ao longo do seu comprimento. Assim, uma parte significativa da carga foi, neste ensaio laboratorial, suportada pelo balastro existente sob a zona central da travessa. Este fenómeno tem vindo a ser reportado por outros investigadores em estudos experimentais (Abadi; Pen; Zervos; *et al.*; 2019) e numéricos (Tutumluer; Feng; Hou; *et al.*; 2019). Como se comentará em 7.2, este efeito tem consequências importantes, não

apenas em termos de distribuição de tensões, mas também em termos de rigidez geral do sistema. Nesta situação, há um vazio entre a base das extremidades da travessa e o balastro subjacente, que só é, eventualmente, fechado durante a passagem dos eixos mais pesados.

Os resultados obtidos constituem um bom contributo para a validação do modelo numérico, nomeadamente no que se refere às leis de comportamento resiliente e de deformação permanente dos geomateriais que constituem as camadas de apoio da via-férrea.

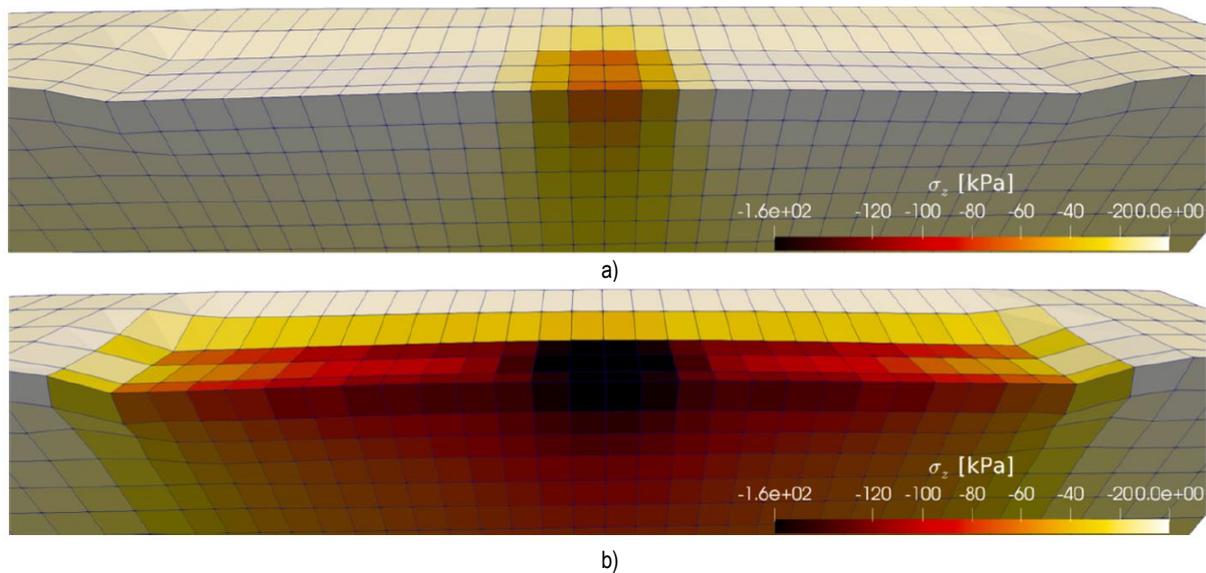


Figura 5.19 – Níveis de tensão vertical na malha deformada em 3D (deslocamentos ampliados 15 vezes) numa secção ao longo da direção longitudinal da travessa, após 500 000 ciclos de carga, para a fase de carregamento mínimo (4 kN) (a) e carregamento máximo (98 kN) (b) (Varandas; *et al.*; 2020)

## 6 | Estudos para o desenvolvimento de modelos numéricos discretos para análise do comportamento estrutural da camada de balastro

Em paralelo com os estudos referidos nas secções anteriores, desenvolveram-se estudos para tentar modelar numericamente, recorrendo ao método dos elementos discretos (DEM), o comportamento mecânico da camada de balastro, como meio granular, quando solicitado por ações exteriores. Parte desta tarefa foi comum a um outro projeto de investigação, designado GroutRail – Reabilitação de Plataformas Ferroviárias com Tratamento de Solos, que recentemente foi concluído no LNEC (Fortunato; Paixão; Francisco; *et al.*; 2020).

Ao contrário da modelação numérica por elementos contínuos, o DEM permite representar de uma forma mais adequada o meio particulado da camada de balastro. Concretamente, permite avaliar em detalhe: i) o arranjo e interação entre partículas deste material; ii) o contacto e a distribuição de forças entre as travessas e as partículas de balastro; iii) a interação dos equipamentos de manutenção da via-férrea com esta camada.

No entanto, a aplicação do DEM ao estudo da camada de balastro é bastante exigente em termos computacionais devido ao elevado número de partículas e ao nível da complexidade da sua geometria que normalmente é necessário modelar para representar um pequeno trecho de via-férrea. No âmbito deste projeto estava previsto a utilização de um *software* comercial para desenvolver estudos de modelação do comportamento da camada de balastro, quando inserida como elemento da via-férrea. No entanto, não estiveram disponíveis recursos para proceder à aquisição de uma licença desse *software*, pelo que, em alternativa, considerou-se que poderia ser adequado utilizar o *software* YADE (Šmilauer *et al.*; 2015), que é um programa de utilização livre, que também utiliza o DEM. Para tal, houve necessidade de utilização de linguagem de programação *Python* e de ambientação ao programa YADE para desenvolver os códigos de modelação numérica recorrendo a elementos discretos. A título de exemplo, apresenta-se na Figura 6.1 um modelo simples inicialmente desenvolvido com o programa YADE.

Os estudos realizados permitiram calibrar os modelos que foram desenvolvidos com o objetivo de representar o comportamento da camada de balastro ferroviário. Na Figura 6.2 apresenta-se, a título de exemplo, os resultados dos cálculos que permitiram calibrar os parâmetros do material da camada de balastro, tendo por base a informação disponível na bibliografia da especialidade relativa a ensaios específicos de caracterização e parametrização de material de balastro, nomeadamente ensaios de carga triaxial (Kumara; 2013).

Posteriormente, procedeu-se à calibração de um modelo por camadas, nomeadamente simulando um ensaio de carga com placa realizado segundo a norma NF P94-117-1 (AFNOR; 2000). Na Figura 6.3 apresenta-se um aspeto do modelo e do respetivo resultado da modelação.

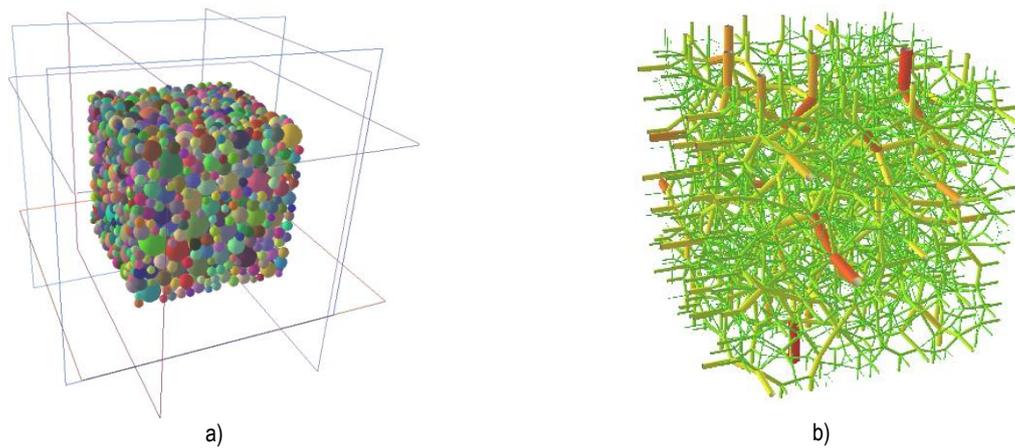


Figura 6.1 – Exemplo de testes de modelação por DEM: a) partículas de balastro sob carregamento; b) rede de forças de contacto estabelecida entre partículas no interior de uma porção de balastro (Fortunato; *et al.*; 2020)

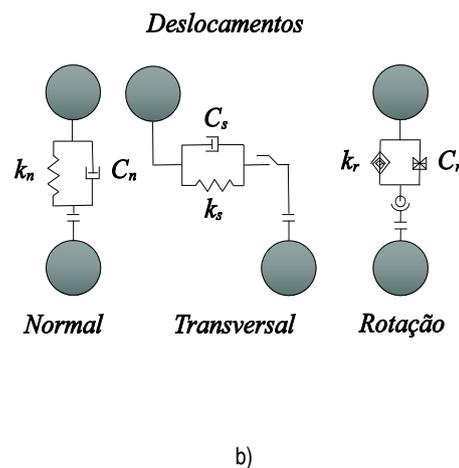
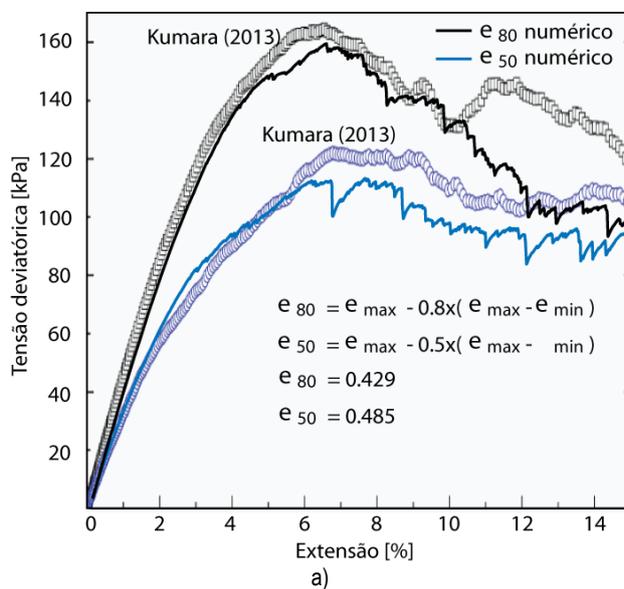


Figura 6.2 – Exemplo de resultados de cálculos efetuados para calibração das propriedades do balastro nos modelos DEM: a) modelação de um ensaio triaxial; b) modelos de contactos entre partículas (Fortunato; *et al.*; 2020)

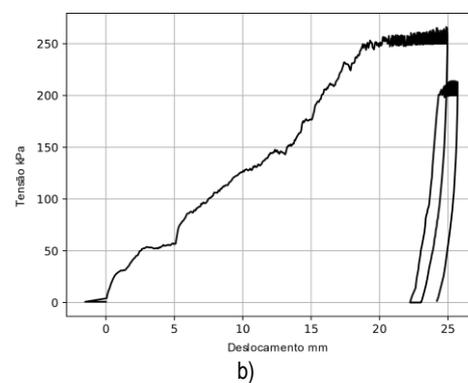
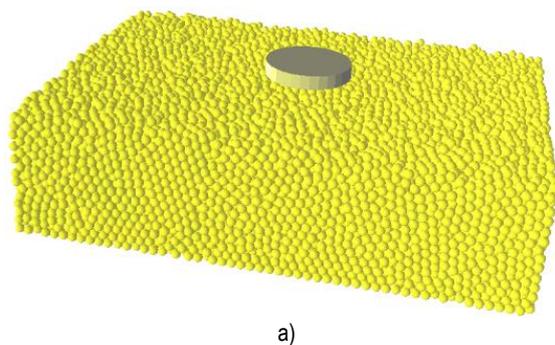


Figura 6.3 – Modelação de um ensaio de carga com placa: a) aspeto do modelo; b) resultado da modelação (Fortunato; *et al.*; 2020)

Na sequência dos estudos modelou-se, primeiro, uma travessa sobre balastro Figura 6.4 e depois um pequeno trecho de via-férrea, considerando a fundação, a camada de balastro e quatro travessas, de acordo com o apresentado na Figura 6.5. É de salientar que com os meios de hardware atualmente disponíveis no DT/NIT, este modelo, relativamente simples, solicitado por uma carga estática, demorou cerca de uma semana de cálculo.

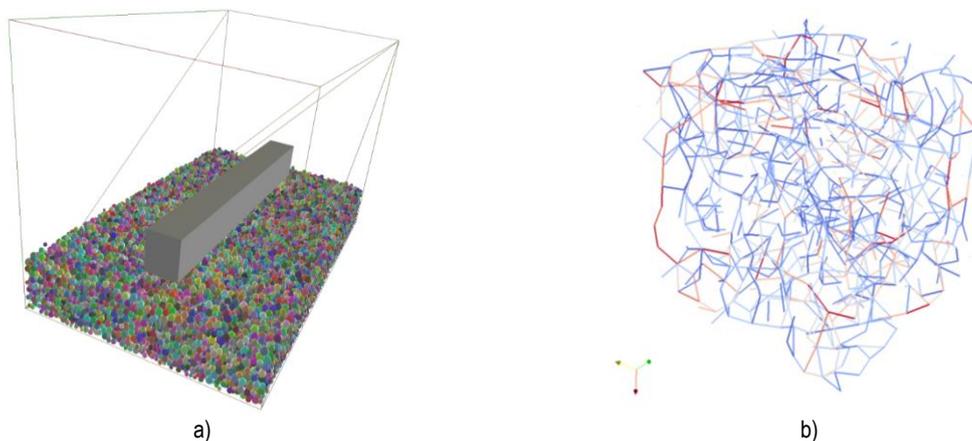


Figura 6.4 – Modelação por DEM de uma travessa sobre balastro: a) modelo sob carregamento; b) rede de forças de contacto estabelecida entre partículas no interior de uma porção de balastro (Fortunato; *et al.*; 2020)

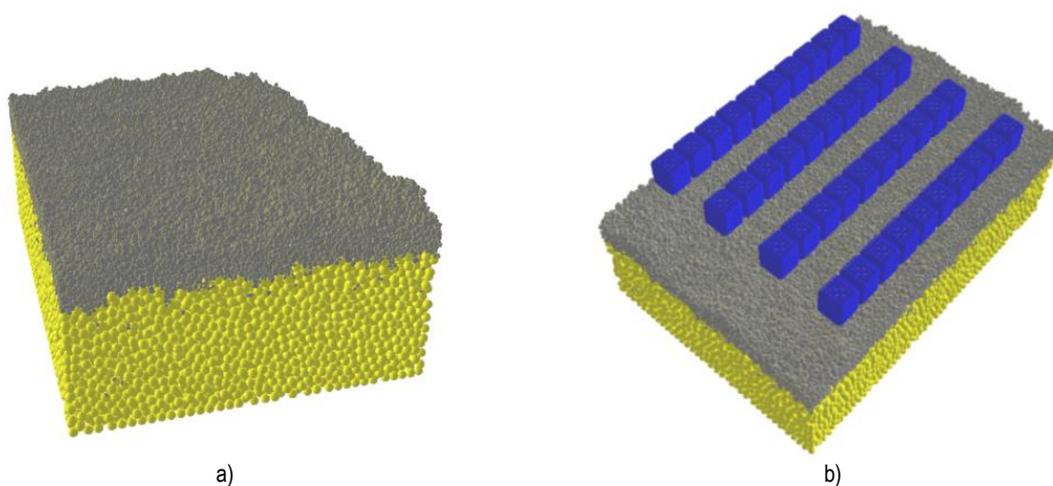


Figura 6.5 – Modelação de um trecho de via-férrea por DEM: a) fundação e camada de balastro; b) fundação, camada de balastro e 4 travessas (Fortunato; *et al.*; 2020)

Ao contrário dos modelos de elementos finitos, em que as forças de contacto travessa-balastro são aproximadamente iguais em todas as travessas, quando solicitadas de modo semelhante, nos modelos de elementos discretos isso não se verifica. O comportamento identificado é mais representativo das condições reais de apoio das travessas no balastro. Sendo este um meio particulado, composto por partículas com geometria irregular, a área de contacto entre a travessa e o balastro é muito menor do que a área da travessa. Este tipo de comportamento dificilmente é modelado adequadamente com

elementos contínuos, como no caso do método dos elementos finitos, em que se considera um contacto uniforme entre a travessa e o balastro. Nessas abordagens, a resultante das forças de contacto travessa balastro será igual em todas as travessas que têm as mesmas condições de apoio e de carregamento, o que se afasta daquilo que se verifica na realidade.

A título de exemplo, na Figura 6.6 apresentam-se os caminhos e as amplitudes das forças de contacto entre partículas num corte na direção transversal da via, na zona da travessa número 4, verificando-se uma variabilidade relevante das forças no espaço e em amplitude, que é característica deste tipo de estruturas. Os retângulos visíveis nas figuras (a vermelho e a azul, sobre o fundo cinzento) representam a discretização de uma travessa em diversos elementos do modelo.

Assim, com os modelos de elementos discretos é possível concluir que as condições de apoio das travessas são bastante irregulares, o que pode contribuir para diferentes modos de degradação da geometria da via e dos seus elementos.

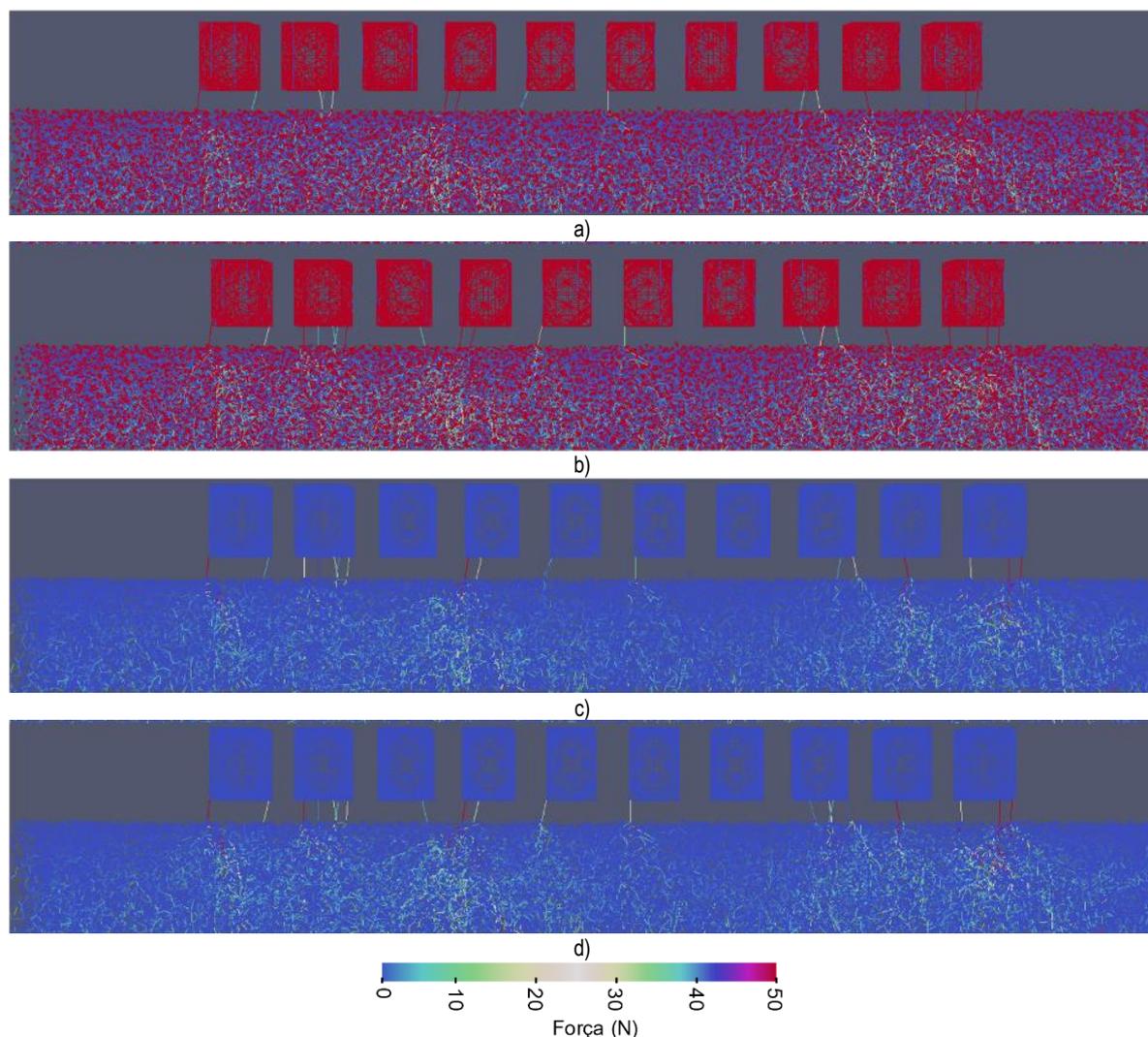


Figura 6.6 – Forças de contacto entre partículas no modelo (corte na direção transversal da via na zona da travessa número 4): a) força normal, peso da via; b) força normal, carregamento do veículo; c) força tangencial, peso da via; d) força tangencial, carregamento do veículo (Fortunato; *et al.*; 2020)

## 7 | Estudos de modelação numérica do comportamento dinâmico da via-férrea

### 7.1 Comportamento resiliente

#### 7.1.1 Influência do comportamento resiliente não linear da camada de balastro na resposta dinâmica da via

A camada de balastro está sujeita a variações consideráveis do estado de tensão devido aos ciclos de carga resultantes da passagem dos comboios. Atendendo a que a rigidez deste material é influenciada pelo estado de tensão a que está sujeito, pode ser importante considerar a sua resposta resiliente (elástica) não linear na análise estrutural. Nos cálculos apresentados nesta secção, o módulo de deformabilidade do balastro é variável, determinado numericamente pelo programa, com recurso ao modelo de comportamento elástico não linear  $K - \theta$  (descrito na secção 5.5.1) e adotando parâmetros de calibração propostos por Aursudkij et al. (2009), em que  $K_1 = 110$  MPa e  $K_2 = 0,6$ , assumindo um valor mínimo de  $E_r = 16$  MPa e um coeficiente de Poisson constante de 0,20 (Paixão; et al.; 2016b).

Na Figura 7.1 apresentam-se os deslocamentos verticais obtidos nos casos de comportamento elástico linear, considerando para o material de balastro um valor de  $E_i = 130$  MPa (apresentados anteriormente na Figura 5.15), e comportamento elástico não linear considerando o modelo  $K - \theta$  para aquele material. Os resultados mostram que os deslocamentos verticais são praticamente coincidentes, para os dois tipos de veículos. O mesmo acontece no caso das acelerações das travessas (não apresentadas). Como foi realçado noutros estudos (Varandas; et al.; 2014), a consideração do comportamento elástico linear do balastro pode conduzir a boas estimativas do comportamento global da via, em termos de deslocamentos verticais do carril. Neste caso, demonstrou-se que aquelas conclusões são válidas para distintas solicitações, nomeadamente para os comboios Alfa Pendular e Intercidades, com cargas por eixo significativamente distintas (Figura 5.14).

Para analisar a variação da tensão na camada de balastro durante a passagem do veículo, seleccionaram-se os elementos finitos relativos a várias posições, identificados na Figura 7.2.

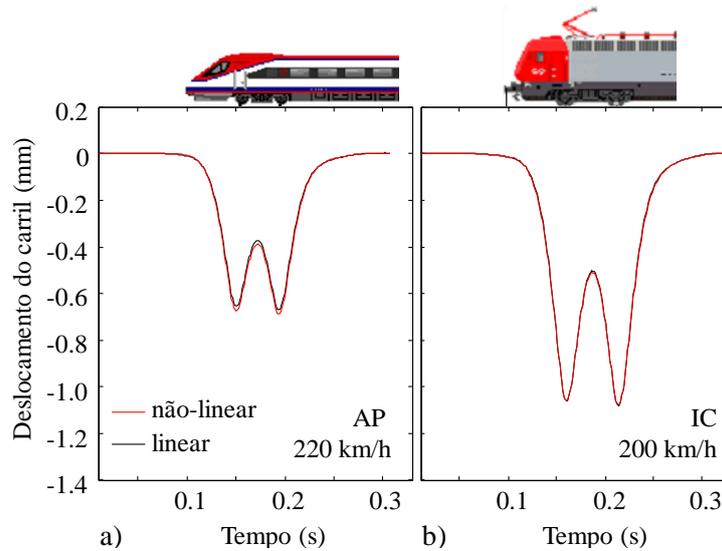


Figura 7.1 – Deslocamentos verticais obtidos nos casos de comportamento linear e não linear: a) Alfa Pendular (AP); b) Intercidades (IC) (Paixão; *et al.*; 2016b)

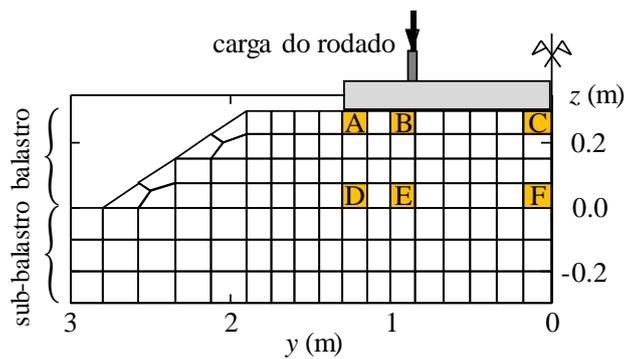


Figura 7.2 – Posição dos elementos seleccionados na análise (Paixão; *et al.*; 2016b)

Na Figura 7.3 apresentam-se os valores da tensão média,  $p$  (definida como positiva no caso de compressão), e da tensão deviatórica,  $q$ , nos referidos elementos, as quais são calculadas por:

$$p = \frac{1}{3}(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) \tag{43}$$

$$q = \sqrt{\frac{1}{2}((\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2) + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)} \tag{44}$$

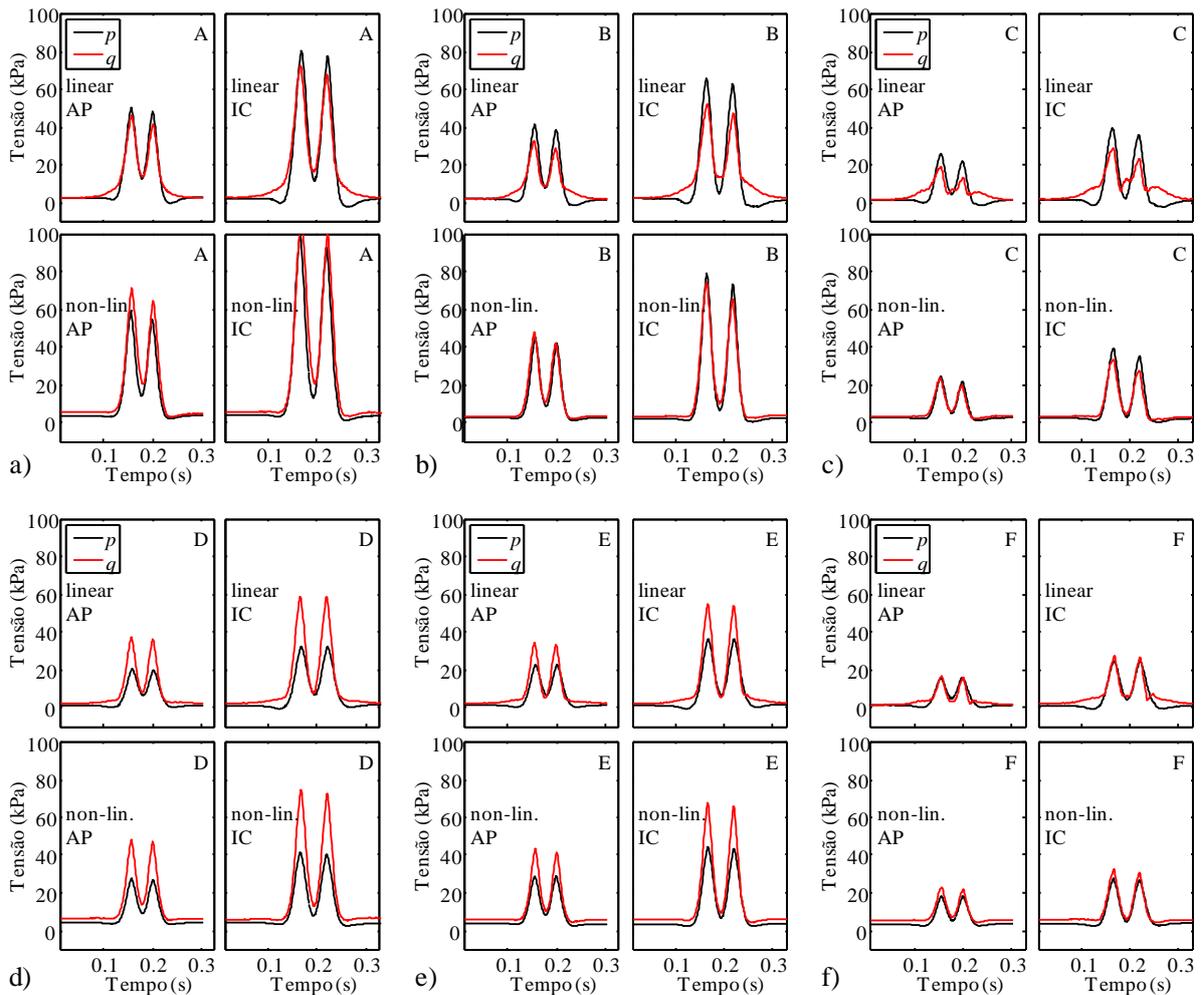


Figura 7.3 – Variação de  $p$  e  $q$ , nas posições A a F identificadas na Figura 7.2, considerando o comportamento resiliente linear e não-linear do balastro à passagem do Alfa Pendular (AP) e do Intercidades (IC) (Paixão; *et al.*; 2016b)

É notório que a consideração do comportamento elástico linear falha quer na estimativa das tensões de pico ( $p$ ,  $q$ , e  $\sigma_z$ ) nas várias posições, quer na estimativa da variação da tensão, em particular antes e após os eixos atravessarem a secção em análise (mais pronunciado em termos de  $q$  nas posições A, B e C da Figura 7.2). Este comportamento decorre do facto de a transferência de carga entre a base das travessas e a camada de balastro se realizar de forma distinta no caso do comportamento não linear, pois concentram-se tensões mais elevadas nos elementos finitos que sofrem maiores variações de módulo, resultantes das condições de carga mais gravosa a que estão sujeitos.

Este aspeto é mais evidente nos elementos sob as travessas, como se constata da análise da Figura 7.4, onde se apresenta mapas de cores da tensão vertical de pico,  $\sigma_z$ , obtida nas situações de comportamento linear e não linear, à passagem dos veículos na secção central do modelo. A figura apresenta, para cada caso e tipo de veículo, secções em  $x = 0,0$  m (alinhada com a travessa central),  $z = 0,0$  m e  $z = 0,3$  m.

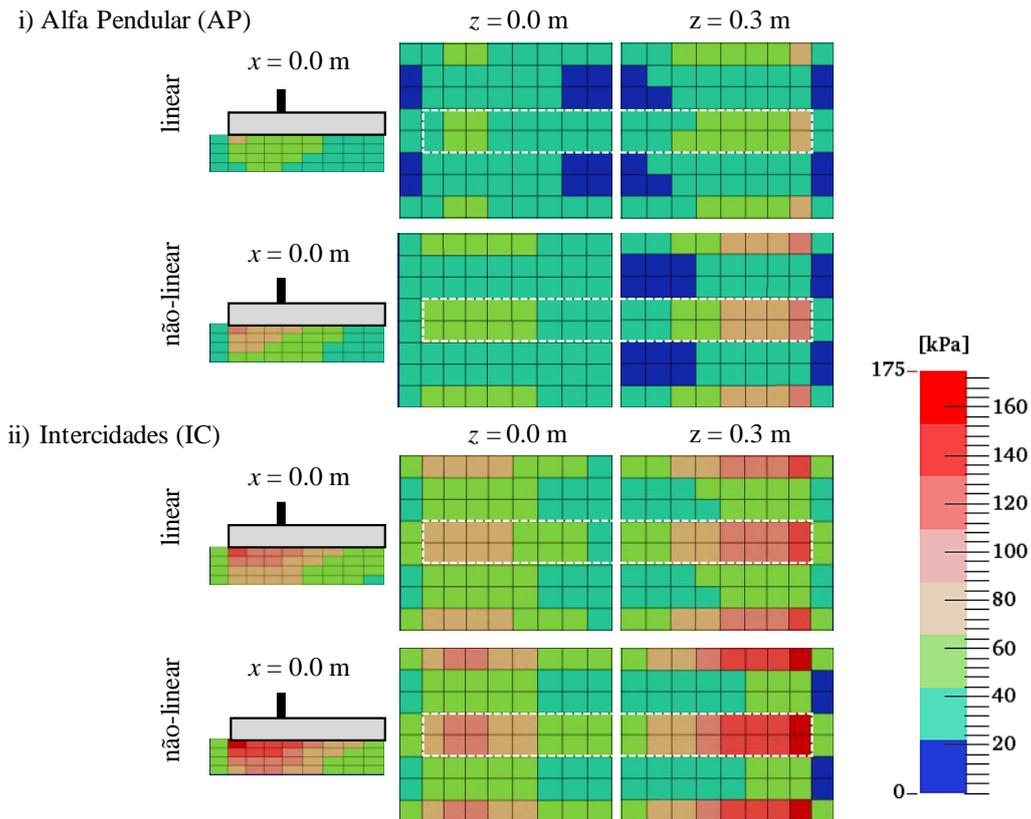


Figura 7.4 – Tensão vertical de pico obtida na camada de balastro (Paixão; *et al.*; 2016b)

A variação do módulo do balastro, resultante de considerar o modelo de comportamento  $K - \theta$  é evidente na Figura 7.5, na qual se apresenta o valor máximo do módulo resiliente nas mesmas secções. Por exemplo, no caso da representação relativa ao Intercidades, é visível que sob as travessas o valor do módulo aumenta até 220 MPa, mas entre as travessas os valores são significativamente inferiores, em particular no centro da via.

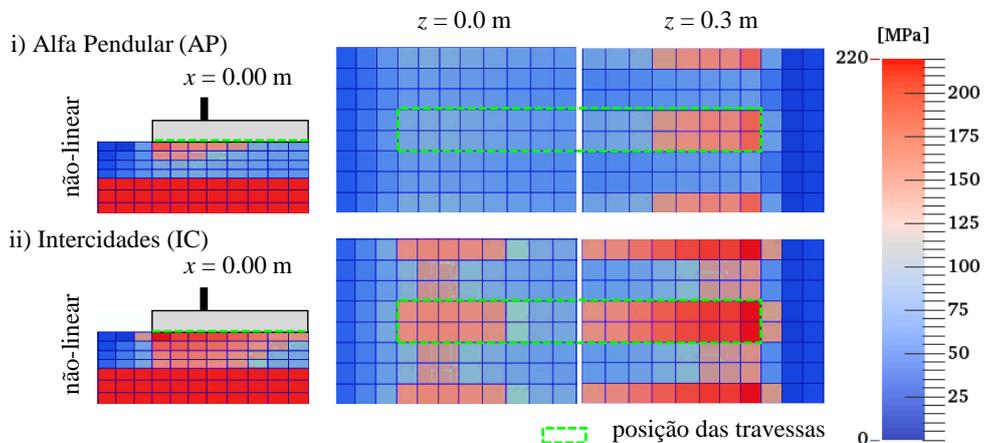


Figura 7.5 – Módulo resiliente máximo obtido na camada de balastro (Paixão; *et al.*; 2016b)

Estes resultados mostram que a consideração do comportamento elástico linear parece subestimar os níveis de tensão na camada de balastro, o que pode afetar negativamente os estudos de modelação que dependam da avaliação precisa das tensões ou deformações dos geomateriais, conforme se demonstrou no estudo apresentado na secção 5.5.2. Por exemplo, devem ser utilizados com precaução no estudo do comportamento de longo prazo das vias-férreas que envolva formulações empíricas que relacionam deformações plásticas com tensões ou deformações. No entanto, a modelação considerando o comportamento elástico linear continua a permitir estimar de forma satisfatória (na maioria das situações) o comportamento global da via, requerendo um esforço computacional significativamente inferior.

### 7.1.2 Influência da velocidade de circulação na resposta dinâmica da via

É conhecido que os deslocamentos verticais da via e da respetiva fundação aumentam com a velocidade do veículo, até um determinado valor – velocidade crítica da via –, para o qual a amplificação dinâmica atinge um máximo. O valor desta velocidade depende basicamente da rigidez da subestrutura da via, sendo pouco influenciado pelas propriedades da superestrutura (Mezher; Connolly; Woodward; *et al.*; 2015). Para uma subestrutura do tipo daquela descrita anteriormente, a velocidade crítica foi estimada em 405 km/h (Correia; 2015). Como expectável, este valor é próximo da velocidade das ondas de Rayleigh num semi-espaço homogéneo constituído por um aterro de solos, que é de 355 km/h.

Para avaliar o efeito da velocidade de circulação na variação resposta estrutural da via, em particular na variação das tensões no interior da camada de balastro, num regime sub-crítico, foi agora considerado um modelo tridimensional com 151 travessas, correspondendo a 90,9 m de comprimento de via, em que a superestrutura foi discretizada por 3618 elementos de viga e 3469 nós e a subestrutura por 260 864 elementos sólidos e 280 098 nós (Varandas; Paixão; Fortunato; *et al.*; 2016d). O comprimento do modelo foi estabelecido com o objetivo de garantir condições estacionárias na secção em estudo, atendendo à elevada velocidade do comboio.

Nesta análise foi considerada a solicitação do comboio Alfa Pendular, através da aplicação de quatro cargas móveis correspondentes a quatro eixos pertencentes a dois bogies consecutivos, com valor médio constante de 132 kN (ver Figura 5.14). Nestas circunstâncias, não foi considerada a influência das forças de inércia do veículo, as quais são relevantes apenas nos casos em que são consideradas irregularidades geométricas da via e/ou irregularidades na superfície do carril (Varandas; Correia; Paixão; *et al.*; 2016b).

Nas análises foram considerados três valores de velocidade de circulação do veículo: 220 km/h, 320 km/h e 350 km/h. Atendendo a que a velocidade crítica da via é 405 km/h, estes valores correspondem a cerca de 54%, 79% e 86% dessa velocidade.

Na Figura 7.6 apresentam-se as deflexões dinâmicas do carril devido à passagem do Alfa Pendular (relativas à posição inicial de equilíbrio) para as distintas velocidades, considerando as situações de comportamento elástico linear ou elástico não linear do balastro. Para a velocidade mais baixa (220 km/h), a componente dinâmica é pequena (campo de deflexões quase simétrico, em relação ao plano transversal médio entre os dois bogies) e os valores obtidos com as diferentes abordagens de

modelação do comportamento (linear e não linear) são quase coincidentes. Na velocidade intermédia (320 km/h) constata-se alguma amplificação dinâmica, em particular são mais elevados os valores da deflexão máxima, quando comparado com os relativos à velocidade mais baixa, e ocorrem deflexões ascendentes (levantamento do carril). É de assinalar também que são visíveis algumas diferenças nos resultados obtidos com cada uma das abordagens. Por último, para a velocidade mais elevada (350 km/h) a componente dinâmica assume uma importância significativa e as diferenças entre os resultados obtidos com as distintas abordagens são já evidentes. Nestas circunstâncias, conclui-se que a influência nas deflexões do efeito dinâmico/inercial apenas será significativa quando a velocidade do veículo se aproximar da velocidade crítica da via.

No que se refere às tensões na camada de balastro, a Figura 7.7 apresenta as trajetórias de tensão ( $p - q$ ) nos elementos A, B e C (de acordo com a Figura 7.2), decorrentes da passagem do comboio Alfa Pendular a 220, 320 e 350 km/h, considerando o comportamento não linear do balastro. Como seria expectável, em todas as situações as tensões decrescem do extremo da travessa (elemento A) para a zona central (elemento C). Com o aumento da velocidade, aumenta a tensão normal média,  $p$ , mas a tensão deviatórica,  $q$ , diminui.

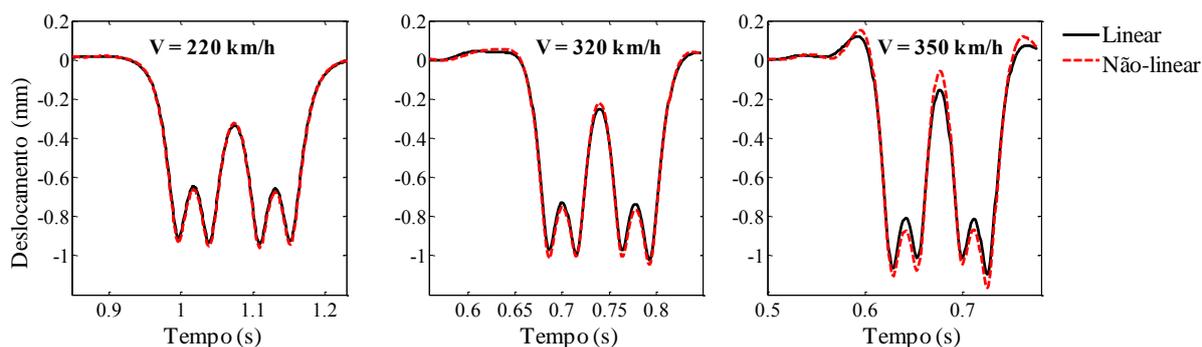


Figura 7.6 – Evolução das deflexões dinâmicas do carril durante a passagem do veículo a distintas velocidades, considerando o comportamento elástico linear (preto) e não linear (vermelho) do balastro (Varandas; *et al.*; 2016d)

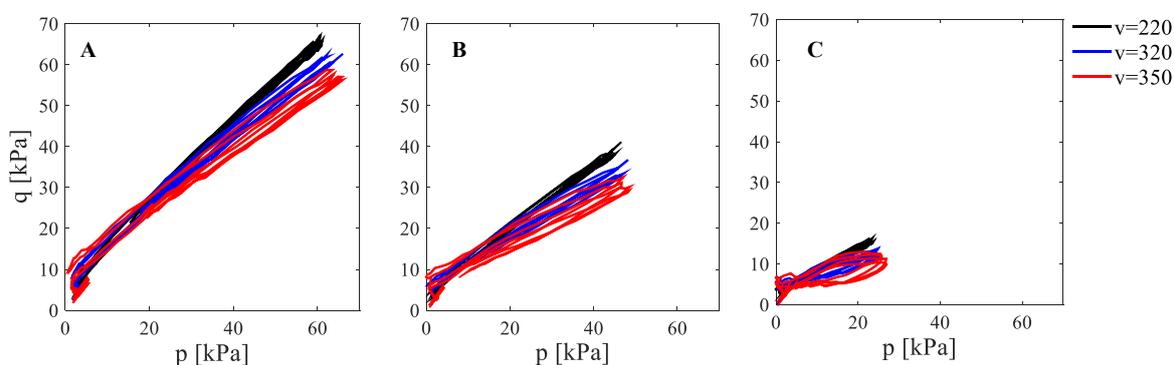


Figura 7.7 – Trajetória de tensões no espaço  $p - q$ , nos elementos A, B e C, durante a passagem do veículo a distintas velocidades (Varandas; *et al.*; 2016d)

A redução da tensão deviatórica máxima com o aumento da velocidade deve-se a um aumento da tensão horizontal que não é acompanhada por um aumento da tensão vertical, como se constata pela análise da Figura 7.8, na qual se apresenta a evolução das seis componentes de tensão no elemento A, durante a passagem do veículo a velocidades de 220 e 350 km/h.

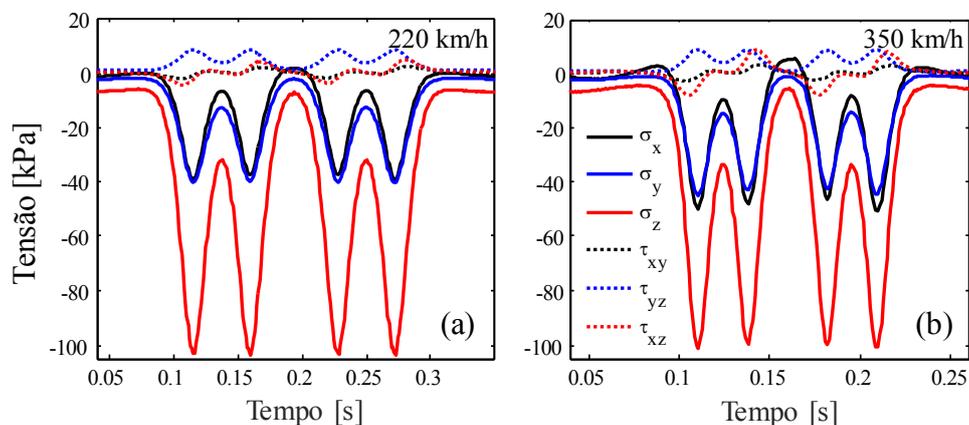


Figura 7.8 – Evolução das tensões no elemento A durante a passagem do veículo a velocidades de: a) 220 km/h; b) 350 km/h (Varandas; *et al.*; 2016d)

A justificação para a alteração da distribuição de tensões quando se passa do regime quasi-estático para um regime próximo do crítico, sendo o mesmo carregamento externo aplicado para velocidades diferentes, reside nos efeitos inerciais dinâmicos no solo induzidos pela passagem do veículo ao viajar a velocidades próximas da velocidade das ondas de Rayleigh no solo.

A rotação das tensões principais nos elementos D, E e F, para velocidades do veículo de 220, 320 e 350 km/h, em termos de  $\alpha_x$  e de  $\alpha_y$ , é apresentada na Figura 7.9. Os valores de abcissa representam uma posição relativa normalizada do veículo ao longo do modelo, de forma a sincronizar resultados obtidos a distintas velocidades. Estes resultados mostram que velocidades mais elevadas conduzem a valores mais elevados de rotação das tensões principais na camada balastro, em particular em termos do ângulo medido no plano  $x - z$ ,  $\alpha_x$ .

Conclui-se assim que, quando a velocidade se aproxima do valor crítico as trajetórias de tensão e a rotação das tensões principais são influenciadas significativamente.

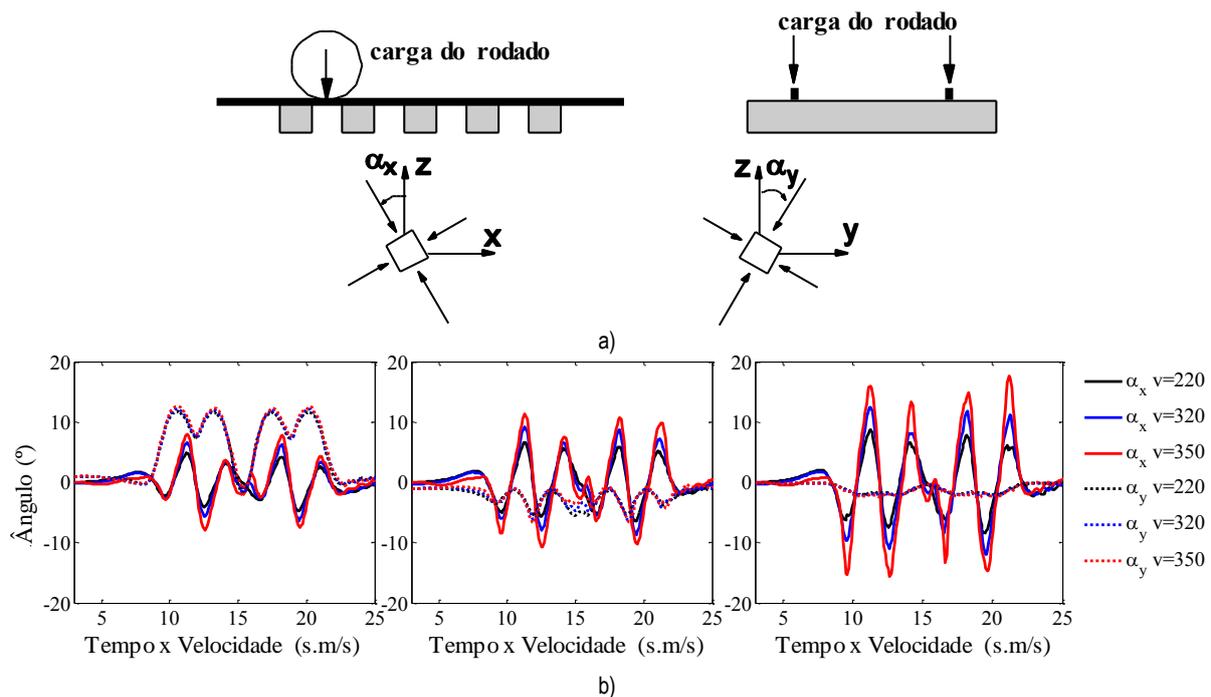


Figura 7.9 – Rotação das tensões principais em função da velocidade do veículo: a) definição dos ângulos  $\alpha_x$  e  $\alpha_y$  em perfil longitudinal e transversal; b) variação da rotação das tensões nos elementos D, E e F do balastro (Varandas; *et al.*; 2016d)

### 7.1.3 Influência de defeitos de geometria na resposta dinâmica da via

Os defeitos de qualidade geométrica ao nível do posicionamento do carril originam cargas dinâmicas elevadas à passagem dos veículos, que podem resultar na degradação acelerada da via. Em zonas de transição entre diferentes tipos de subestrutura de via é frequente desenvolverem-se defeitos de geometria relativos ao nivelamento longitudinal traduzindo-se frequentemente em assentamentos diferenciais com alguma expressão (Paixão; 2014).

Para analisar este fenómeno foi simulado um hipotético assentamento diferencial numa zona de transição entre terraplenagens e um viaduto de acesso a uma ponte (Figura 7.10)(Varandas; *et al.*; 2014). Esta transição é constituída por um aterro construído com agregado britado de granulometria extensa (ABGE), na continuidade do aterro em solos com altura máxima de 7 m, e por um aterro adjacente construído, junto à estrutura do viaduto, com agregado misturado com 5% (em peso) de cimento Portland (MAC) (Paixão; Fortunato; Calçada; 2015). Sobre os aterros de solos e de ABGE foi colocada uma camada de leito de via de 0,20 m de espessura. Sobre esta camada e sobre o aterro de agregado misturado com cimento foi colocada uma camada de sub-balastro granítico com 0,30 m de espessura. A camada de balastro tem também 0,30 m de espessura.

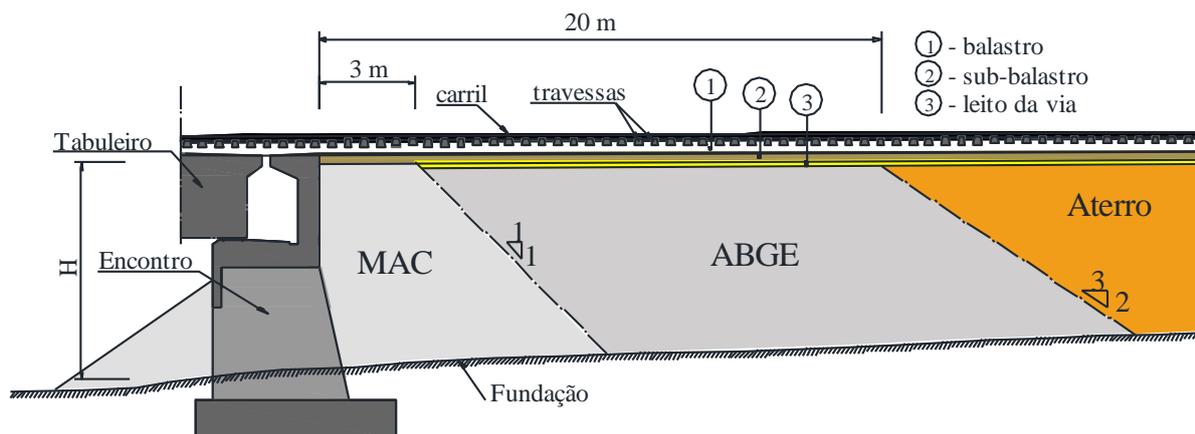


Figura 7.10 – Esquema representativo de uma zona de transição entre a terra e um viaduto (Paixão; 2014)

As características da superestrutura de via são iguais às consideradas na Secção 5.6. Os materiais da subestrutura, nomeadamente da fundação e das camadas de apoio da via, foram considerados com as características apresentadas no Quadro 7.1 e no Quadro 7.2. Assumiu-se um coeficiente de amortecimento de 3% nas frequências de 2 Hz e 100 Hz, para todas as camadas do modelo.

Quadro 7.1 – Propriedades dos geomateriais da fundação da via (Varandas; et al.; 2014)

	Módulo de Young	Coefficiente de Poisson	Densidade	Espessura
Geomateriais	$E$ (MPa)	$\nu$ (-)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$H$ (m)
Aterro	90	0,25	2040	7,0
ABGE	300	0,25	2040	7,0
MAC	10 000	0,25	2200	7,0
Leito de via	1000	0,25	2200	0,2

Quadro 7.2 – Propriedades dos materiais de balastro e sub-balastro no modelo de comportamento  $K - \theta$  (Varandas; et al.; 2014)

	Espessura	Densidade	Coefficiente de Poisson	Parâmetros do modelo			
Camada	$H$ (m)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\nu$ (-)	$K_1$ (MPa)	$K_2$ (-)	$E_{min}$ (MPa)	$\theta_t$ (kPa)
Balastro	0,3	1730	0,20	110	0,6	16	8
Sub-balastro	0,3	2200	0,25	200	0,6	16	8

Neste caso, o modelo numérico tridimensional, com 317 000 elementos, foi estabelecido com 48,9 m de comprimento, 14,6 m de largura e 7,8 m de altura, considerando 77 travessas espaçadas de 0,6 m. Ficaram excluídos do modelo o encontro do viaduto e a ponte, assumindo-se nesta zona a existência de uma superfície rígida sob o balastro.

O assentamento diferencial de 1 mm foi imposto a 20 m do encontro da obra de arte, na transição entre o aterro de solos e o aterro construído com agregados britados de granulometria extensa.

Na Figura 7.11 apresenta-se a geometria inicial do carril com assentamento diferencial de 1 mm, originada pela imposição de um deslocamento vertical ao nível do topo da camada de balastro, causando um defeito de nivelamento longitudinal.

Na Figura 7.12 apresentam-se as forças de contacto entre a travessa e o balastro no estado inicial, antes da passagem do veículo. Pode concluir-se que devido ao assentamento de 1 mm no aterro de solos anulam-se as forças de contacto em três travessas do modelo, gerando-se uma força estática relativamente importante, de cerca de 19 kN (superior à que corresponde à situação regular, cerca de 4 kN), no contacto entre o balastro e a travessa localizada na posição  $x = -19,8$  m.

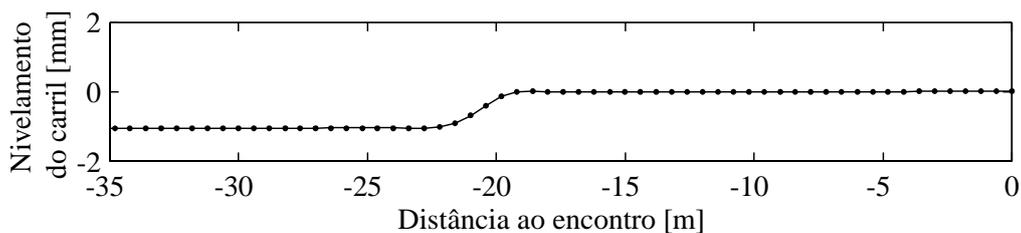


Figura 7.11 – Geometria inicial do carril com assentamento diferencial de 1 mm (Varandas; *et al.*; 2014)

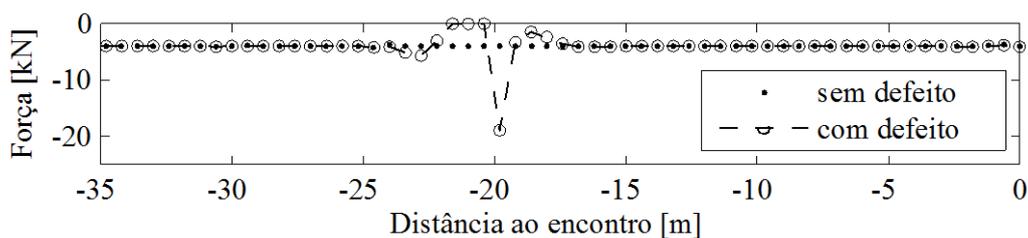


Figura 7.12 – Forças de contacto entre as travessas e o balastro no estado inicial (Varandas; *et al.*; 2014)

A Figura 7.13 apresenta as forças verticais máximas de contacto entre as travessas e o balastro devido à passagem do comboio Alfa Pendular a 200 km/h (um bogie de dois eixos de 130 kN, cada, espaçados de 2,7 m), em condições normais e considerando o assentamento diferencial de 1 mm. No caso em que se inclui o defeito geométrico observa-se um valor de compressão relativamente mais elevado na posição  $x = -19,8$  m, o que está relacionado com a força estática inicial resultante do peso próprio da via, como era visível na Figura 7.12.

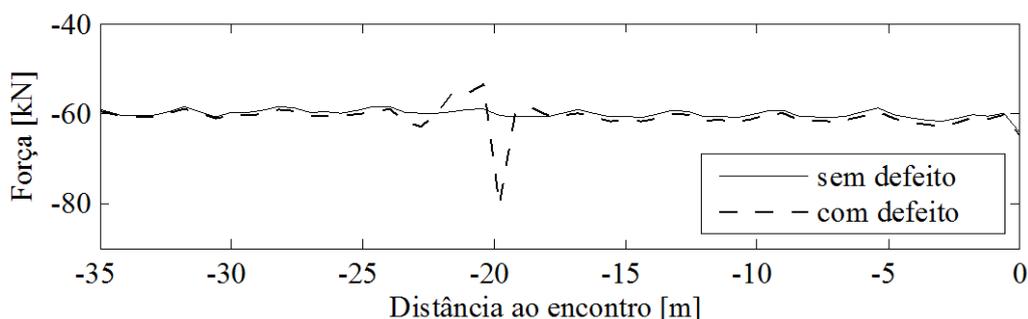


Figura 7.13 – Forças verticais máximas de contacto entre as travessas e o balastro devido à passagem do veículo (Varandas; *et al.*; 2014)

A Figura 7.14 mostra a evolução das tensões normais no interior da camada de balastro (ponto A da Figura 7.2), durante a passagem de um bogie com dois eixos, para três situações distintas: i) travessa apoiada adequadamente, situação que corresponde a uma força de contacto inicial entre a travessa e o balastro aproximadamente igual ao peso próprio da via (cerca de 4 kN por travessa); ii) travessa mal apoiada, não havendo força de contacto inicial; iii) travessa inicialmente sobrecarregada, sendo a força de contacto inicial bastante superior à da travessa apoiada adequadamente. É notório que as tensões no interior da camada de balastro variam consideravelmente. O balastro localizado sob a travessa mais carregada sofre um maior acréscimo de tensão vertical, conduzindo a uma maior tensão de corte,  $q$ , quando comparado com os outros casos, como se evidencia na Figura 7.15.

Estes resultados evidenciam a importância que a geometria de via tem na variação das tensões na camada de balastro durante a passagem do veículo. O acréscimo das tensões resultante de defeitos de geometria, em particular de assentamentos diferenciais da camada de balastro, é muito importante na análise da evolução a longo prazo da geometria da via. No curto prazo, esse efeito poderá suavizar a anomalia geométrica, mas no longo prazo pode agravar a anomalia e conduzir a manutenção adicional, devido à maior degradação das partículas de balastro e maiores deformações permanentes dentro desta camada.

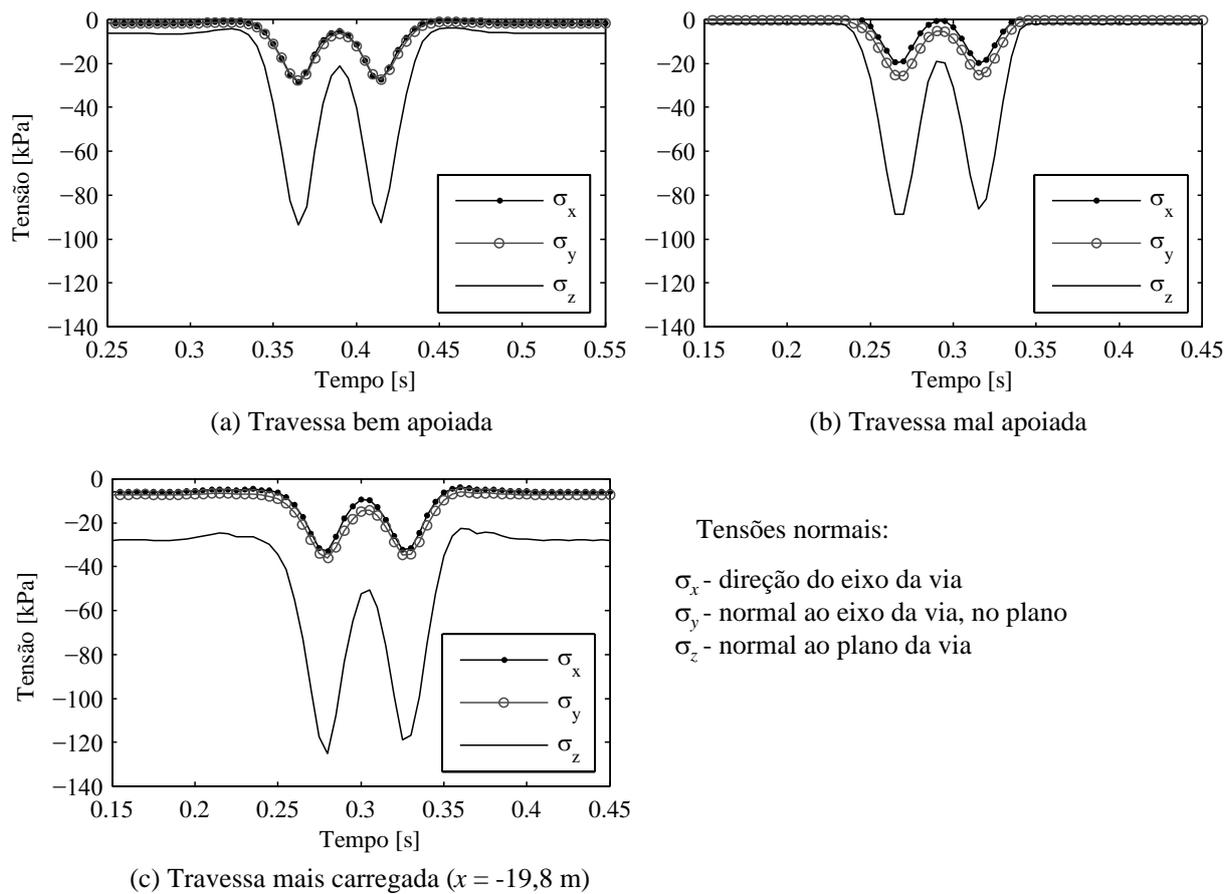


Figura 7.14 – Evolução das tensões normais no interior da camada de balastro (Ponto A da Figura 7.2), durante a passagem de um bogie do Alfa Pendular (Varandas; *et al.*; 2014)

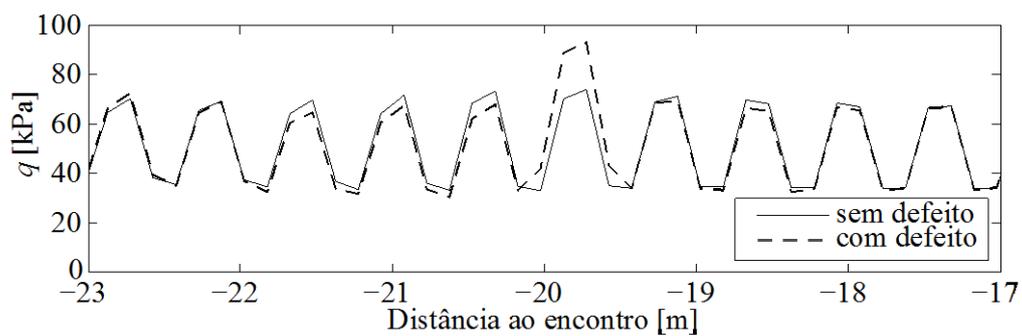


Figura 7.15 – Valor máximo da tensão de corte,  $q$ , no interior da camada de balastro (Ponto A) ao longo do desenvolvimento da via (Varandas; *et al.*; 2014)

## 7.2 Comportamento de longo prazo

Nesta secção avalia-se a resposta estrutural da via-férrea considerando a deformação permanente acumulada dos materiais das camadas de apoio devido a sucessivos ciclos de carga resultantes da passagem de eixos ferroviários. Modelou-se um trecho de via-férrea com cerca de 18 m de comprimento, que inclui 29 travessas espaçadas de 0,60. Na Figura 7.16 apresenta-se o sistema balastro/fundação do modelo da via, respetiva malha de elementos finitos hexaédricos e sistema de eixos. Nesta representação introduziram-se dois cortes (em  $x = 0$  m e  $y = 0,75$  m) para permitir a visualização da zona interior da malha. Percebe-se que a malha não é uniforme ao longo da direção longitudinal da via: a zona central é a zona de análise e possui malha mais fina, sendo as duas extremidades construídas de forma a garantir condições de movimento estacionário na zona central de estudo e têm malhas mais grosseiras. À zona central correspondem 11 travessas, e em cada uma das extremidades existem 9 travessas. O modelo tem cerca de 210 000 graus de liberdade e 63 000 elementos tridimensionais.

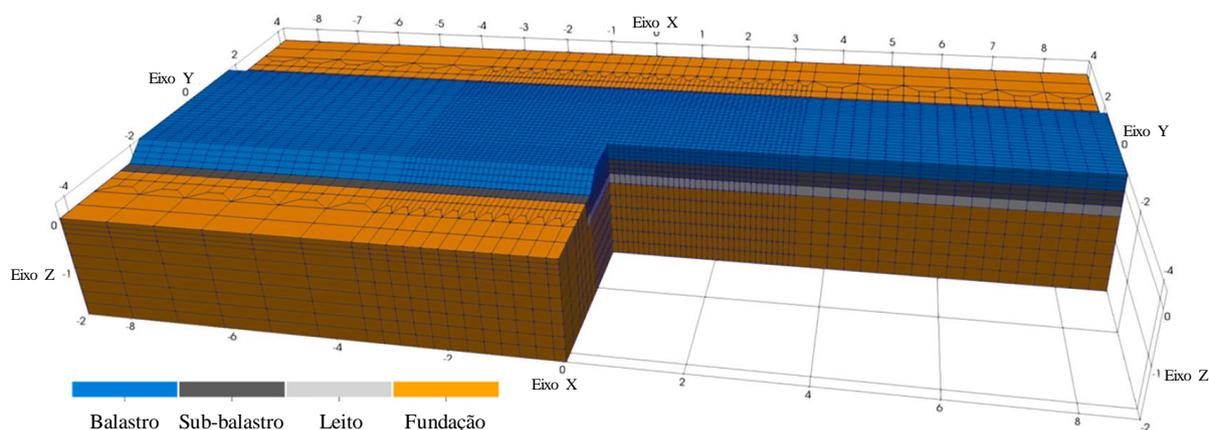


Figura 7.16 – Representação do sistema balastro/fundação do modelo da via com 29 travessas, respetiva malha de elementos finitos e sistema de eixos (Varandas; *et al.*; 2020)

As propriedades geométricas e dos materiais do modelo são baseadas em dados apresentados em (Paixão; Varandas; Fortunato; *et al.*; 2018b), mas considerando a bitola europeia (1,435 m). A superestrutura da via é composta por carris UIC60E1 de barra longa soldada, travessas de betão monobloco (prismas retangulares assumidos com 2,6 m de comprimento, 0,30 m de largura, 0,19 m de altura e 322 kg cada) e sistema de fixação Vossloh W14 com palmilhas Zw700/148/165, com um valor de rigidez vertical de 160 kN/mm e uma constante de amortecimento de 9,6 kNs/m. A subestrutura é composta por camadas de balastro e sub-balastro de granito com uma espessura de 30 cm cada, e uma camada de leito de 20 cm de espessura de agregado britado de granulometria extensa de origem calcária. A fundação foi modelada de forma a representar um solo homogéneo, isotrópico, bem compactado e razoavelmente rígido, com 4 m de espessura. De forma a otimizar o cálculo, os dois metros superiores são representados no modelo com elementos tridimensionais, e os dois metros mais

profundos por meio de uma fundação de Kelvin-Voigt viscoelástica bidimensional equivalente (Varandas; 2013). As paredes laterais do modelo possuem amortecedores locais para absorver as ondas de impacto (Lysmer; Kuhlemeyer; 1969). As propriedades dos materiais são as que foram apresentadas anteriormente no Quadro 5.3. Apenas foi considerada a deformação plástica do balastro, assumindo que a contribuição correspondente ao sub-balastro e camadas mais profundas, devido às cargas dos veículos, será bem menor. Esta modelação pretende representar uma via que está em serviço há vários anos e foi submetida a uma operação de manutenção regular, com ataque mecânico pesado da camada de balastro, com vista a manter uma boa qualidade geométrica da via. Para o sub-balastro foi considerado um comportamento linear-elástico e para o balastro o modelo não linear hipoelástico.

As simulações dinâmicas foram realizadas considerando a passagem de bogies individuais pertencentes a dois veículos do serviço ferroviário português: o Alfa Pendular e a locomotiva da classe 5600 da Siemens, referidos em 5.6.2. Os veículos percorrem a zona central do modelo a uma velocidade de 144 km/h (correspondendo a 40 m/s). Atendendo às propriedades da via, esta velocidade é significativamente inferior à velocidade crítica e, portanto, a resposta estacionária é quase estática.

Foram definidos dois esquemas de carregamento com o objetivo de testar o modelo de acumulação de deformação e a respetiva implementação para sequências de carregamento em fases. No primeiro esquema (LS A) foram aplicados inicialmente os 20 000 bogies do Alfa Pendular e depois os 10 000 bogies da locomotiva. No segundo esquema (LS B), inverteu-se a ordem de aplicação. O número correspondente de ciclos de carga é duplo (dois eixos por bogie).

A Figura 7.17 mostra os assentamentos calculados considerando LS A e LS B, no topo da camada de balastro, sob o centro e sob a extremidade da travessa central do modelo. Da análise dos resultados pode-se concluir que: a) a curva de assentamento apresenta um ponto de inflexão quando a carga aumenta repentinamente e a ordem de carregamento desempenha um papel menor no valor final do assentamento, o que vai ao encontro de resultados de ensaios laboratoriais realizados no âmbito da caracterização de materiais deste tipo (Fortunato; 2005); b) é novamente notório que o assentamento do balastro não é homogéneo ao longo da direção longitudinal da travessa, sendo o valor mais elevado observado nas extremidades da travessa, conduzindo à situação em que na fase de descarga esta fica sem apoio nas extremidades; c) o modelo de acumulação da deformação permanente, como esperado, considera adequadamente o histórico de carregamento, como mostram os resultados obtidos com LS B, evidenciando que o assentamento total depende essencialmente do número de veículos mais pesados.

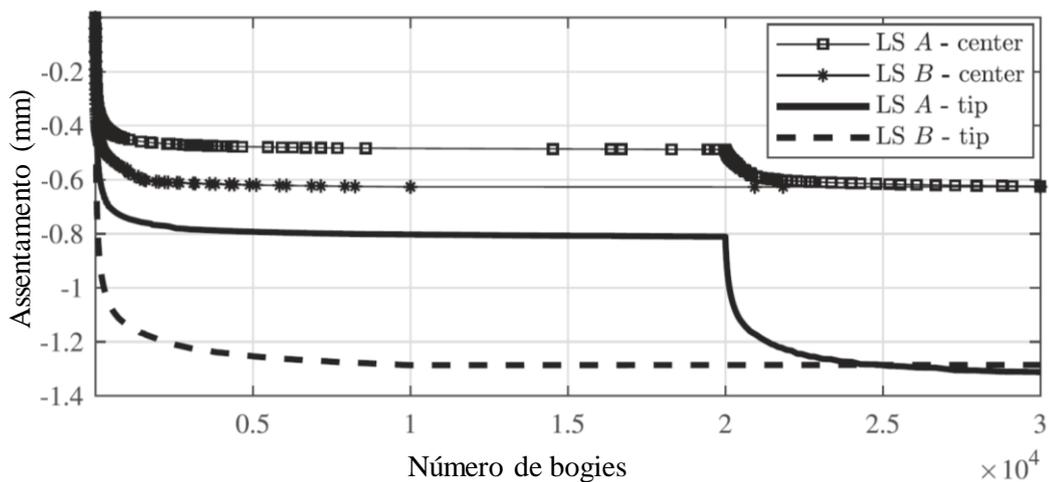


Figura 7.17 – Assentamento calculado no topo do balastro, sob o centro (*center*) e sob a extremidade (*tip*) da travessa central do modelo, considerando LS A e LS B (Varandas; *et al.*; 2020)

Na Figura 7.18 apresenta-se vistas 3D do sistema balastro/solo carregado pelo bogie da locomotiva da classe 5600, deslocando-se da esquerda para a direita a 144 km/h. O eixo dianteiro está sobre o local da travessa com as cores mais escuras, do lado direito. A escala de cores reflete a tensão vertical,  $z$ , em cada elemento finito. A Figura 7.18a mostra a tensão vertical e a deformada resiliente/instantânea (quase impercetível) associadas à situação inicial,  $N = 1$ , quando o balastro ainda não experimentou deformação plástica. Trata-se, portanto, da situação que normalmente é apresentada na bibliografia relativamente a simulações convencionais com apoio homogéneo das travessas. A Figura 7.18b representa a situação equivalente da via, mas após a acumulação de deformações permanentes resultantes do esquema de carregamento A ( $N = 30\ 000$ ). Neste caso, a deformação resiliente causada pela passagem do veículo está sobreposta à deformação permanente. De facto, é possível concluir que a implementação computacional apresentada neste trabalho fornece uma resposta em termos de deformação plástica que está em linha com o que seria esperado, considerando a característica homogénea da via-férrea e a continuidade da formulação adotada.

Em termos de distribuição de tensões, há, novamente, uma alteração muito significativa com a acumulação da deformação permanente do balastro: quando a travessa é apoiada homogeneamente pelo balastro, para  $N = 1$  (Figura 7.18a), o valor mais elevado da tensão de contacto balastro-travessa é registado sob a posição dos carris, como seria de esperar; com o aumento do número de ciclos de carga e, conseqüente, da deformação permanente, a concentração de tensões muda gradualmente para o centro da travessa, o que resulta do assentamento desigual do balastro sob a travessa, como referido anteriormente.

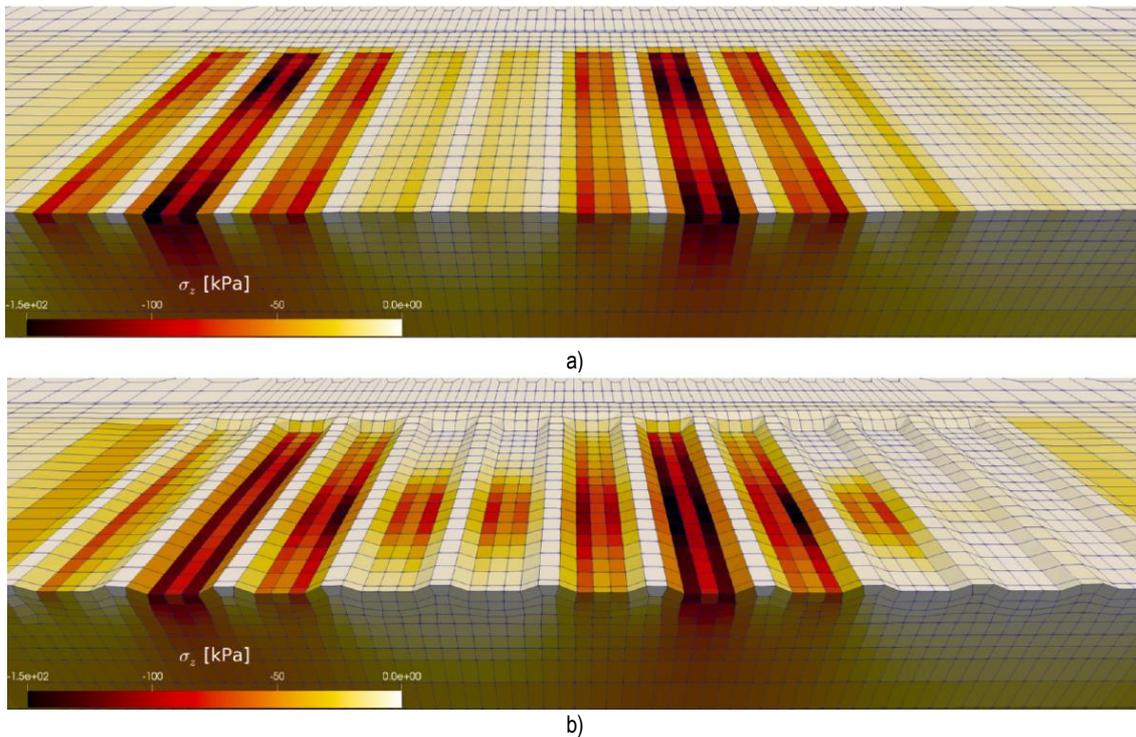


Figura 7.18 – Vistas 3D do sistema balastro/solo carregado pelo bogie da locomotiva: a) N=1; b) N=30 000 (deslocamentos ampliados 60 vezes) (Varandas; *et al.*; 2020)

A Figura 7.19 mostra os deslocamentos dinâmicos (deflexões) devido à passagem da locomotiva, na travessa central do modelo. A origem corresponde à posição descarregada da via antes da passagem do veículo. A deformação gradual do balastro, e o conseqüente apoio desigual da travessa, conduz a maiores deslocamentos na extremidade durante a passagem do veículo. A rigidez aparente da via medida na extremidade da travessa é, portanto, reduzida por este efeito. Este é um aspeto importante, geralmente negligenciado na análise da via-férrea. Os deslocamentos centrais da travessa, por outro lado, mantêm-se ao longo dos ciclos de carga. O aumento em termos de amplitudes de tensão aplicada é compensado por um aumento da rigidez elástica.

Na Figura 7.20 mostra-se em detalhe a evolução das tensões normais na linha superior dos elementos de balastro localizados sob a travessa, causada pela sua deformação de longo prazo. São apresentados os valores médios calculados a partir do conjunto de elementos localizados nas zonas correspondentes (sob a extremidade e no meio da travessa). É possível concluir que há uma redução muito significativa das tensões sob a extremidade da travessa e há um aumento das tensões sob o centro. A evolução da pressão de confinamento ( $\sigma_x$  e  $\sigma_{xy}$ ) segue a da tensão vertical.

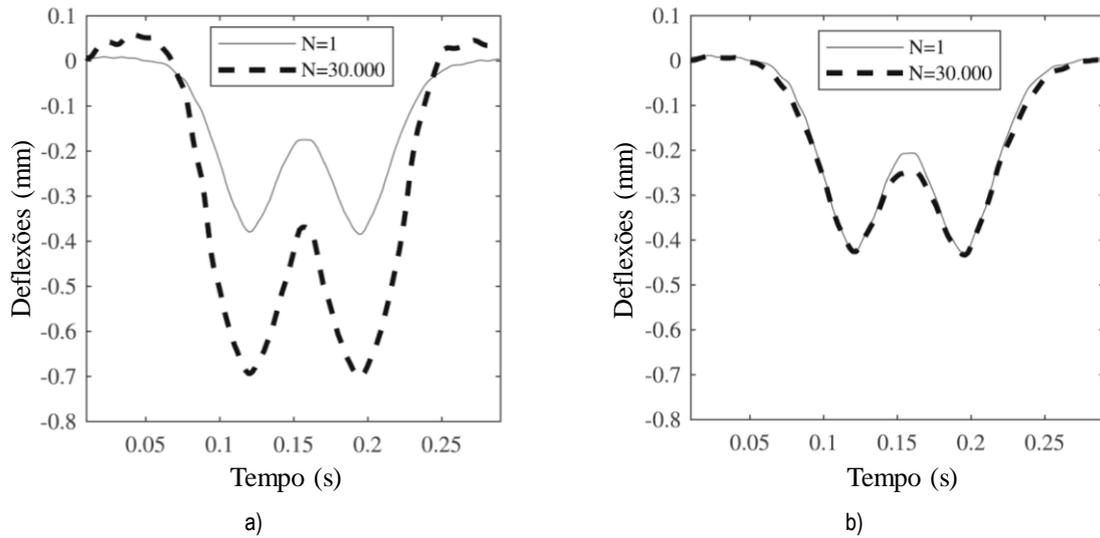


Figura 7.19 – Deslocamentos da travessa exclusivamente devido à passagem da locomotiva: a) na extremidade; b) no centro (Varandas; et al.; 2020)

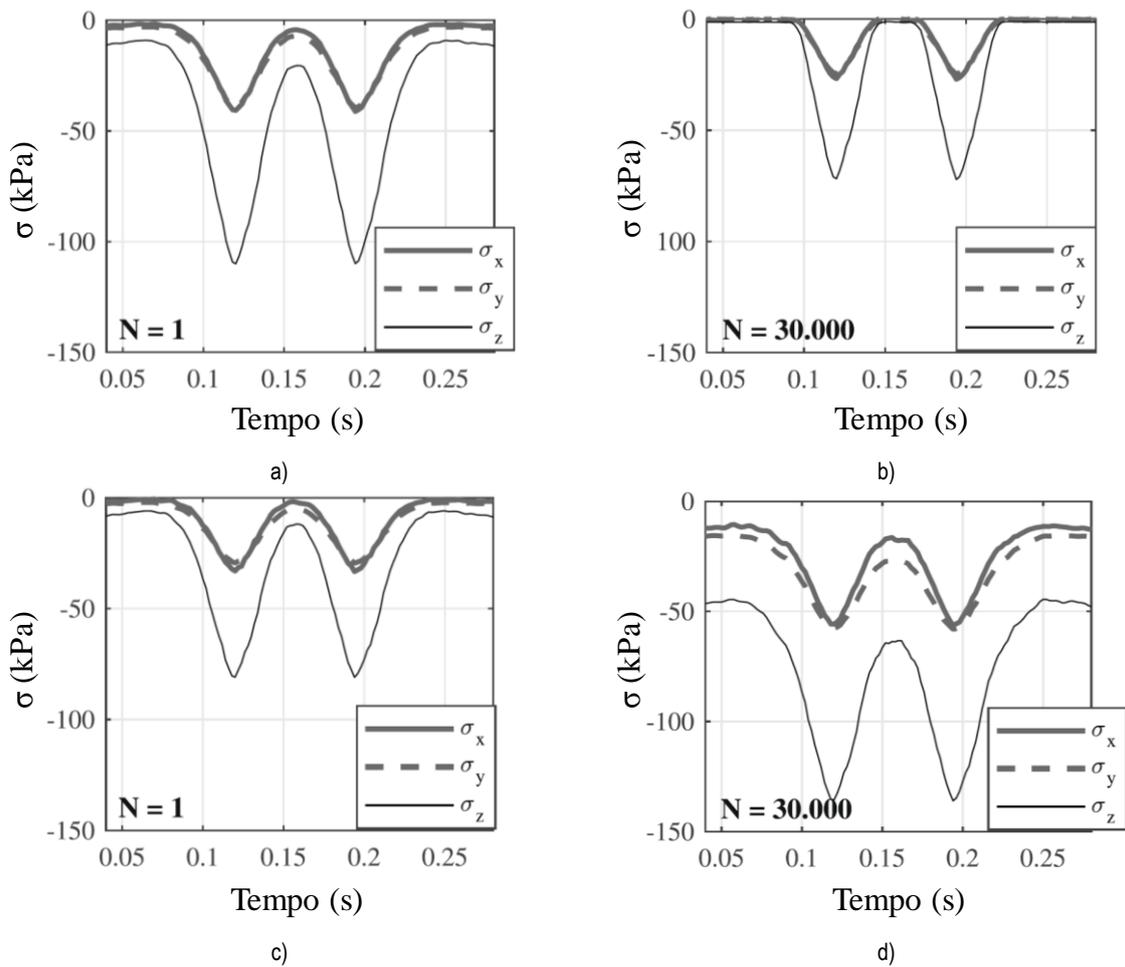


Figura 7.20 – Histórico de tensões normais na zona superior da camada de balastro decorrente da passagem da locomotiva, em dois locais sob a travessa, para N = 1 e N = 30 000 (Varandas; et al.; 2020)

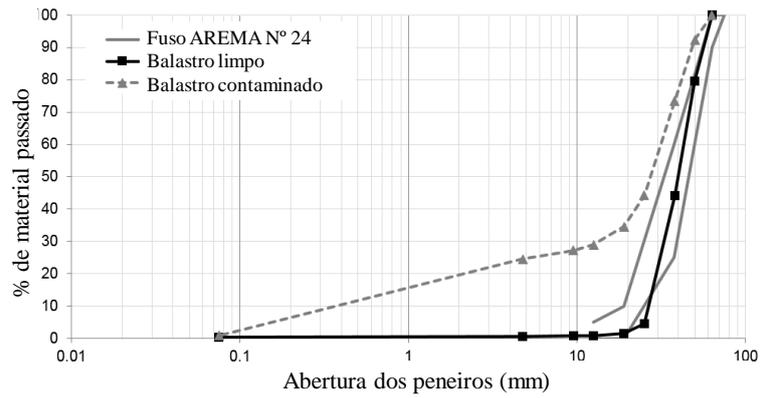
## 8 | Estudos experimentais de avaliação das características do balastro contaminado

Considerando que o ensaio de carga triaxial continua a ser um dos ensaios mais adequados para avaliar as propriedades de resistência e de deformabilidade de geomateriais, no âmbito deste projeto houve oportunidade de colaborar no desenvolvimento de um equipamento de carga triaxial cíclica de grandes dimensões, construído na Escola Politécnica de São Paulo (Costa; *et al.*; 2017). O equipamento desenvolvido permite a realização de ensaios sobre o material de balastro em escala real (granulometria integral), utilizando uma câmara de grandes dimensões, de 400 mm de diâmetro por 800 mm de altura, cumprindo assim o rácio considerado adequado entre o diâmetro máximo das partículas e o diâmetro do provete, da ordem de 1/5 a 1/7 (Skoglund; 2002; Suiker; Selig; Frenkel; 2005; Sevi; 2008). Desta forma, é possível simular o carregamento cíclico que ocorre numa via-férrea devido à passagem de veículos, e observar o comportamento mecânico dos materiais em termos de resposta resiliente (quasi-elástica) e em termos de deformação permanente acumulada (deformação plástica).

De acordo com relatos de vários autores, a camada de balastro pode exibir características físicas e comportamento mecânico bastante distintos em função da sua granulometria, nomeadamente do respetivo grau de contaminação – presença de partículas de dimensões inferiores às consideradas adequadas, normalmente designadas de material fino (Fortunato; 2005; Trinh; Tanga; Cui; *et al.*; 2012; Tennakoon; Indraratna; Nimbalkar; 2014; Ebrahimi; Tinjum; Edil; 2015; Lamas-Lopez; Cui; Calon; *et al.*; 2015; Qian; Mishra; Tutumluer; *et al.*; 2016; Wang; Cui; Lamas-Lopez; *et al.*; 2017; Nguyen; Indraratna; Kelly; *et al.*; 2019; Bassey; Ngene; Akinwumi; *et al.*; 2020; Kian; Sadeghi; Zakeri; 2020).

Segundo um estudo do *European Railway Research Institute* - ERRI (1994) o balastro deve ser substituído quando apresenta uma percentagem de material passado no peneiro de 22,4 mm superior a 30% (valor médio das amostras, em peso, colhidas na via “descalçando uma travessa”). Berggren (2009) refere a absoluta necessidade de proceder a essa substituição se aquela percentagem for superior a 40%.

Assim, realizaram-se ensaios no referido equipamento com o objetivo de comparar o desempenho mecânico de um balastro contaminado, com 40% de material de dimensão inferior a 22 mm, com o de um balastro limpo utilizado em vias-férreas no Brasil, cuja granulometria se insere, quase completamente, no fuso AREMA Nº 24 (2015). Na Figura 8.1 apresentam-se as curvas granulométricas e aspetos dos materiais antes da construção dos provetes. Na Figura 8.2 apresenta-se o aspeto de um provete de balastro pronto para ensaio. O peso volúmico dos provetes de balastro e de balastro contaminado foram de 16,8 kN/m<sup>3</sup> e 20,8 kN/m<sup>3</sup>, respetivamente. Os ensaios foram realizados com uma frequência de carga deviatória de 9 Hz. Os valores das tensões aplicados nos ensaios (Quadro 8.1) foram selecionados atendendo a valores apresentados na bibliografia, em particular considerados representativos das tensões que se podem instalar sob as travessas aquando da passagem dos veículos (Ionescu; 2004; Fortunato; 2005; Aursudkij; 2007).



a)



b)



c)

Figura 8.1 – Materiais utilizados nos ensaios: a) curvas granulométricas; b) aspeto do balastro limpo; c) aspeto do balastro contaminado (Costa; *et al.*; 2017)



Figura 8.2 – Aspeto de um provete de balastro pronto para ensaio (Costa; *et al.*; 2017)

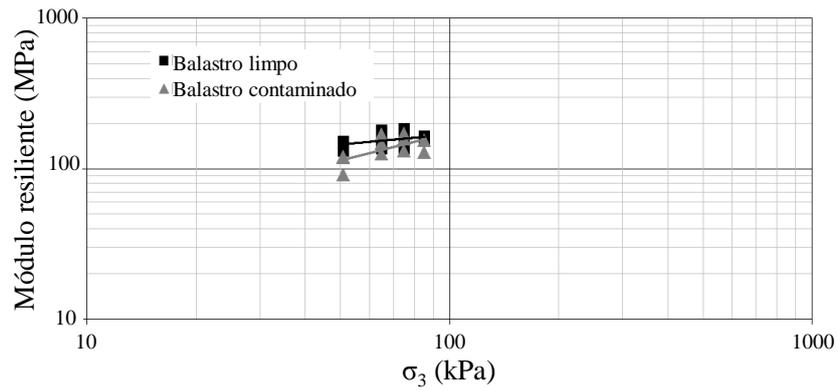
Quadro 8.1 – Valores de tensão aplicados nos ensaios (Costa; *et al.*; 2017)

$\sigma_3$ (kPa)	$\sigma_d$ (kPa)	$\sigma_1/\sigma_3$
85	85	2
	170	3
	255	4
75	75	2
	150	3
	225	4
65	65	2
	130	3
	195	4
51	51	2
	102	3
	153	4

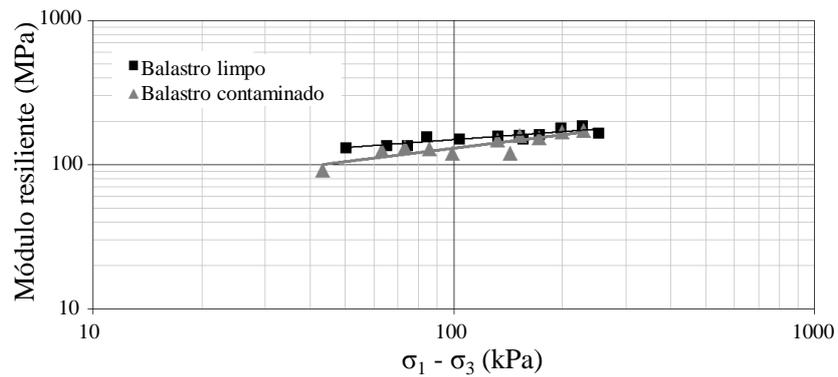
Inicialmente, para cada nível de tensão de confinamento, com o objetivo de estabilizar e densificar o material e minimizar possíveis erros de leitura pelo equipamento, foi realizado um processo de condicionamento dos provetes sob tensões que cumpriam o rácio  $\sigma_1/\sigma_3 = 2$ . Em seguida, foram aplicados 1000 ciclos de carga para todos os valores de tensão apresentados no Quadro 8.1 e foi determinado o respetivo valor do módulo resiliente (AASHTO; 2003), cujos valores são apresentados na Figura 8.3, em função da pressão de confinamento e da tensão deviatória.

Em geral, os valores do módulo de deformabilidade variaram entre cerca de 150 e 180 MPa no material de balastro e entre cerca de 100 a 160 MPa no balastro contaminado. Observou-se uma tendência para um ligeiro aumento do valor do módulo com o aumento da tensão de confinamento (Figura 8.3<sup>a</sup>), como é característico deste tipo de materiais. Parece haver igualmente uma ligeira tendência de aumento do módulo com a tensão deviatória (Figura 8.3<sup>b</sup>). Conclui-se, assim, que embora o balastro limpo tenha apresentado valores superiores do módulo de deformabilidade, quando comparados com os do balastro contaminado, para as mesmas condições de ensaio, as diferenças observadas não foram muito significativas.

Posteriormente, sobre o mesmo provete foi realizado um ensaio para avaliação da deformação permanente, adotando para tal uma tensão de confinamento  $\sigma_3 = 51$  kPa, e uma tensão deviatória,  $\sigma_d = 153$  kPa ( $\sigma_1/\sigma_3 = 4$ ). Na Figura 8.4 apresenta-se a deformação acumulada, quer a que ocorreu durante os 12 000 ciclos de carga aplicados para determinação do comportamento resiliente, quer a que ocorreu posteriormente, durante 150 000 ciclos, decorrente da aplicação desta trajetória de tensões.



a)



b)

Figura 8.3 – Valores do módulo resiliente dos materiais ensaiados em função da: a) pressão de confinamento; b) tensão deviatórica (Costa; *et al.*; 2017)

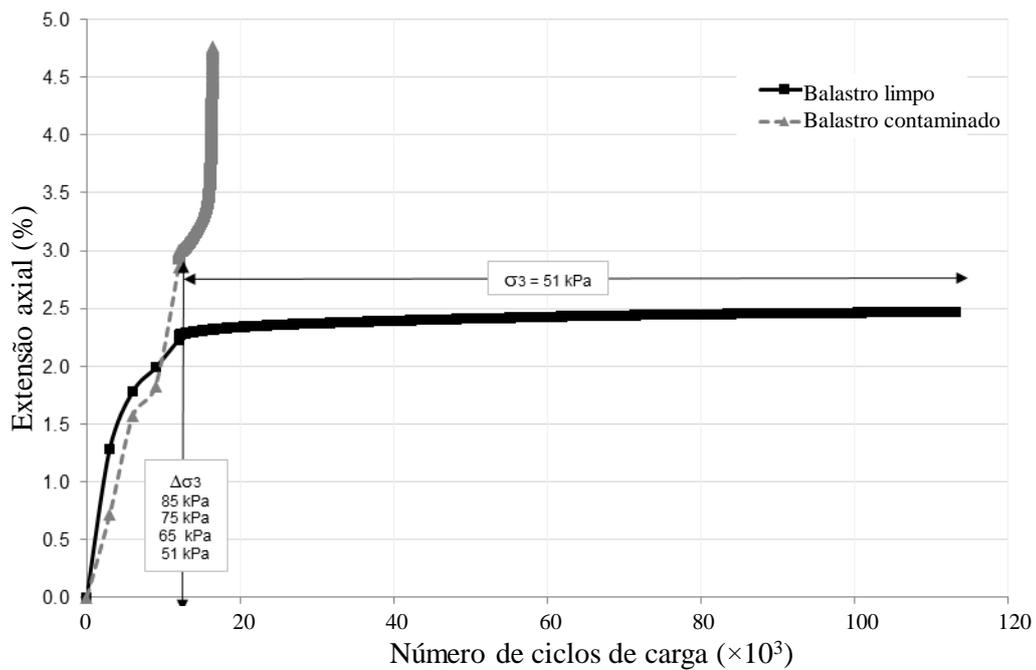


Figura 8.4 – Deformação permanente acumulada (Costa; *et al.*; 2017)

Durante os ciclos de carga aplicada com o objetivo de avaliar a deformação permanente (após os primeiros 12 000), o provete de balastro limpo sofreu apenas cerca de 0,25% de deformação permanente e evidenciou uma tendência para estabilizar próximo do fim do ensaio. O provete de balastro contaminado, apesar de ter evidenciado uma deformação permanente semelhante à do provete de balastro limpo durante a maioria das trajetórias de tensão aplicadas na avaliação do comportamento resiliente, apresentou um comportamento distinto a partir da aplicação da última trajetória, correspondente a  $\sigma_3 = 51$  kPa e  $\sigma_d = 153$  kPa ( $\sigma_1/\sigma_3 = 4$ ), ainda durante os primeiros 1000 ciclos de carga (relacionados com a avaliação do comportamento resiliente). Posteriormente, a deformação axial permanente aumentou rapidamente com o número de ciclos de carga, levando à interrupção do ensaio devido ao valor excessivo que foi atingido (cerca de 4,7%).

Estes resultados evidenciam que o aumento da sollicitação relacionado com o aumento da carga por eixo ou com o aumento da carga dinâmica associada a defeitos geométricos e degradação dos elementos da via – em particular nas situações de baixo confinamento –, pode conduzir a um comportamento desadequado da via-férrea, em particular em linhas antigas em que o balastro se encontra muito contaminado.

Após a conclusão dos ensaios foi possível analisar a granulometria dos provetes, tendo-se concluído, por análise visual, que ocorreu degradação das partículas, nomeadamente por desgaste e fragmentação em ambos os provetes (Figura 8.5).



Figura 8.5 – Degradação das partículas avaliada após os ensaios de deformação permanente: a) balastro limpo; b) balastro contaminado (Costa; *et al.*; 2017)

## 9 | Estudos de caracterização de materiais alternativos para camada de balastro ferroviário

### 9.1 Introdução

O conceito de economia circular tem impulsionado o reaproveitamento de subprodutos industriais em aplicações de engenharia civil. No contexto da construção sustentável, alguns estudos têm mostrando ser promissor o aproveitamento de subprodutos do processo de fabricação do aço na forma de agregados siderúrgicos, principalmente em infraestruturas de transporte. Embora alguns países venham permitindo a utilização de escórias de aciaria na construção de camadas de balastro e da fundação de vias-férreas (AS; 2015; AREMA; 2020; Esmaeili; Yousefian; Ghahroudi; 2020), as aplicações recentes destes materiais na Europa foram basicamente limitadas à construção de camadas da fundação (Morata; Saborido; 2017; Delgado; 2019).

Apesar dos esforços para promover um uso mais amplo da escória de aço como agregado de balastro, estudando diversos aspetos relacionados com o desempenho deste tipo de material (Pires; Junior; Vianna; *et al.*; 2006; Esmaeili; Nouri; Yousefian; 2017; Kuo; Lin; 2017; Koh; Moon; Jung; *et al.*; 2018; Jing; Wang; Wang; *et al.*; 2020), e havendo menção do mesmo na Norma Europeia para balastro ferroviário (CEN; 2013a), a maioria dos países ainda não permite a sua utilização nessa camada, principalmente devido à ausência de quantificação das propriedades do agregado de escória de aço.

No âmbito deste projeto procedeu-se à caracterização e comparação de dois agregados com origem distinta: um agregado granítico do tipo daquele que usualmente é utilizado em camada de balastro; e um agregado siderúrgico resultante da produção de aço em forno de arco elétrico, habitualmente designado por ASIC – agregado siderúrgico inerte para a construção –, o qual tem vindo a ser utilizado em Portugal em diversas obras de infraestruturas de transporte (Gomes Correia; Roque; Reis Ferreira; *et al.*; 2012; Fortunato; *et al.*; 2018; Delgado; *et al.*; 2019d).

Os materiais estudados exibiam, nomeadamente, as propriedades apresentadas no Quadro 9.1. Na Figura 9.1 apresentam-se aspetos de cada um dos materiais estudados.

Quadro 9.1 – Propriedades dos agregados estudados (Delgado; 2019)

	Coeficiente Los Angeles	Coeficiente micro-Deval	Densidade das partículas	Absorção de Água (%)
Agregado granítico	15	13	2,7	0,5
ASIC	23	11	3,2	1,7

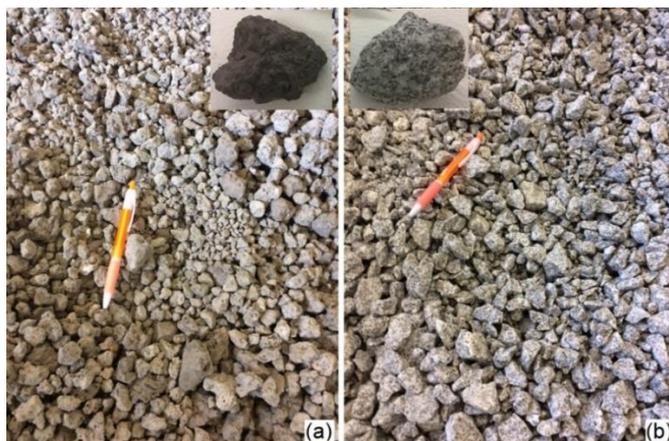


Figura 9.1 – Aspeto dos materiais estudados: a) ASIC; b) agregado de granito (Delgado; *et al.*; 2019c)

## 9.2 Avaliação da resistência e da deformabilidade do meio particulado

Os ensaios tradicionais de caracterização físico-mecânica e os ensaios sobre o meio particulado para determinação de parâmetros de rotura e para avaliação da deformação permanente e do módulo resiliente sob ação de carga triaxial cíclica foram efetuados no LabGeo - Laboratório de Geotecnia da FEUP. Para tal, foram desenvolvidos diversos equipamentos e estabelecidos procedimentos específicos de ensaio (Delgado; 2019).

Atendendo aos equipamentos disponíveis, em particular às dimensões da câmara triaxial (150 mm de diâmetro e 300 mm de altura), foi necessário proceder ao ensaio do material de balastro com escala reduzida (1:2,5), a partir de uma curva de balastro hipotética enquadrada nos fusos granulométricos do balastro padrão N. 24 da AREMA (2015), de acordo com a distribuição granulométrica (a vermelho) apresentada na Figura 9.2. É de notar que este procedimento permite que os ensaios sejam realizados de forma mais rápida e económica quando comparada com o procedimento que utiliza provetes com granulometria original, pois, atendendo à dimensão máxima das partículas, estes terão de ter um diâmetro relativamente elevado (da ordem de 30 a 40 cm) para evitar que os resultados dos ensaios sejam condicionados por uma desadequada relação entre o diâmetro máximo das partículas e o diâmetro do provete. Diversos autores têm seguido este procedimento e obtido resultados satisfatórios (Cambio; Ge; 2007; Sevi; Ge; 2012; Le Pen; Powrie; Zervos; *et al.*; 2013; Aingaran; Pen; Zervos; *et al.*; 2018; Abadi; *et al.*; 2019; Dorador; Villalobos; 2020).

Adotou-se o fuso padrão N. 24 da AREMA por ser frequentemente utilizado no Brasil em vias-férreas destinadas a composições ferroviárias com elevadas carga por eixo (*heavy haul*), e por neste país existirem alguns trechos de via em que foi utilizado agregado siderúrgico na construção da camada de balastro (Delgado; *et al.*; 2019d).

Foi estabelecido um vasto programa de ensaios que incluiu, nomeadamente, ensaios triaxiais monotónicos, ensaios triaxiais de carga cíclica com grande número de aplicações de carga para

avaliação da deformação permanente sob distintas trajetórias de tensão e ensaios de carga cíclica com diversas trajetórias de tensão para avaliação do módulo resiliente.

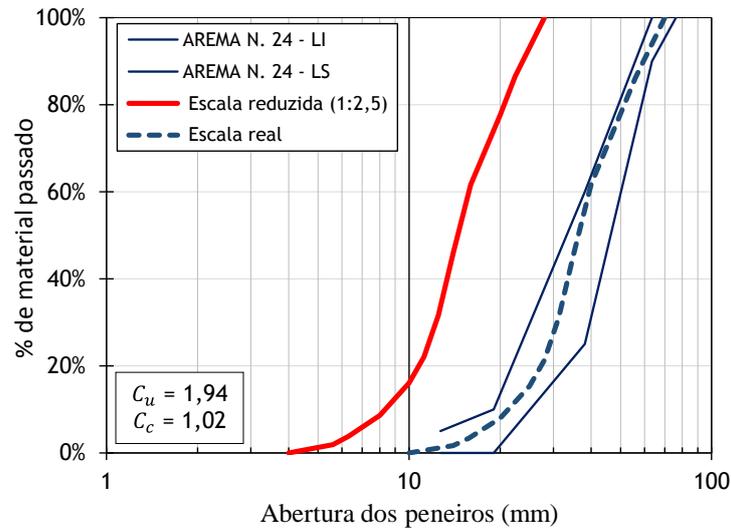


Figura 9.2 – Curvas granulométricas dos materiais ensaiados (Delgado; *et al.*; 2019c)

Os ensaios triaxiais monotónicos foram conduzidos até à rotura, para três níveis de pressão de confinamento, sob uma taxa de deformação de 0,028 mm/min. Na Figura 9.3 apresentam-se aspetos da moldagem, instrumentação e ensaio dos provetes de balastro em escala reduzida.

Foi aplicado a todos os provetes, antes de ensaio, um processo de compactação dinâmica que não é usual, e que compreendeu 10 000 ciclos de carregamento, com uma tensão deviatória de 340 kPa e uma pressão de confinamento constante de 70 kPa. Este procedimento teve como objetivo obter provetes com índices de vazios iniciais variando entre 0,70 e 0,80, que são valores típicos para camadas de balastro após a compactação, em vias-férreas novas antes da passagem do tráfego (Suiker; 2002; Indraratna; Salim; Rujikiatkamjorn; 2011).

Nos provetes sujeitos a ensaios triaxiais cíclicos, para determinação da deformação permanente e do módulo resiliente, foram instalados 3 LVDT entre as partes superior e inferior dos provetes (instrumentação interna da câmara triaxial), desfasados de 120°, para medição das deformações axiais.

No Quadro 9.2 e na Figura 9.4 apresentam-se as condições experimentais e os resultados dos ensaios triaxiais monotónicos. Da análise dos resultados é possível concluir que a resistência do ASIC é superior à do agregado de granito, tanto no pico quanto no estado crítico, em particular para pressões de confinamento mais elevadas.

No que se refere à deformação permanente acumulada dos agregados sob carga cíclica, ela depende, nomeadamente, do número de aplicações de carga e da razão  $n$ , entre a tensão efetiva deviatória cíclica,  $q'_{cyc}$ , e a tensão efetiva deviatória na rotura,  $q'_f$ , obtida em ensaios monotónicos para trajetórias de tensões semelhantes, sendo  $q' = \sigma'_1 - \sigma'_3$ , em que  $\sigma'_1$  e  $\sigma'_3$  são, respetivamente, a tensão efetiva principal máxima e mínima (pressão de confinamento no ensaio triaxial).

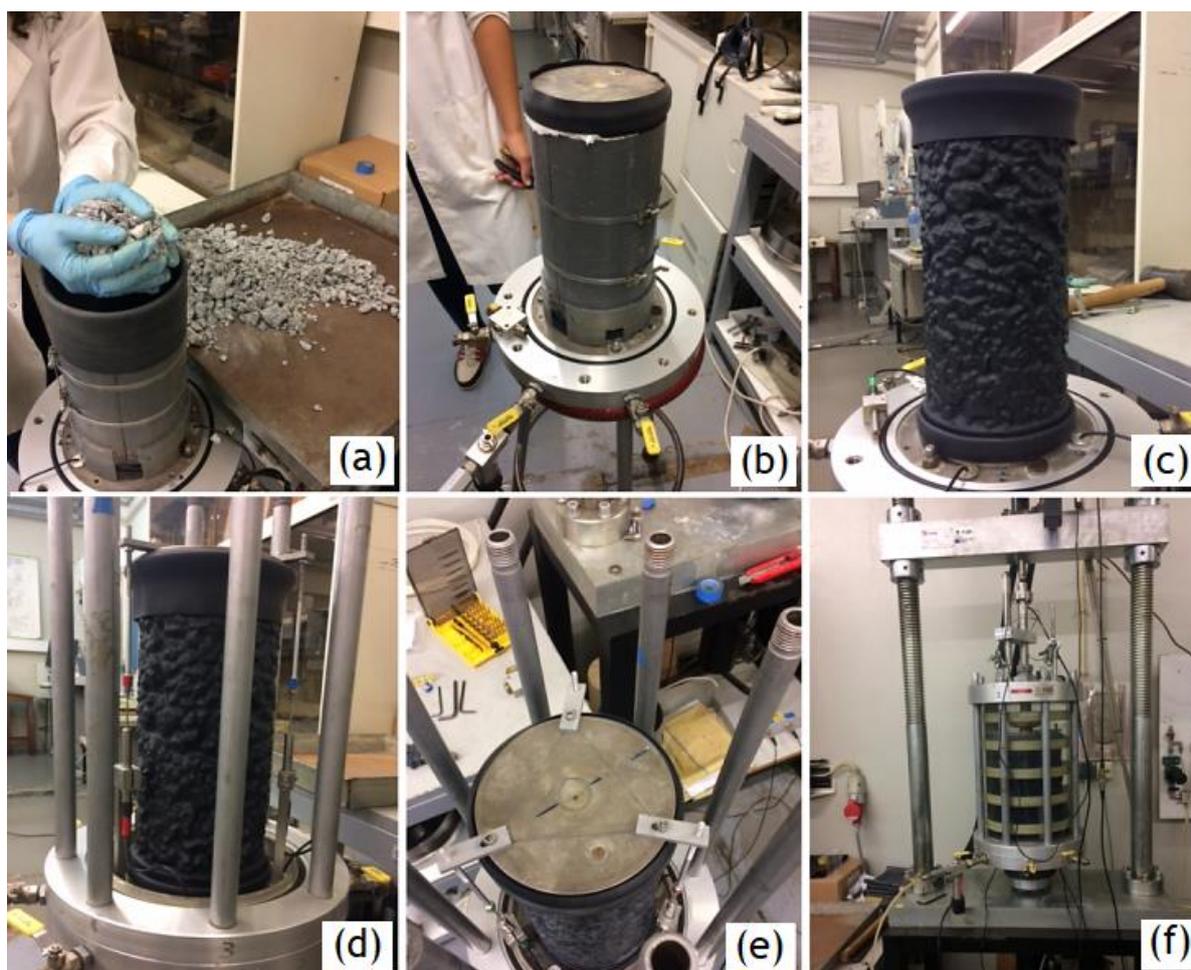


Figura 9.3 – Sequência para moldagem dos provetes de balastro em escala reduzida no âmbito dos ensaios triaxiais cíclicos: (a) colocação do material; (b) vedação do molde com a colocação do *top-cap* e aplicação do vácuo; (c) provete; (d) instalação dos LVDT axiais; (e) detalhe da fixação dos LVDT no *top-cap*; e (f) provete na câmara triaxial para início do condicionamento/compactação (Delgado; *et al.*; 2019c)

Quadro 9.2 – Condições experimentais e parâmetros mecânicos obtidos dos ensaios triaxiais monotônicos

Material	Ensaio	$M$	$\Phi'_{cv}$ (°)	$\Phi'_f$ (°)	$\psi$ (°)	$e_0$	$q_f$ (kPa)	$\sigma'_3$ (kPa)
ASIC	TM1-A			51,3	3,2	0,78	461	65
	TM2-A	1,98	48,1	48,8	0,7	0,79	517	85
	TM3-A			58,5	10,4	0,79	232	20
Granito	TM1-G			48,8	2,1	0,75	396	65
	TM2-G	1,91	46,7	46,9	0,2	0,73	434	85
	TM3-G			59,2	12,5	0,74	244	20

$M = (p'/q)_{cv} = 6 \cdot \text{sen}\Phi'_f / (3 - \text{sen}\Phi'_f)$ : parâmetro de estado crítico;  $\Phi'_{cv}$ : ângulo de atrito no estado crítico;  $\Phi'_f$ : ângulo de resistência ao corte;  $\psi$ : Ângulo de dilatância;  $e_0$ : Índice de vazios inicial;  $q_f$ : tensão deviatória na rotura (resistência de pico);  $\sigma'_3$ : tensão de confinamento efetiva.

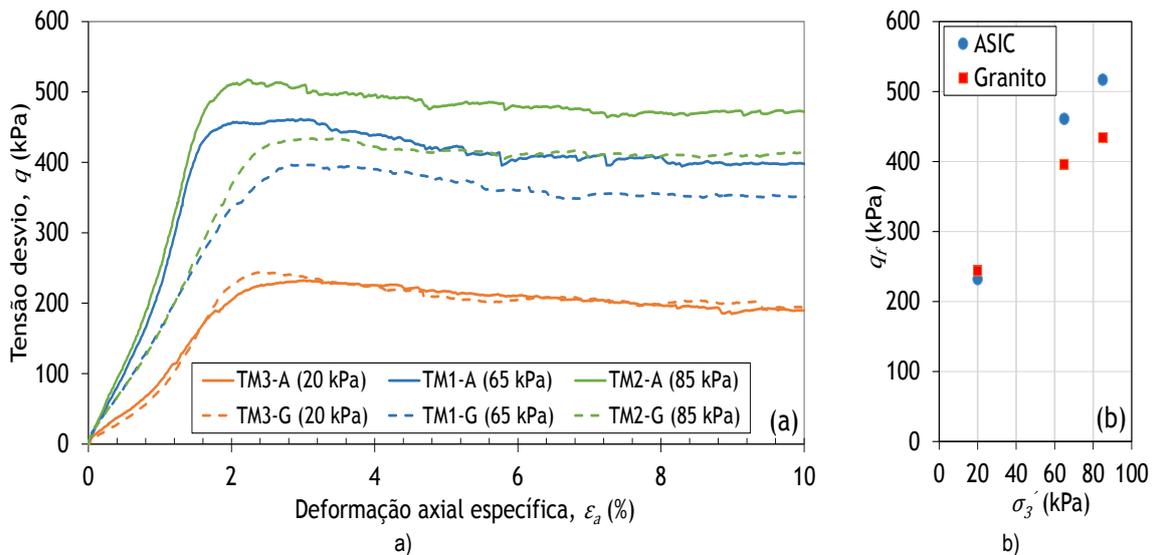


Figura 9.4 – Resistência ao corte em ensaio triaxial do ASIC e do agregado de granito: a) curvas tensão-deformação; b) tensão deviatórica na rotura em função da tensão de confinamento efetiva

Nos ensaios de deformação permanente conduzidos no âmbito deste estudo foram considerados níveis de tensão que traduzem dois valores de carga relativamente elevados, que podem ser induzidos por comboios de mercadorias com elevada carga por eixo (*heavy haul*). O primeiro (Nível I) pretendeu representar a uma carga por eixo de 32,5 toneladas, atualmente utilizada em vias-férreas de transporte pesado no Brasil; o segundo (Nível II) pretendeu representar uma carga por eixo de 40,0 toneladas, que corresponde a um valor que está atualmente a ser proposto por alguns operadores ferroviários no Brasil (Delgado; 2019). Ao adotar estes valores, para além de se pretender representar casos práticos, pretendeu-se também que os materiais fossem ensaiados sob condições relativamente severas para que fosse, eventualmente, mais fácil distinguir as suas propriedades mecânicas. O Nível I e o Nível II de carregamento traduzem valores  $\sigma'_1/\sigma'_3$  de 5 e 6, respetivamente, com pressão de confinamento constante de 70 kPa. Os ensaios seguiram o protocolo B da norma Europeia EN 13286-7 (CEN; 2004), com uma frequência de carga de 2 Hz. No Quadro 9.3 apresentam-se as designações e os parâmetros estabelecidos para os provetes dos ensaios de deformação permanente. Ambas as trajetórias de tensão impostas estão abaixo das que provocam a rotura dos materiais, mas correspondem a níveis bastante elevados de tensão. No caso do ASIC, a tensão deviatórica cíclica de 280 kPa (Nível I) corresponde a 59% da tensão de rotura do material e a tensão de 350 kPa (Nível II) corresponde a 74% dessa tensão. No caso do agregado granítico, os mesmos valores de tensão correspondem, respetivamente a 68% e 85% da tensão de rotura.

Quadro 9.3 – Parâmetros dos provetes dos ensaios de deformação permanente

Parâmetros	Granito				ASIC			
	PD LS-G	PD I-G	PD II-G	PD II_2-G	PD LS-I	PD I-I	PD II-I	PD II_2-I
Nº de ciclos	$\frac{5 \times 10^5}{5 \times 10^5}$	$10^6$	$10^6$	$2 \times 10^6$	$\frac{5 \times 10^5}{5 \times 10^5}$	$10^6$	$10^6$	$2 \times 10^6$
$e_0$	0,70	0,75	0,70	0,76	0,74	0,79	0,78	0,78
$\gamma_0(kN/m^3)$	15,9	15,4	15,9	15,3	18,6	17,9	18,1	18,1
$q_{cyc}(kPa)$	$\frac{280}{350}$	280	350	350	$\frac{280}{350}$	280	350	350
$n$	$\frac{0,68}{0,85}$	0,68	0,85	0,85	$\frac{0,59}{0,74}$	0,59	0,74	0,74
$\sigma'_1/\sigma'_3$	$\frac{5}{6}$	5	6	6	$\frac{5}{6}$	5	6	6

PD – deformação permanente; LS – 2 estágios de carga; I – Nível I; II – Nível II; G – Granito; I – ASIC;  $e_0$  – índice de vazios inicial;  $\gamma_0$  – peso volúmico inicial

Na Figura 9.5 apresentam-se os resultados da deformação vertical permanente acumulada em cada um dos ensaios, ao longo dos ciclos de carga. A representação dos resultados em termos de taxa de deformação em função da deformação (Figura 9.6) permite concluir que para níveis de tensão mais baixos (Nível I) os materiais apresentam um comportamento plástico semelhante, evidenciando um comportamento de estabilização de deformações (*shakedown*) para um número de ciclos de carga relativamente reduzido. Para o nível de tensão mais elevado (Nível II), parece haver uma tendência de estabilização mais rápida no ASIC, para um número relativamente elevado de ciclos, quando comparado com agregado granítico, o qual parece manter um comportamento relativamente plástico. Os diferentes comportamentos estão provavelmente relacionados com o maior valor da razão  $n$  a que o granito está sujeito neste nível de tensões, por ter uma menor resistência ao corte.

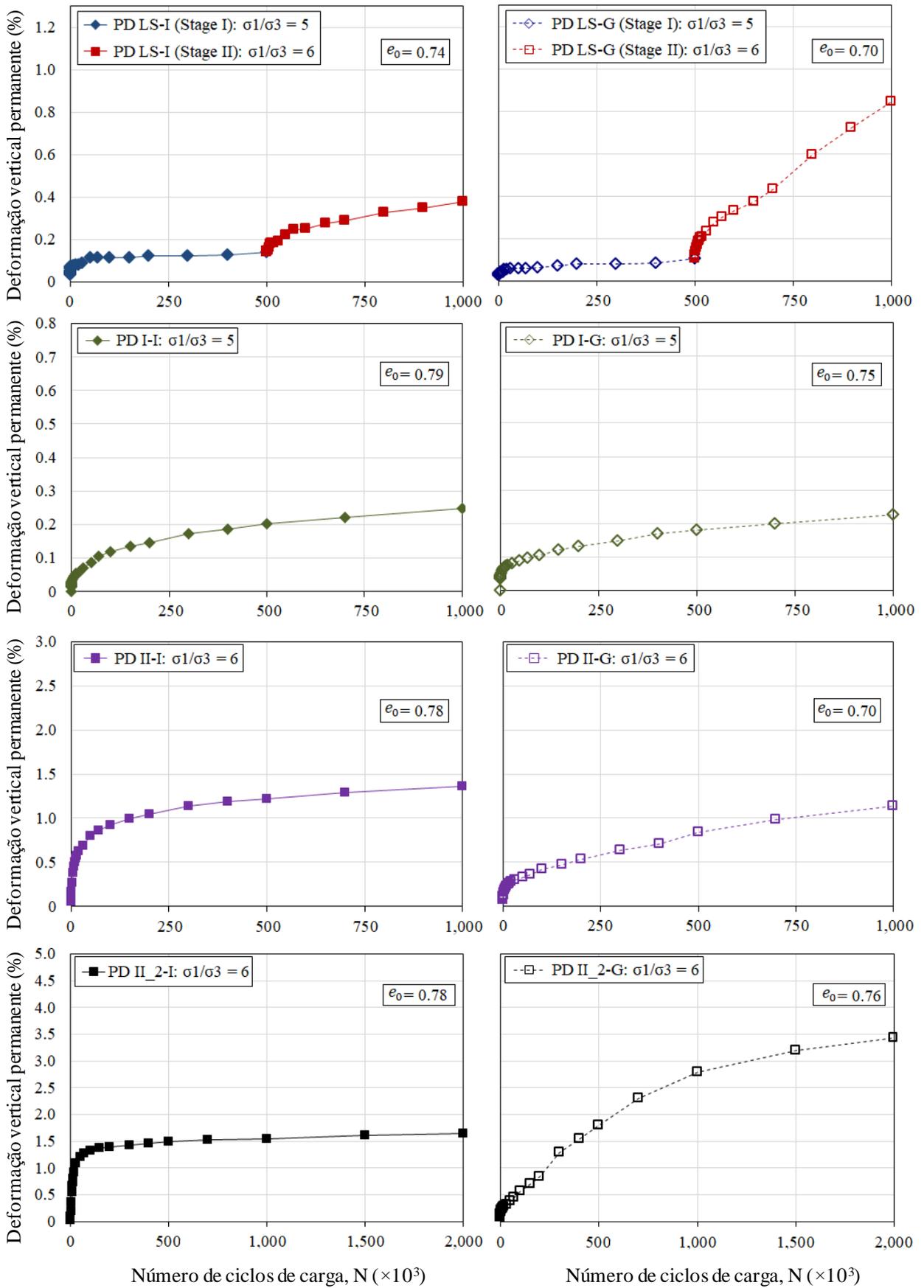


Figura 9.5 – Deformação vertical permanente (Delgado; et al.; 2021b)

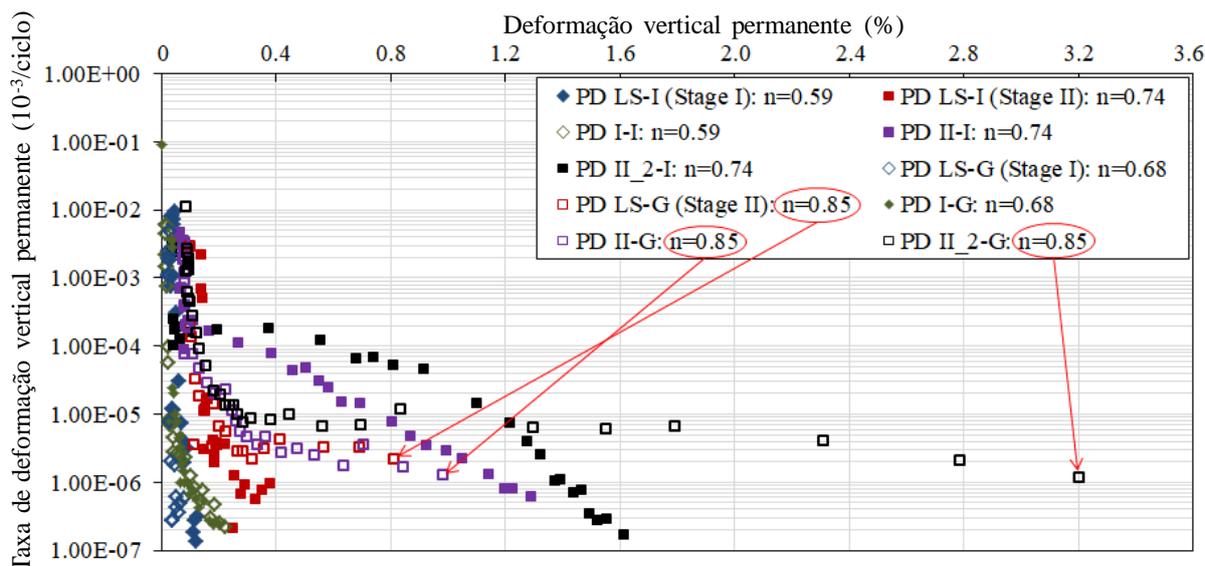


Figura 9.6 – Deformação vertical permanente (Delgado; et al.; 2021b)

Após cada ensaio foi avaliado o grau de fracturação das partículas,  $B_g$  (Marsal; 1967). Este índice permite avaliar a quebra das partículas através da análise da alteração da curva granulométrica dos agregados decorrente dos ensaios, nomeadamente calculando a soma dos valores positivos da diferença da percentagem em peso retida em cada peneiro antes e após os testes. De acordo com o apresentado na Figura 9.7, o aumento da tensão cíclica conduz ao aumento da fracturação em ambos os materiais. No entanto, o grau de fracturação das partículas do agregado granítico é superior ao das partículas de ASIC, para o mesmo nível de tensão de ensaio.

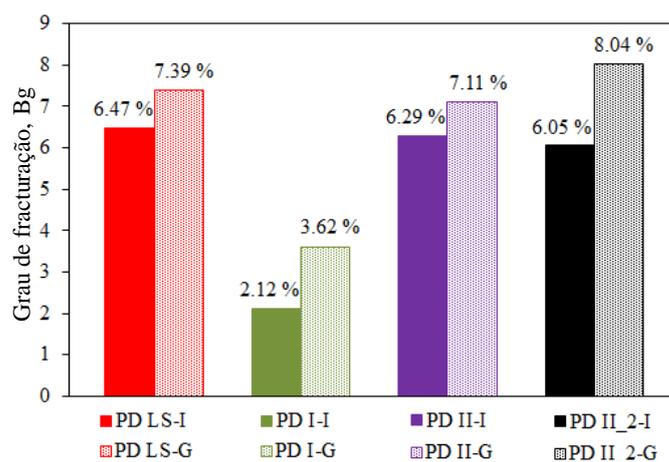


Figura 9.7 – Grau de fracturação ( $B_g$ ) para o ASIC e para o agregado de granito, após ensaios de deformação permanente de longo prazo (Delgado; et al.; 2021b)

No que se refere ao comportamento resiliente, apresenta-se na Figura 9.8 os valores do módulo de deformabilidade obtidos antes e depois dos ensaios de deformação permanente. É notória a variação do módulo com a pressão de confinamento. Os valores do módulo obtidos nos provetes de ASIC são superiores aos obtidos nos de agregado granítico. Além disso, no ASIC ocorreu um acréscimo mais significativo desse parâmetro, para iguais trajetórias de tensão, após os ensaios de deformação permanente.

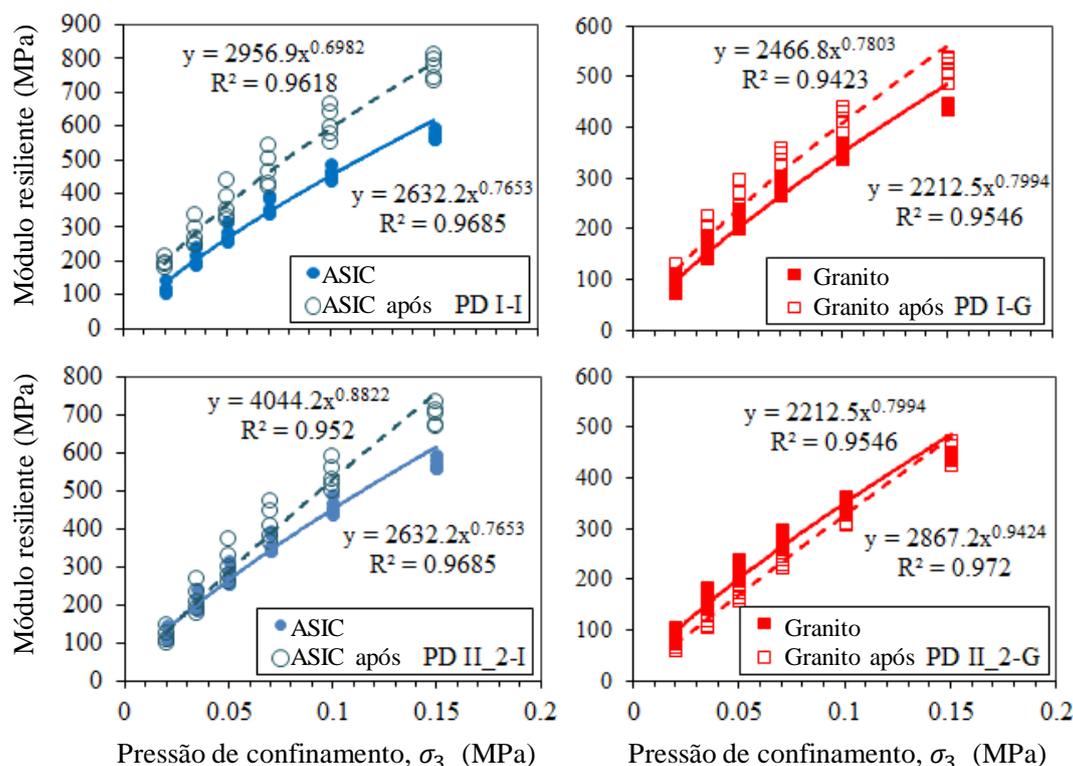


Figura 9.8 – Módulo resiliente dos materiais estudados, antes e após os ensaios de deformação permanente (Delgado; *et al.*; 2021b)

### 9.3 Avaliação da resistência das partículas à rotura por esmagamento

A origem das partículas de balastro normalmente influencia a qualidade da matriz formada pela ligação entre os minerais constituintes da rocha, o que acaba por condicionar fatores como a densidade das partículas, a porosidade e a capacidade de absorção de água, que irão, consequentemente, influenciar a resistência da partícula ao desgaste, à fragmentação e à rotura, e a sua suscetibilidade à alteração por agentes químicos e atmosféricos.

Apesar de se poder considerar que os ensaios de fragmentação e de desgaste usualmente considerados na avaliação dos materiais para balastro podem traduzir globalmente a resistência mecânica das partículas, objetivamente a resistência à rotura normalmente não é uma propriedade requerida na avaliação do material para balastro. Ainda assim, este parâmetro é considerado por alguns autores como o aspeto que mais influencia a degradação da camada de balastro e, consequentemente, o assentamento permanente e a deformação lateral da via.

A rotura de partículas aproximadamente esféricas sob tensão de compressão dá-se por tração, podendo ser indiretamente medida por compressão entre placas. No caso de uma partícula de diâmetro  $d$  e sob uma força vertical  $F$ , a resistência à rotura das partículas é dada por  $\sigma_f = F_f/d^2$ .

Na Figura 9.9 apresenta-se o equipamento de ensaio (prensa de deformação controlada) e na Figura 9.10 são apresentados os resultados de 60 ensaios de rotura de partículas individuais para cada um dos agregados estudados. As partículas, com dimensões entre 4 e 55 mm, novas e ainda não submetidas a nenhum ensaio anterior, foram escolhidas aleatoriamente a partir dos mesmos materiais utilizados nos ensaios triaxiais dos estudos referidos anteriormente. No entanto, nos ensaios de esmagamento procedeu-se também à rotura de partículas com diâmetros nominais superiores aos das partículas utilizadas nos estudos anteriores, com o objetivo de ensaiar partículas representativas das que existem normalmente na camada de balastro.

A resistência ao esmagamento das partículas de ASIC é superior à do granito. Para além disso, à medida que se reduziu o tamanho das partículas ensaiadas, as partículas de ASIC apresentaram um pronunciado ganho de resistência comparativamente às de granito, cujo incremento na resistência foi menor.

Este aspeto ajuda a explicar a menor quebra e desgaste superficial apresentados pelas partículas dos provetes de ASIC, quebra essa quantificada por meio do índice  $Bg$  após os ensaios triaxiais de deformação permanente de longo prazo, como referido anteriormente, em particular porque esses provetes foram moldados com partículas de tamanho variando entre 4 e 28 mm. Pode-se inferir que a maior resistência à rotura das partículas provavelmente compensou a tensão superior desenvolvida nos contactos entre partículas em função da maior angularidade das partículas de ASIC, conforme se discutirá adiante, não gerando a quebra desses grãos mais angulosos. Nestas condições, a elevada angularidade, verificada para os grãos de ASIC, parece ser favorável para o melhor comportamento mecânico observado no agregado deste material.

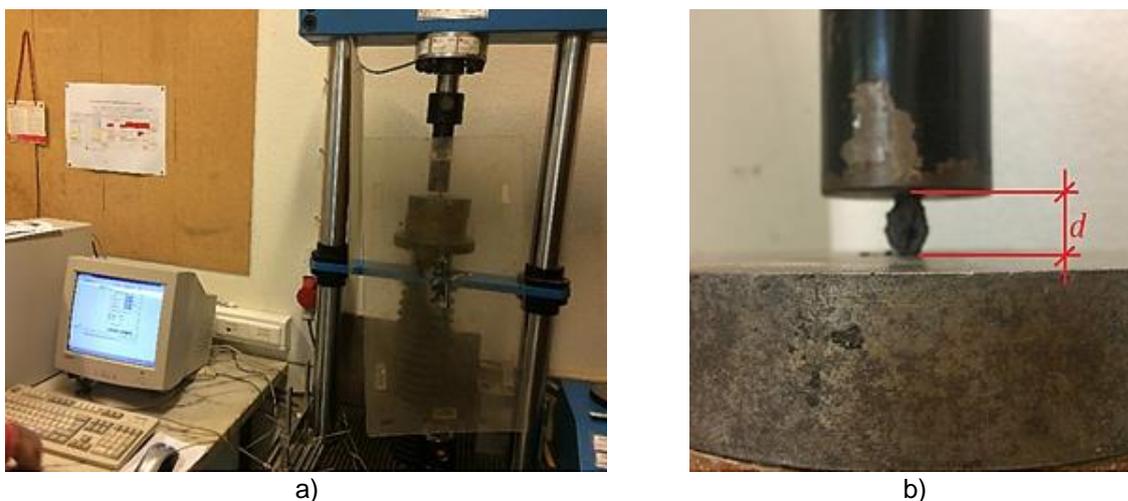


Figura 9.9 – Ensaio de resistência ao esmagamento de partículas: a) equipamento utilizado (LNEC); b) detalhe de um dos ensaios realizados (Delgado; *et al.*; 2021b)

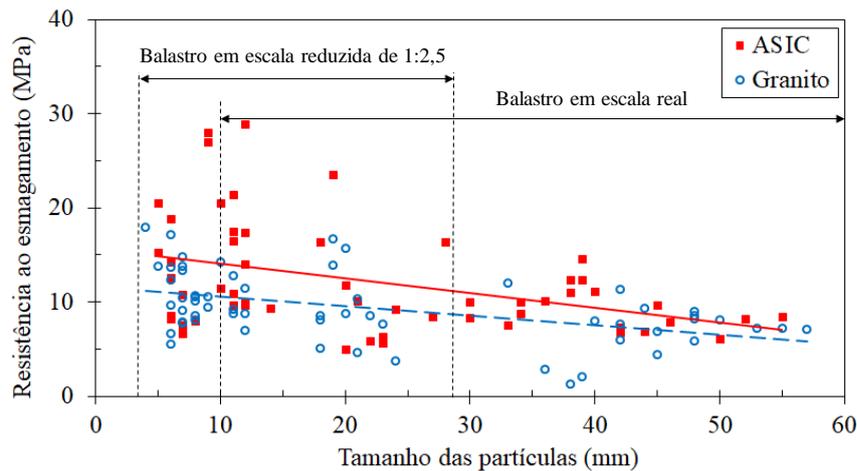


Figura 9.10 – Resistência à rotura de partículas individuais de granito e de ASIC em função do diâmetro médio (Delgado; *et al.*; 2021b)

## 9.4 Avaliação da morfologia das partículas recorrendo a técnicas de caracterização automatizada

### 9.4.1 Análise da morfologia com recurso a técnicas bidimensionais de processamento de imagens

No âmbito deste projeto realizaram-se estudos onde se analisaram e desenvolveram diversos métodos para avaliar a morfologia das partículas e a respetiva evolução, quando estas são submetidas a ensaios de desgaste.

Num desses estudos, em colaboração com a Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) foi possível recorrer ao equipamento AIMS (do inglês, *Aggregate Image Measurement System*) (Gates; *et al.*; 2011), apresentado na Figura 9.11, para analisar a morfologia de partículas de agregados. Este equipamento utiliza um sistema que consiste num microscópio e uma câmara com dois diferentes tipos de iluminação para capturar imagens, com diferentes resoluções, de partículas previamente depositadas num compartimento de uma bandeja circular. O programa de captura de imagens executa três ciclos de medição de maneira assíncrona sobre o perímetro das partículas.

Foram ensaiadas partículas dos agregados referidos anteriormente - agregado granítico usualmente utilizado em balastro ferroviário e ASIC (Figura 9.12). Os diâmetros nominais das partículas ensaiadas foram definidos a partir de pontos distintos da curva granulométrica dos agregados de forma a serem representativos do material e em consonância com os tamanhos de partículas possíveis de serem ensaiados no AIMS.

Foi possível quantificar a esfericidade, a textura e a angularidade de partículas de ambos os agregados, com diâmetros nominais de 6,3, 11,2 e 22,4 mm. A percentagem acumulada de partículas ensaiadas com sucesso (pelo menos 50 de cada dimensão) é apresentada na Figura 9.13. Os valores da esfericidade e da textura foram similares em ambos os materiais. Ao contrário, a angularidade foi baixa no granito e baixa/moderada a elevada no ASIC. Esta característica pode ajudar a explicar o melhor

desempenho do meio particulado de ASIC quando comparado com o do granito, para condições de carga semelhantes.

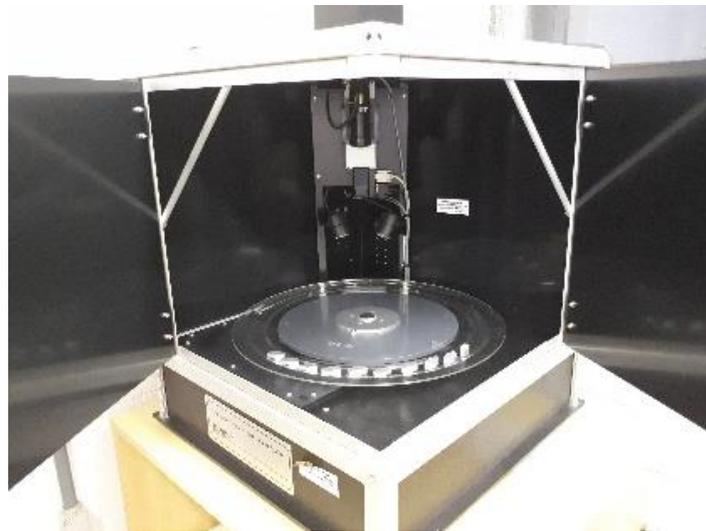


Figura 9.11 – Equipamento AIMS da UFRJ (Delgado; *et al.*; 2019e)

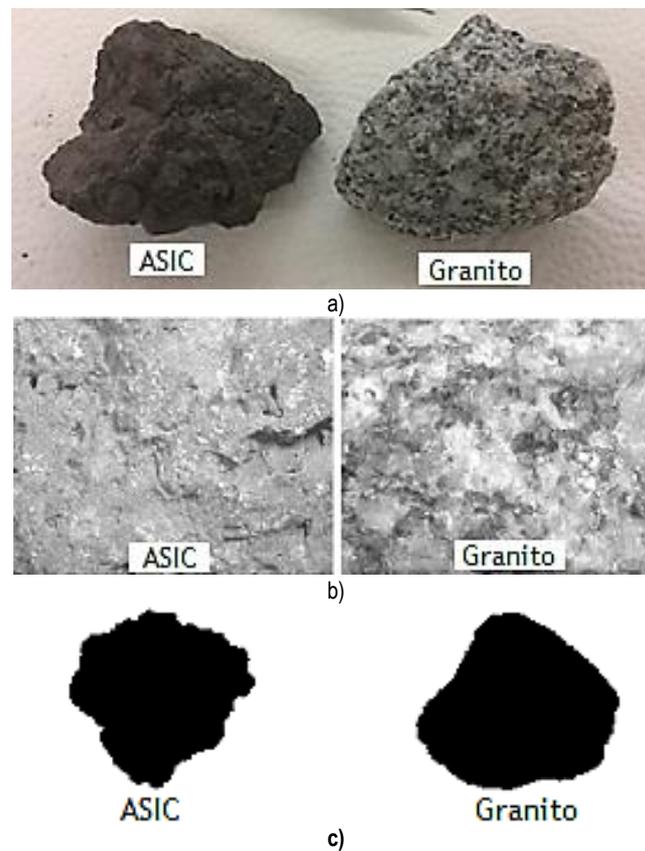
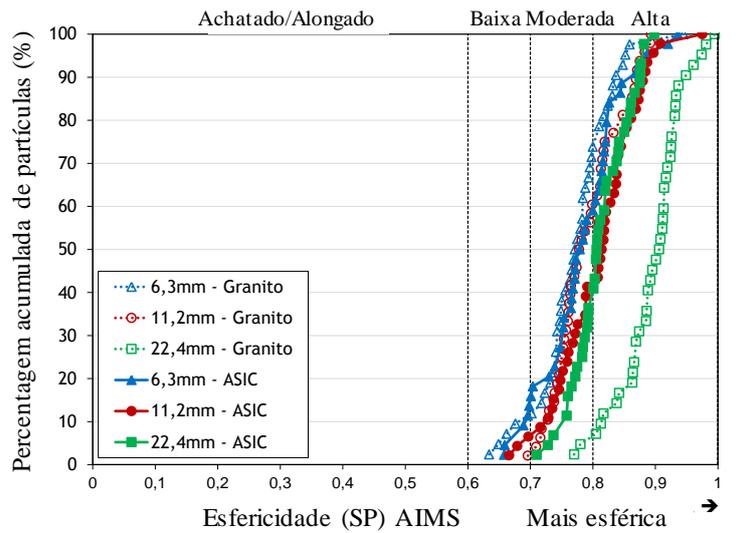
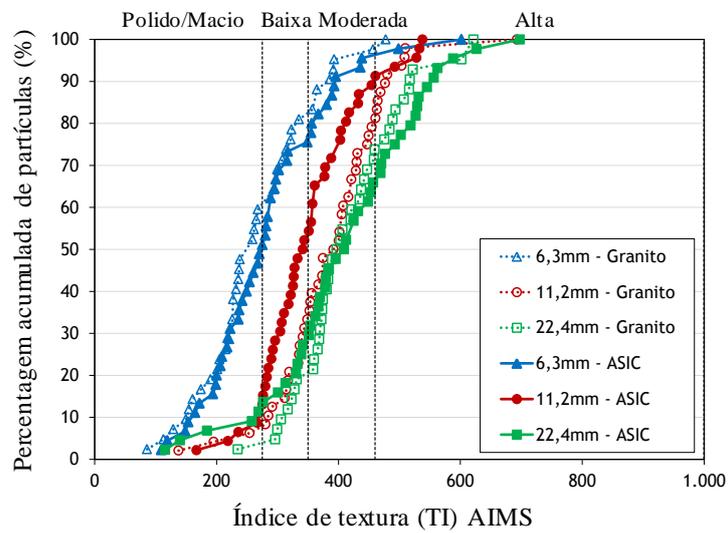


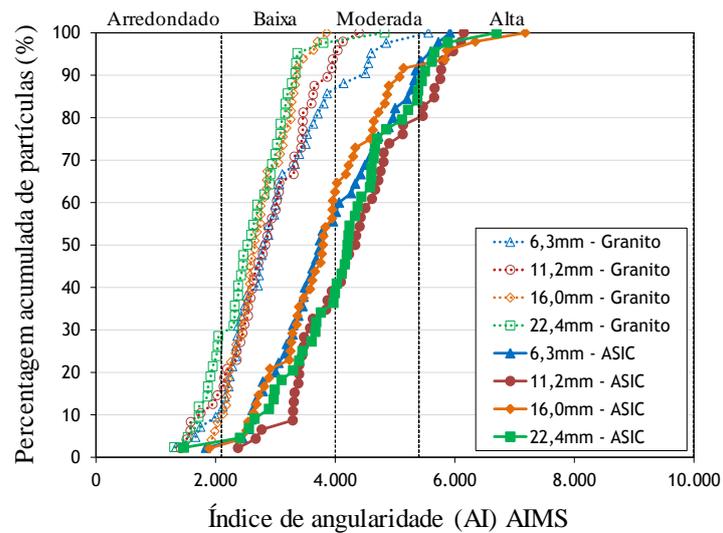
Figura 9.12 – Partículas analisadas (exemplos com diâmetro nominal de 22,4 mm): a) imagens macroscópicas; b) imagens microscópicas da superfície (microscópio do AIMS); c) imagens bidimensionais (fotos AIMS) (Delgado; Viana da Fonseca; Fortunato; *et al.*; 2019b)



a)



b)



c)

Figura 9.13 – Classificação das partículas de ASIC e granito com recurso ao AIMS: a) esfericidade; b) textura superficial; c) angularidade (Delgado; *et al.*; 2019e)

## 9.4.2 Análise tridimensional da morfologia e respetiva evolução com recurso à fotogrametria e ensaios de desgaste

### 9.4.2.1 Características físicas das partículas e ensaios de desgaste

Num outro estudo (Paixão; Fortunato; 2021), recorrendo à produção de modelos digitais de partículas através de fotogrametria, foi também possível comparar a morfologia e respetiva evolução de partículas de granito e de ASIC. Seguindo o procedimento levado a cabo no estudo referido em 3.3, estudaram-se conjuntos de 30 partículas de cada material (no caso das partículas graníticas, algumas delas foram as utilizadas nesse estudo) (Figura 9.14). É de notar que devido ao faseamento implementado no estudo das partículas dos dois materiais – produção de modelos digitais antes de iniciar o ensaio de micro-Deval, paragem do ensaio após 2000 revoluções e execução de novos modelos digitais, reinício do ensaio e paragem às 14 000 revoluções, ao que se seguiu nova construção de modelos digitais –, foram construídos um total 180 modelos digitais ( $2 \times 3 \times 30$ ), com uma média de cerca de 290 000 vértices e 580 000 faces, num total de cerca de 20 mil imagens captadas. Para elucidar sobre o detalhe das varreduras obtidas com este método, utilizando o equipamento descrito, em média, a densidade das malhas foi de cerca de 38 vértices/mm<sup>2</sup>.

Na Figura 9.15 apresentam-se histogramas de distribuição das principais características físicas das partículas. Os valores do coeficiente de micro-Deval obtidos para as partículas de granito e de ASIC foram de 3 e 6, respetivamente.

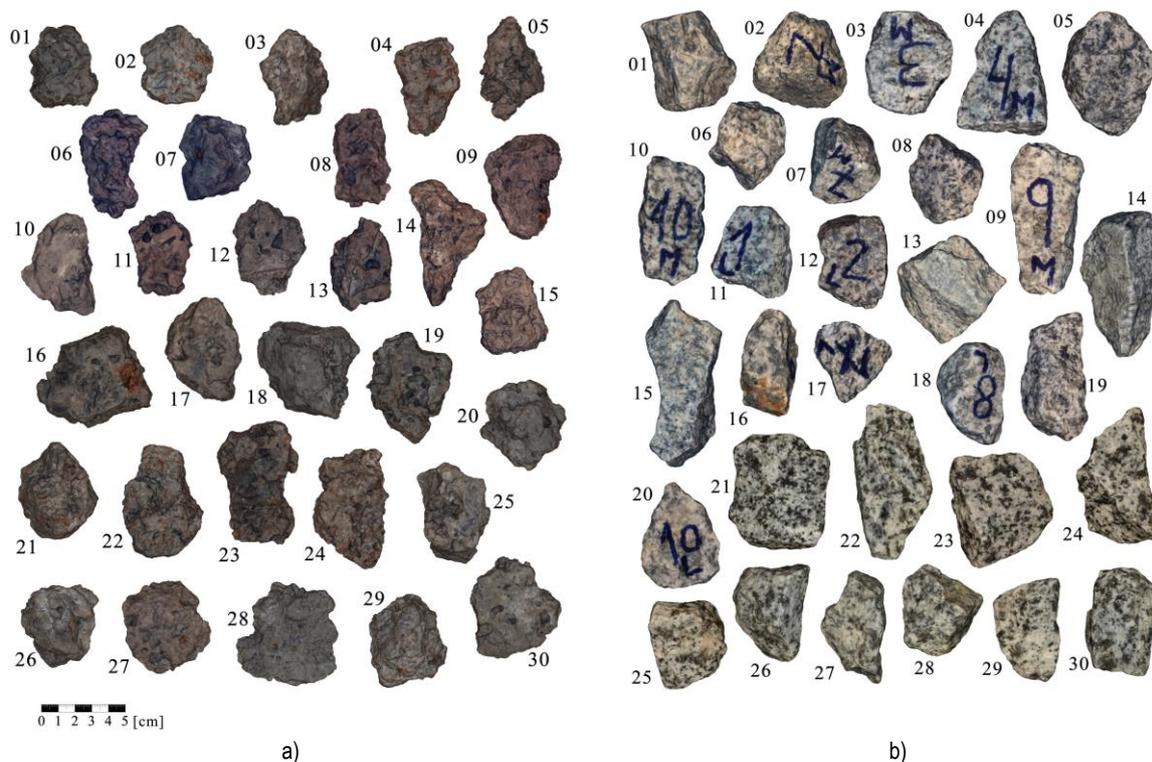


Figura 9.14 – Partículas estudadas: a) ASIC; b) Granito (Paixão; Fortunato; 2021)

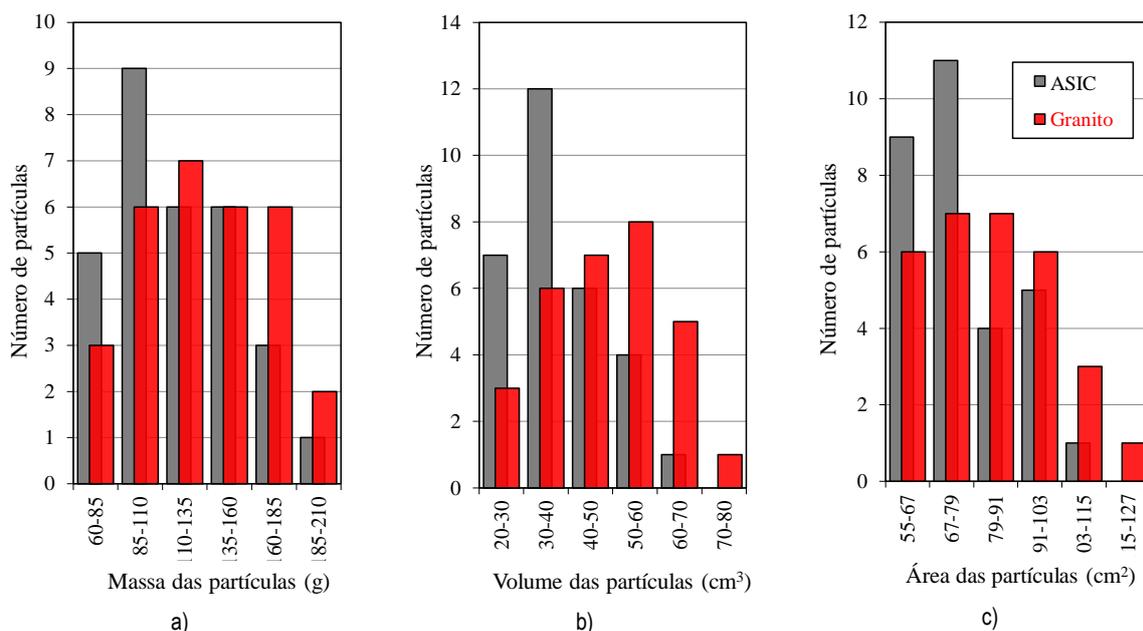


Figura 9.15 – Histogramas de massa (a), volume (b) e área (c) das partículas estudadas (Paixão; Fortunato; 2021)

O valor do coeficiente micro-Deval seco,  $M_{DS,RB}$ , foi 6 para o ASIC e 3 para o granito, como se constata pela análise dos valores finais das curvas apresentadas na Figura 9.16 (% de massa produzida durante o ensaio que passa no peneiro de 1,6 mm). Essa diferença pode ser explicada pelo facto de as partículas de escória terem uma geometria mais irregular e, portanto, maior área de superfície e mais arestas e cantos expostos ao desgaste e à fragmentação, mas também porque a densidade do material de escória é cerca de 1,2 vezes superior, resultando em maiores forças de impacto entre as partículas e com as paredes do tambor do equipamento de ensaio. Outra possibilidade seria as partículas de ASIC terem menor resistência, mas este não parece ser o caso considerando os resultados apresentados anteriormente na secção 9.3 e os que adiante se apresentarão. Ambos os materiais apresentam maiores taxas de desgaste durante as primeiras 2000 rotações, em comparação com a evolução do desgaste na etapa seguinte, até às 14 000 rotações, o que está de acordo com os resultados de outros estudos (Deiros; *et al.*; 2019).

Os valores do coeficiente micro-Deval do balastro ferroviário,  $M_{DE,RB}$  (ensaio padrão com água), obtidos foram de 11 para o ASIC e 7 para o granito, os quais vão ao encontro de resultados de trabalhos anteriores e denotam que estes agregados cumprem os requisitos de desgaste para balastro ferroviário em alguns países (Delgado; *et al.*; 2019c). De acordo com o esperado, os valores de  $M_{DE,RB}$  foram superiores aos de  $M_{DS,RB}$  devido ao efeito negativo da presença de água neste processo de desgaste.

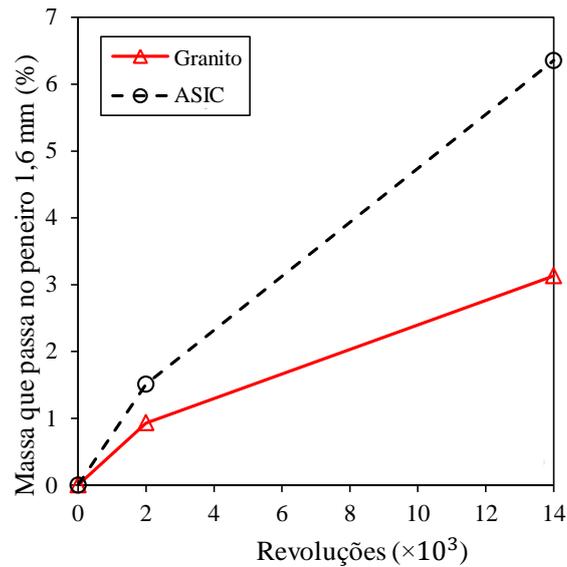


Figura 9.16 – Evolução da produção de massa passada no peneiro 1,6 mm (em % da massa do provete) (Paixão; Fortunato; 2021)

Para obter mais informações sobre o desenvolvimento do desgaste das partículas, analisou-se a evolução da massa e do volume das partículas selecionadas. A Figura 9.17 mostra a mediana e os percentis de 5% e 95% da perda de massa das partículas (medida) e do volume (estimado a partir das malhas 3D reconstruídas). É de notar a evolução semelhante na perda de massa e de volume das partículas em comparação com a produção de partículas de menores dimensões (<1,6 mm) apresentada na Figura 9.16. No entanto, os valores da mediana da perda de massa e de volume das partículas de ASIC são bastante próximos dos das partículas de granito. Além disso, nota-se que as taxas de perda de massa e de volume das partículas de granito são maiores nas primeiras 2000 revoluções, quando comparadas com as das partículas de ASIC; o inverso é observado na segunda etapa do ensaio. Estas tendências diferem um pouco das dos resultados da macroanálise da perda de massa observada na Figura 9.16, o que poderá ser explicado pelo facto de a norma do ensaio micro-Deval estabelecer apenas a contabilização da produção de partículas que passam no peneiro 1,6 mm, não considerando a produção de partículas de maior dimensão. Além disso, as características dos minerais e o maior tamanho de grão do granito também podem ter influenciado os resultados.

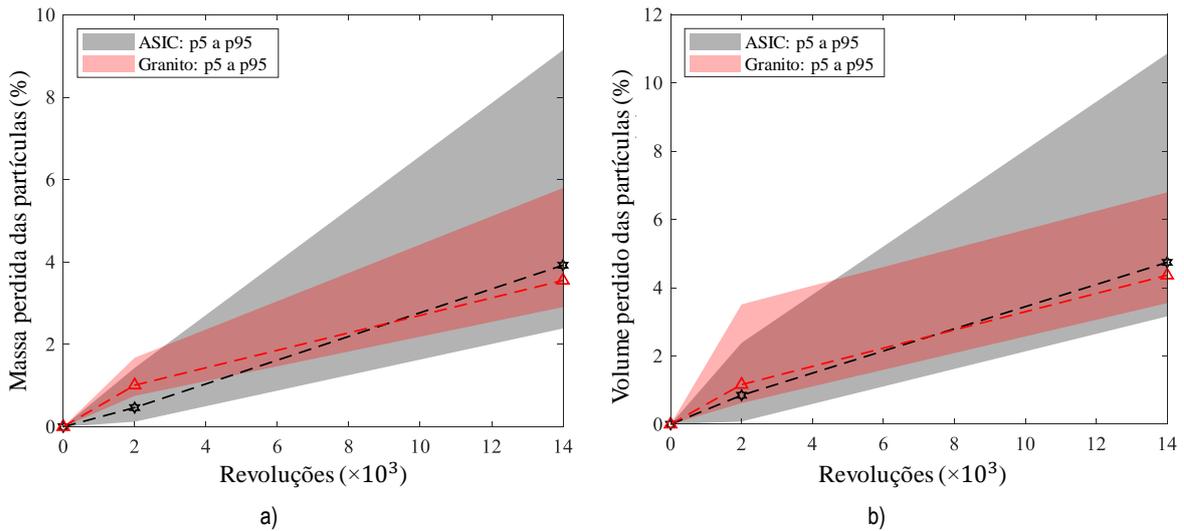


Figura 9.17 – Perda de massa (real) e de volume (estimado a partir das malhas 3D) das partículas no ensaio de micro-Deval (Paixão; Fortunato; 2021)

#### 9.4.2.2 Caracterização tradicional da morfologia das partículas

Para classificar as partículas de acordo com a sua morfologia começou-se por utilizar a caracterização tradicional, nomeadamente recorrendo ao diagrama modificado de Zingg (Figura 9.18), semelhante ao que se apresentou na Figura 3.21.

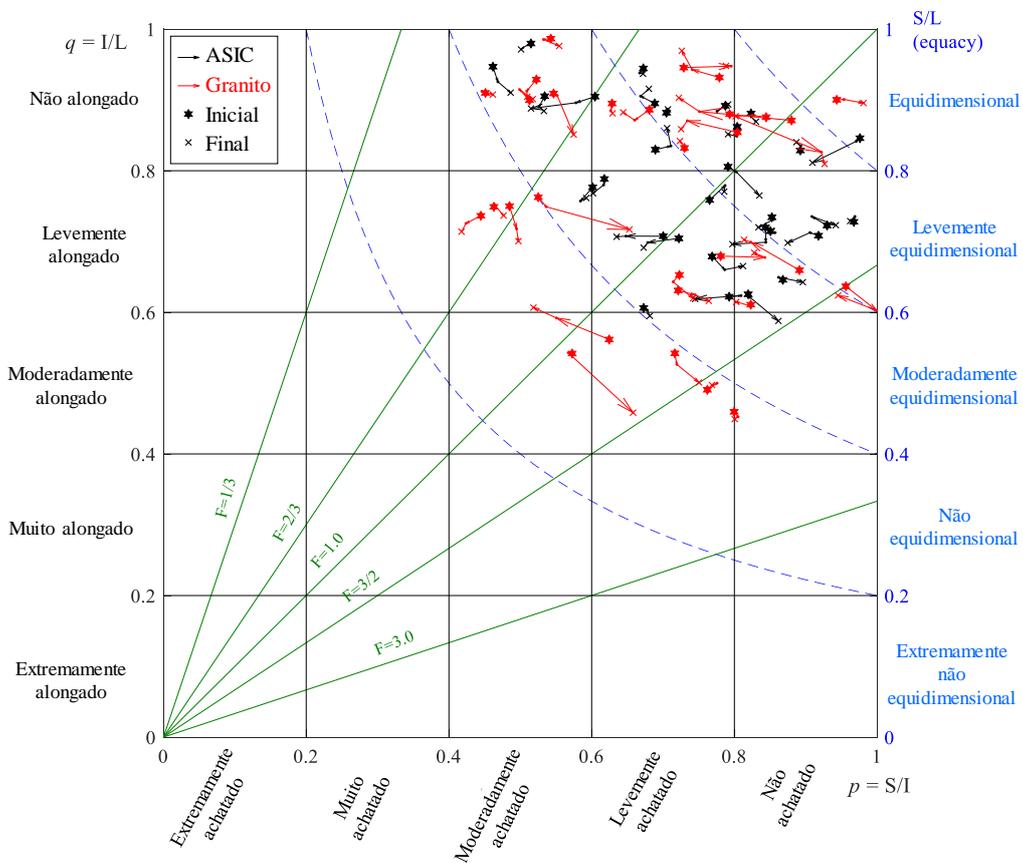


Figura 9.18 – Classificação da morfologia das partículas e respetiva evolução ao longo do ensaio (Paixão; Fortunato; 2021)

A maioria das partículas manteve a sua classificação ao longo do ensaio micro-Deval e, em geral, manteve-se o mesmo nível de heterogeneidade de classificação, com fatores de forma entre 0,49 e 1,78. As partículas de ASIC acabaram por ser mais uniformes e a sua trajetória de evolução foi também mais curta, no que diz respeito à migração das relações  $p$  e  $q$ . Não foi identificada uma evolução clara na classificação com o desgaste das partículas. Em geral, a mudança na classificação das partículas foi causada por arestas proeminentes que foram sendo lascadas.

Em relação à esfericidade ( $\Psi$ ) das partículas, a variação neste parâmetro ficou dentro dos seguintes intervalos, respetivamente para o ASIC e para o granito: [0,64; 0,77] e [0,64; 0,85] no estágio inicial; [0,65; 0,79] e [0,66; 0,87] após 2000 rev.; [0,66; 0,81] e [0,69; 0,89] após 14 000 rev.. Assim, para ambos os materiais, os valores aumentaram em média com o ensaio, embora tenha sido observado um aumento ligeiramente superior nas partículas de granito. Este aumento foi devido ao desgaste no tambor que levou a formas de partículas cada vez mais próximas da forma de uma esfera (daí os valores de esfericidade mais próximos do valor unitário), o que é normal (Domokos; *et al.*; 2014).

Como a forma das partículas permaneceu praticamente a mesma ou a evolução na classificação morfológica foi um tanto errática, estes índices parecem não ser adequados para esta análise ou são difíceis de avaliar. Isso é evidente da análise da Figura 9.19, na qual as distribuições dos valores dos índices  $p$ ,  $q$ ,  $S/L$  e  $F$  permanecem semelhantes ao longo do ensaio. Os resultados obtidos com esta abordagem tradicional de classificação apontam para a necessidade de análises morfológicas mais detalhadas, como aquela que se apresenta em seguida.

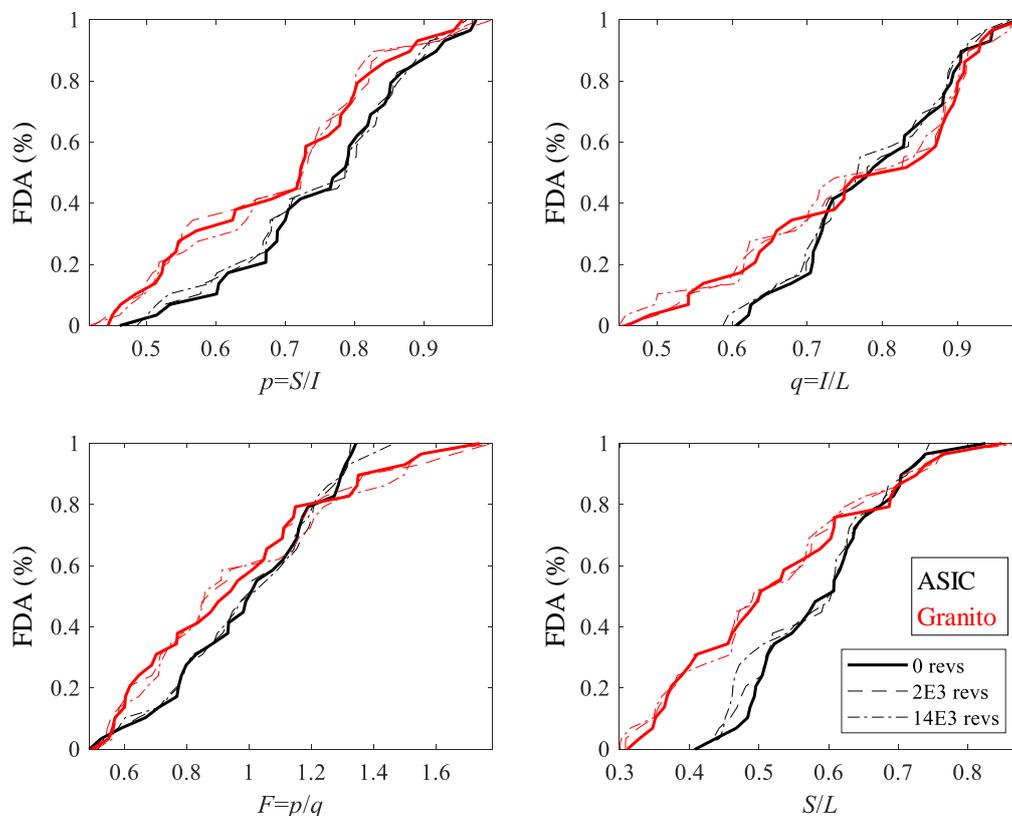


Figura 9.19 – Função de distribuição acumulada (FDA) dos índices  $p$ ,  $q$ ,  $S/L$  e  $F$  (Paixão; Fortunato; 2021)

### 9.4.2.3 Análise morfológica 3D utilizando harmónicas esféricas

Vários autores têm proposto diferentes procedimentos para analisar quantitativamente a morfologia das partículas, nomeadamente recorrendo a análises espectrais 2D dos contornos das partículas utilizando, por exemplo, séries de Fourier (Bowman; K. Soga; 2001; Guo; *et al.*; 2019). Porque estas abordagens não são capazes de descrever corretamente as partículas em três dimensões, Garboczi (2002) propôs a utilização de funções harmónicas esféricas para representar tridimensionalmente as partículas de agregados. Enquanto que a série Fourier descreve o contorno das partículas em 2D, usando funções seno e cosseno, as harmónicas esféricas utilizam funções ortogonais para descrever superfícies de corpos em 3D, pelo que a superfície de uma partícula pode ser definida por uma função de distância radial,  $r(\theta, \phi)$ , em coordenadas esféricas, de acordo com:

$$r(\theta, \phi) = \sum_{l=0}^{l_{max}} \sum_{m=-l}^l a_{lm} Y_l^m(\theta, \phi)$$
$$0 \leq \theta \leq \pi, 0 \leq \phi \leq 2\pi \quad (45)$$

$$Y_l^m(\theta, \phi) = \sqrt{\frac{(2l+1)}{4\pi} \frac{(l-m)!}{(l+m)!}} P_l^m(\cos \theta) e^{im\phi} \quad (46)$$

onde  $a_{lm}$  são coeficientes escalares das harmónicas esféricas;  $Y_l^m(\theta, \phi)$  são as funções harmónicas esféricas de grau  $l$  e ordem  $m$ ;  $\theta$  é o ângulo a partir do eixo  $z$  positivo (latitude);  $\phi$  é o ângulo a partir do eixo  $x$  positivo (longitude) e  $P_l^m(x)$  são as funções associadas de Legendre, não normalizadas. Neste trabalho, foi implementado em ambiente *MATLAB* o cálculo dos coeficientes escalares  $a_{lm}$  convertendo a equação (45) num produto matricial, conforme proposto por Kutay; Hande e Nelson (2010). Aplicações recentes de harmónicas esféricas e abordagens semelhantes têm permitido a geração artificial de bases de dados de partículas 3D usando distribuições de probabilidade de características morfológicas conhecidas para representar agregados realistas (Ouhbi; Voivret; Perrin; *et al.*; 2017; Sun; Zheng; 2020).

De forma semelhante a abordagens apresentadas noutros estudos (Masad; Saadeh; Al-Rousan; *et al.*; 2005; Deiros; *et al.*; 2019) e para poder realizar os cálculos com razoável esforço computacional, o grau mais elevado da análise de harmónicas esféricas neste estudo foi fixado em  $l_{max} = 30$ . No entanto, relativamente às malhas 3D digitalizadas, não foi necessário reduzir o número de vértices ou simplificar a malha, preservando o máximo de características possíveis da superfície da partícula.

Para ilustrar a aplicação das harmónicas esféricas e o detalhe alcançado, foi gerado um conjunto de vetores, com origem no centro de massa da partícula, com 10 242 orientações diferentes ( $\theta, \phi$ ) e uma distribuição quase uniforme no espaço, que foram então utilizados para reconstrução de malha. A Figura 9.20a representa a malha triangular de uma esfera gerada a partir do conjunto de vértices nas posições dadas pelos 10 242 vetores referidos e definindo o raio ( $\theta, \phi$ ) 1,0 mm. A Figura 9.20b apresenta a partícula original de onde os respetivos coeficientes  $a_{lm}$  foram extraídos. A Figura 9.20c e a Figura 9.20d representam a partícula reconstruída por harmónicas esféricas (com e sem malha, respetivamente) determinada nas orientações dadas pelos referidos vetores. O gradiente de cores nas figuras denota a amplitude do raio em cada posição na superfície.

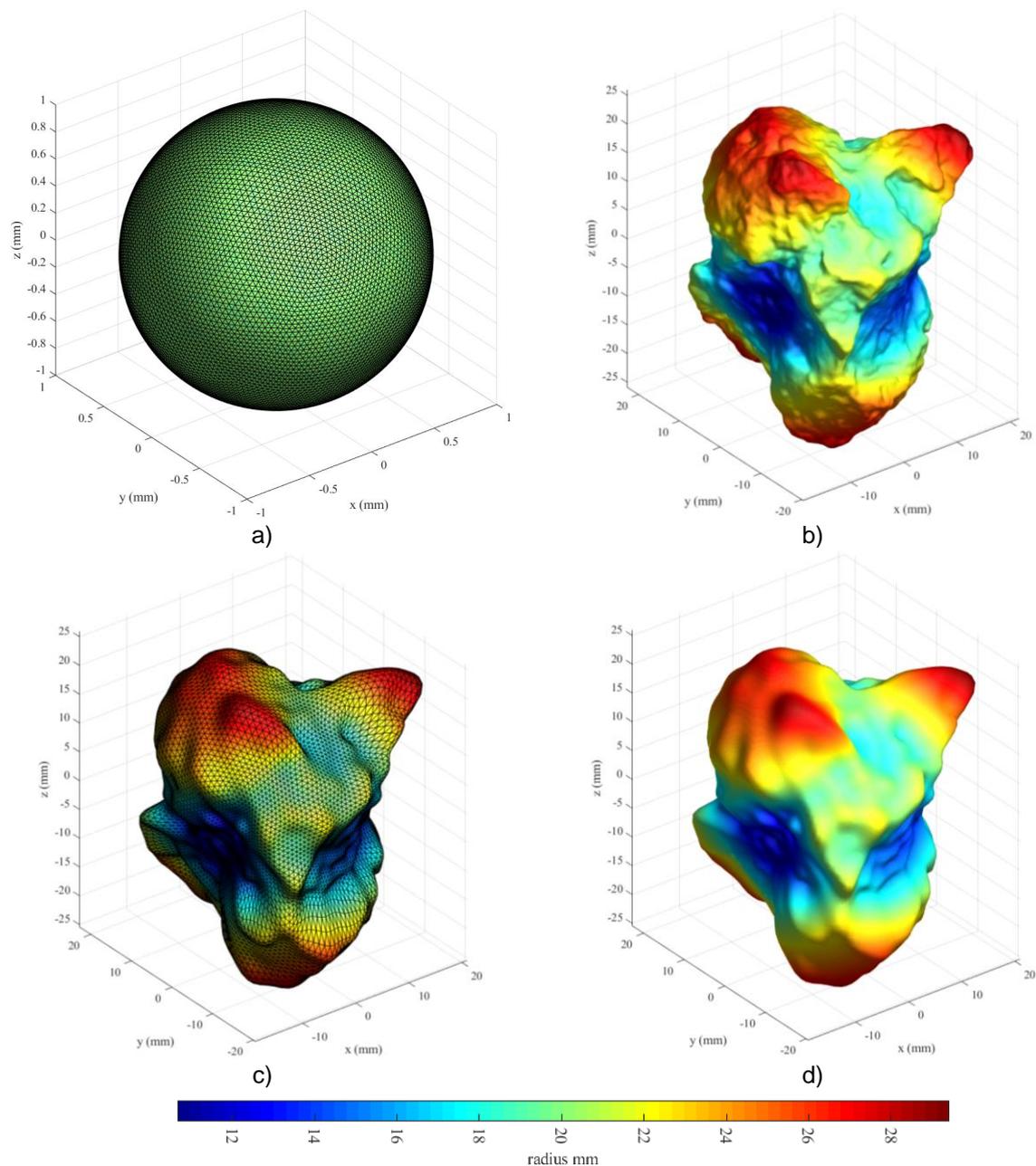


Figura 9.20 – Exemplo da reconstrução de uma partícula recorrendo às harmónicas esféricas ( $l = 30$ ) (Paixão; Fortunato; 2021)

Estudos anteriores identificaram a correlação entre os coeficientes das harmónicas esféricas  $a_{lm}$  e os aspetos morfológicos das partículas. Por analogia com os padrões de Fourier ou descritores formulados para análises 2D (Masad; Button; 2000), Masad; *et al.* (2005) propuseram um conjunto de três parâmetros para descrever os aspetos grosseiros, intermédios e mais finos das partículas (Figura 3.1), tendo posteriormente Kutay; Ozturk; Abbas; *et al.* (2011) sugerido sua normalização no que diz respeito à amplitude do coeficiente de ordem zero,  $a_{00}$ , para uma comparação mais precisa entre partículas de tamanhos distintos. Estes autores relataram uma boa correlação entre esses índices de harmónicas esféricas e os formulados para a análise de Fourier 2D clássica.

Esses parâmetros são:

Índice de Forma 3D:

$$FI_{3DN} = \sum_{l=1}^4 \sum_{m=-l}^l \frac{a_{lm}}{a_{00}} \quad (47)$$

Índice de Angularidade 3D:

$$AI_{3DN} = \sum_{l=5}^{25} \sum_{m=-l}^l \frac{a_{lm}}{a_{00}} \quad (48)$$

Índice de Micro-Textura 3D:

$$MT_{3DN} = \sum_{l=26}^{l_{max}} \sum_{m=-l}^l \frac{a_{lm}}{a_{00}} \quad (49)$$

No estudo agora descrito foi utilizada a análise por harmónicas esféricas para caracterizar a morfologia das partículas de ASIC e de granito. Na Figura 9.21 apresentam-se os índices  $FI_{3DN}$ ,  $AI_{3DN}$  e  $MT_{3DN}$  obtidos por análise baseada nas harmónicas esféricas. A Figura 9.22 mostra a distribuição acumulada desses índices, que foram calculados nos três estágios do ensaio: 0, 2000 e 14 000 revoluções. Pode-se concluir que enquanto os valores de  $FI_{3DN}$  permanecem inalterados para cada partícula ao longo do ensaio, porque se mantém a forma geral das partículas, o que está de acordo com o que foi discutido na seção 9.4.2.2, há uma diminuição geral em  $AI_{3DN}$  e  $MT_{3DN}$  com o aumento nas revoluções.

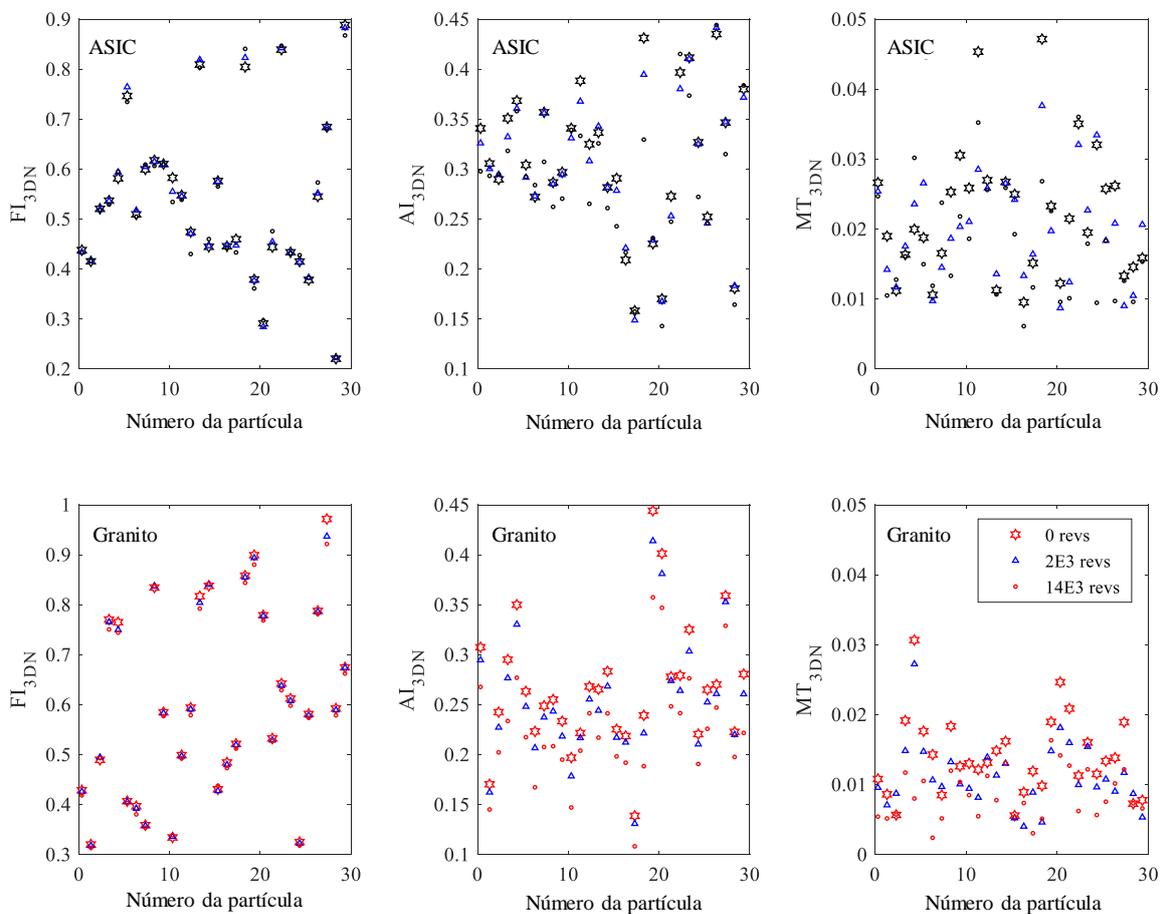


Figura 9.21 – Índices  $FI_{3DN}$ ,  $AI_{3DN}$  e  $MT_{3DN}$  para 0, 2000 e 14 000 revoluções (Paixão; Fortunato; 2021)

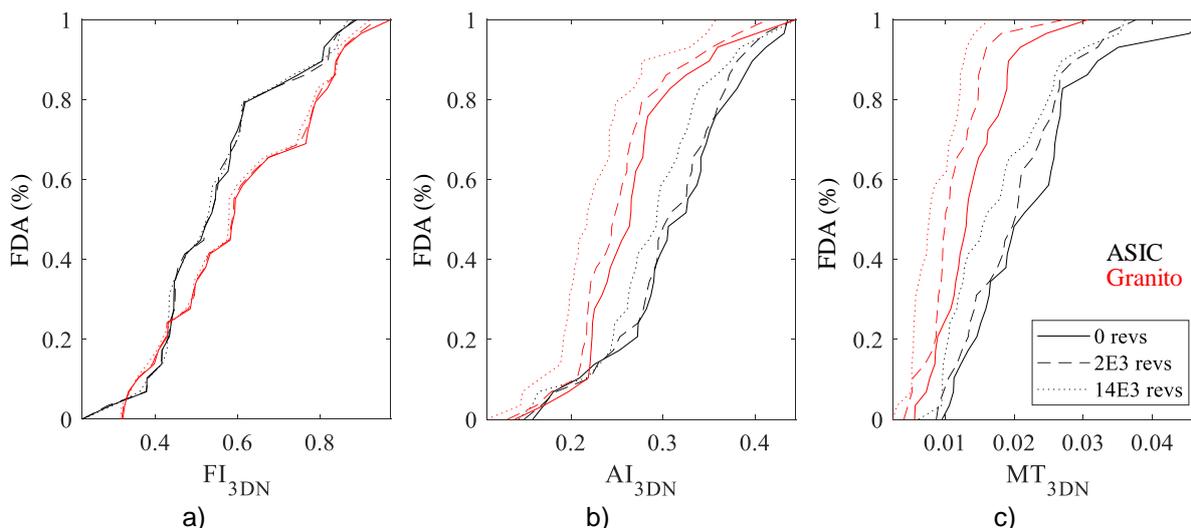


Figura 9.22 – Função de distribuição acumulada (FDA) para 0, 2000 e 14 000 revoluções dos índices: a)  $FI_{3DN}$ ; b)  $AI_{3DN}$ ; c)  $MT_{3DN}$  (Paixão; Fortunato; 2021)

Este resultado deve-se à perda de asperezas e à suavização resultante do desgaste de cantos e arestas. As curvas de distribuição de  $FI_{3DN}$  do ASIC e do granito são semelhantes, conforme seria de esperar, uma vez que ambos cumprem os requisitos relativos às características de macro geometria estabelecidos para o balastro ferroviário. Porém, quanto à angularidade e textura da superfície, percebe-se que a escória é geralmente mais rica. No que se refere ao  $MT_{3DN}$ , apesar da diminuição geral neste parâmetro ao longo do ensaio, algumas partículas de ASIC não seguiram essa tendência. Este comportamento foi, provavelmente, causado pelas geometrias mais complexas dessas partículas, nas quais pequenas alterações na superfície da partícula causaram maiores variações nas amplitudes dos coeficientes  $a_{lm}$  de ordem superior para se ajustar à nova forma. No entanto, as curvas de distribuição dos valores de  $MT_{3DN}$  da escória apresentam valores consistentemente superiores aos do granito, em todas as etapas do ensaio.

#### 9.4.2.4 Análise de superfície 3D da evolução da morfologia das partículas

- Evolução do raio de curvatura e de aspereza

Seguindo a abordagem apresentada por Deiros; *et al.* (2019) para estudar a aspereza de partículas, foi também calculada a curvatura (ou seu recíproco - o raio de aspereza) da superfície das malhas de todas as partículas. Recorreu-se ao programa *MeshLab*, usando o algoritmo *Algebraic Point Set Surfaces* - APSS (Guennebaud; Gross; 2007) e considerando um filtro espacial passa-baixo de escala 10. Esses cálculos foram realizados após amostragem reduzida das malhas originais, usando uma função de decimação disponível no *MeshLab*, para obter malhas com uma distribuição mais uniforme de vértices nas suas superfícies e para atingir um comprimento da aresta médio das malhas triangulares de cerca de 0,3 mm, para todas as partículas. Este procedimento teve como objetivo melhorar a consistência desta análise, reduzindo a influência da variação existente na densidade de vértices na superfície das malhas na aplicação do algoritmo APSS.

A Figura 9.23 mostra os valores da mediana dos histogramas normalizados (em termos de estimativa da função densidade de probabilidade - fdp) do raio de aspereza calculado para o conjunto de vértices de cada partícula. Os três primeiros gráficos referem-se às três diferentes etapas do ensaio micro-Deval e indicam, nas áreas sombreadas (ASIC a cinza e granito a vermelho), a faixa entre os percentis p5 e p95 dos histogramas calculados. O quarto gráfico junta os valores da mediana dos histogramas num único gráfico para se visualizar a evolução ao longo do ensaio. Todos os histogramas foram calculados usando 500 classes, de 0,12 mm de largura, entre -30 e 30 mm. Os valores negativos referem-se a asperezas côncavas e os valores positivos a convexas. Observa-se que partículas de um mesmo material possuem histogramas semelhantes e, portanto, este método, por si só, poderia ser utilizado para diferenciar as partículas de cada material. O ASIC apresentou maior rugosidade correspondente às asperezas (côncavas e convexas), com raios menores que cerca de 3 mm em todas as fases de ensaio. Isso indica que as superfícies das partículas de granito são menos complexas e mais suaves, o que está de acordo com o que foi discutido nas seções anteriores. No último gráfico da Figura 9.23, fica claro que o raio das asperezas das partículas tende a aumentar ao longo do ensaio (afastam-se de zero em ambas as direções) e essa evolução de suavização parece ser mais rápida para o granito.

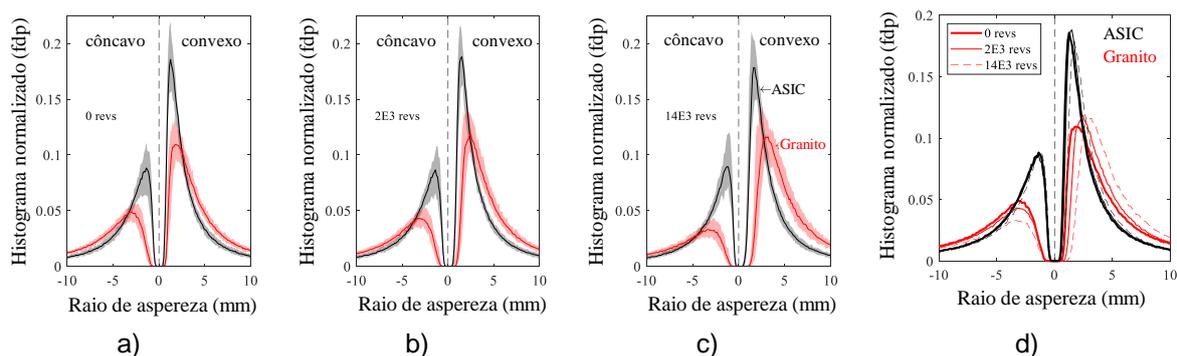


Figura 9.23 – Histogramas normalizados do raio de aspereza para as revoluções: a) 0; b) 2000; c) 14 000; d) todas (Paixão; Fortunato; 2021)

Na Figura 9.24a e na Figura 9.24b, são apresentadas as diferenças dos histogramas obtidas para cada partícula entre 0 e 2000 rotações e entre 2000 e 14 000 rotações, respetivamente, em termos de medianas e percentis p5 e p95. Na Figura 9.24c compara-se apenas as medianas entre esses dois estágios do ensaio micro-Deval. É visível que as partículas de granito sofreram maior suavização de asperezas de maior raio do que as partículas de ASIC. Foi eliminada das partículas de ASIC uma percentagem relevante de convexidades com raio de até 1,6 mm, com valor de pico (negativo) no raio = 1 mm, o que, conseqüentemente, aumentou a percentagem de convexidades acima desse valor, principalmente entre 2 e 2,5 mm.

Nas partículas de granito, as convexidades mais finas, nas quais se constatou percentual significativo de erosão, atingiram raios de até 2,6 mm, com valor de pico (negativo) próximo ao raio = 1,5 mm. Verificou-se também que o desenvolvimento de convexidades maiores (raio maior que 3 mm) foi mais

expressivo no granito, em detrimento de convexidades menores. Observou-se também no granito uma maior erosão das concavidades (tanto em quantidade como em dimensão). O desenvolvimento de novas concavidades (de raio maior que as iniciais) não teve expressão relevante em ambos os materiais. No entanto, foi identificado um pico em torno de  $-0,7$  mm, o que pode estar relacionado com o surgimento de porosidades, que é característico das partículas de ASIC.

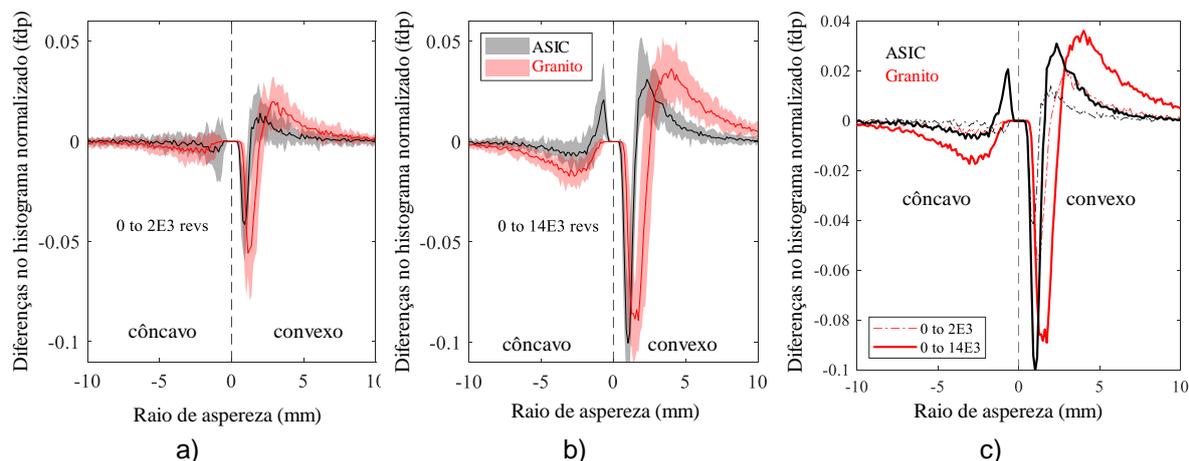


Figura 9.24 – Alterações nos histogramas normalizados do raio de aspereza (Paixão; Fortunato; 2021)

- Evolução do desgaste de partículas

O desgaste da superfície das partículas foi estimado usando o algoritmo de cálculo de distância de Hausdorff disponível no programa *Meshlab* calculando, para cada vértice, a distância mais próxima de uma determinada superfície - a malha inicial da malha da partícula - para outra superfície - outra malha que descreve um estágio subsequente da mesma partícula. Na Figura 9.25 apresenta-se, como exemplo, para uma partícula de ASIC e para uma partícula de granito, a sobreposição das malhas inicial e final nas posições em que foi aplicado o algoritmo de distância de Hausdorff.

A Figura 9.26 apresenta a mediana dos histogramas normalizados dessas distâncias calculadas - o desgaste da superfície - entre 0 e 2000 revoluções e entre 0 e 14 000 revoluções; novamente, as áreas sombreadas correspondem ao intervalo entre os percentis p5 e p95. É interessante observar que os histogramas de desgaste médio são bastante semelhantes para ambos os materiais e em ambas as etapas, o que parece estar de acordo com as perdas médias de massa e volume semelhantes apresentadas na seção 9.4.2.1. Verifica-se que, no estágio inicial do ensaio até 2000 revoluções, a variabilidade no desgaste é ligeiramente maior no granito; no entanto, é maior no ASIC se for considerado todo o ensaio. As menores amplitudes dos histogramas observadas para valores de desgaste superiores a 0,2 mm indicam que apenas uma pequena fração da superfície das partículas sofre desgaste relevante. Por exemplo, entre 0 e 2000 revoluções, a mediana das amplitudes dos histogramas do ASIC e do granito rapidamente tende para zero para valores de desgaste maiores que

0,2 mm; considerando o desgaste entre 0 e 14 000 revoluções, as curvas também tendem para zero, mas num ritmo mais lento, denotando maior desgaste.

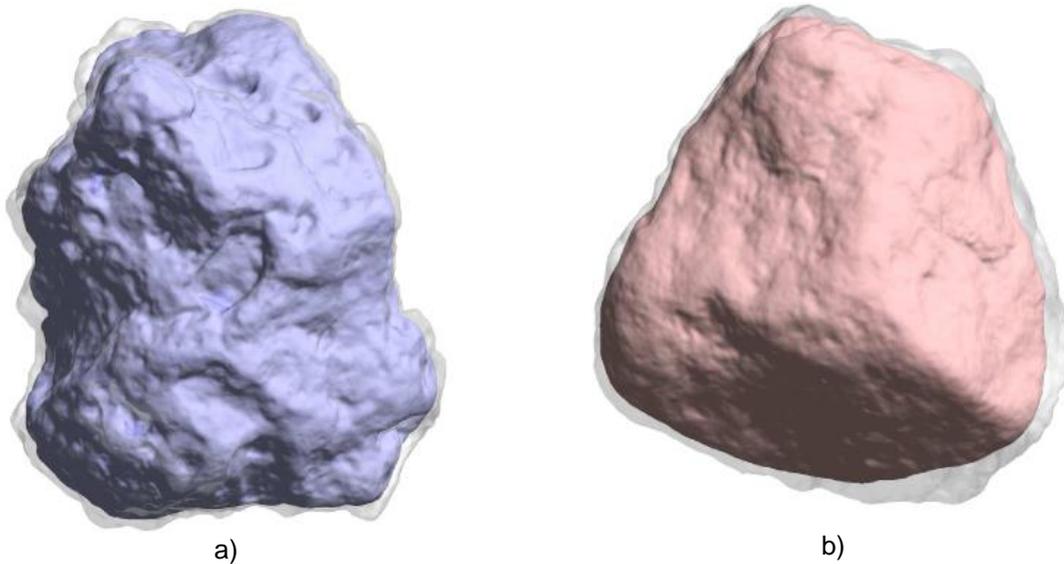


Figura 9.25 – Exemplo da sobreposição das malhas inicial e final nas posições em que foi aplicado o algoritmo de distância de Hausdorff a) partícula de ASIC; b) partícula de granito (Paixão; Fortunato; 2021)

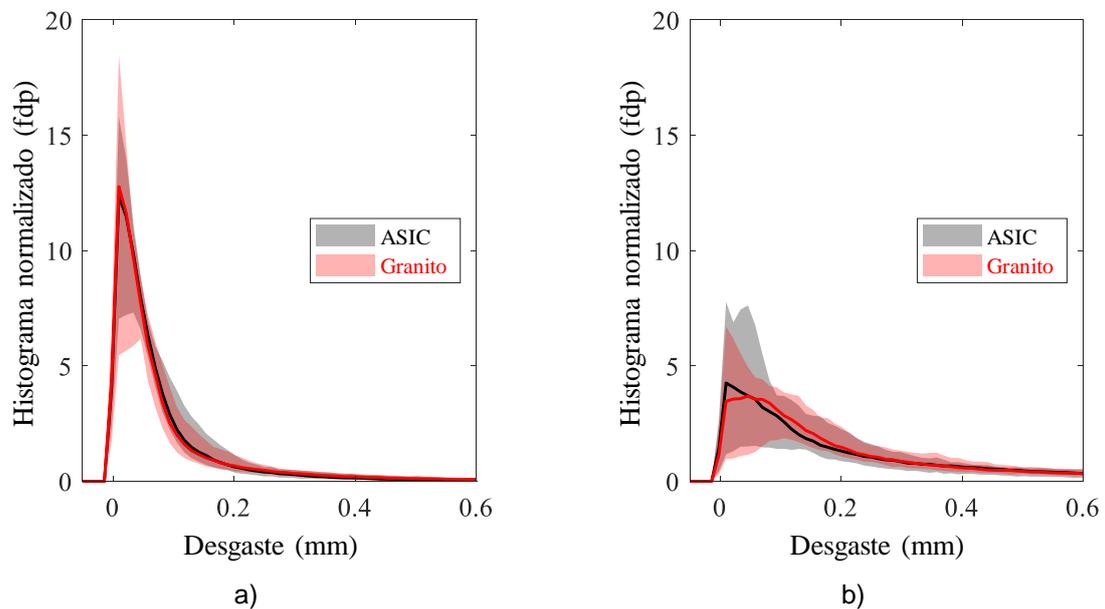


Figura 9.26 – Mediana dos histogramas normalizados das distâncias calculadas na sequência do desgaste da superfície: a) entre 0 e 2000 revoluções; b) 0 e 14 000 revoluções (Paixão; Fortunato; 2021)

Essa constatação é mais clara na Figura 9.27, que apresenta as amplitudes dos valores da mediana dos histogramas numa representação semilogarítmica. Esta representação também evidencia que as partículas de granito, quando comparadas com as partículas de ASIC, exibem uma maior extensão de

superfície que sofre desgaste na gama de 0,2 a 1,5 mm, entre 0 e 2000 revoluções, e na gama de 1,2 a 2,0 mm, entre 0 e 14 000 revoluções. Para valores de desgaste mais elevados, ocorre o oposto, embora as muito baixas amplitudes de histograma em faixas mais elevadas sugiram que os resultados são menos representativos de toda a amostra e podem ser controlados pela quebra de protuberâncias num número limitado de partículas. Outra justificação poderia ser a dificuldade de a fotogrametria capturar corretamente a geometria de algumas cavidades das partículas de ASIC que não sofreram desgaste relevante, mas foram erroneamente consideradas como desgaste pelo algoritmo de distância de Hausdorff.

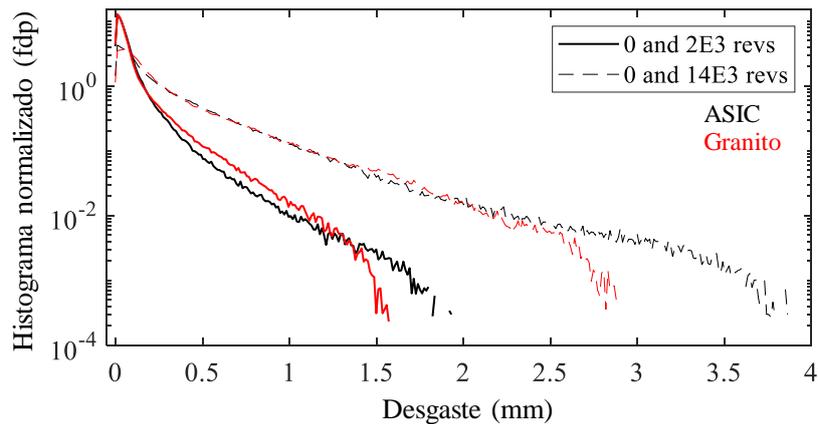


Figura 9.27 – Histogramas normalizados do raio de aspereza em escala logarítmica (Paixão; Fortunato; 2021)

Determinado o raio de aspereza (recíproco da curvatura) e o desgaste de cada vértice de cada partícula Figura 9.28, foi possível analisar a ligação entre essas duas variáveis. A Figura 9.29 mostra exemplos dessa comparação para duas partículas. Para cada partícula, a primeira imagem à esquerda destaca as regiões da superfície onde foi observado o maior desgaste, usando uma escala de cores quentes (é considerado nesta escala um valor máximo de 2 mm). As três imagens à direita mostram a evolução das regiões superficiais evidenciando raio de aspereza menor, até 3 mm. É visível que o raio de aspereza tende a aumentar à medida que as partículas sofrem desgaste, pois a área das regiões destacadas diminui e as cores tornam-se mais frias. Além disso, as áreas que denotam maior amplitude de desgaste ocorrem em arestas e ângulos salientes, que são caracterizados por raios de aspereza menores (curvaturas mais altas).

Como as malhas analisadas foram obtidas por amostragem reduzida para obter uma distribuição espacial uniforme de vértices, foi possível estender a comparação a todo o grupo de partículas, juntando os dados relativos aos vértices das partículas do mesmo material e comparando os dois conjuntos de dados associados resultantes. Considerando a quantidade de dados que essa tarefa envolvia, optou-se por analisar os resultados por meio de histogramas normalizados, em cuja amplitude é representada por um mapa de cores numa imagem 2D.

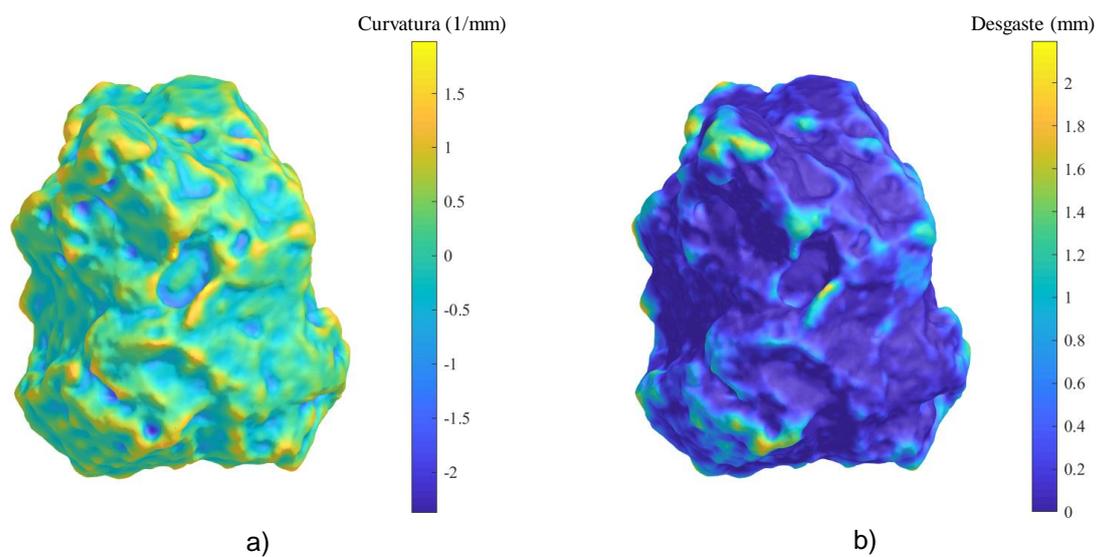


Figura 9.28 – Exemplo de curvatura (a) e valores de desgaste (b) calculados numa partícula (Paixão; Fortunato; 2021)

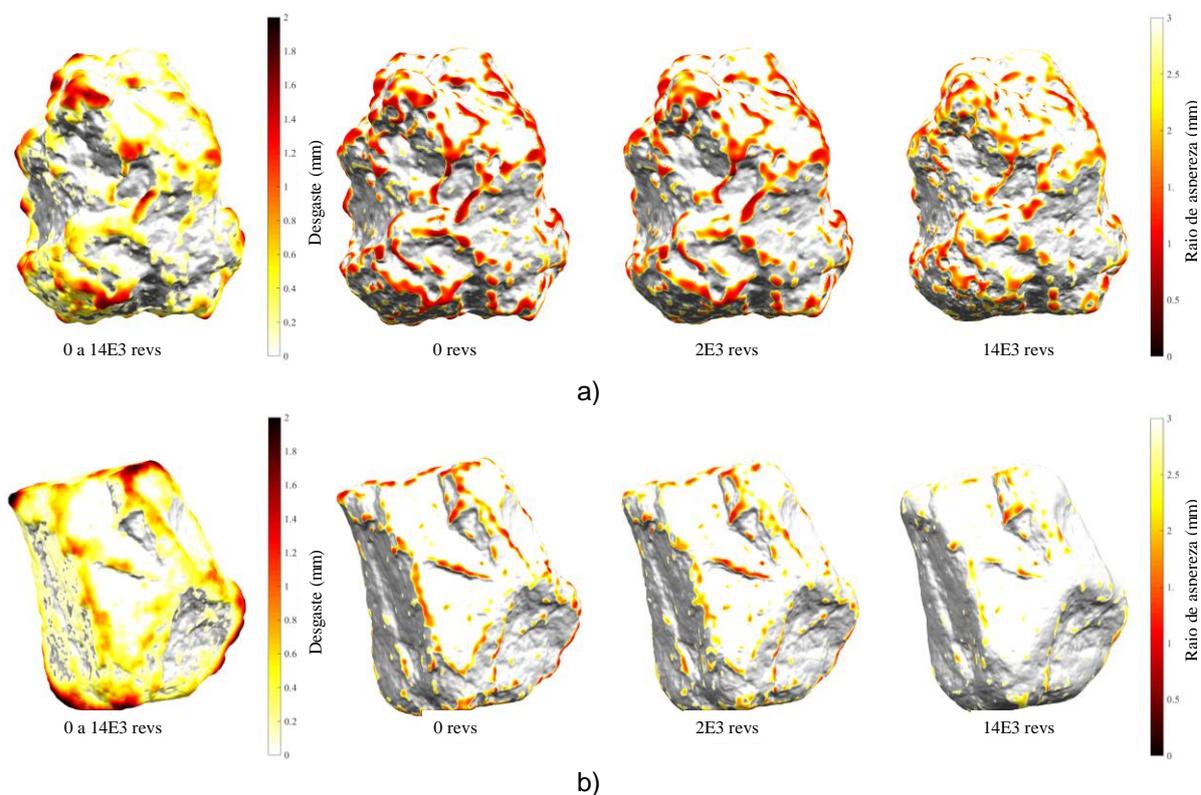


Figura 9.29 – Exemplo de zonas evidenciando maior desgaste e raios de aspereza mais curtos: a) partícula de ASIC; b) partícula de granito (Paixão; Fortunato; 2021)

A Figura 9.30 mostra a relação entre histogramas 2D normalizados da curvatura da superfície e o desgaste após 2000 e 14 000 revoluções, para o ASIC e para o granito. A superfície das partículas de ambos os materiais sofre menos de 0,1 mm de desgaste nas primeiras 2000 revoluções, correspondendo a locais que denotam uma curvatura da superfície de cerca de 0 a 0,4  $mm^{-1}$ . No final do ensaio (após 14 000 revoluções), as superfícies das partículas geralmente desgastaram-se até cerca de 0,5 mm, principalmente em locais aproximadamente dentro da mesma gama de curvatura da superfície. No entanto, os resultados indicam que a distribuição do desgaste das partículas de ASIC é mais concentrada em locais com maior curvatura, quando comparada com a do granito, o que seria de esperar, pois as partículas de ASIC são caracterizadas por maior curvatura (ou menor raio de aspereza, conforme se identificou na Figura 9.23) É também visível que a distribuição do desgaste superficial nas partículas de granito se estende ligeiramente para valores mais elevados do que nas partículas de ASIC, conforme evidenciado pelas regiões de azul mais claro que se estendem para cima. Outra observação relevante, particularmente visível após 14 000 revoluções, é que parece existir uma relação crescente entre a curvatura e o desgaste, e que a inclinação desta relação parece ser mais acentuada para o granito do que para o ASIC. Ou seja, para a mesma gama de curvatura, as superfícies das partículas de granito parecem desgastar-se mais do que as das partículas de escória.

Esses resultados sugerem que, embora as partículas de ASIC sejam caracterizadas por mais asperezas, sendo mais propensas ao desgaste, quebra e lascamento de protuberâncias e vértices, o seu desgaste superficial foi geralmente inferior ao observado no granito, para a mesma gama de curvaturas da superfície. Estas conclusões corroboram o argumento de que, em termos de morfologia das partículas e resistência ao desgaste, o ASIC é igual ou ainda mais adequado para ser aplicado em camadas de balastro ferroviário, proporcionando melhor imbricamento das partículas e apresentando degradação inferior ou comparável.

Considerando que a resistência ao corte e a estabilidade da camada de balastro ferroviário aumentam com a angularidade das suas partículas, estas conclusões contribuem para demonstrar que o ASIC pode constituir uma fonte valiosa de agregado para balastro ferroviário, podendo atingir um mais elevado nível de desempenho mecânico, conforme ficou também evidenciado pelos resultados apresentados nas secções 9.2 e 9.3 e de conclusões de outros estudos (Esmaeili; *et al.*; 2017; Morata; Saborido; 2017).

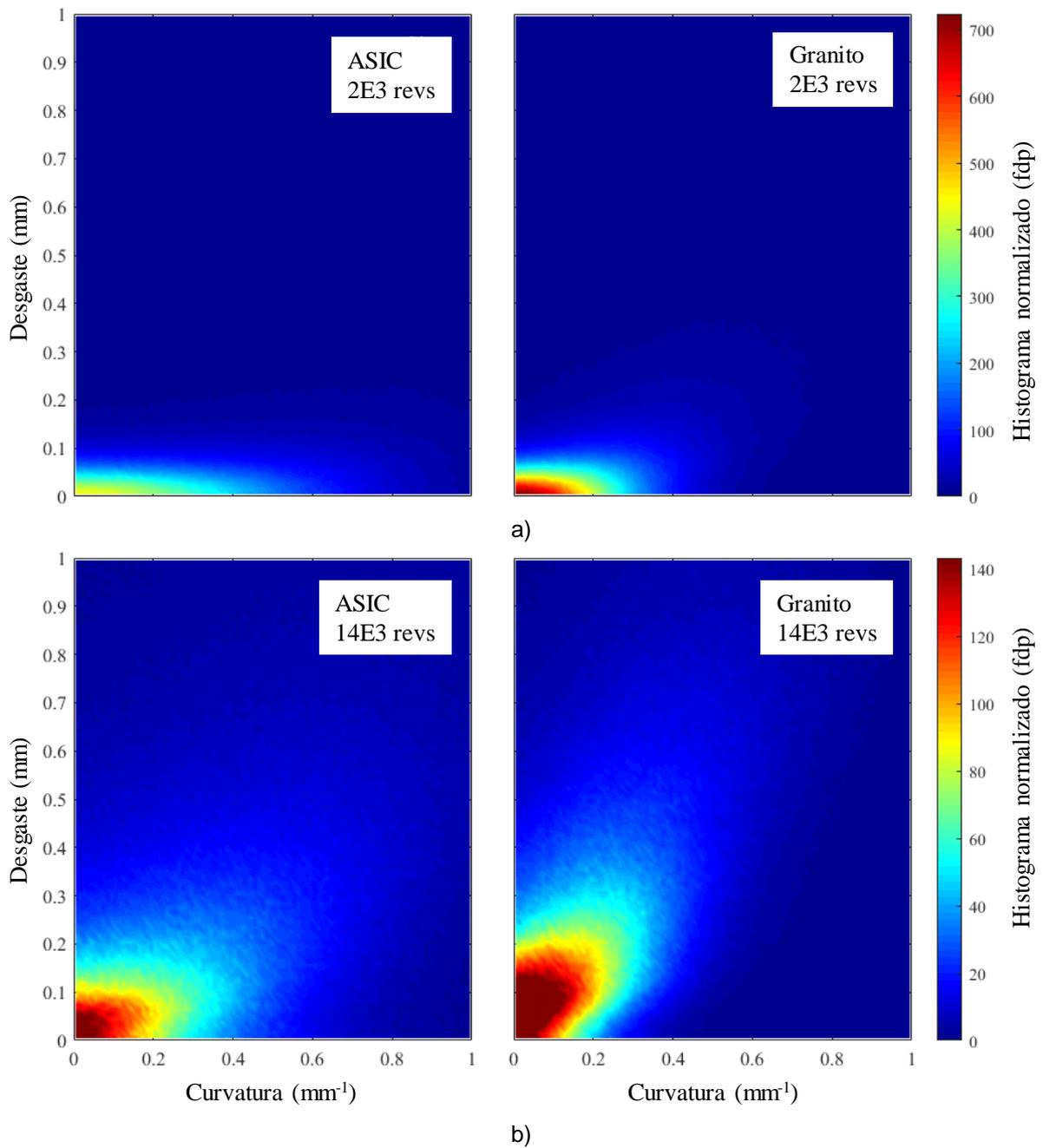


Figura 9.30 – Histogramas 2D normalizados de curvatura e desgaste: a) 0 a 2000 revoluções; b) 0 a 14 000 revoluções (Paixão; Fortunato; 2021)

## 10 | Considerações finais

O projeto MODER-B2 tem vindo a apresentar resultados significativos em termos quantitativos e qualitativos, decorrentes da concretização de múltiplas tarefas, experimentais e de modelação, e com a colaboração de diversas entidades.

Continuam os estudos com vista a concretizar os objetivos do projeto e estão a ser envidados esforços no sentido de obter novos financiamentos e recursos humanos para o projeto, nomeadamente através da submissão de candidaturas a financiamento de projetos de investigação e a bolsas de investigação para doutorandos. Para além disso, está em análise a possibilidade de estabelecer novas parcerias com entidades privadas, no sentido de puderem contribuir com recursos materiais necessários a algumas das atividades do projeto.

Os autores deste relatório agradecem a todos aqueles que têm vindo a colaborar nas atividades do projeto e às entidades públicas e privadas que têm contribuído para a sua concretização.

Lisboa, LNEC, maio de 2021

VISTO

O Diretor do Departamento de Transportes



António Lemonde de Macedo

AUTORIA



Eduardo Fortunato

Investigador Principal com Habilitação  
Chefe do Núcleo de Infraestruturas de  
Transportes



André Paixão

Investigador Auxiliar

## Referências bibliográficas

- AASHTO, 2003 – **AASHTO T 307. Standard Method of Test for Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials.**
- ABADI, T.; PEN, L. L.; ZERVOS, A.; POWRIE, W., 2019 – **Effect of sleeper interventions on railway track performance.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. Vol. 145. n.º 4. doi:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002022.
- AFNOR, 2000 – **NF P 94-117-1: Plate test static deformation module (EV2).** Paris: Association Française de Normalisation.
- AFONSO, C., 2019 – **Caracterização mecânica e digitalização tridimensional na análise de partículas granulares de geomateriais.** Dissertação (MSc), Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- AI, J.; CHEN, J.-F.; ROTTER, J. M.; OOI, J. Y., 2011 – **Assessment of rolling resistance models in discrete element simulations.** Powder Technology. Vol. 206 p. 269–282. doi:10.1016/j.powtec.2010.09.030.
- AIKAWA, A., 2013 – **Dynamic interaction within boundary layer between a sleeper and ballast based on field measurement.** WCRR 2013 - World Congress on Railway Research. Sydney, Australia: 25-28 Nov. 2013.
- AINGARAN, S.; PEN, L. L.; ZERVOS, A.; POWRIE, W., 2018 – **Modelling the effects of trafficking and tamping on scaled railway ballast in triaxial tests.** Transportation Geotechnics. Vol. 15 n.º 1. p. 84–90. doi:10.1016/j.trgeo.2018.04.004.
- ALLAART, A., 1992 – **Design principles for flexible pavements, a computational model for granular bases.** Dissertação (Ph.D.), Delft: Technische Universiteit Delft.
- AREMA, 2015 – **Manual for Railway Engineering.** Lanham, Maryland: Association of American Railway, Engineering Maintenance-of-Way.
- AREMA, 2020 – **Manual for Railway Engineering.** Lanham, Maryland: American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association.
- AS, 2015 – **AS 2758.7:2015 – Australian Standard – Aggregates and rock for engineering purposes, Part 7: Railway ballast.** Homebush, Sydney: Standards Association of Australia.
- ASCHENBRENNER, B., 1956 – **A new method of expressing particle sphericity.** Journal of Sediment. Vol. 26 n.º 1. p. 15–31. doi:10.1306/74D704A7-2B21-11D7-8648000102C1865D.
- AURSUDKIJ, B., 2007 – **A Laboratory study of railway ballast behavior under traffic loading and tamping maintenance.** Dissertação (Ph.D.), Nottingham, UK: University of Nottingham.
- AURSUDKIJ, B.; MCDOWELL, G. R.; COLLOP, A. C., 2009 – **Cyclic loading of railway ballast under triaxial conditions and in a railway test facility.** Granular Matter. Vol. 11. n.º 6. p. 391-401. doi:10.1007/s10035-009-0144-4.
- BA, M.; TINJUM, J. M.; FALL, M., 2015 – **Prediction of permanent deformation model parameters of unbound base course aggregates under repeated loading.** Road Materials and Pavement Design. Vol. 16. n.º 4. p. 854–869. doi:10.1080/14680629.2015.1063534.

- BACH, H., 2013 – **Evaluation of attrition tests for railway ballast**. Dissertação (PhD), Graz, Austria: Graz University of Technology.
- BANIMAH, M., 2008 – **Advanced finite element modelling of coupled train-track systems: a geotechnical perspective**. Dissertação (Ph.D.), Edinburgh Heriot-Watt University.
- BASSEY, D.; NGENE, B.; AKINWUMI, I.; AKPAN, V.; BAMIGBOYE, G., 2020 – **Ballast Contamination Mechanisms: A Critical Review of Characterisation and Performance Indicators**. Infrastructures. Vol. 5. n.º 94. doi:10.3390/infrastructures5110094.
- BATHE, K. J., 1996 – **Finite Element Procedures**. Prentice Hall. ISBN 9780133014587.
- BELYTSCHKO, T., 1976 – **A survey of numerical methods and computer programs for dynamic structural analysis**. Nuclear Engineering and Design. Vol. 37. n.º 1. p. 23-34. doi:10.1016/0029-5493(76)90050-9.
- BERGGREN, E. G., 2009 – **Railway Track Stiffness - Dynamic measurements and evaluation for efficient maintenance**. Dissertação (Ph.D), Stockholm, Sweden: KTH Royal Institute of Technology.
- BHATTI, M. A., 2006 – **Advanced Topics in Finite Element Analysis of Structures: With Mathematica and MATLAB Computations**. Wiley. ISBN 9780471648079.
- BLOTT, S. J.; PYE, K., 2008 – **Particle shape: a review and new methods of characterization and classification**. Sedimentology. Vol. 55. n.º 1. p. 31–63. doi:10.1111/j.1365-3091.2007.00892.x.
- BOWMAN, E. T.; SOGA, W. D., 2001 – **Particle shape characterisation using Fourier descriptor analysis**. Géotechnique Vol. 51 n.º 6. p. 545–554. doi:10.1680/geot.2001.51.6.545.
- BROWN, S.; PELL, P., 1967 – **An experimental investigation of the stresses, strains and deflections in layered pavement structure subjected to dynamic loads**. 2nd Int. Conf. on Structural Design of Asphalt Pavements. Michigan, Ann Arbor: pp. 487–504.
- CALÇADA, R., 1995 – **Efeitos dinâmicos em pontes resultantes do tráfego ferroviário a alta velocidade**. Dissertação (M.Sc.), Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- CAMBIO, D.; GE, L., 2007 – **Effects of parallel gradation on strength properties of ballast materials**. Geo-Denver, Advances in Measurement and Modeling of Soil Behavior. Colorado, USA: Vol. GSP 173; pp. 1–7.
- CARDOSO, M., 2020 – **Análise da resistência mecânica de partículas de balastro ferroviário em ensaios de compressão**. Dissertação (MSc), Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- CEN, 2004 – **European Standard EN 13286-7:2004, Unbound and hydraulically bound mixtures - Part 7: Cyclic load triaxial test for unbound mixtures**. Brussels: Comité Européen de Normalisation.
- CEN, 2008 – **European Standard EN 933-4:2008 Tests for geometrical properties of aggregates - Part 4: Determination of particle shape - Shape index**. Brussels: CEN/TC 154 - Aggregates.
- CEN, 2011 – **European Standard EN 1097-1:2011 Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 1: Determination of the resistance to wear (micro-Deval)**. Brussels: CEN TC 154 - Comité Européen de Normalisation.

- CEN, 2012 – **European Standard EN 933-3:2012 Tests for geometrical properties of aggregates - Part 3: Determination of particle shape - Flakiness index**. Brussels: CEN/TC 154 - Aggregates.
- CEN, 2013a – **European Standard EN 13450:2013, Aggregates for railway ballast** Brussels: CEN TC 154 - Comité Européen de Normalisation.
- CEN, 2013b – **European Standard EN 1097-6:2013 Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 6: Determination of particle density and water absorption**. Brussels: CEN TC 154 - Comité Européen de Normalisation.
- CEN, 2020 – **European Standard EN 1097-2:2020 Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 1: Methods for the determination of resistance to fragmentation**. Brussels: CEN TC 154 - Comité Européen de Normalisation.
- CERDEIRAL, J., 2014 – **Influência da subestrutura na evolução da degradação da qualidade geométrica da via-férrea**. Dissertação (MSc.), Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- CIGNONI, P.; CALLIERI, M.; CORSINI, M.; DELLEPIANE, M.; GANOVELLI, F.; RANZUGLIA, G.; BERGGREN, E., 2008 – **MeshLab: an Open-Source Mesh Processing Tool**. 2008 Eurographics Italian Chapter Conference. Salerno, Italy: 2-4 Jul. 2008. pp. 129-136. doi: 10.2312/LocalChapterEvents/ItalChap/ItalianChapConf2008/129-136.
- CLOUGH, R. W.; PENZIEN, J., 1993 – **Dynamics of Structures**. McGraw-Hill. ISBN 9780071132411.
- CORREIA, B., 2015 – **Resposta dinâmica do sistema veículo-via férrea em zonas de variação das condições de suporte da via**. Dissertação (M.Sc.), Monte da Caparica: FCT, Nova University of Lisbon.
- COSTA, R.; MOTA, R.; FORTUNATO, E.; PIRES, J.; MOURA, E.; BERNUCCI, L., 2017 – **Large-scale triaxial apparatus for railroad ballast material**. 3rd International Symposium on Railway Geotechnical Engineering (GEORAIL 2017). Paris, France: 23-24 Nov. 2017. pp. 125-134.
- CUNDALL, P. A.; STRACK, O. D. L., 1979 – **A discrete numerical model for granular assemblies**. Geotechnique. Vol. 29. n.º 1. p. 47-65. doi:citeulike-article-id:1458141.
- DEIROS, I.; VOIVRET, C.; COMBE, G.; EMERIAULT, F., 2016 – **Quantifying degradation of railway ballast using numerical simulations of micro-Deval test and in-situ conditions**. 3rd Int. Conf. on Transportation Geotechnics - Advances in Transportation Geotechnics 3. Guimarães, Portugal: 4-7 Sep. Vol. 143; pp. 1016–1023. doi: 10.1016/j.proeng.2016.06.096.
- DEIROS, I.; COMBE, G.; EMERIAULT, F.; VOIVRET, C.; FERELLEC, J.-F., 2019 – **X-ray CT analysis of the evolution of ballast grain morphology along a Micro-Deval test: key role of the asperity scale**. Granular Matter. Vol. 21. n.º 2. p. 30. doi:10.1007/s10035-019-0881-y.
- DELGADO, B.; VIANA DA FONSECA, A.; FORTUNATO, E.; PAIXÃO, A.; COELHO, D., 2017 – **A proposal for molding of reduced scale ballast samples for repeated load triaxial tests**. 3rd International Symposium on Railway Geotechnical Engineering (GEORAIL 2017). Paris, France: 23-24 Nov. 2017. pp. 135-144.
- DELGADO, B.; VIANA DA FONSECA, A.; FORTUNATO, E.; COELHO, D., 2018a – **Railway ballast behaviour of steel furnace slag aggregate under monotonic triaxial load**. 4th International

- Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance (Railways 2018). Sitges, Barcelona, Spain: 3-7 September 2018.
- DELGADO, B.; VIANA DA FONSECA, A.; FORTUNATO, E.; COELHO, D., 2018b – **Comportamento do lastro ferroviário de agregado de escória de aciaria sob carregamento triaxial monotónico**. 16º Congresso Nacional de Geotecnia. Ponta Delgada: 27 a 30 de maio de 2018.
- DELGADO, B.; VIANA DA FONSECA, A.; FORTUNATO, E.; COELHO, D., 2018c – **Análise comparada de um agregado de escória de aciaria como material alternativo para lastro de vias férreas por meio de ensaios triaxiais monotônicos e cíclicos**. XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (COBRAMSEG 2018) e VIII Congresso Luso-Brasileiro de Geotecnia. Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Salvador-Bahia, Brasil: 28 de agosto a 1 de setembro de 2018.
- DELGADO, B., 2019 – **Geomecânica de um agregado siderúrgico inerte como material alternativo para lastro de vias férreas do tipo heavy haul**. Dissertação (Ph.D.), Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- DELGADO, B.; VIANA DA FONSECA, A.; FORTUNATO, E.; COELHO, D., 2019a – **As Engenharias frente a Sociedade, a Economia e o Meio Ambiente 3**. Atena Editora. Cap. 5 - Análise comparada de um agregado de escória de aciaria como material alternativo para lastro de vias férreas do tipo heavy haul por meio de ensaios triaxiais. ISBN 978-85-7247-432-0.
- DELGADO, B.; VIANA DA FONSECA, A.; FORTUNATO, E.; GORETTI DA MOTTA, L. M., 2019b – **The Particles Morphology Influence in the Rail Ballast Behaviour of a Steel Slag Aggregate**. Environmental Geotechnics. p. 1-10. doi:10.1680/jenge.18.00203.
- DELGADO, B.; VIANA DA FONSECA, A.; FORTUNATO, E.; MAIA, P., 2019c – **Mechanical behavior of inert steel slag ballast for heavy haul rail track: laboratory evaluation**. Transportation Geotechnics. Vol. 20. p. 2214-3912. doi:10.1016/j.trgeo.2019.100243.
- DELGADO, B.; VIANA DA FONSECA, A.; FORTUNATO, E.; MOTTA, L., 2019d – **Aproveitamento de escórias de aciaria em infraestruturas de transportes - estudos e aplicações em Portugal e no Brasil**. 9º Congresso Rodoviário Português. Lisboa: 28 a 30 de maio de 2019.
- DELGADO, B.; VIANA DA FONSECA, A.; FORTUNATO, E.; MOTTA, L., 2019e – **Particle morphology's influence on the rail ballast behaviour of a steel slag aggregate**. Environmental Geotechnics. Vol. published ahead of print. p. 1-10. doi:10.1680/jenge.18.00203.
- DELGADO, B.; VIANA DA FONSECA, A.; FORTUNATO, E., 2021a – **Stress-strain analysis of heavy haul rail track with steel slag ballast by laboratory tests and numerical simulations**. The 4th International Conference on Transportation Geotechnics (4ICTG). Chicago, USA: 24-27 May, 2021.
- DELGADO, B.; VIANA DA FONSECA, A.; FORTUNATO, E.; PAIXÃO, A.; ALVES, R., 2021b – **Geomechanical assessment of an inert steel slag aggregate as an alternative ballast material for heavy haul rail tracks**. Construction and Building Materials. Vol. in Press.
- DELGADO, B.; VIANA DA FONSECA, A.; FORTUNATO, E.; PAIXÃO, A., 2022a – **Effects of Parallel Gradation Scaling Technique on Permanent Deformation of a Ballast Material**. 5th

- International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance. Montpellier, France: 22-25 August 2022 (aceite para publicação).
- DELGADO, B.; VIANA DA FONSECA, A.; FORTUNATO, E.; PAIXÃO, A., 2022b – **Influência da resistência das partículas no desempenho de um agregado siderúrgico inerte como lastro de vias férreas**. XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas, IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens, VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens. Campinas - SP: 23 a 26 de agosto de 2022 (aceite para publicação).
- DOMOKOS, G.; JEROLMACK, D. J.; SIPOS, A. Á.; TÖRÖK, Á., 2014 – **How river rocks round: resolving the shape-size paradox**. PLoS One Vol. 9. n.º 2.
- DORADOR, L.; VILLALOBOS, F., 2020 – **Analysis of the geomechanical characterization of coarse granular materials using the parallel gradation method**. Obras y Proyectos Vol. 27 p. 50–63.
- EBRAHIMI, A.; TINJUM, J. M.; EDIL, T. B., 2015 – **Deformational behavior of fouled railway ballast**. Canadian Geotechnical Journal. Vol. 52. p. 344–355. doi:10.1139/cgj-2013-0271.
- ERRI, 1994 – **D 187: Unified Assessment Criteria for Ballast Quality and Methods for Assessing the Ballast Condition in the Track, Determining the Criteria for Ballast Durability using Triaxial Tests**. Utrecht: European Rail Research Institute - Office de Recherches et d'Essais de l'Union Internationale des Chemins de Fer.
- ESMAEILI, M.; NOURI, R.; YOUSEFIAN, K., 2017 – **Experimental comparison of the lateral resistance of tracks with steel slag ballast and limestone ballast materials**. Proc. Inst. Mech. Eng. Part F: J. Rail Rapid Transit. Vol. 231 n.º 2. p. 175–184. doi:10.1177/0954409715623577.
- ESMAEILI, M.; YOUSEFIAN, K.; GHAHROUDI, P. A., 2020 – **An investigation of abrasion and wear characteristics of steel slag and granite ballasts**. Proc. Inst. Civil Eng. Construct. Mater. . Vol. 173 n.º 1. p. 41–52. doi:10.1680/jcoma.17.00044.
- FOLK, R. L., 1955 – **Student operator error in determination of roundness, sphericity, and grain size**, . Journal of Sedimentary Petrology. Vol. 25. n.º 4. p. 297–301. doi:10.1306/74D70493-2B21-11D7-8648000102C1865D.
- FONTUL, S.; FORTUNATO, E.; DE CHIARA, F., 2014 – **Evaluation of ballast fouling using GPR**. 15th International Conference on Ground Penetrating Radar - GPR 2014. Brussels, Belgium: June 30 - July 4, 2014. pp. 418-422. doi: 10.1109/ICGPR.2014.6970458.
- FORTUNATO, E., 2005 – **Renovação de Plataformas Ferroviárias. Estudos Relativos à Capacidade de Carga**. Dissertação (Ph.D.), Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- FORTUNATO, E.; PAIXÃO, A.; FONTUL, S., 2012 – **Improving the use of unbound granular materials in railway sub-ballast layer**. Advances in Transportation Geotechnics II. Hokkaido University, Japan: 10-12 Sep. 2012. pp. 522-527. doi: 10.1201/b12754-7.
- FORTUNATO, E.; PAIXÃO, A., 2014 – **Influência da Subestrutura no Desempenho da Via-Férrea**. Actas do XVII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (COBRAMSEG 2014) e VII Congresso Luso-Brasileiro de Geotecnia. Goiânia, Brasil: 9 a 13 de setembro de 2014.

- FORTUNATO, E., 2016 – **Comportamento estrutural de vias férreas balastradas. Contributos para melhorar a eficiência e a qualidade da operação.** Lisboa: LNEC. ISBN ISBN 978-972-49-2280-5.
- FORTUNATO, E.; PAIXÃO, A., 2016 – **Estudos experimentais e numéricos sobre o comportamento estrutural da via-férrea no âmbito do projeto MODER-B2.** LNEC - Proc. 0702/112/19721. R 31/2016 – DT/NIT.
- FORTUNATO, E.; PAIXÃO, A.; FONTUL, S.; PIRES, J., 2017 – **Some results on the properties and behavior of railway ballast.** 10th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields (BCRRA 2017). Athens, Greece: 28-30 June 2017.
- FORTUNATO, E.; ROQUE, A. J.; GOMES CORREIA, A., 2018 – **Comportamento estrutural de um trecho rodoviário construído com agregado siderúrgico inerte para construção (ASIC).** 16º Congresso Nacional de Geotecnia. Ponta Delgada: 27 a 30 de maio de 2018.
- FORTUNATO, E.; PAIXÃO, A.; FRANCISCO, A.; MORAIS, P.; SANTOS, C.; MORAIS, J., 2020 – **GroutRail – Reabilitação de Plataformas Ferroviárias com Tratamento de Solos. Relatório técnico do projeto.** LNEC - Proc. 0702/111/20012. R 221/2020 – DT/NIT.
- FORTUNATO, E.; PAIXÃO, A.; VARANDAS, J. N., 2021 – **Modelação Matemática em Engenharia de Transportes. A experiência do Departamento de Transportes do LNEC.** LNEC. - Modelação numérica avançada do comportamento estrutural de vias-férreas.
- GARBOCZI, E. J., 2002 – **Three-dimensional mathematical analysis of particle shape using X-ray tomography and spherical harmonics: Application to aggregates used in concrete.** Cement and Concrete Research. Vol. 32. n.º 10. p. 1621–1638. doi:10.1016/S0008-8846(02)00836-0.
- GATES, L.; MASAD, E.; PYLE, R.; BUSHEE, D., 2011 – **Aggregate Image Measurement System 2 (AIMS2): Final Report.** Washington DC: Federal Highway Administration (FHWA), U.S. DoT.
- GOMES CORREIA, A.; ROQUE, A. J.; REIS FERREIRA, S. M.; FORTUNATO, E., 2012 – **Case Study to Promote the Use of Industrial Byproducts: The Relevance of Performance Tests.** Journal of ASTM International. Vol. 9. n.º 2. p. 18. doi:10.1520/JAI103705.
- GUENNEBAUD, G.; GROSS, M., 2007 – **Algebraic point set surfaces.** ACM Trans. Graph.; Vol. Vol. 26. n.º 3. doi:10.1145/1276377.1276406.
- GUO, Y.; MARKINE, V.; ZHANG, X.; QIANG, W.; JING, G., 2019 – **Image analysis for morphology, rheology and degradation study of railway ballast: A review.** Transportation Geotechnics. Vol. 18. p. 173-211. doi:10.1016/j.trgeo.2018.12.001.
- GUO, Y.; ZHAO, C.; MARKINE, V.; JING, G.; ZHAI, W., 2020 – **Calibration for discrete element modelling of railway ballast: A review.** Transportation Geotechnics. Vol. 23. doi:10.1016/j.trgeo.2020.100341.
- HUANG, H., 2010 – **Discrete element modeling of railroad ballast using imaging based aggregate morphology characterization.** Dissertação (PhD), Urbana-Champaign, Illinois: University of Illinois.
- HUANG, H.; TUTUMLUER, E., 2011 – **Discrete Element Modeling for fouled railroad ballast.** Construction and Building Materials. Vol. 25. n.º 8. p. 3306-3312.

- HUGHES, T. J. R., 2012 – **The Finite Element Method: Linear Static and Dynamic Finite Element Analysis**. Dover Publications. ISBN 9780486135021.
- HYSLIP, J. P.; VALLEJO, L. E., 1997 – **Fractal analysis of the roughness and size distribution of granular materials** Engineering Geology. Vol. 48. p. 231-244.
- INDRARATNA, B.; SALIM, W.; RUJIKIATKAMJORN, C., 2011 – **Advanced Rail Geotechnology – Ballasted Track**. Taylor & Francis. ISBN 978-0-203-81577-9.
- IONESCU, D., 2004 – **Evaluation of the engineering behaviour of railway ballast**. Dissertação (Ph.D.), Wollongong, Australia: University of Wollongong.
- JERÓNIMO, P., 2014 – **Caracterização Mecânica, Digitalização Volumétrica e Modelação Numérica de Partículas Rochosas para Balastro Ferroviário**. Dissertação (M.Sc.), Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- JERÓNIMO, P.; RESENDE, R.; FORTUNATO, E., 2020 – **An assessment of contact and laser-based scanning of rock particles for railway ballast**. Transportation Geotechnics. Vol. 22. doi:10.1016/j.trgeo.2019.100302.
- JING, G.; WANG, J.; WANG, H.; SIAHKOUHI, M., 2020 – **Numerical investigation of the behavior of stone ballast mixed by steel slag in ballasted railway track**. Construction and Building Materials. Vol. 262 doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.120015.
- KIAN, A. R. T.; SADEGHI, J.; ZAKERI, J.-A., 2020 – **Influences of railway ballast sand contamination on loading pattern of pre-stressed concrete sleeper**. Construction and Building Materials. Vol. 233. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.117324.
- KOH, T.; MOON, S.-W.; JUNG, H.; JEONG, Y.; PYO, S., 2018 – **A feasibility study on the application of basic oxygen furnace (BOF) steel slag for railway ballast material**. Sustainability. Vol. 10 n.º 2. p. 284.
- KOUROUSSIS, G.; VERLINDEN, O.; CONTI, C., 2011 – **Finite-Dynamic Model for Infinite Media: Corrected Solution of Viscous Boundary Efficiency**. Journal of Engineering Mechanics. Vol. 137. n.º 7. p. 509-511. doi:10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000250.
- KRUMBEIN, W. C., 1941 – **Measurement and geological significance of shape and roundness of sedimentary particles**. Journal of Sedimentary Research. Vol. Vol. 11. n.º 2. p. 64-72.
- KUMARA, G., 2013 – **Development of prediction methods for deformation characteristics of fouled ballasts based on laboratory experiments and discrete element method**. Dissertação (PhD), Yokohama National University.
- KUO, C.-M.; LIN, C.-C., 2017 – **Engineering performance of steel slag as railway ballast**. 10th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields (BCRRA 2017). Athens, Greece: 28-30 June 2017. pp. 1859-1864.
- KUTAY, M. E.; HANDE, I. O.; NELSON, G., 2010 – **3D Micromechanical Simulation of Compaction of Hot Mix Asphalt Using Real Aggregate Shapes Obtained from XRay CT**. Pavements and Materials. p. 86-98. doi:10.1061/41129(385)8.
- KUTAY, M. E.; OZTURK, H. I.; ABBAS, A. R.; HU, C., 2011 – **Comparison of 2D and 3D imagebased aggregate morphological indices**. Int. J. Pavement Eng. Vol. 12 n.º 4. p. 421–431. doi:10.1080/10298436.2011.575137.

- LAMAS-LOPEZ, F.; CUI, Y.-J.; CALON, N.; D'AGUIAR, S. C., 2015 – **Influence of moisture content on the dynamic properties of an interlayer soil under cyclic loading**. 13rd International Conference on Railway Engineering. Edinburgh: 30 June - 1 July.
- LANKARANI, H. M.; NIKRAVESH, P. E., 1990 – **A Contact Force Model With Hysteresis Damping for Impact Analysis of Multibody Systems**. Journal of Mechanical Design. Vol. 112. n.º 3. p. 369-376. doi:10.1115/1.2912617.
- LE PEN, L.; POWRIE, W.; ZERVOS, A.; AHMED, S.; AINGARAN, S., 2013 – **Dependence of shape on particle size for a crushed rock railway ballast**. Granular Matter. Vol. 15. p. 849-861. doi:DOI 10.1007/s10035-013-0437-5.
- LEKARP, F.; DAWSON, A., 1998 – **Modelling permanent deformation behaviour of unbound granular materials**. Construction and Building Materials. Vol. 12. n.º 1. p. 9-18. doi:10.1016/s0950-0618(97)00078-0.
- LIM, W. L.; MCDOWELL, G. R., 2005 – **Discrete element modelling of railway ballast**. Granular Matter. Vol. 7. n.º 1. p. 19-29. doi:10.1007/s10035-004-0189-3.
- LOBO-GUERRERO, S.; VALLEJO, L., 2006 – **Discrete Element Method Analysis of Railtrack Ballast Degradation during Cyclic Loading**. Granular Matter. Vol. 8. n.º 3. p. 195-204.
- LYSMER, J.; KUHLEMEYER, R. L., 1969 – **Finite dynamic model for infinite media**. Journal of the Engineering Mechanics Division. Vol. 95. n.º 4. p. 859-877.
- MARSAL, R. J., 1967 – **Large scale testing of rockfill materials**. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE. Vol. 93. n.º SM2. p. 27-43.
- MASAD, E.; BUTTON, J. W., 2000 – **Unified Imaging Approach for Measuring Aggregate Angularity and Texture**. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering Computations. Vol. 15. n.º 4. p. 273-280. doi:doi: 10.1111/0885-9507.00191.
- MASAD, E.; SAADEH, S.; AL-ROUSAN, T.; GARBOCZI, E.; D. LITTLE, 2005 – **Computations of particle surface characteristics using optical and X-ray CT images** Comput. Mater. Sci. Vol. 34. n.º 4. p. 406–424. doi:10.1016/j.commatsci.2005.01.010.
- MATLAB, 2013 – **MATLAB release R2013b documentation**. Natick, MA, USA: The MathWorks, Inc.
- MEZHER, S. B.; CONNOLLY, D. P.; WOODWARD, P. K.; LAGHROUCHE, O.; POMBO, J.; COSTA, P. A., 2015 – **Railway critical velocity – Analytical prediction and analysis**. Transportation Geotechnics. doi:10.1016/j.trgeo.2015.09.002.
- MOAVENI, M.; MAHMOUD, E.; ORTIZ, E. M.; TUTUMLUER, E.; BESHEARS, S., 2014 – **Use of Advanced Aggregate Imaging Systems to Evaluate Aggregate Resistance to Breakage, Abrasion, and Polishing**. Transportation Research Record. Vol. 2401. n.º 1. p. 1-10. doi:10.3141/2401-01.
- MOAVENI, M.; QIAN, Y.; BOLER, H.; MISHRA, D.; TUTUMLUER, E., 2014 – **Investigation of Ballast Degradation and Fouling Trends using Image Analysis**. 2nd International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance - Railways 2014. Ajaccio, Corsica, France: 8-11 April 2014. pp. 8-11.

- MORATA, M.; SABORIDO, C., 2017 – **Recycled aggregates with enhanced performance for railway track bed and form layers**. *Journal of Sustainable Metallurgy*. Vol. 3. n.º 2. p. 322–335. doi:10.1007/s40831-016-0095-z.
- NGUYEN, T. T.; INDRARATNA, B.; KELLY, R.; PHAN, N. M.; HARYONO, F., 2019 – **Mud pumping under railtracks: mechanisms, assessments and solutions**. *Australian Geomechanics Journal*. Vol. 54. n.º 4. p. 59-80.
- OUHBI, N.; VOIVRET, C.; PERRIN, G.; ROUX, J.-N., 2017 – **3D particle shape modelling and optimization through proper orthogonal decomposition**, *Granular Matter* Granular Matter. Vol. 19. n.º 4. doi:10.1007/s10035-017-0771-0.
- PAIM, F.; FORTUNATO, E.; PAIXÃO, A., 2022 – **Discrete element modelling of micro-Deval testing of steel slag ballast: the effect of particle discretisation on energy evaluation**. 5th International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance. Montpellier, France: 22-25 August 2022 (aceite para publicação).
- PAIXÃO, A., 2014 – **Transition zones in railway tracks: An experimental and numerical study on the structural behaviour**. Dissertação (Ph.D.), Porto: University of Porto, Faculty of Engineering.
- PAIXÃO, A.; FORTUNATO, E.; CALÇADA, R., 2014 – **Transition zones to railway bridges: track measurements and numerical modelling**. *Engineering Structures*. Vol. 80. p. 435-443. doi:10.1016/j.engstruct.2014.09.024.
- PAIXÃO, A.; FORTUNATO, E.; CALÇADA, R., 2015 – **Design and construction of backfills for railway track transition zones**. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. Vol. 229. n.º 1. p. 58-70. doi:10.1177/0954409713499016.
- PAIXÃO, A.; FORTUNATO, E., 2016 – **Sistemas de controlo e monitorização de ensaios de cargas cíclicas no âmbito do projeto MODER-B2**. LNEC - Proc. 0702/112/19721. R 32/2016 – DT/NIT.
- PAIXÃO, A.; VARANDAS, J.; FORTUNATO, E.; CALÇADA, R., 2016a – **Non-Linear Behaviour of Geomaterials in Railway Tracks under Different Loading Conditions**. 3rd Int. Conf. on Transportation Geotechnics - Advances in Transportation Geotechnics 3. Guimarães, Portugal: 4-7 Sep. Vol. 143; pp. 1128-1135. doi: 10.1016/j.proeng.2016.06.147.
- PAIXÃO, A.; VARANDAS, J. N.; FORTUNATO, E.; CALÇADA, R., 2016b – **Non-Linear Behaviour of Geomaterials in Railway Tracks under Different Loading Conditions**. *Procedia Engineering*. Vol. 143. p. 1128-1135. doi:10.1016/j.proeng.2016.06.147.
- PAIXÃO, A.; RESENDE, R.; FORTUNATO, E., 2018a – **Photogrammetry for digital reconstruction of railway ballast particles – A cost-efficient method**. *Construction and Building Materials*. Vol. 191. p. 963-976. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.10.048.
- PAIXÃO, A.; VARANDAS, J.; FORTUNATO, E.; CALÇADA, R., 2018b – **Numerical simulations to improve the use of under sleeper pads at transition zones to railway bridges**. *Engineering Structures*. Vol. 164. p. 169–182. doi:10.1016/j.engstruct.2018.03.005.
- PAIXÃO, A.; VARANDAS, J. N.; FORTUNATO, E.; CALÇADA, R., 2018c – **Numerical simulations to improve the use of under sleeper pads at transition zones to railway bridges**. *Engineering Structures*. Vol. 164. p. 169-182. doi:10.1016/j.engstruct.2018.03.005.

- PAIXÃO, A., 2019 – **ParticleMorphology\_batch; Version beta**. 2019. Disponível em: <[https://zenodo.org/record/3237809#.YGDj\\_69KiHt](https://zenodo.org/record/3237809#.YGDj_69KiHt)>.
- PAIXÃO, A.; AFONSO, C.; DELGADO, B. G.; FORTUNATO, E., 2021 – **Evaluation of ballast particle degradation under micro-Deval testing using photogrammetry**. The 4th International Conference on Transportation Geotechnics (4ICTG). Chicago, USA: 24-27 May, 2021 (aceite para publicação).
- PAIXÃO, A.; AFONSO, C.; FORTUNATO, E., 2021 – **Avaliação da degradação de partículas de balastro ferroviário no ensaio de micro-deval recorrendo à fotogrametria**. 17º Congresso Nacional de Geotecnia. Lisboa: setembro de 2021 (aceite para publicação).
- PAIXÃO, A.; FORTUNATO, E., 2021 – **Abrasion evolution of steel furnace slag aggregate for railway ballast: 3D morphology analysis of scanned particles by close-range photogrammetry**. Construction and Building Materials. Vol. 267. n.º 121225. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.121225.
- PIRES, P.; JUNIOR, J.; VIANNA, Á.; ANTUNES, F.; BARRETO, J.; SALLES, F., 2006 – **Avaliação do emprego de escória de aciaria com material para lastro de ferrovia**. XIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (COBRAMSEG). Curitiba, Brasil: pp. 1-8.
- QIAN, Y.; MISHRA, D.; TUTUMLUER, E.; HASHASH, Y. M. A.; GHABOUSSI, J., 2016 – **Moisture effects on degraded ballast shear strength behavior**. 2016 Joint Rail Conference - JRC2016. Columbia, SC, USA: April 12-15.
- RAMOS, A. L.; FORTUNATO, E.; RESENDE, R.; MURALHA, J., 2014 – **Caracterização e modelação numérica da rugosidade de descontinuidades rochosas**. Geotecnia, Revista da Sociedade Portuguesa de Geotecnia. Vol. 132. p. 5-22.
- RAO, C.; TUTUMLUER, E., 2000 – **Determination of Volume of Aggregates: New Image-Analysis Approach**. Transportation Research Record. Vol. 1721. n.º 1. p. 73-80. doi:10.3141/1721-09.
- RAYMOND, G. P.; DIYALJEE, V. A., 1979 – **Railroad ballast load ranking classification**. Journal of the Geotechnical Engineering Division. Vol. 105. n.º 10. p. 1133-1153.
- RESENDE, R.; RAMOS, A. L.; MURALHA, J.; FORTUNATO, E.; LAMAS, L., 2014 – **Characterisation and numerical modelling of the geometry of rock joints**. Proc. of the 8th Asian Rock Mechanics Symposium “ARMS8”. Sapporo, Japão: 14-16 out. 2014.
- RESENDE, R.; MURALHA, J.; RAMOS, A. L.; FORTUNATO, E., 2015 – **Rock joint topography: three-dimensional scanning and numerical analysis**. Géotechnique Letters. Vol. 5. n.º 4. p. 318-323. doi:10.1680/jgele.15.00046.
- RESENDE, R.; MURALHA, J.; RAMOS, A. L.; FORTUNATO, E., 2016 – **Estudo do contacto e vazios em descontinuidades rochosas através de digitalização tridimensional**. 15º Congresso Nacional de Geotecnia. Porto: 19-23 jun. 2016.
- RIBEIRO, D.; CALÇADA, R.; DELGADO, R.; BREHM, M.; ZABEL, V., 2013 – **Finite-element model calibration of a railway vehicle based on experimental modal parameters**. Vehicle System Dynamics. Vol. 51. n.º 6. p. 821-856. doi:10.1080/00423114.2013.778416.

- RIBEIRO, V., 2015 – **Estudos sobre métodos não destrutivos de caracterização do comportamento dinâmico da via-férrea com diversos tipos de fundação**. Dissertação (MSc.), Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- RODRIGUEZ, J. M.; EDESKÄR, T.; KNUTSSON, S., 2013 – **Particle Shape Quantities and Measurement Techniques—A Review**. The Electronic Journal of Geotechnical Engineering. Vol. 18. p. 169-198.
- SANTOS, C.; PAIXÃO, A.; FORTUNATO, E.; MORAIS, P., 2016 – **Sistema de aplicação de cargas cíclicas para estudo do comportamento da via-férrea**. 10º Congresso Nacional de Mecânica Experimental - CNME2016. LNEC, Lisboa,: 12-14 de outubro de 2016.
- SELIG, E. T.; WATERS, J. M., 1994 – **Track geotechnology and substructure management**. London: Thomas Telford. ISBN 0727720139, 9780727720139.
- SEVI, A., 2008 – **Physical modeling of railroad ballast using the parallel gradation scaling technique within the cyclical triaxial framework**. Dissertação (Ph.D), Missouri University of Science and Technology.
- SEVI, A.; GE, L., 2012 – **Cyclic behaviors of railroad ballast within the parallel gradation scaling framework**. Journal of Materials in Civil Engineering. Vol. 24. n.º 7. p. 797-804.
- SHAN, Y.; ALBERS, B.; SAVIDIS, S. A., 2013 – **Influence of different transition zones on the dynamic response of track–subgrade systems**. Computers and Geotechnics. Vol. 48. n.º -. p. 21-28. doi:10.1016/j.compgeo.2012.09.006.
- SIMÕES, D., 2015 – **Caracterização de materiais de subestrutura de via-férrea com aplicação de cargas cíclicas**. Dissertação (MSc), Porto: Universidade do Porto.
- SKOGLUND, K. A., 2002 – **A Study of some Factors in Mechanistic Railway Track Design**. Dissertação (Ph.D), Trondheim, Norway: Norwegian University of Science and Technology.
- ŠMILAUER ET AL., V., 2015 – **Yade Documentation**. 2nd.
- SUIKER, A. S. J., 2002 – **The Mechanical Behaviour of Ballasted Railway Tracks**. Dissertação (Ph.D), Delft, The Netherlands: Delft University of Technology.
- SUIKER, A. S. J.; BORST, R. D., 2003 – **A numerical model for the cyclic deterioration of railway tracks**. International Journal for Numerical Methods in Engineering. Vol. 57. n.º 4. p. 441-470.
- SUIKER, A. S. J.; SELIG, E. T.; FRENKEL, R., 2005 – **Static and Cyclic Triaxial Testing of Ballast and Subballast**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. Vol. 131. n.º 6. p. 771-782.
- SUN, Q.; ZHENG, J., 2020 – **Realistic soil particle generation based on limited morphological information by probability-based spherical harmonics**. Computational Particle Mechanics. doi:doi: 10.1007/s40571-020-00325-6.
- TENNAKOON, N.; INDRARATNA, B.; NIMBALKAR, S., 2014 – **Impact of Ballast Fouling on Rail Tracks**. 2nd International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance - Railways 2014. Ajaccio, Corsica, France: 8-11 April 2014. doi: 10.4203/ccp.104.122.
- TIMOSHENKO, S.; GOODIER, J. N., 1969 – **Theory of Elasticity**. McGraw-Hill. ISBN 9780070642706.

- TRINH, V. N.; TANGA, A. M.; CUI, Y.-J.; DUPLA, J.-C.; CANOU, J.; CALON, N.; LAMBERTB, L.; ROBINET, A.; SCHOEN, O., 2012 – **Mechanical characterisation of the fouled ballast in ancient railway track substructure by large-scale triaxial tests.** Journal of the Japanese Geotechnical Society: Soils and Foundations. Vol. 52. n.º 3. p. 511–523. doi:10.1016/j.sandf.2012.05.009.
- TUTUMLUER, E.; FENG, B.; HOU, W.; EDWARDS, J. R.; DERSCH, M. S.; MELNICZUK, S., 2019 – **Field loading and tie support conditions influencing track substructure – modeling ballast behavior and statistical perspective.** AREMA 2019 Annual Conference. Minneapolis, Minnesota, USA.
- UIC, 2008 – **CODE 719 R, Earthworks and track bed for railway lines.** Paris: Union Internationale des Chemins de Fer. 2-7461-0568-3.
- UTHUS, L.; HOFF, I.; HORVLI, I., 2005 – **Evaluation of grain shape characterization methods for unbound aggregates** 7th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields - BCRA 2005. Trondheim, Noruega: 27 a 29 de julho, 2005.
- VARANDAS, J., 2013 – **Long-term behaviour of railway transitions under dynamic loading.** Dissertação (Ph.D.), Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.
- VARANDAS, J.; PAIXÃO, A.; FORTUNATO, E.; HÖLSCHER, P.; CALÇADA, R., 2014 – **Numerical modelling of railway bridge approaches: influence of soil non-linearity.** The International Journal of Railway Technology. Vol. 3. n.º 4. p. 73-95. doi:10.4203/ijrt.3.4.4.
- VARANDAS, J.; PAIXÃO, A.; FORTUNATO, E.; HÖLSCHER, P., 2016a – **A numerical study on the stress changes in the ballast due to train passages.** 3rd Int. Conf. on Transportation Geotechnics - Advances in Transportation Geotechnics 3. Guimarães, Portugal: 4-7 Sep. Vol. 143; pp. 1169-1176. doi: 10.1016/j.proeng.2016.06.127.
- VARANDAS, J. N.; CORREIA, B.; PAIXÃO, A.; FORTUNATO, E.; HÖLSCHER, P., 2016b – **Dynamic train-track interaction due to inhomogeneous foundations.** The Third International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance (Railways 2016). Cagliari, Sardinia, Italy: 5-8 Apr. 2016. p. 15. doi: 10.4203/ccp.110.198.
- VARANDAS, J. N.; HÖLSCHER, P.; SILVA, M. A. G., 2016c – **Three-dimensional track-ballast interaction model for the study of a culvert transition.** Soil Dynamics and Earthquake Engineering. Vol. 89. p. 116-127. doi:10.1016/j.soildyn.2016.07.013.
- VARANDAS, J. N.; PAIXÃO, A.; FORTUNATO, E.; HÖLSCHER, P., 2016d – **A Numerical Study on the Stress Changes in the Ballast Due to Train Passages.** Procedia Engineering. Vol. 143. p. 1169-1176. doi:10.1016/j.proeng.2016.06.127.
- VARANDAS, J. N.; PAIXÃO, A.; FORTUNATO, E., 2017 – **A study on the dynamic train-track interaction over cut-fill transitions on buried culverts.** Computers & Structures. Vol. 189. p. 49-61. doi:10.1016/j.compstruc.2017.04.017.
- VARANDAS, J. N.; PAIXÃO, A.; FORTUNATO, E.; HÖLSCHER, P., 2018 – **Calibration of a high-cycle accumulation model for granular materials of railway track layers using tests of variable cyclic load amplitudes.** 4th International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance (Railways 2018). Sitges, Barcelona, Spain: 3-7 September 2018.

- VARANDAS, J. N.; PAIXÃO, A.; FORTUNATO, E.; ZUADA COELHO, B.; HÖLSCHER, P., 2020 – **Long-term deformation of railway tracks considering train-track interaction and non-linear resilient behaviour of aggregates - a 3D FEM implementation**. Computers and Geotechnics. Vol. 126. n.º 103712. doi:10.1016/j.compgeo.2020.103712.
- VARANDAS, J. N.; PAIXÃO, A.; FORTUNATO, E.; ZUADA COELHO, B.; HÖLSCHER, P., 2022 – **Numerical study on the influence of long-term deformation of the railway tracks on the evolution of the track stiffness**. 5th International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance. Montpellier, France: 22-25 August 2022 (aceite para publicação).
- WADELL, H., 1932 – **Volume, Shape, and Roundness of Rock Particles**; . The Journal of Geology. Vol. 40. n.º 5. p. 443-451.
- WANG, H.-L.; CUI, Y.-J.; LAMAS-LOPEZ, F.; DUPLA, J.-C.; CANOU, J.; CALON, N.; SAUSSINE, G.; AIMEDIEU, P.; CHEN, R.-P., 2017 – **Effects of inclusion contents on resilient modulus and damping ratio of unsaturated track-bed materials**. Canadian Geotechnical Journal. Vol. 54. p. 1672–1681. doi:10.1139/cgj-2016-0673.
- WINKLER, E., 1867 – **Die Lehre von der Elasticitaet und Festigkeit**. Prague: H. Dominicus.
- WU, C., 2013 – **Towards linear-time incremental structure from motion**. 2013 International Conference on 3D Vision (3DV 2013). Seattle, Washington, USA: pp. 127–134. doi: 10.1109/3dv.2013.25.
- WU, J.; WANG, L.; HOU, Y.; QIAN, Z.; MENG, L.; ZHAO, Q., 2018 – **Simulation on the Micro-Deval test for the aggregate wear properties measurement**. Construction and Building Materials. Vol. 180 p. 445–454. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.03.264.
- ZHAI, W. M., 1996 – **Two simple fast integration methods for large-scale dynamic problems in engineering**. International Journal for Numerical Methods in Engineering. Vol. 39. n.º 24. p. 4199-4214. doi:10.1002/(sici)1097-0207(19961230)39:24<4199::aid-nme39>3.0.co;2-y.
- ZHAO, L.; ZHANG, S.; HUANG, D.; WANG, X.; Y. ZHANG, 2020 – **3D shape quantification and random packing simulation of rock aggregates using photogrammetry-based reconstruction and discrete element method**. Construction and Building Materials. Vol. 262. n.º 119986. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.119986.

