

# MISTURAS DE ESCÓRIAS DE ACIARIA COM BORRACHA PARA A CAMADA DE SUB-BALASTRO FERROVIÁRIO

## Steel slag-rubber mixtures for railway track sub-ballast layer

Sara Rios<sup>a</sup>, Rubens Alves<sup>a,b</sup>, António Viana da Fonseca<sup>a</sup>, André Paixão<sup>c</sup>, Eduardo Fortunato<sup>c</sup>, José Nuno Varandas<sup>d</sup>

<sup>a</sup> CONSTRUCT-GEO, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, Portugal

<sup>b</sup> Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Estado do Rio Grande do Norte, Natal, Brasil

<sup>c</sup> Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa, Portugal

<sup>d</sup> CERIS, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa, Caparica, Portugal

**RESUMO** – A construção de infraestruturas de transporte mais sustentáveis requer a utilização de materiais que combinem eficiência técnica e viabilidade económica e ambiental. Este estudo, desenvolvido no âmbito do projeto de investigação ECO\_RORAIL, avalia misturas de escória de aciaria com borracha triturada de pneus em fim de vida para camadas não ligadas de apoio de infraestruturas de transporte. O programa experimental compreende ensaios triaxiais monotónicos e cíclicos para avaliar resistência ao corte e módulo resiliente. Em paralelo, recorre-se à modelação numérica 3D pelo método dos elementos finitos para avaliar a resposta estrutural da ferrovia com camada de sub-balastro constituída por estas misturas, variando o teor de borracha. Os resultados laboratoriais indicam comportamento adequado quando o teor de borracha é inferior a 5% em massa e a escória cumpre a granulometria especificada. A análise numérica sugere uma redução das tensões deviatoricas, melhoria da dispersão das cargas em profundidade, contribuindo para mitigar a degradação do balastro e a concentração de tensões no solo de fundação, aumentando a resiliência estrutural.

**ABSTRACT** – The construction of more sustainable transport infrastructures requires the use of materials that combine technical efficiency with economic and environmental viability. This study, carried out as part of the ECO\_RORAIL research project, evaluates mixtures of steel slag with shredded end-of-life tyres for use in unbound layers supporting transport infrastructures. The experimental programme comprises monotonic and cyclic triaxial tests to assess shear strength, resilient modulus, and permanent deformation. In parallel, 3D FEM numerical modelling is employed to evaluate the structural response of railway systems with a sub-ballast layer composed of these mixtures, varying the rubber content. The laboratory results indicate suitable behaviour when the rubber content is below 5% by mass, and the slag meets the specified granulometry. Numerical analysis suggests a reduction in deviatoric stresses, improved load dispersion at depth, helping to mitigate ballast degradation and stresses concentration in the foundation soil, thus enhancing structural resilience.

**Palavras Chave** – sub-produtos industriais, ensaios triaxiais cíclicos, modelação numérica.

**Keywords** – industrial by-products, cyclic triaxial tests, numerical modelling.

---

E-mails: sara.rios@fe.up.pt (S. Rios), rubens.alves@ifrn.edu.br (R. Alves), viana@fe.up.pt (A. Viana da Fonseca), apaixao@lnec.pt (A. Paixão), efortunato@lnec.pt (E. Fortunato), jnsf@fct.unl.pt (J.N. Varandas)

ORCID: orcid.org/0000-0002-2625-1452 (S. Rios), orcid.org/0000-0002-6249-1787 (R. Alves), orcid.org/0000-0002-9896-1410 (A. Viana da Fonseca), orcid.org/0000-0002-1665-7037 (A. Paixão), orcid.org/0000-0002-9968-0821 (E. Fortunato), orcid.org/0000-0002-7083-1278 (J.N. Varandas)

## 1 – INTRODUÇÃO

A indústria siderúrgica gera grandes quantidades de escória, descartadas durante o processo de produção do aço. Nos fornos elétricos a arco (Electric Arc Furnaces - EAF), são produzidos aproximadamente 200 kg de escória de aço por tonelada de aço (WSA, 2025). Com uma produção mundial de aço de  $1,88 \times 10^9$  toneladas em 2022, isso corresponde a cerca de 376 milhões de toneladas de escória de EAF geradas (WSA, 2025). A deposição de escórias de aço constitui, assim, uma preocupação crescente em muitas regiões, particularmente devido a um aumento de 50% da produção de aço ao longo da última década. Por exemplo, a Europa produziu 16,8 milhões de toneladas de escórias de aço em 2021 (www.euroslag.com). A escória de EAF tem sido aplicada em diversas áreas da engenharia civil, incluindo a produção de betão convencional (Arribas et al., 2015), betão betuminoso (Shi, 2004), camadas de base e sub-base rodoviárias (Liu et al., 2022), balastro ferroviário (Hussain e Hussaini, 2022) e sub-balastro. Adicionalmente, pode ser utilizada na produção de cimento, entre outras aplicações (EuroSlag, 2018). De forma semelhante, a borracha proveniente de pneus em fim de vida útil pode ser reutilizada sob diferentes formas, inteiros ou triturados, em diversas aplicações, conforme especificado na ASTM D6270 (ASTM, 2020), beneficiando das suas propriedades resilientes. No entanto, cerca de 8% destes pneus continuam a ser depositados em aterros ou armazenados em pilhas (www.etrma.org), exercendo impactos ambientais consideráveis.

Em simultâneo, os gestores de infraestruturas de transporte demonstram preocupação com a eficiência e a sustentabilidade das operações de construção, exploração e manutenção de estradas e ferrovias. Por um lado, torna-se cada vez mais difícil encontrar agregados naturais adequados que satisfaçam as especificações técnicas exigidas para infraestruturas de transporte. Por outro lado, as preocupações associadas à sustentabilidade impulsionam a reutilização e a reciclagem de subprodutos industriais, como demonstram os objetivos de desenvolvimento sustentável das Nações Unidas.

As diferentes aplicações das escórias e da borracha contribuem para a redução das quantidades depositadas em aterro ou armazenadas, mitigando, assim, os custos económicos e ambientais associados. Além disso, a incorporação destes subprodutos industriais em infraestruturas de transporte evita a extração de matérias-primas naturais, alinhando-se plenamente com os princípios da economia circular (Hidalgo Signes et al., 2016; Gökalp et al., 2018). Nas infraestruturas de transporte, as camadas granulares não ligadas reduzem e transmitem as tensões para as camadas subjacentes, limitando simultaneamente a migração ascendente de partículas finas provenientes do subleito. Contudo, a aplicação repetida de cargas ao longo do tempo pode conduzir a danos (nomeadamente sob a forma de deformações permanentes excessivas e formação de rodeiras por fadiga), evidenciando a necessidade de avaliar o desempenho a longo prazo da subestrutura (Ramos et al., 2020). Com efeito, a compreensão dos mecanismos de deformação e de rotura dos geomateriais sob carregamento cíclico é de extrema importância, uma vez que a deformação permanente pode comprometer tanto a integridade estrutural como o conforto dos passageiros (Puppala et al., 2009). Assim, a compreensão aprofundada destes aspetos assume elevado valor no planeamento da manutenção das estruturas ferroviárias, com o objetivo de minimizar os custos de manutenção.

As escórias de aço caracterizam-se, tipicamente, por agregados resistentes, densos e de forma aproximadamente cúbica, com boa resistência ao polimento (Paixão e Fortunato, 2021). Como consequência, estes materiais apresentam elevados ângulos de atrito, elevado módulo de rigidez, baixos valores de abrasão nos ensaios de Los Angeles e micro-Deval, e elevado peso específico (Gomes Correia et al., 2012). Estas propriedades tornam-nos substitutos promissores dos materiais naturais nas camadas de suporte de infraestruturas de transporte, nomeadamente em estradas e ferrovias.

A incorporação de quantidades limitadas de borracha em camadas de sub-balastro e balastro constituídas por agregados naturais foi avaliada por Hidalgo Signes et al. (2015), através de ensaios

CBR, ensaios de abrasão e ensaios triaxiais cíclicos (Farooq e Nimbalkar, 2023), e por Guo et al. (2019), através de análises de imagem 3D, tendo sido reportada uma redução da fragmentação das partículas sem comprometer a capacidade de suporte exigida. Qi et al. (2024) apresentam várias soluções para incorporação de borracha na via-férrea. Indraratna et al. (2018) estudaram uma mistura de resíduos de lavagem de carvão, escória de forno siderúrgico e granulado de borracha como material de sub-balastro, com o objetivo de ultrapassar problemas de expansão e fragmentação das partículas de escória e do resíduo de carvão. A mistura global apresentou um comportamento favorável em termos de permeabilidade, comportamento tensão-deformação monotónico, fragmentação das partículas e pressão de expansão. Hidalgo Signes et al. (2017) e Martínez Fernández et al. (2018) realizaram ensaios laboratoriais e medições em campo, demonstrando uma redução muito significativa (até 50%) do valor médio do pico de aceleração com a incorporação de borracha. Este resultado está de acordo com o aumento da capacidade de absorção de energia das misturas solo-borracha, conforme reportado por Rios et al. (2021).

Neste trabalho pretende-se utilizar a ampla caracterização experimental das misturas de escória de aciaria e borracha para obter os parâmetros de calibração de um modelo numérico 3D da via-férrea, de forma a avaliar o impacto destas misturas no comportamento da via.

## 2 – MATERIAIS E PROCEDIMENTOS

### 2.1 – Escórias de aciaria – Agregado siderúrgico inerte para construção (ASIC)

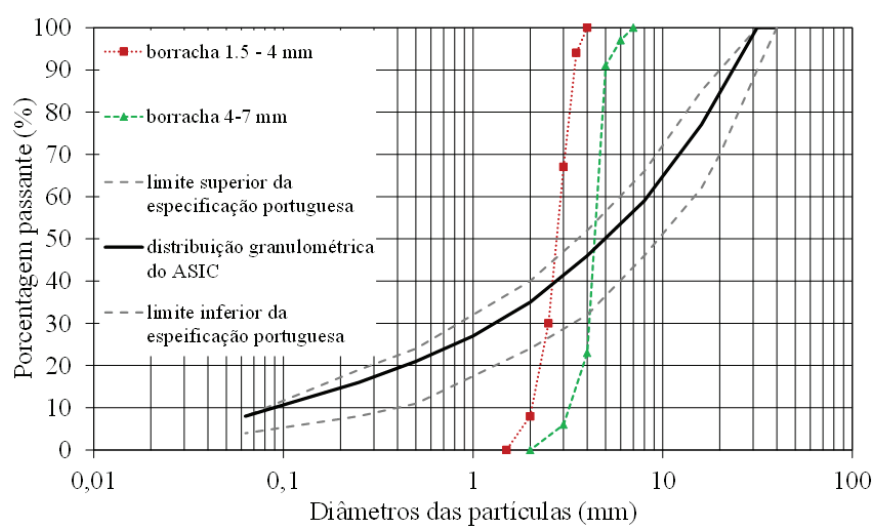
A escória de aço utilizada neste estudo foi proveniente da Siderurgia Nacional da Maia (Portugal). A análise por fluorescência de raios X revelou que os óxidos de ferro, cálcio e sílica representam cerca de 70% da sua composição (Alves et al., 2023). Embora os óxidos de cálcio e de magnésio possam provocar fenómenos de expansão devido à hidratação, a escória é submetida a um tratamento industrial que permite a sua certificação ao abrigo da marcação CE europeia como “Agregado Siderúrgico Inerte para Construção - ASIC”, adequado para aplicações em engenharia civil e rodoviária. Em resultado do processamento industrial prévio, o material apresenta propriedades estáveis, sendo denso, rígido, limpo e resistente à abrasão (Gomes Correia et al., 2012). Os principais parâmetros físicos encontram-se resumidos no Quadro 1.

**Quadro 1 – Propriedades geotécnicas da escória.**

| Parâmetros                    | Valores                |
|-------------------------------|------------------------|
| D <sub>50</sub>               | 5 mm                   |
| Teor de finos (< 0,074 mm)    | 8%                     |
| Massa volúmico real dos grãos | 3,53 Mg/m <sup>3</sup> |
| Massa volúmica seca           | 2,85 Mg/m <sup>3</sup> |
| Teor em água ótimo            | 4%                     |
| CBR                           | 213%                   |

Tal como ilustrado na curva granulométrica (Figura 1), o material é classificado como um pedregulho bem graduado com silte, de acordo com o Sistema Unificado de Classificação dos Solos, e enquadra-se nas especificações portuguesas para sub-balastro, semelhantes às especificações aplicáveis às sub-bases granulares não ligadas para estradas. Esta conformidade assegura a sua eficácia como camada separadora e filtrante, permitindo a drenagem, o controlo da pressão

intersticial sob carregamento cíclico e a prevenção da migração de partículas entre o subleito e o balastro (Alves et al., 2024).



**Fig. 1** – Distribuições granulométricas do ASIC e da borracha, enquadradas nos limites da especificação portuguesa (IP, 2023).

**2.2 – Borracha triturada de pneus em fim de vida**

A borracha utilizada neste estudo foi obtida por trituração mecânica de pneus em fim de vida útil fornecidos pela GENAN®, resultando da combinação de duas diferentes classes granulométricas. Isento de fios metálicos, o material é constituído por partículas com dimensões compreendidas entre 1,5 e 7 mm (Figura 1) e é classificado como borracha granulada de acordo com a norma ASTM D6270 (ASTM, 2020).

**2.3 – Preparação dos provetes e procedimentos de ensaio**

Nas misturas contendo borracha, as partículas de escória correspondentes à fração granulométrica entre 1,5 e 7 mm foram substituídas por borracha, garantindo que a curva granulométrica global se mantivesse consistente com a da escória. Ambos os constituintes foram misturados manualmente até se obter uma mistura homogénea, resultando num material com potencial aplicabilidade como substituto de camadas de sub-balastro ou sub-base. A compactação foi realizada com um martelo vibratório especificamente adaptado para este fim, equipado com uma haste e um disco de 148 mm de diâmetro. Cada provete foi compactado em camadas de 50 mm de espessura, aplicando-se 1 minuto de vibração por camada. As misturas com teores de borracha (Rb) de 0%, 2,5%, 5%, 7,5% e 10% em massa foram compactadas à respetiva humidade ótima, determinada a partir da curva de compactação.

Para os ensaios triaxiais, foram moldados provetes cilíndricos com 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura, com uma extensão adicional de 50 mm. A fase de consolidação consistiu na aplicação de uma tensão constante durante um período mínimo de 12 horas. Os ensaios monotónicos foram realizados com uma taxa de deformação axial de 0,2 mm/min, utilizando uma prensa de carga com capacidade de 100 kN, tendo a rotura ocorrido pouco após a tensão de pico, através de um plano de corte, comportamento típico de materiais densos. Os ensaios triaxiais cíclicos foram executados de acordo com o Método B (tensão de confinamento constante) da norma EN 13286-7 (CEN, 2004),

seguindo a sequência de carregamento descrita no Quadro 2, definida em função da tensão de confinamento efetiva ( $\sigma'_3$ ) e da tensão de desvio máxima ( $q_{\max}$ ). O carregamento aplicado foi sinusoidal, com uma frequência de 1 Hz, oscilando entre uma tensão de desvio mínima de aproximadamente 5 kPa ( $q_{\min}$ ) e a tensão de desvio máxima especificada ( $q_{\max}$ ).

**Quadro 2** – Propriedades geotécnicas da escória.

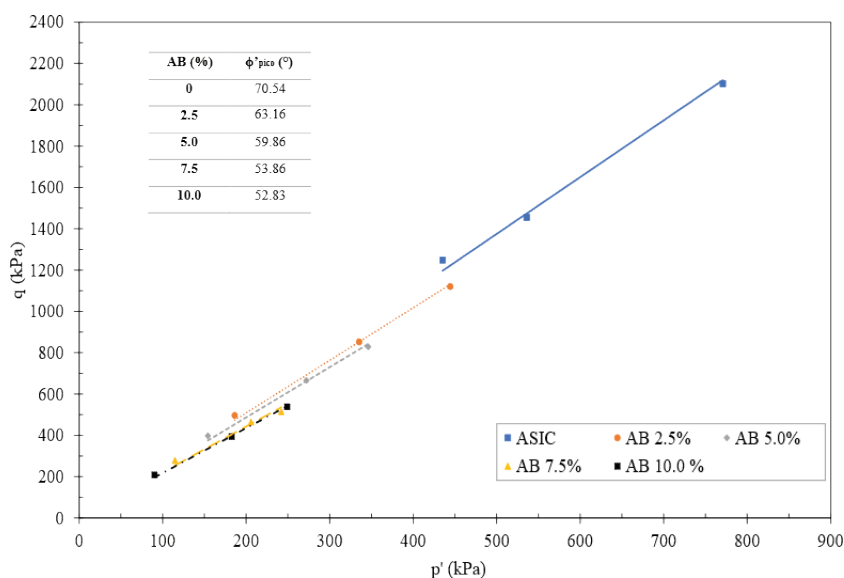
| $\sigma'_3$ (kPa) | $q_{\max}/\sigma'_3$         | Nº ciclos   |
|-------------------|------------------------------|-------------|
| 70                | 4,86                         | 20000       |
| 20                | 1,50; 2,50; 4,00; 5,75       | 100/estágio |
| 35                | 1,43; 2,29; 3,29; 4,29; 5,71 | 100/estágio |
| 80                | 1,60; 2,30; 3,00; 4,00; 5,60 | 100/estágio |
| 70                | 1,64; 2,14; 2,86; 4,00; 4,86 | 100/estágio |
| 100               | 1,50; 2,00; 2,80; 3,40; 4,00 | 100/estágio |
| 150               | 1,33; 1,87; 2,27; 2,67; 3,17 | 100/estágio |

### 3 – CARACTERIZAÇÃO GEOTECNICA DAS MISTURAS ASIC-BORRACHA

#### 3.1 – Comportamento monotónico

As curvas tensão-deformação foram obtidas a partir de ensaios triaxiais de compressão monotónica realizados nas misturas escória-borracha, sendo expressas em termos de tensão de desvio ( $q = \sigma_1 - \sigma_3$ , onde  $\sigma_1$  e  $\sigma_3$  correspondem, respetivamente, às tensões principais máxima e mínima) em função da deformação axial ( $\epsilon_a$ ). As misturas apresentaram uma resposta tensão-deformação típica de materiais granulares densos, com uma resistência de pico bem definida seguida de amolecimento pós-pico. O pico mostrou-se mais pronunciado para teores mais baixos de borracha. A resistência de pico diminuiu com o aumento do teor de borracha, variando o ângulo de resistência ao corte de 71° (Rb = 0%) para (Figura 2): 63° (Rb = 2,5%); 60° (Rb = 5,0%); 54° (Rb = 7,5%); 53° (Rb = 10%).

Teores mais elevados de borracha conduziram também a maiores deformações axiais no pico, indicando uma perda de rigidez, resultante da substituição de partículas rígidas de escória por borracha mais deformável. Ainda assim, apesar desta redução, todas as misturas mantiveram ângulos de atrito residual relativamente elevados, indicando que a presença de borracha influencia de forma mais significativa a rigidez do que a resistência ao corte. Este comportamento é consistente com a dimensão elevada das partículas de escória, que promove uma dilatância acentuada. A evolução da rigidez com o teor de borracha foi avaliada através do módulo de rigidez secante determinado a 50% da tensão de desvio de pico e normalizado pela tensão de confinamento. Para baixos teores de borracha, a rigidez diminuiu com o aumento de Rb; contudo, para  $Rb \geq 7,5\%$ , o módulo tende a estabilizar, refletindo o comportamento observado na resistência. Tal sugere que, acima deste limiar, a influência da borracha no comportamento da mistura torna-se mais marcada, independentemente da sua proporção exata.

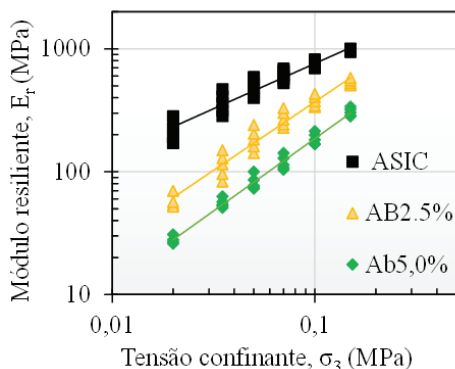


**Fig. 2** – Trajetórias de tensões para as diferentes misturas analisadas. Nota: AB2,5% corresponde a uma mistura ASIC-borracha com teor de borracha de 2,5% (adaptado de Alves et al., 2023).

### 3.2 – Comportamento cíclico

O módulo resiliente ( $E_r$ ) dos materiais granulares não ligados é amplamente reconhecido como dependente do estado de tensão, tendo sido propostos numerosos modelos para expressar o módulo resiliente em função das tensões aplicadas (Han-Cheng et al., 2020). O comportamento resiliente das misturas escória-borracha é apresentado, em função da tensão de confinamento, na Figura 3.

Os resultados indicam uma redução progressiva do módulo resiliente com o aumento do teor de borracha. Ainda assim, o comportamento característico dos materiais granulares - nomeadamente o aumento do módulo com o acréscimo da tensão de confinamento - mantém-se evidente nas misturas escória-borracha, evidenciando uma sensibilidade marcada à tensão de confinamento  $\sigma_3$ .



**Fig. 3** – Módulo resiliente das misturas com diferentes teores de borracha em função da tensão de confinamento. Nota: AB2,5% corresponde a uma mistura ASIC-borracha com teor de borracha de 2,5% (adaptado de Alves et al., 2023).

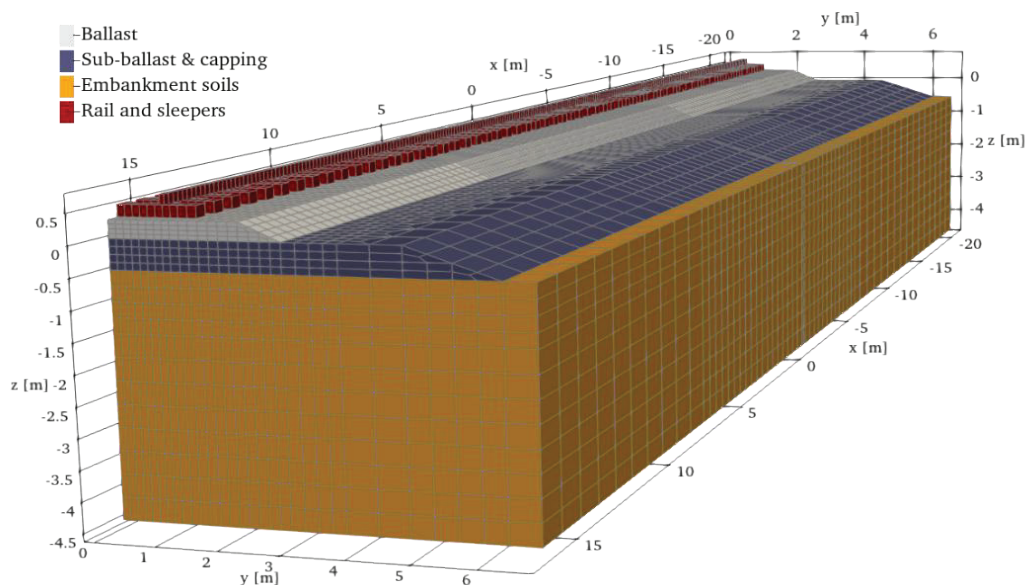
## 4 – MODELAÇÃO NUMÉRICA

### 4.1 – Descrição do modelo numérico 3D FEM

A modelação numérica baseou-se num modelo 3D de elementos finitos para análise dinâmica veículo-via, implementado em MATLAB®, incorporando o acoplamento veículo-via e as não-linearidades relevantes, conforme a formulação base apresentada em (Varandas et al., 2016) e desenvolvimentos recentes para via balastrada de alta velocidade (Varandas et al., 2025). O sistema é decomposto em: (i) veículo: idealizado por corpos rígidos ligados por elementos mola-amortecedor; (ii) superestrutura: com carris e travessas em vigas de Euler-Bernoulli e fixações/palmilhas de carril por elementos mola-amortecedor; e (iii) subestrutura: discretizada por elementos sólidos hexaédricos de 8 nós (integração completa) representando balastro, sub-balastro, coroamento, aterro e fundação.

O domínio de cálculo discretiza a via e a subestrutura num volume com cerca de 37 m de comprimento, 7 m de largura e 4 m de profundidade (Figura 4). Considerando a simetria relativamente ao eixo da via, apenas meia secção transversal é modelada, correspondendo a uma largura representada de cerca de 14 m. A profundidade efetiva simulada atinge cerca de 9 m, uma vez que os solos de aterro assentam numa fundação visco-elástica equivalente (não explicitada geometricamente com elementos sólidos). A malha integra 1822 elementos de viga (1763 nós) na superestrutura e 83 064 elementos sólidos (90 297 nós) na subestrutura, assegurando resolução adequada para campos de tensão e deformação sob carregamento móvel.

Para minimizar reflexões artificiais associadas à propagação de ondas, as fronteiras laterais incluem amortecedores viscosos não-refletores. A interação dinâmica inclui contacto roda-carril (Hertz) e contacto/fricção travessa-balastro (Coulomb), essenciais para reproduzir a variabilidade espacial e temporal das forças transmitidas. As palmilhas foram caracterizadas por rigidez vertical de 160 kN/mm e amortecimento de 17 kNs/m.



**Fig. 4** – Esquema do modelo 3D e domínio de cálculo (Paixão et al., 2026).



## 4.2 – Parametrização, casos de estudo e condições de carregamento

A parametrização distingue materiais elásticos lineares de materiais granulares com resposta resiliente não-linear dependente do estado de tensão, nomeadamente balastro, sub-balastro e coroamento seguem uma lei  $k-\theta$  para reproduzir a variação do módulo resiliente ( $E_r$ ) com o confinamento, sob carregamento cíclico. Os parâmetros do balastro baseiam-se em trabalhos prévios e os das misturas escória-borracha decorrem da caracterização laboratorial descrita na Secção 3, em função do teor de borracha.

Consideraram-se três cenários, variando apenas as propriedades da camada sub-balastro/coroamento (Quadro 3) para 0%, 2,5% e 5% de borracha (massa seca de borracha/massa seca total). Os restantes componentes do sistema mantiveram-se constantes, permitindo avaliar o efeito associado à redução de rigidez e ao aumento de amortecimento considerados para as misturas com borracha.

Considerou-se amortecimento de Rayleigh, ajustado para aproximar o comportamento dissipativo nas frequências de 2 e 100 Hz, adotando-se  $\zeta = 3\%$  para a maioria dos geomateriais e valores superiores nas misturas com borracha, em linha com Hidalgo Signes et al. (2017). O carregamento corresponde à passagem de um Alfa Pendular ( $\sim 132$  kN/eixo) a 200 km/h, analisando-se forças dinâmicas roda-carril, deslocamentos verticais do carril, rigidez vertical efetiva e campos de tensões na subestrutura.

## 4.3 – Resultados e discussão

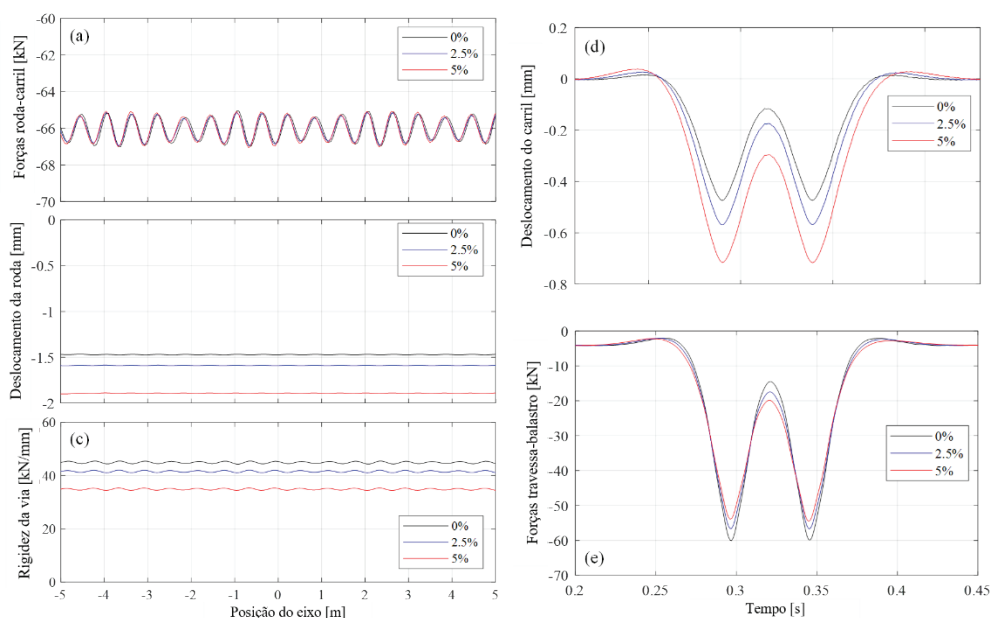
A Figura 5 resume os indicadores globais de resposta (força roda-carril, deslocamento vertical do carril, rigidez efetiva e históricos). As forças dinâmicas roda-carril variam pouco entre cenários, sendo o padrão oscilatório dominado pela discretização e cadência espacial das travessas (0,60 m).

Em contraste, o aumento de borracha na camada sub-balastro/coroamento aumenta a deformabilidade global: com 5% de borracha, a amplitude do deslocamento do carril aumenta  $\sim 30\%$  face ao caso de referência (0%), coerente com a redução da rigidez vertical efetiva de  $\sim 45$  para  $\sim 35$  kN/mm. Simultaneamente, a “bacia” de deformação alarga, traduzindo maior redistribuição de cargas por travessas adjacentes e menores concentrações locais no contacto travessa-balastro e no solo subjacente.

**Quadro 3** – Parâmetros principais do modelo numérico (Paixão et al., 2026).

| Componentes /geomateriais | Teor de borracha (%) | Altura/ Espessura (m) | Densidade $\rho_i$ (kg/m <sup>3</sup> ) | Módulo resiliente, $E_r$ (MPa) | Coef. Poisson $\nu_i$ | Amort. $\xi$ (%) |
|---------------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------------------------|--------------------------------|-----------------------|------------------|
| Carris                    | -                    | -                     | 7860                                    | $210 \times 10^3$              | 0,35                  | 3                |
| Travessas                 | -                    | 0,19                  | 2170                                    | $30 \times 10^3$               | 0,25                  | 3                |
| Balastro                  | -                    | 0,20                  | 1650                                    | (variável)                     | 0,30                  | 3                |
| Sub-balastro e Coroamento | 0,0                  | 0,50                  | 2900                                    | (variável)                     | 0,30                  | 3                |
|                           | 2,5                  |                       | 2650                                    |                                |                       | 6                |
|                           | 5,0                  |                       | 2450                                    |                                |                       | 10               |
| Solos de aterro           | -                    | 4,00                  | 2200                                    | 958                            | 0,30                  | 3                |
| Fundação                  | -                    | 5,00                  | 1950                                    | 2186                           | 0,30                  | 3                |





**Fig. 5** – Resposta global: a) forças roda-carril; b) deslocamento da roda; c) rigidez vertical; d) históricos do deslocamento do carril; e) e das forças de contacto travessa-balastro (Paixão et al., 2026).

Esta redistribuição é desejável por reduzir picos de tensão na subestrutura. Contudo, reduções excessivas de rigidez podem penalizar a estabilidade geométrica e as condições de serviço, pelo que o teor de borracha deve resultar de um compromisso entre atenuação de concentrações de tensão e controlo de deformações elásticas.

A Figura 6 apresenta mapas em planta dos incrementos de tensão vertical ( $\Delta\sigma_z$ ) e da razão tensão de desvio/média ( $\Delta q/\Delta p$ ) em dois níveis: (i) no balastro, ~11 cm abaixo da base da travessa; e (ii) no topo do sub-balastro, ~6 cm abaixo da base do balastro (~36 cm abaixo da base da travessa). Os mapas referem-se ao instante em que o 1º eixo se encontra na posição  $x = 1,2$  m.

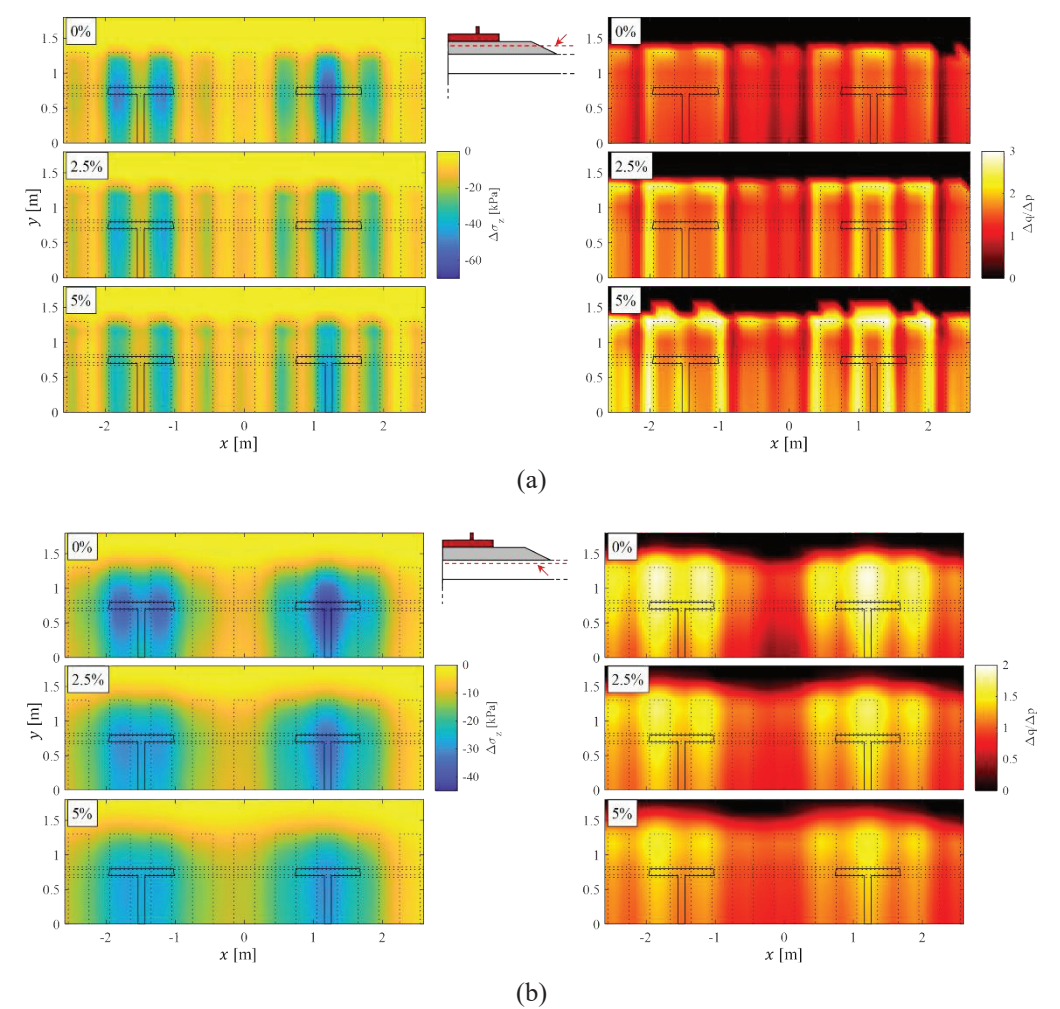
No balastro, o aumento de teor de borracha no sub-balastro/coroamento reduz  $\Delta\sigma_z$  sob as travessas mais solicitadas. Entre 0% e 5%, a redução do máximo é ~30%. Em paralelo,  $\Delta q/\Delta p$  aumenta, particularmente de 2,5% para 5%, atingindo  $\Delta q/\Delta p \sim 3$ , sugerindo que a maior deformabilidade da camada de apoio, embora distribua melhor a carga, pode intensificar mecanismos de corte no balastro e conduzir a trajetórias de tensão potencialmente mais severas.

No sub-balastro, a tendência é mais favorável:  $\Delta\sigma_z$  e  $\Delta q/\Delta p$  decrescem com o teor de borracha, com maior expressão para 5%, limitando a transferência de tensões verticais e de desvio para o aterro/subleito e reduzindo a propensão para assentamentos e degradação a longo prazo.

## 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

A incorporação de subprodutos industriais, como escórias de aciaria e borracha de pneus em fim de vida, em infraestruturas de transporte constitui uma abordagem consistente com os princípios da economia circular, permitindo simultaneamente reduzir a deposição/armazenamento de resíduos e limitar a extração de agregados naturais. No presente estudo, enquadrado no projeto ECO\_RORAIL, avaliou-se o desempenho mecânico de misturas ASIC-borracha com 0%, 2,5%, 5,0%, 7,5% e 10% de borracha (em massa), com vista à sua aplicação em camadas granulares não

ligadas de suporte (sub-balastro e sub-base). Para esse efeito, recorreu-se a ensaios triaxiais monotónicos e cíclicos, complementados por modelação numérica 3D (FEM) da interação veículo-via e subestrutura.



**Fig. 6** – Mapas em planta no balastro e no topo do sub-balastro ( $\Delta\sigma_z$  e  $\Delta q/\Delta p$ , com indicação de profundidades e posição do eixo em  $x = 1,2$  m) (Paixão et al., 2026).

Os resultados laboratoriais evidenciam que as misturas apresentam um comportamento típico de materiais granulares densos, com resistência de pico seguida de amolecimento pós pico. A substituição parcial da fração 1,5–7 mm de escória por borracha conduz, como esperado, a uma redução da rigidez e a um aumento das deformações axiais no pico, refletindo a natureza mais deformável do granulado de borracha. Em termos de resistência ao corte, observa-se uma diminuição progressiva do ângulo de atrito com o aumento de  $R_b$ , embora se mantenham valores residuais elevados, indicando que a borracha influencia mais marcadamente a rigidez do que a resistência. Este aspeto é particularmente relevante para camadas de suporte, onde a resposta tensão-deformação e a evolução de deformações com carregamentos repetidos são determinantes para o desempenho em serviço.

No comportamento cíclico, as misturas mantêm a tendência característica dos materiais granulares não ligados: o módulo resiliente aumenta com a tensão de confinamento, confirmando a dependência do estado de tensão. Contudo, verifica-se uma redução consistente de  $E_r$  com o aumento do teor de borracha, o que reforça a necessidade de limitar a sua incorporação quando se pretende preservar níveis elevados de rigidez. Nesta ótica, os resultados apontam para um intervalo de aplicação tecnicamente mais favorável quando o teor de borracha é inferior a 5% em massa, desde que a escória seja adequadamente processada e cumpra a granulometria especificada para sub-balastro (condição essencial para assegurar simultaneamente capacidade resistente, função separadora/filtrante e desempenho hidráulico compatível com o carregamento cíclico). Acresce que a borracha triturada é um material estável, não se prevendo fenómenos de desagregação por ação da água nas condições de utilização consideradas.

A modelação numérica 3D clarifica o impacto destas alterações de rigidez/amortecimento ao nível estrutural da via. A incorporação de borracha na camada de sub-balastro/coroamento traduz-se num aumento da deformabilidade vertical global e num alargamento da bacia de deformação sob cargas móveis. Apesar de as forças dinâmicas roda-carril variarem pouco entre cenários, a redistribuição de cargas por travessas adjacentes torna-se mais evidente à medida que aumenta o teor de borracha, o que se reflete numa redução da rigidez vertical efetiva e em deslocamentos verticais superiores do carril. Do ponto de vista da subestrutura, esta maior “capacidade de acomodação” favorece a redução de concentrações de tensão: para 5% de borracha observam-se diminuições da ordem dos 30% nas tensões verticais máximas no balastro, bem como uma atenuação das tensões verticais e de desvio transmitidas ao sub-balastro e ao aterro/subleito, contribuindo para mitigar mecanismos associados a assentamentos e degradação a longo prazo.

Importa, no entanto, sublinhar o compromisso identificado entre benefícios e potenciais penalizações. Embora a redução de tensões em profundidade e a melhoria da dispersão de cargas sejam desejáveis para aumentar a resiliência estrutural e limitar a evolução de deformações permanentes, reduções excessivas de rigidez podem ser desfavoráveis do ponto de vista da estabilidade geométrica e das condições de serviço. Em particular, a análise evidencia que a maior deformabilidade da camada de apoio pode alterar as trajetórias de tensão no balastro (p. ex., aumento de  $\Delta q/\Delta p$ ) em determinados níveis/locais), aspeto que deve ser ponderado no dimensionamento e na definição de teores máximos admissíveis de borracha.

Em síntese, os resultados laboratoriais e numéricos são coerentes ao indicar que as misturas ASIC-borracha constituem uma solução promissora para camadas granulares não ligadas de suporte em infraestruturas de transporte, desde que a incorporação de borracha seja controlada (preferencialmente até 5% em massa) e que o agregado siderúrgico cumpra os requisitos granulométricos aplicáveis. Para além da valorização de subprodutos e da redução da dependência de agregados naturais, a incorporação de borracha surge como uma potencial ferramenta de projeto para ajuste da rigidez vertical da via, permitindo otimizar a resposta estrutural em função de requisitos operacionais e condições específicas de fundação, desde que enquadrada por critérios de desempenho mecânico e de serviço. Como trabalhos futuros será necessário avaliar a viabilidade de reciclagem da mistura de escórias com borracha aquando de obras de conservação ou manutenção da via-férrea.

## 6 – AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio dos parceiros industriais SN-Maia e GENAN e a colaboração das entidades Infraestruturas de Portugal, Plataforma Ferroviária Portuguesa e Smart Waste Portugal. O trabalho foi desenvolvido no âmbito da Comissão Portuguesa de Geotecnia nos Transportes, em articulação com o TC202 da ISSMGE. O financiamento foi assegurado por: i) projeto [doi:10.54499/UID/04708/2025](https://doi.org/10.54499/UID/04708/2025), CONSTRUCT Instituto de I&D em Estruturas e Construções; ii) projeto [doi:10.54499/UID/06438/2025](https://doi.org/10.54499/UID/06438/2025), CERIS - Instituto de Investigação e Inovação em Engenharia Civil para a Sustentabilidade; iii) projeto InnovaMaTech-ROADS (Plano de I&I do

LNEC); iv) projeto ECO\_RORAIL – Industrial by-products for eco-efficient roads and railways, referência LISBOA2030-FEDER-00771300, financiado pela FCT, I.P./MECI, através de fundos nacionais ([doi:10.54499/2023.16407.ICDT](https://doi.org/10.54499/2023.16407.ICDT)).

## 7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alves, R.; Castanheira-Pinto, A.; Ramos, A.; Rios, S.; Fernández-Ruiz, J. (2024). *Steel slag sub-ballast for sustainable railway track infrastructure*. *Infrastructures* 9 (7), pp. 1–21. <https://doi.org/10.3390/infrastructures9070106>
- Alves, R.; Rios, S.; Fortunato, E.; Viana da Fonseca, A.; Guimarães Delgado, B. (2023). *Mechanical behaviour of steel slag–rubber mixtures: laboratory assessment*. *Sustainability* 15 (2), pp. 1–20. <https://doi.org/10.3390/su15021563>
- Arribas, I.; Santamaría, A.; Ruiz, E.; Ortega-López, V.; Manso, J.M. (2015). *Electric arc furnace slag and its use in hydraulic concrete*. *Construction and Building Materials* 90, pp. 68–79. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.003>
- ASTM (2020) D6270-20: Standard Practice for Use of Scrap Tires in Civil Engineering Applications. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken
- CEN (2004). EN 13286-7: Unbound and hydraulically bound mixtures – Part 7: cyclic load triaxial test for unbound mixtures. European Committee for Standardization.
- EuroSlag. (2018). *The European slag association: Legal status of slag*. Position paper.
- Farooq, M.A.; Nimbalkar, S. (2024). *Monotonic and cyclic triaxial testing of untreated and polyurethane-treated soil and soil–rubber mixtures*. *Acta Geotech.* 19, pp. 605–630 <https://doi.org/10.1007/s11440-023-02100-2>
- Gökalp, İ.; Uz, V.E.; Saltan, M.; Tutumluer, E. (2018). *Technical and environmental evaluation of metallurgical slags as aggregate for sustainable pavement layer applications*. *Transportation Geotechnics* 14, pp. 61–69. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2017.10.003>
- 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* 9 (2), pp. 1–18. <https://doi.org/10.1520/JAI103705>
- Guo, Y.; Markine, V.; Qiang, W.; Zhang, H.; Jing, G. (2019). *Effects of crumb rubber size and percentage on degradation reduction of railway ballast*. *Construction and Building Materials* 212, pp. 210–224. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.315>
- Han-Cheng, D.; Lin-Hua, H.; Lian-Heng, Z. (2020). *Experimental investigation on the resilient response of unbound graded aggregate materials by using large-scale dynamic triaxial tests*. *Road Materials and Pavement Design* 21 (2), pp. 434–451. <https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1500300>
- Hidalgo Signes, C.; Martínez Fernández, P.; Medel Perallón, E.; Insa Franco, R. (2015). *Characterisation of an unbound granular mixture with waste tyre rubber for subballast layers*. *Materials and Structures* 48 (12), pp. 3847–3861. <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0443-z>
- Hidalgo Signes, C.; Martínez Fernández, P.; Garzón-Roca, J.; Insa-Franco, R. (2016). *Analysis of the bearing capacity of unbound granular mixtures with rubber particles from scrap tyres when used as sub-ballast*. *Materiales de Construcción* 66 (324), <https://doi.org/10.3989/mc.2016.11515>

- Hidalgo Signes, C.; Martínez Fernández, P.; Medel Perallón, E.; Insa Franco, R. (2017). *Analysis of the vibration alleviation of a new railway sub-ballast layer with waste tyre rubber*. Materials and Structures 50 (2). <https://doi.org/10.1617/s11527-016-0951-0>
- Hussain, A.; Hussaini, S. K. K. (2022). *Use of steel slag as railway ballast: A review*. Transportation Geotechnics 35, p. 100779. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2022.100779>
- Indraratna, B.; Qi, Y.; Heitor, A. (2018). *Evaluating the properties of mixtures of ateel furnace slag, coal wash, and rubber crumbs used as subballast*. Journal of Materials in Civil Engineering 30 (1), pp. 1–9. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002108](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002108)
- IP (2023). Infraestruturas de Portugal (Portugal Infrastructure). Instrução Técnica–GR.IT.GEO.006– Características técnicas do sub-balaastro.
- Liu, J.; Xu, J.; Liu, Q.; Wang, S.; Yu, B. (2022). *Steel slag for roadway construction: A review of material characteristics and application mechanisms*. Journal of Materials in Civil Engineering 34(6), p. 3122001. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0004230](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004230) .
- Martínez Fernández, P.; Hidalgo Signes, C.; Villalba Sanchís, I.; Pérez Mira, D.; Insa Franco, R. (2018). *Real scale evaluation of vibration mitigation of sub-ballast layers with added tyre-derived aggregate*. Construction and Building Materials 169, pp. 335–346. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.027>
- Paixão, A.; Varandas, J. N.; Fortunato, E.; Alves, R.; Rios, S. (2026). Numerical modelling of EAF slag and recycled rubber mixtures in railway infrastructures. Proceedings of the 12th International Conference on Bearing Capacity of Roads, Railways, and Airfields; 12<sup>th</sup> BCRRA 2026; 8 pp (aceite para publicação na revista Transportation Research Procedia; ISSN: 2352-1465).
- 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 267, p. 121225. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121225>
- Puppala, A. J.; Saride, S.; Chomtid, S. (2009). *Experimental and modeling studies of permanent strains of subgrade soils*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 135 (10), pp. 1379–1389. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000163](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000163)
- Qi, Y.; Indraratna, B.; Ngo, T.; Arachchige, C. M. K.; Hettiyahandi, S. (2024). *Sustainable solutions for railway using recycled rubber*. Transportation Geotechnics 46, 101256. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2024.101256>
- Ramos, A.; Gomes Correia, A.; Indraratna, B.; Ngo, T.; Calçada, R.; Costa, P.A. (2020). *Mechanistic-empirical permanent deformation models: Laboratory testing, modelling and ranking*. Transportation Geotechnics 23 (January), pp. 1–26. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100326>
- Shi, C. (2004). *Steel slag—its production, processing, characteristics, and cementitious properties*. Journal of Materials in Civil Engineering 16 (3), pp. 230–236. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2004\)16:3\(230\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2004)16:3(230))
- Varandas, J. N.; Hölscher, P.; Silva, M. A. G. (2016). *Three-dimensional track-ballast interaction model for the study of a culvert transition*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 89, pp. 116–127. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2016.07.013>

Varandas, J. N.; Paixão, A.; Tijera, Á.; Crespo-Chacón, I.; Estaire, J.; Fortunato, E. (2025). *Dynamic response of ballasted High-Speed Railways: insights from experimental measurements and 3D nonlinear numerical modelling*. *Transportation Geotechnics*, 52, 101549. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2025.101549>

WSA (2025) *World Steel Association*. <https://worldsteel.org/publications> [Acedido em: 10 setembro 2025].