

# ESTUDOS EXPERIMENTAIS SOBRE A AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DA ESCÓRIA DE AÇO COMO MATERIAL ALTERNATIVO PARA BALASTRO FERROVIÁRIO

André Paixão<sup>1\*</sup>, Eduardo Fortunato<sup>1</sup>, Bruno Guimarães Delgado<sup>2</sup>, António Viana da Fonseca<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Avenida do Brasil 101, 1700-075, Lisboa, Portugal

<sup>2</sup> Vale, S.A., Santa Luzia, 33040-900, Minas Gerais, Brasil

<sup>3</sup> CONSTRUCT-GEO – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, R. Dr. Roberto Frias s/n, 4200-465 Porto, Portugal

\* email: [apaixao@lnec.pt](mailto:apaixao@lnec.pt)

**RESUMO:** Alguns subprodutos industriais, como a escória de forno de arco elétrico (EAF), têm ganhado relevância como alternativa sustentável aos agregados britados naturais, na utilização em balastro ferroviário. Este trabalho apresenta uma síntese de estudos experimentais recentes que avaliaram a resistência mecânica e a evolução morfológica de partículas de escória EAF e o comportamento geomecânico do meio particulado sob cargas cíclicas. Ensaios laboratoriais revelaram que as partículas de escória EAF apresentam elevada angularidade e resistência, mantendo características semelhantes ou superiores às do granito ao longo da degradação por abrasão. Além disso, ensaios triaxiais cíclicos mostraram que este material possui maior resistência à quebra, menor deformação permanente e módulo resiliente superior, especialmente sob condições de cargas elevadas, comuns em vias *heavy haul*. Estas características indicam que a escória EAF é uma alternativa viável aos materiais tradicionais, contribuindo para a redução de impactos ambientais associados à extração e processamento de rochas naturais. Este trabalho reforça a necessidade de encetar revisões normativas para ampliar a utilização de materiais alternativos na construção ferroviária, promovendo práticas mais sustentáveis.

**PALAVRAS-CHAVE:** Balastro ferroviário, Agregados artificiais, Escória de aciaria, Sustentabilidade

## 1 Introdução

A utilização de materiais sustentáveis em infraestruturas de transporte tem ganhado relevância devido à necessidade de maior eficiência económica e responsabilidade ambiental (Koohmishi *et al.*, 2025). O balastro ferroviário, tradicionalmente composto por agregados britados naturais, desempenha um papel essencial na estabilidade e durabilidade das vias-férreas, sendo usual a utilização de agregados graníticos em Portugal. No entanto, a exploração intensiva destes recursos levanta preocupações ambientais, incluindo o esgotamento de jazidas e as emissões associadas à indústria extrativa, ao processamento e transporte dos materiais.

A escória de aço, um subproduto siderúrgico, surge como uma alternativa promissora para camadas de infraestruturas de transporte (Costa *et al.*, 2022; Alves *et al.*, 2023), como o balastro ferroviário. A escória de forno de arco elétrico (EAF) apresenta elevada densidade, angularidade e resistência mecânica, o que a torna adequada para essa aplicação (Koh *et al.*, 2018; Hussain & Hussaini, 2022). Estudos laboratoriais indicam que este material exhibe propriedades geomecânicas equivalentes ou superiores às de rochas naturais, com maior rigidez, menor deformação permanente e melhor estabilidade – aspetos relevantes para a redução de custos de manutenção (Raymond & Dyaljee, 1979; Esmaeili *et al.*, 2017; Chamling *et al.*, 2020a; Hussain & Hussaini, 2022; Jing *et al.*, 2022; dos Santos *et al.*, 2024). A avaliação ambiental da escória abrange aspetos como lixiviação e estabilidade química. Estudos mostram que, quando devidamente processada, não representa riscos ambientais significativos (Nguyen *et al.*, 2021), cumprindo as normas europeias aplicáveis (Navarro *et al.*, 2010; Morata *et al.*, 2016; Alves *et al.*, 2023). Devem ser controlados aspetos como a expansibilidade

(devido à presença de cal livre e óxido de magnésio), a lixiviação de metais pesados (Chamling *et al.*, 2020b; Hussain & Hussaini, 2022) e o impacto no isolamento elétrico da via (Guo *et al.*, 2022).

Em Portugal, a aplicação de escória de aço está alinhada com estratégias de sustentabilidade. O LNEC tem participado na avaliação técnica destes agregados para pavimentos, tendo também sido publicada documentação sobre a sua utilização em misturas betuminosas (LNEC, 2020). No contexto de estudos anteriores (Gomes Correia *et al.*, 2012), foi estabelecida a designação Agregado Siderúrgico Inerte para a Construção (ASIC), referente à escória EAF processada para cumprir os critérios de inerte. Atualmente, o ASIC está certificado com a Marca CE (NP EN 13242), com ficha técnica e declaração de desempenho.

Apesar do crescente conhecimento e utilização de escória de aço, são escassos os estudos que integram a caracterização morfológica com o desempenho geomecânico sob carregamento cíclico representativo do tráfego ferroviário. Este trabalho visa colmatar essa lacuna, contribuindo com dados experimentais relevantes para a possível adoção normativa do ASIC, com vista a melhorar a sustentabilidade da infraestrutura ferroviária em Portugal. Este documento visa apresentar estudos de avaliação experimental sobre o desempenho da escória de aço (ASIC), como material alternativo ao granito em balastro ferroviário, com base em parâmetros de resistência, degradação e deformabilidade sob cargas cíclicas. Sintetizam-se estudos experimentais conduzidos em Portugal sobre o ASIC como balastro, focando sobre o seu comportamento geomecânico, resistência à abrasão, morfologia das partículas e resistência ao esmagamento. São também discutidas as implicações normativas e os desafios técnicos da sua aplicação no setor ferroviário. O material analisado teve origem na Siderurgia Nacional (Maia) e foi processado para cumprir os critérios de classificação como ASIC.

## 2 Desempenho geomecânico

Em estudos anteriores desenvolvidos pelos autores (Delgado *et al.*, 2019a; Delgado *et al.*, 2021), realizou-se uma comparação entre o comportamento de um ASIC e o de um agregado granítico, que cumpria os requisitos para balastro ferroviário, recorrendo a ensaios triaxiais de carga monotónica e cíclica. Para além da avaliação dos parâmetros índice usuais, os estudos focaram-se em aspetos fundamentais para a aplicação como balastro, tais como a resistência ao corte e o comportamento resiliente e de deformação permanente sob a ação de um elevado número de ciclos de carga. Embora estes estudos tenham sido realizados em Portugal, foram desenvolvidos para o contexto de aplicação em balastro ferroviário de linhas de mercadorias no Brasil de tráfego tipo *heavy haul* com cargas por eixo de 32,5 e 40 t com vista a demonstrar a sua viabilidade técnica.

### 2.1 Descrição do material e preparação dos provetes

Para garantir a comparação entre o ASIC e o agregado granítico, os materiais foram preparados de acordo com as especificações do balastro do tipo n.º 24 da AREMA (2015). As amostras foram sujeitas a um processo de graduação paralela, permitindo a sua redução dimensional (Figura 1) sem comprometer as propriedades intrínsecas dos agregados, o que possibilitou a execução dos ensaios em equipamentos triaxiais convencionais, mantendo a representatividade das condições reais (Sevi & Ge, 2012; Delgado *et al.*, 2017).

A massa volúmica das partículas (NP EN 1097-6) foi de 3,2 e de 2,7 Mg/m<sup>3</sup>, respetivamente para o ASIC e para o granito. Na Figura 1 apresentam-se também propriedades mecânicas dos dois materiais. Em Portugal (REFER, 2015) os valores de resistência das partículas exigidos na RF.IT.VIA.015 para vias de alta velocidade ou de velocidade alta (balastro Tipo I) e para vias convencionais (balastro Tipo II), são, respetivamente,  $\leq 7$  e  $\leq 11$  para o coeficiente de micro-Deval,  $M_{DE}$  (NP EN 1097-1) e  $\leq 16$  e  $\leq 20$  para o coeficiente Los Angeles,  $LA$  (NP EN 1907-2). No panorama internacional, verifica-se que os limites para estes dois parâmetros são bastante exigentes (Nålsund, 2014; Guo *et al.*, 2022). No caso do ASIC, os valores de  $M_{DE}$  e  $LA$  situam-se normalmente em gamas entre 11-12 e 23-28, respetivamente (Gomes Correia *et al.*, 2012; Paixão & Fortunato, 2021; Delgado *et al.*, 2022; Guo *et al.*, 2022).

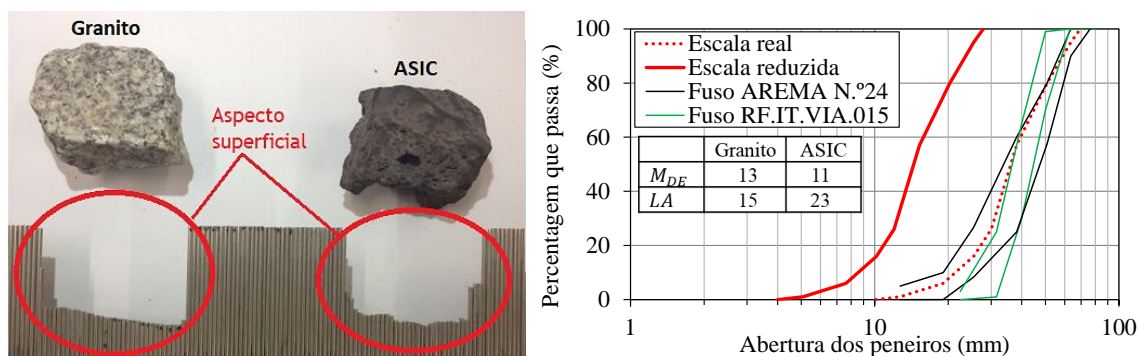


Figura 1. Partículas, fusos, granulometria e parâmetros físicos e mecânicos (adaptado de Delgado, 2019).

Os provetes foram moldados em cilindros com 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura, assegurando uma composição homogênea dos agregados. O procedimento envolveu peneiração, homogeneização e compactação para atingir índices de vazios entre 0,70 e 0,80, reproduzindo a densidade do balastro *in situ* após ataque mecânico pesado (Suiker, 2002; Indraratna *et al.*, 2011). Durante a moldagem, aplicou-se uma pressão de confinamento por vácuo de 70 kPa, reduzindo perturbações durante a remoção do molde. Adicionalmente, para estabilizar a estrutura dos provetes e simular os efeitos do carregamento ferroviário, foi aplicado um condicionamento inicial de 10 000 ciclos de carga com tensão deviatória,  $\sigma_d = q = \sigma_1 - \sigma_3$ , máxima de 340 kPa, sob pressão de confinamento,  $\sigma_3$ , constante de 70 kPa, seguindo o protocolo B da EN 13286-7. Os ensaios foram realizados em condição drenada e a seco, simulando condições de campo típicas em vias com boa drenagem, e à semelhança de outros estudos de referência na Europa (Suiker, 2002; Nåsund, 2014).

## 2.2 Resistência ao corte

Avaliou-se a resistência ao corte dos materiais através de ensaios triaxiais monotônicos, realizados sob três níveis de  $\sigma_3$ : 20 kPa, 65 kPa e 85 kPa. Estes ensaios evidenciaram um comportamento mecânico ligeiramente superior do ASIC em relação ao granito, em termos de resistência de pico e no estado crítico, em particular para pressões de confinamento superiores (Figura 2). O ASIC exibiu, ainda, um comportamento dilatante mais pronunciado no estado crítico quando comparado com o granito. A envolvente de resistência e a linha de estado crítico do ASIC são mais elevadas do que as do granito, o que confirma a sua maior resistência ao corte. É de referir que a compacidade inicial dos provetes de granito, após a fase de condicionamento, foi ligeiramente superior à dos provetes de ASIC, indicando uma maior tendência de acomodação das partículas. Apesar disso, o ASIC apresentou melhor desempenho de resistência ao corte. Como se abordará adiante, considera-se que a resistência ao corte mais elevada do ASIC é atribuída à maior angularidade das suas partículas e rugosidade superficial, que aumentam o atrito entre partículas e possibilitam maior transferência de carga.

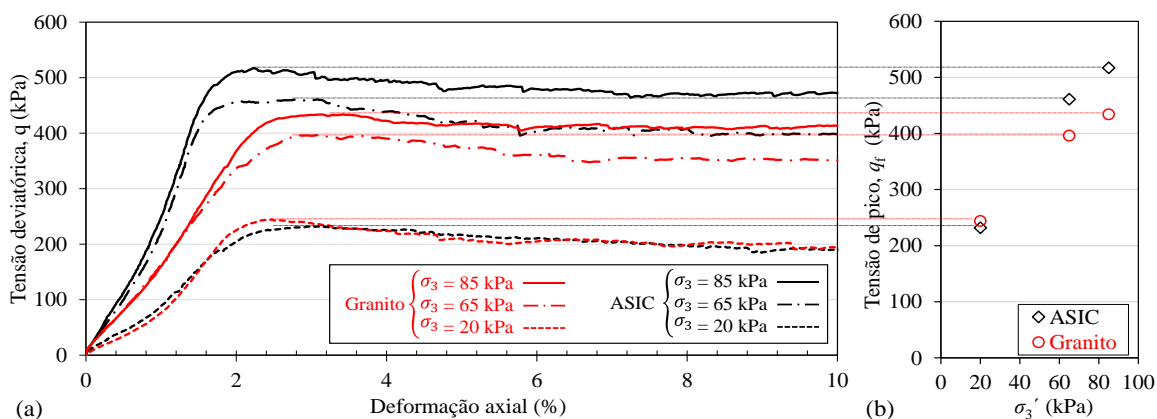


Figura 2. Resistência ao corte do ASIC e do granito: (a) curvas tensão-deformação (b) tensão de corte na rotura em função da pressão de confinamento efetiva (adaptado de Delgado *et al.*, 2019a).

### 2.3 Comportamento resiliente

O comportamento resiliente dos agregados foi avaliado por meio de ensaios triaxiais cíclicos (procedimento B da EN 13286-7), com pressão de confinamento,  $\sigma_3$ , constante entre 20 e 150 kPa e cobrindo diversos níveis de tensão deviatória,  $\sigma_d$ , máxima (entre 30 e 475 kPa). Para cada trajetória de carga ( $\sigma_3$ ,  $\sigma_d$ ) foram aplicados 100 ciclos a uma frequência de 2 Hz e determinado o respetivo módulo resiliente,  $E_r$ . Os valores de  $E_r$  foram determinados antes e após aplicação de um número elevado de ciclos de carga sobre provetes utilizados no estudo do comportamento de deformação permanente (abordados no ponto 2.4). Para cada material, considerou-se dois provetes submetidos à seguinte solicitação: i) 1E6 ciclos representativos de cargas por eixo de 32,5 t ( $\sigma_3=70$  kPa;  $\sigma_d=280$  kPa); ii) 2E6 ciclos representativos de 40 t/eixo ( $\sigma_3=70$  kPa;  $\sigma_d = 350$  kPa).

O ASIC apresentou valores de  $E_r$  superiores aos do granito, em coerência com outros estudos sobre ASIC (Ferreira, 2010), embora com diferenças na granulometria e compactidade. A Figura 3 apresenta uma síntese destes resultados em que os valores de  $E_r$  são expressos em função de  $\theta$  (primeiro invariante do tensor das tensões, que no caso de axissimetria pode ser determinado por  $\theta = \sigma_d + 3\sigma_3$ ) e são traçadas regressões para o modelo de comportamento  $E_r = K_1 \theta^{K_2}$ . No cenário correspondente a cargas por eixo de 40 t, os valores de  $E_r$  do ASIC superam os do granito em, pelo menos, 30%. O ASIC demonstrou, ainda, uma maior tendência de aumento da rigidez com o acumular de ciclos de carga, sugerindo maior estabilidade estrutural a longo prazo.

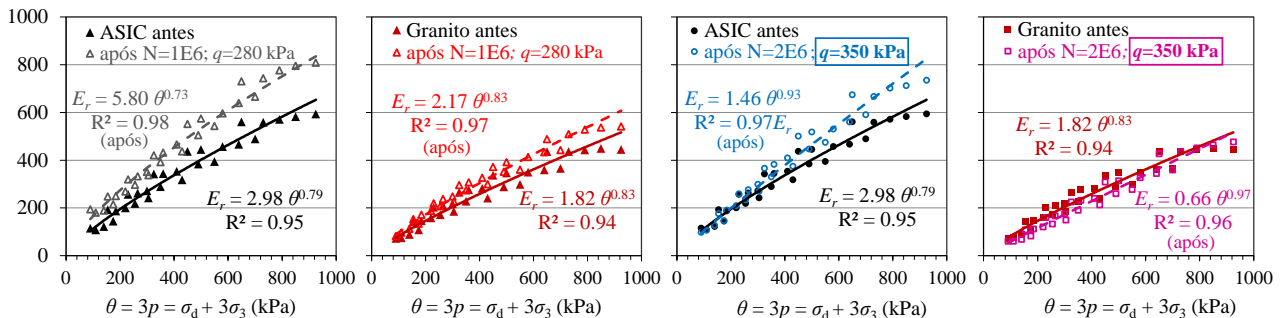


Figura 3. Valores de  $E_r$  antes e após os ensaios de def. permanente (adaptado de Delgado *et al.*, 2021).

### 2.4 Comportamento de deformação permanente

Para comparar a resposta de deformação permanente sob as condições indicadas anteriormente – representativas de eixos de 32,5 e 40 t – também se seguiu o protocolo B da EN 13286-7, tendo-se submetido alguns provetes a 2 milhões de ciclos de carga. Para o nível de carga correspondente a eixos de 32,5 t ( $\sigma_3=70$  kPa;  $\sigma_d=280$  kPa), não se verificaram diferenças significativas entre o ASIC e o granito. Ambos os materiais estabilizaram, embora o ASIC tenha atingido o estado de *shakedown* para níveis de deformação ligeiramente inferiores (Figura 4). No nível mais elevado, relativo a cargas por eixo de 40 t ( $\sigma_3=70$  kPa;  $\sigma_d=350$  kPa), o ASIC apresentou menor deformação permanente e uma estabilização a longo prazo mais rápida. O ASIC demonstrou uma tendência para entrar em regime de *shakedown* para aproximadamente 2E6 ciclos, enquanto o granito permaneceu num estado de fluência plástica para o mesmo número de ciclos de carga. As taxas mais reduzidas de deformação no ASIC evidenciam a maior capacidade de suportar tensões cíclicas elevadas sem degradação significativa da sua integridade estrutural. Não se verificou influência clara do índice de vazios inicial dos provetes nos resultados. A resposta de deformação permanente pareceu ser mais influenciada pelas propriedades intrínsecas dos materiais e pelas condições de carregamento.

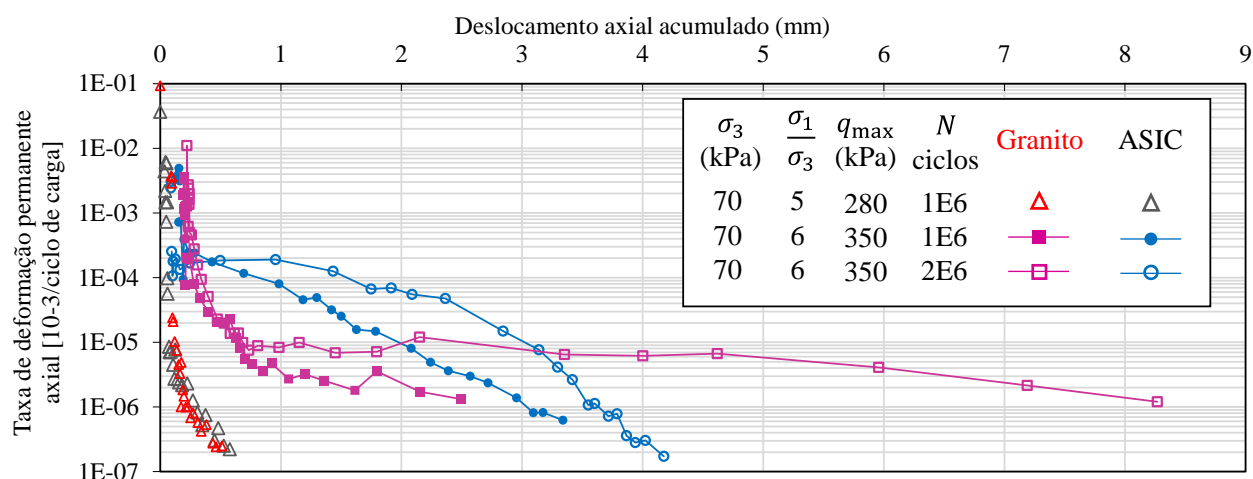


Figura 4. Deformação axial permanente e comportamento *shakedown* (adaptado de Delgado, 2019).

## 2.5 Caracterização morfológica e análise de abrasão

Com o objetivo de fundamentar o contributo da morfologia das partículas do ASIC no seu melhor desempenho, primeiramente foi realizado um estudo (Delgado *et al.*, 2019b) no qual se recorreu ao equipamento AIMS2 (Gates *et al.*, 2011) para quantificar a forma (avaliada em termos de esfericidade), a angularidade e a textura superficial das partículas. Foram analisadas três gamas granulométricas representativas do balastro utilizado nos ensaios triaxiais referidos anteriormente: 6,3 mm, 11,2 mm e 22,4 mm. A metodologia consistiu na captura de imagens de 50 partículas individuais sob iluminação controlada, seguida de processamento digital para extrair métricas quantitativas e realizar análises estatísticas. Os resultados (Figura 5) evidenciaram que: o granito tende a tornar-se mais esférico com o aumento da dimensão das partículas; o ASIC apresenta maior angularidade nas três frações analisadas; não se verificaram diferenças significativas quanto à textura superficial. A elevada angularidade do ASIC é um fator positivo, pois contribui para um maior imbricamento das partículas, o que confere maior resistência ao corte e um comportamento resiliente mais rígido, conforme demonstrado nos ensaios triaxiais referidos anteriormente.

Para estender a análise às três dimensões e ultrapassar as limitações do equipamento AIMS2, no que se refere à dimensão máxima das partículas, noutra estudo foi aplicada uma metodologia de fotogrametria, baseada em software de código aberto e técnicas de *Structure-from-Motion* (Paixão *et al.*, 2018). Analisou-se o efeito do ensaio de micro-Deval na morfologia das partículas de ASIC e de granito, à escala real, que cumpriam os requisitos para balastro em Portugal (Paixão & Fortunato, 2021). Foram estudadas 30 partículas de cada material, capturando imagens antes e após 14 000 revoluções do ensaio (revs.). A Figura 6a apresenta a distribuição do desgaste, obtida através da comparação entre modelos digitais iniciais e finais. O mapeamento do raio de aspereza (inverso da curvatura) demonstra a correspondência entre zonas de menor raio e maior desgaste. A Figura 6b ilustra a relação entre curvatura e desgaste, revelando que o ASIC apresenta menor desgaste superficial em comparação com o granito, independentemente da gama de curvaturas analisada.

Foram analisados três parâmetros morfológicos (Masad *et al.*, 2005): Índice de Forma 3D ( $FI_{3DN}$ ); Índice de Angularidade 3D ( $AI_{3DN}$ ); e Índice de Microtextura 3D ( $MT_{3DN}$ ). Os resultados (Figura 7) indicaram que o ASIC apresentava maior complexidade geométrica, como esperado e corroborando o estudo anterior, e mantinha essas características por mais tempo durante o ensaio de micro-Deval.

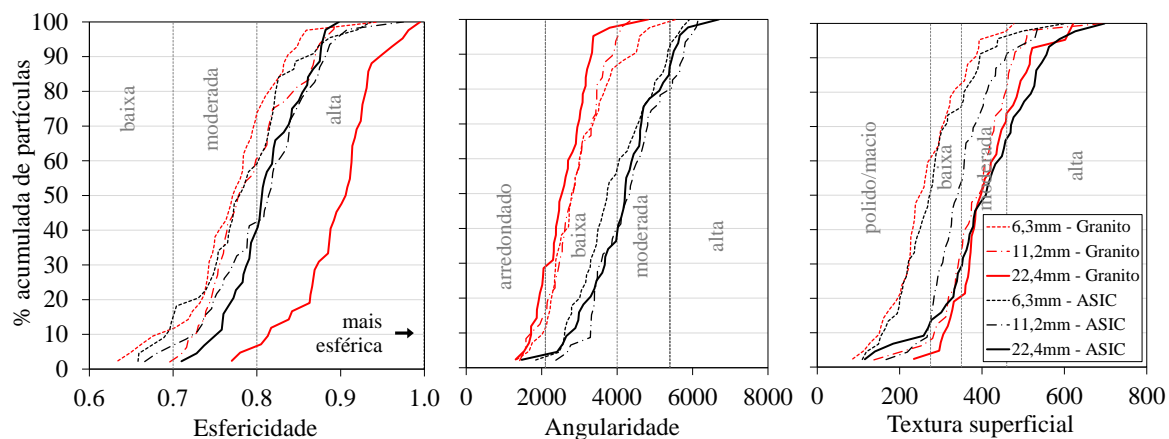


Figura 5. Curvas de distribuição acumulada de (a) esfericidade, (b) angularidade e (c) textura superficial nas gamas granulométricas de 6,3 mm, 11,2 mm e 22,4 mm (adaptado de Delgado, 2019).

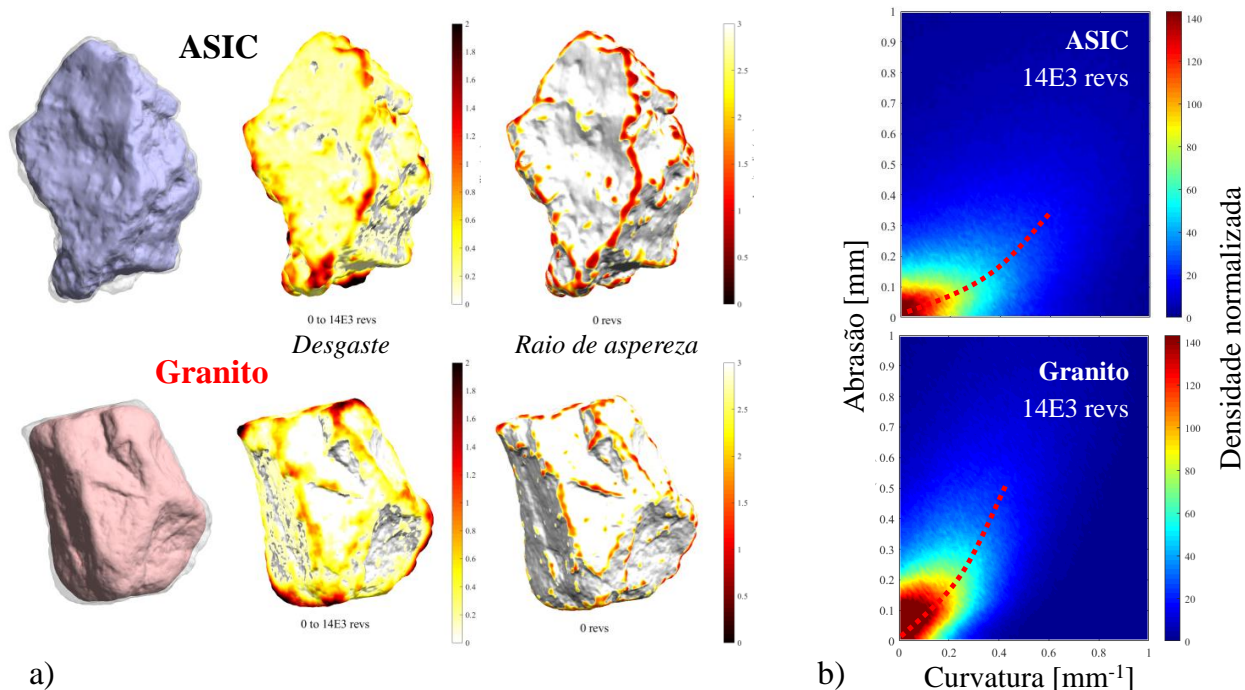


Figura 6. Exemplos do desgaste sofrido pelas partículas durante o ensaio e do raio de aspereza da superfície (a); relação entre a curvatura e o desgaste (b) (adaptado de Paixão & Fortunato, 2021).

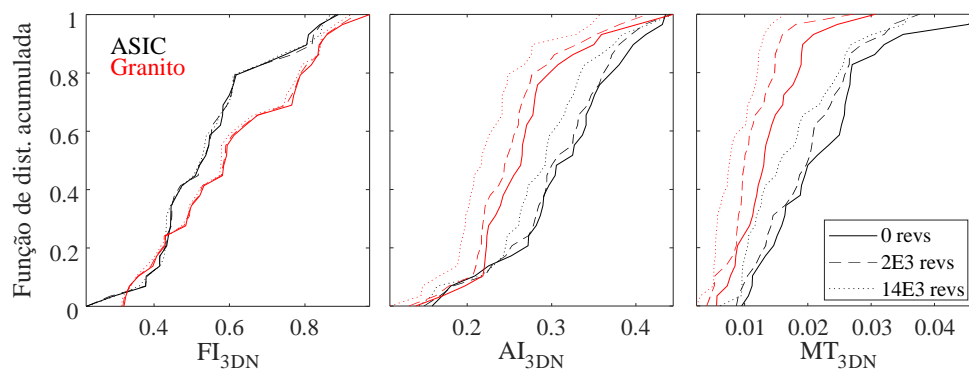


Figura 7. Curvas de distribuição acumulada dos índices  $FI_{3DN}$ ,  $AI_{3DN}$  e  $MT_{3DN}$  determinados para os conjuntos de partículas de granito e de ASIC (adaptado de Paixão & Fortunato, 2021).

### 3 Resistência das partículas ao esmagamento e quebra sob carregamento cíclico

A matriz mineralógica das partículas influencia diretamente a densidade, porosidade e resistência à degradação. Partículas mais densas garantem maior estabilidade à via-férrea, enquanto partículas menos resistentes estão mais sujeitas a quebra, contribuindo para assentamentos plásticos e comprometendo a geometria da via. Embora ensaios como o Los Angeles permitam avaliar essa resistência de forma indireta, alguns autores (Indraratna *et al.*, 2011) sugerem que a resistência ao esmagamento deve ser considerada nos critérios normativos, dada a sua relevância na degradação do balastro.

Em estudos anteriores ensaiaram-se partículas de ASIC e de granito ao esmagamento (Delgado *et al.*, 2022), selecionadas aleatoriamente e não submetidas a ensaios prévios, com dimensões entre 4 e 28 mm, e partículas de tamanho real (10 a 60 mm). Cada partícula foi esmagada entre placas paralelas sob controlo de deformação, determinando-se a resistência ao esmagamento. Os resultados indicaram que o ASIC apresentou resistência superior ao granito em todas as frações granulométricas analisadas. A Figura 8a ilustra os valores obtidos, verificando-se que a resistência aumentou com a redução do tamanho das partículas, sendo esse efeito mais acentuado no ASIC. Além disso, o ASIC revelou uma distribuição mais homogênea dos valores de resistência, sugerindo um comportamento mais previsível e menor probabilidade de rotura prematura sob carga.

Noutros estudos (Delgado *et al.*, 2021), a quebra das partículas foi quantificada através do índice de Marsal (1972),  $B_g$ , que avalia a alteração da distribuição granulométrica após ensaios de carga cíclica descritos na secção 2.4. A Figura 8b compara os valores de  $B_g$  para ambos os materiais, evidenciando uma menor quebra para o ASIC em todas as condições de carregamento. O aumento da carga cíclica resultou num acréscimo da quebra para ambos os materiais, sendo este efeito mais pronunciado no granito. No ASIC, a variação do índice de  $B_g$  manteve-se reduzida, indiciando a sua maior resistência. A menor taxa de quebra do ASIC é atribuída à sua elevada resistência ao esmagamento, especialmente para as partículas de menor dimensão, conforme evidenciado na Figura 8a. Como destacado por Delgado *et al.* (2019a); Delgado *et al.* (2022), a resistência mais elevada ao esmagamento das partículas de ASIC também pode ter compensado os níveis de tensão mais elevados de contacto gerados devido à sua maior angularidade (cf. secção 2.5), evitando a fragmentação dos grãos mais angulosos. Estes fatores são essenciais para a manutenção das condições de drenagem da via e para minimizar a contaminação do balastro, aspetos fundamentais para a estabilidade e longevidade da infraestrutura ferroviária. Os resultados obtidos reforçam o potencial do ASIC como uma alternativa viável aos agregados naturais tradicionalmente utilizados para balastro.

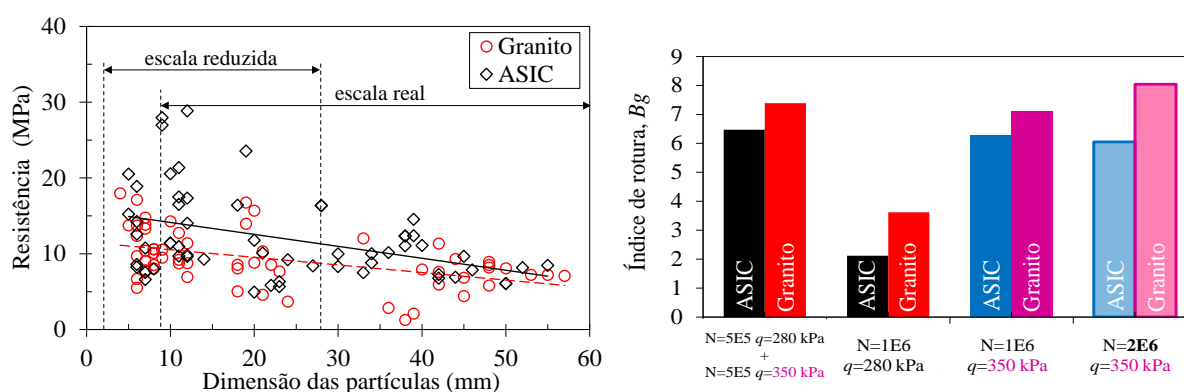


Figura 8. (a) resistência ao esmagamento de partículas individuais de ASIC e de granito em função da sua dimensão (Delgado *et al.*, 2022); (b) Índice de rotura de Marsal,  $B_g$ , das partículas dos agregados ASIC e granito após ensaios de deformação permanente (Delgado *et al.*, 2021).

### 4 Outros aspetos a considerar

Do ponto de vista ambiental e económico, a utilização de agregados siderúrgicos apresenta vantagens significativas ao reduzir a extração de agregados naturais e promover a economia circular. A sua maior

durabilidade implica menor necessidade de renovação do balastro e custos reduzidos de manutenção. No entanto, a localização dos centros de produção em Portugal (Maia e Seixal) pode representar um fator limitativo devido aos custos de transporte para obras mais distantes.

Apesar das vantagens mecânicas e ambientais evidenciadas, persistem algumas preocupações técnicas sobre a aplicação de agregados siderúrgicos como balastro ferroviário. A lixiviação de metais pesados é um dos aspetos mais debatidos. Estudos desenvolvidos em Portugal (Gomes Correia *et al.*, 2012) demonstraram que o ASIC apresenta impacto ambiental insignificante e não constitui risco para a saúde pública. Estes resultados foram validados por estudos com lisímetros em trechos experimentais rodoviários e por outros trabalhos internacionais aplicados a balastro ferroviário (Koh *et al.*, 2018; Chamling *et al.*, 2020b). Ainda assim, pode ser adequado proceder à monitorização regular para garantir a conformidade ambiental.

A influência dos agregados siderúrgicos no isolamento elétrico da via é também um tema de discussão (Guo *et al.*, 2022). Estudos indicam que a escória pode apresentar resistência elétrica até cinco vezes superior à do granito, minimizando o risco de interferência nos circuitos de via (Kuo & Lin, 2017). Em condições de chuva, foi reportada uma resistência de aproximadamente 500  $\Omega$ /km, cumprindo os requisitos usuais para balastro ferroviário (Merkel, 2007). Contudo, outros estudos apontam que a resistência pode diminuir em condições de elevada humidade, comprometendo o isolamento elétrico (Jing *et al.*, 2022).

A possibilidade de misturar agregados siderúrgicos com agregados naturais levanta também questões sobre a variabilidade das propriedades mecânicas e o impacto na resposta da camada de balastro. Estes fatores reforçam a necessidade de estudos adicionais em condições representativas da rede ferroviária nacional.

Por fim, a regulamentação portuguesa coloca desafios à adoção de agregados siderúrgicos como balastro ferroviário, particularmente devido aos limites exigidos para os coeficientes de Los Angeles e micro-Deval para balastros Tipo I e Tipo II. Embora a NP EN 13450 permita agregados artificiais, a especificação RF.IT.VIA.015 (REFER, 2015) centra-se essencialmente em materiais naturais. Estudos laboratoriais (Nålsund, 2014) demonstraram que o coeficiente de micro-Deval apresenta boa correlação com a degradação da camada de balastro, mas o mesmo não acontece com o coeficiente de Los Angeles. No entanto, não se verificou uma boa correlação entre o coeficiente de micro-Deval e a quebra de partículas nos ensaios triaxiais cíclicos. Assim, estes parâmetros podem não ser os mais adequados para avaliar a aptidão de um agregado para balastro ferroviário, pelo que eventuais revisões normativas deveriam incorporar critérios de desempenho baseados em evidência experimental mais robusta.

## 5 Considerações finais

Os estudos apresentados demonstram que o ASIC apresenta um desempenho geomecânico igual ou superior ao do balastro granítico. Em ensaios triaxiais monotónicos, verificaram-se ângulos de atrito (tanto de pico como no estado crítico) ligeiramente superiores no ASIC, tendência que se acentuou com o aumento de  $\sigma_3$ , indicando maior resistência ao corte. Nos ensaios triaxiais cíclicos, ambos os materiais atingiram o regime de *shakedown*, mas, sob cargas mais elevadas (equivalentes a 40 t/eixo), apenas o ASIC atingiu esse regime. O ASIC apresentou resposta resiliente mais rígida e crescente com o acumular de ciclos. A caracterização morfológica evidenciou que, apesar de formas semelhantes, o ASIC apresenta maior angularidade, favorecendo o imbricamento e a transferência de cargas. Aliada à sua superior resistência ao esmagamento e menor quebra de partículas, estas características proporcionam um melhor desempenho à camada de balastro.

A nível ambiental e económico, o ASIC promove a economia circular ao reaproveitar subprodutos da siderurgia, reduzindo a dependência de agregados naturais. Apesar de desafios como as exigências normativas (coeficientes de Los Angeles e micro-Deval), prevê-se que a sua durabilidade reduza os custos de manutenção. Conclui-se que o ASIC é uma alternativa viável para balastro ferroviário, e para consolidar estes resultados, recomendam-se estudos de campo de longo prazo em Portugal e revisões normativas.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Siderurgia Nacional da Maia a disponibilização do material ASIC utilizado neste estudo. Parte do estudo foi desenvolvido no âmbito da atividade da Comissão Portuguesa de Geotecnia nos Transportes (CPGT) da SPG, em associação com a Sociedade Internacional de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Este trabalho foi apoiado pelo Financiamento Base - UIDB/04708/2020 e Financiamento programático - UIDP/04708/2020 da Unidade de Investigação CONSTRUCT - Instituto de I&D em Estruturas e Construções - financiada por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alves, R.; Rios, S.; Fortunato, E.; Viana da Fonseca, A. & Guimarães Delgado, B. (2023) *Mechanical Behaviour of Steel Slag–Rubber Mixtures: Laboratory Assessment*; Sustainability; Vol. 15; n.º 2; doi: 10.3390/su15021563
- AREMA (2015) *Manual for Railway Engineering. Vol. I - IV*; Lanham, MD: American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association;
- Chamling, P.K.; Haldar, S. & Patra, S. (2020a) *Behaviour of Steel Slag Ballast for Railway under Cyclic Loading*; In: *Geotechnical Characterization and Modelling*; Ch. Chapter 57; pp. 709-722; doi: 10.1007/978-981-15-6086-6\_57; ISBN: 978-981-15-6085-9; 978-981-15-6086-6
- Chamling, P.K.; Haldar, S. & Patra, S. (2020b) *Physico-Chemical and Mechanical Characterization of Steel Slag as Railway Ballast*; Indian Geotechnical Journal; Vol. 50; n.º 2; p. 267-275; doi: 10.1007/s40098-020-00421-7
- Costa, L.C.B.; Nogueira, M.A.; Ferreira, L.C.; Elói, F.P.d.F.; Carvalho, J.M.F.d. & Peixoto, R.A.F. (2022) *Eco-efficient steel slag concretes: an alternative to achieve circular economy*; Revista IBRACON de Estruturas e Materiais; Vol. 15; n.º 2; doi: 10.1590/s1983-41952022000200001
- Delgado, B.; Fonseca, A.V.d.; Fortunato, E. & Paixão, A. (2022) *Influência da Resistência das Partículas no Desempenho de um Agregado Siderúrgico Inerte como Lastro de Vias Férreas*; In: Anais do XX COBRAMSEG; Campinas, Brasil; Vol. 1, Paper 119349;
- 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*; In: GEORAIL 2017, 3rd International Symposium on Railway Geotechnical Engineering; Paris; 23-24 Nov. 2017; p. 135-144;
- Delgado, B.G. (2019) *Geomecânica de um agregado siderúrgico inerte como material alternativo para lastro de vias férreas do tipo heavy haul*; Ph.D. Thesis; Porto: FEUP;
- Delgado, B.G.; Viana da Fonseca, A.; Fortunato, E. & Maia, P. (2019a) *Mechanical behavior of inert steel slag ballast for heavy haul rail track: Laboratory evaluation*; Transportation Geotechnics; Vol. 20; doi: 10.1016/j.trgeo.2019.100243
- Delgado, B.G.; Viana da Fonseca, A.; Fortunato, E. & Motta, L.M.G.d. (2019b) *Particle morphology's influence on the rail ballast behaviour of a steel slag aggregate*; Environmental Geotechnics; p. 1-10; doi: 10.1680/jenge.18.00203
- Delgado, B.G.; Viana da Fonseca, A.; Fortunato, E.; Paixão, A. & Alves, R. (2021) *Geomechanical assessment of an inert steel slag aggregate as an alternative ballast material for heavy haul rail tracks*; Construction and Building Materials; Vol. 279; doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122438
- dos Santos, W.W.; Coelho, L.M.; Monteiro, S.N.; Marques, M.E.S. & Guimarães, A.C.R. (2024) *Evaluation of Steel Slag as a Sustainable Alternative Aggregate for Railway Ballast: A Shakedown Theory-Based Approach*; Buildings; Vol. 14; n.º 11; doi: 10.3390/buildings14113546
- Esmaeili, M.; Nouri, R. & Yousefian, K. (2017) *Experimental comparison of the lateral resistance of tracks with steel slag ballast and limestone ballast materials*; Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit; Vol. 231; n.º 2; p. 175-184; doi: 10.1177/0954409715623577
- Ferreira, S. (2010) *Comportamento mecânico e ambiental de materiais granulares - aplicação às escórias de aciaria nacionais*; Ph.D. Thesis; Guimarães: Universidade do Minho;
- 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. 1-18; doi: 10.1520/jai103705

- Guo, Y.; Xie, J.; Fan, Z.; Markine, V.; Connolly, D.P. & Jing, G. (2022) *Railway ballast material selection and evaluation: A review*; Construction and Building Materials; Vol. 344; doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128218
- Hussain, A. & Hussaini, S.K.K. (2022) *Use of steel slag as railway ballast: A review*; Transportation Geotechnics; Vol. 35; doi: 10.1016/j.trgeo.2022.100779
- Indraratna, B.; Salim, W. & Rujikiatkamjorn, C. (2011) *Advanced Rail Geotechnology – Ballasted Track*; Taylor & Francis; ISBN: 978-0-203-81577-9;
- Jing, G.; Aela, P.; Zhou, Q. & Jia, W. (2022) *Steel Slag Aggregate Characteristics Evaluation as Railway Ballast*; In: *Advances in Transportation Geotechnics IV*; Ch. Chapter 37; pp. 449-460; doi: 10.1007/978-3-030-77234-5\_37; ISBN: 978-3-030-77233-8, 978-3-030-77234-5
- 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; doi: 10.3390/su10020284
- Koohmishi, M.; Kaewunruen, S.; He, X. & Guo, Y. (2025) *Advancing railway sustainability: strategic integration of circular economy principles in ballasted track systems*; Journal of Cleaner Production; doi: 10.1016/j.jclepro.2025.144713
- Kuo, C.-M. & Lin, C.-C. (2017) *Engineering performance of steel slag as railway ballast*; In: *Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields*; Loizos, A., et al. (eds.); Ed. 1st; CRC Press; doi: 10.1201/9781315100333; ISBN: 9781315100333
- LNEC (2020) *Agregado Siderúrgico Inerte para Construção (ASIC): utilização em misturas betuminosas do tipo AC20 base*; Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil;
- Marsal, R.J. (1972) *Large scale testing of rockfill materials*; Journal of the Soil Mechanics and Foundation Engineering Division; Vol. 93; n.º SM2; p. 27-43;
- Masad, E.; Saadeh, S.; Al-Rousan, T.; Garboczi, E. & Little, D. (2005) *Computations of particle surface characteristics using optical and X-ray CT images*; Computational Materials Science; Vol. 34; n.º 4; p. 406-424; doi: 10.1016/j.commatsci.2005.01.010
- Merkel, T. (2007) *New field of application – Steel Slag for Railway Tracks*; In: 5th European Slag Conference, Slag Products – Providing Sustainable Solutions for the Built Environment; Luxembourg; 19-21 Set. 2007; p. 128–134;
- Morata, M.; Saborido, C. & Fontserè, V. (2016) *Slag aggregates for railway track bed layers: monitoring and maintenance*; In: COMPAIL 2016 - Computers in Railways XV: Railway Engineering Design and Operation; Madrid, Spain; p. 283-294; doi: 10.2495/cr160261
- Nålsund, R. (2014) *Railway Ballast Characteristics, Selection Criteria and Performance*; Ph.D Thesis; Trondheim, Norway: Norwegian University of Science and Technology;
- Navarro, C.; Díaz, M. & Villa-García, M.A. (2010) *Physico-Chemical Characterization of Steel Slag. Study of its Behavior under Simulated Environmental Conditions*; Environmental Science & Technology; Vol. 44; n.º 14; p. 5383-5388; doi: 10.1021/es100690b
- Nguyen, L.H.; Nguyen, T.D.; Tran, T.V.N.; Nguyen, D.L.; Tran, H.S.; Nguyen, T.L.; Nguyen, T.H.; Nguyen, H.G.; Nguyen, T.P.; Nguyen, N.T.; Isawa, T.; Ta, Y. & Sato, R. (2021) *Steel slag quality control for road construction aggregates and its environmental impact: case study of Vietnamese steel industry—leaching of heavy metals from steel-making slag*; Environmental Science and Pollution Research; Vol. 29; n.º 28; p. 41983-41991; doi: 10.1007/s11356-021-16438-1
- 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; doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121225
- Paixão, A.; Resende, R. & Fortunato, E. (2018) *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
- Raymond, G.P. & Dyaljee, V.A. (1979) *Railroad ballast sizing and grading*; Journal of the Geotechnical Engineering Division; Vol. 105; n.º 5; p. 676-681;
- REFER (2015) *RF.IT.VIA.015 - Especificações técnicas para fornecimento de balastro novo*; Lisboa: Rede Ferroviária Nacional, EPE;
- 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; doi: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000460
- Suiker, A.S.J. (2002) *The Mechanical Behaviour of Ballasted Railway Tracks*; Ph.D Thesis; Delft: Delft University of Technology; doi: uuid:53f549b2-53c9-4a7d-be82-69929d918fc7