

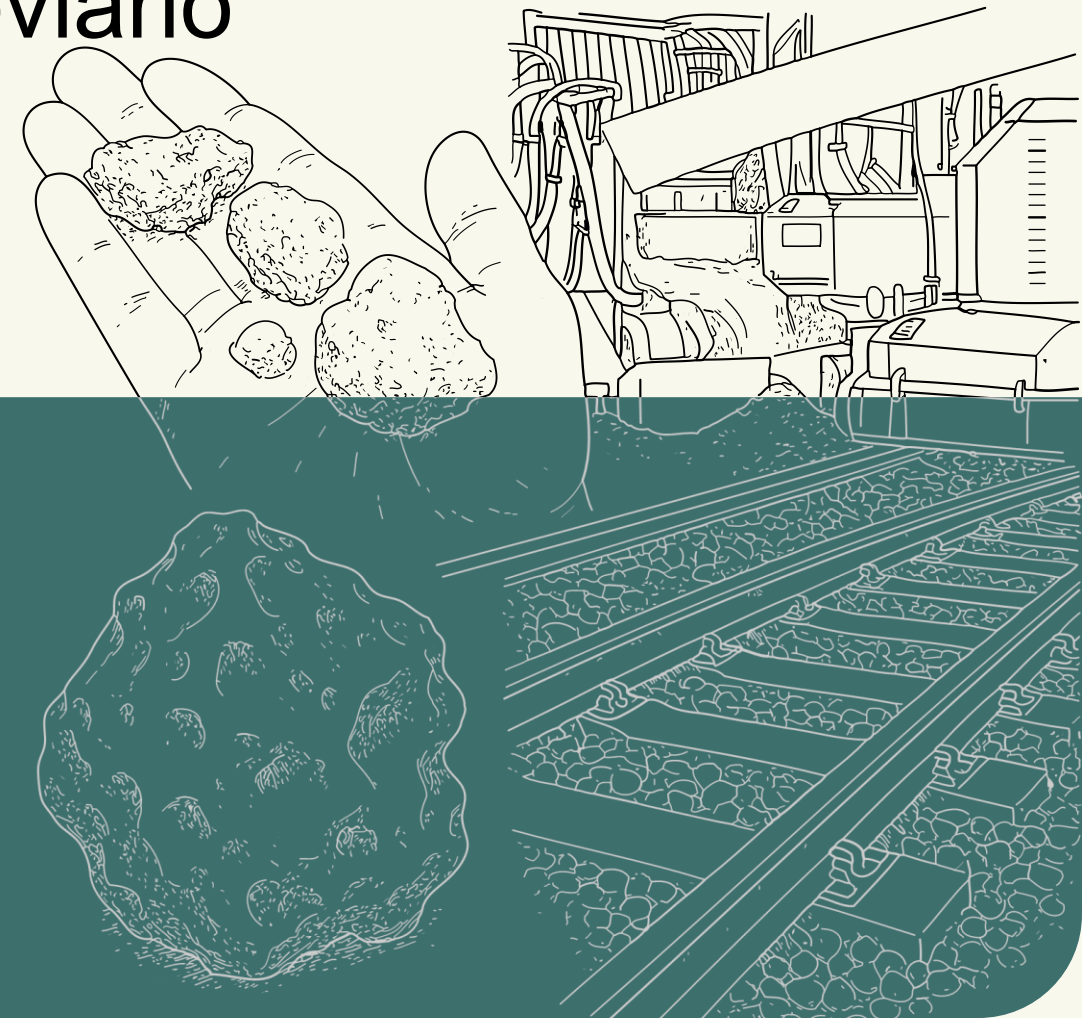
Estudos experimentais sobre a avaliação do potencial da escória de aço (ASIC) como material alternativo para balastro ferroviário

André Paixão, LNEC, Portugal

Bruno Guimarães Delgado, Vale, S.A., Brasil

António Viana da Fonseca, FEUP, Portugal

Eduardo Fortunato, LNEC, Portugal



11 crp

sustentabilidade e
resiliência

Índice

1. Introdução

- Motivação e enquadramento
- Objetivos

2. Estudos experimentais

- Descrição dos materiais analisados
- Ensaios triaxiais monotónicos e cíclicos
- Caracterização da morfologia de partículas
- Ensaios de desgaste e quebra de partículas

3. Considerações finais

4. Perspectivas futuras

Granito



Escória



Introdução - Motivação

- Gestão ambientalmente sustentável de recursos - agregados naturais

O uso intensivo de agregados naturais em obras de engenharia levanta preocupações ambientais e económicas, especialmente num cenário de transição para uma economia mais circular.

- Potencial da escória de forno de arco elétrico (EAF/ASIC) como recurso valorizado (certificado com a marca CE)

A escória de forno de arco elétrico, subproduto da indústria siderúrgica, tem vindo a ser estudada como alternativa tecnicamente viável aos agregados naturais como o balastro tradicional, com benefícios ambientais e desempenho promissor.

- Estudos experimentais em contexto exigente como evidência de robustez

Embora não existam linhas *heavy haul* em Portugal, parte dos estudos experimentais foram representativas desse regime de exploração (evidências de bom desempenho reforçariam a adequação do material para aplicação em linhas convencionais nacionais).



Introdução - Enquadramento técnico

- Requisitos mecânicos e morfológicos do balastro

Distribuição de cargas, estabilidade estrutural, drenagem e resistência à degradação. A qualidade do balastro é determinante para o desempenho e manutenção da via

- Referencias normativas e prática nacional

Requisitos técnicos da AREMA, complementados por normas europeias/portuguesas (**NP EN 13450**) e especificações da IP (**RF.IT.VIA.015**)

Ainda não existe, em Portugal, um guia específico para agregados artificiais para balastro, embora esteja prevista essa possibilidade na **NP EN 13450**

NP
EN 13450
2005

p. 7 de 47

1 Objectivo e campo de aplicação

A presente Norma Europeia especifica as propriedades dos agregados não ligados obtidos a partir do processamento de materiais naturais, **artificiais** ou reciclados para utilização na construção de vias férreas. No âmbito desta Norma, o agregado é referido como balastro.

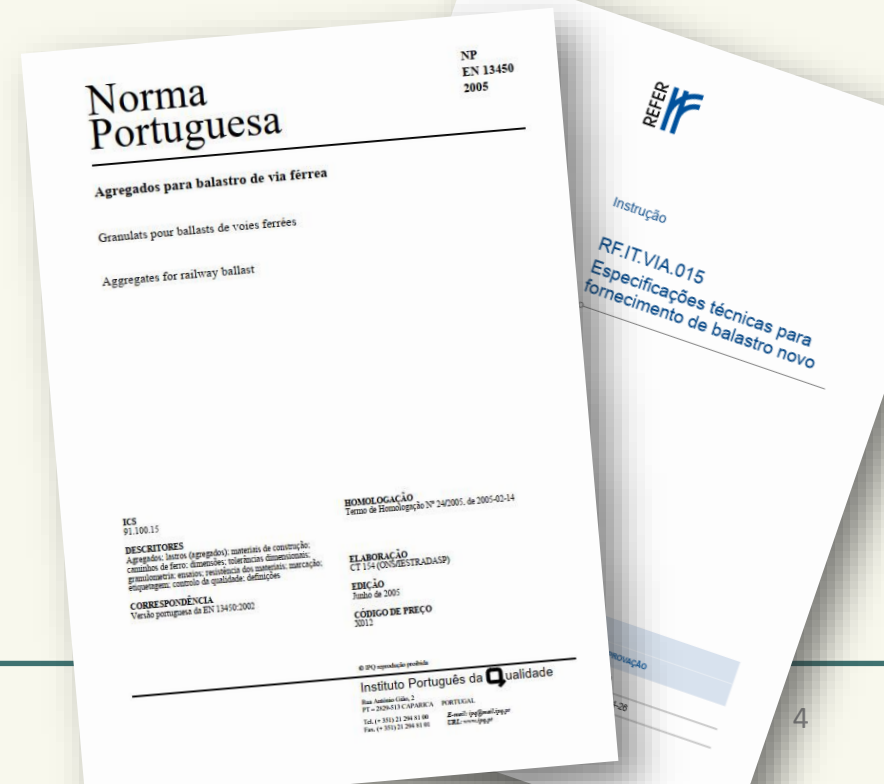
Inclui, ainda, a avaliação da conformidade dos produtos com a presente Norma Europeia.

***NOTA:** Os requisitos da presente Norma Europeia são baseados na experiência adquirida com tipos de agregados com um padrão de utilização estabelecido. Deverão ser tomadas as necessárias precauções quando se considerar o uso de agregados provenientes de determinadas origens para as quais não exista tal padrão como, por exemplo, agregados reciclados e agregados resultantes de certos subprodutos industriais. Tais agregados, que deverão satisfazer todos os requisitos da presente Norma Europeia, podem ter outras características não incluídas no Mandato M125 (como emendado) que não se aplicam à generalidade dos tipos de agregados com um padrão de utilização estabelecido e, quando requerido, podem ser usadas as disposições em vigor no local de utilização para avaliar a sua aptidão.*

RF.IT.VIA.015

4 REQUISITOS TÉCNICOS DO BALASTRO

O balastro novo tem de ser obtido exclusivamente de rochas duras e sãs. Entende-se por rocha dura aquela que revela elevada resistência à fragmentação e ao desgaste.

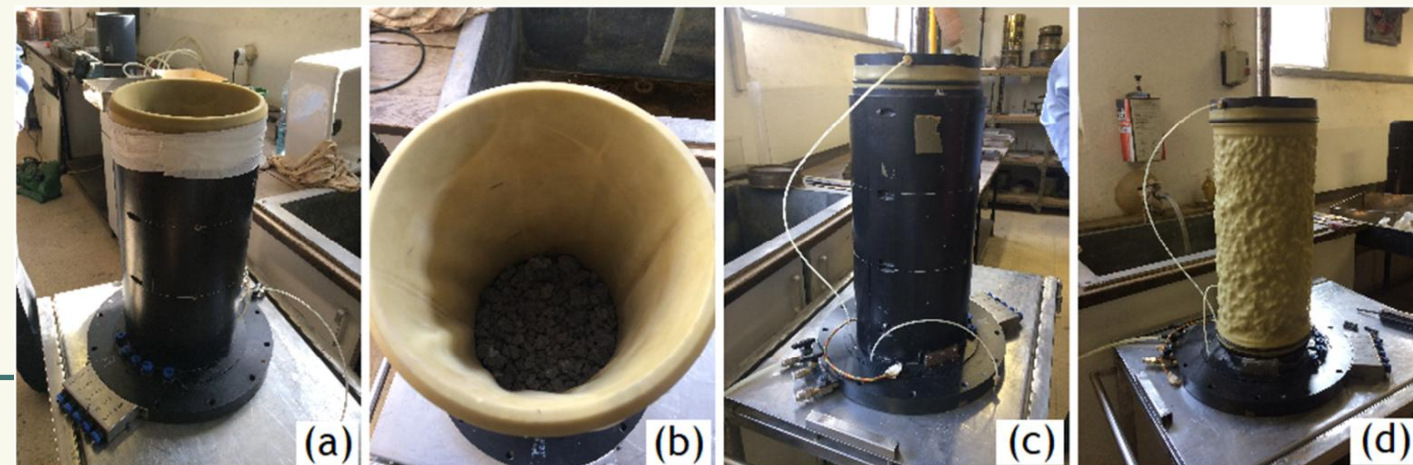
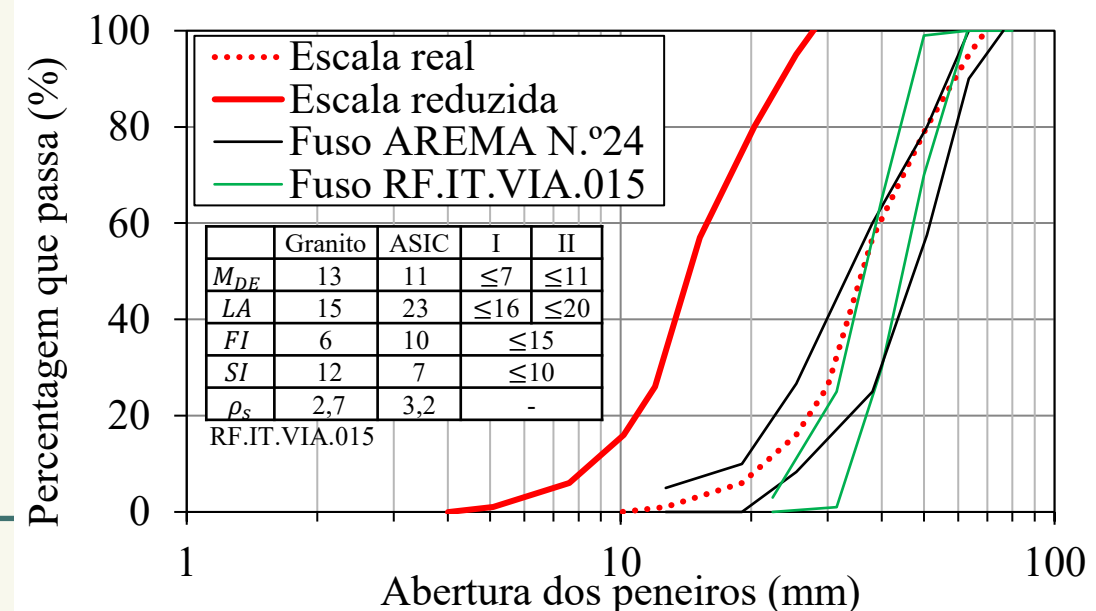
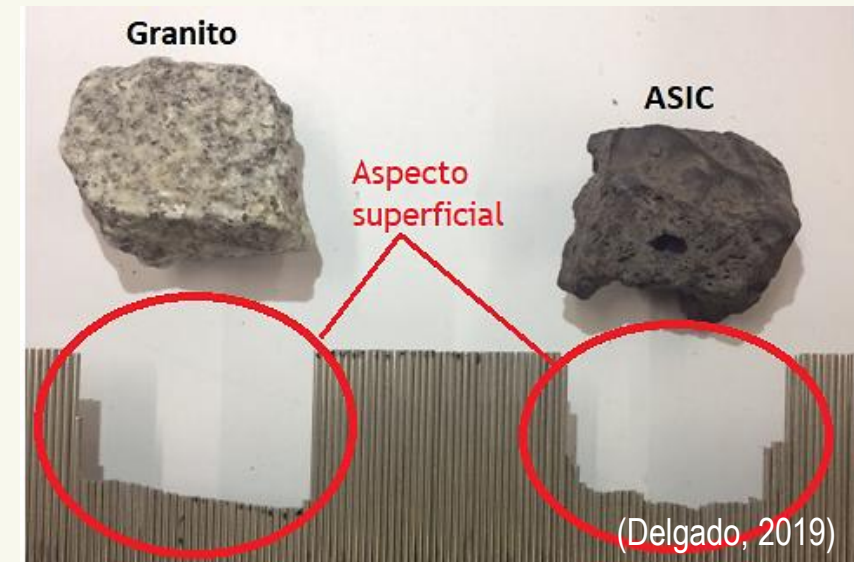


Introdução - Objetivos

- Síntese de evidência técnica de vários estudos experimentais
 - Compilação e análise de resultados laboratoriais realizados em Portugal sobre a aplicação da escória siderúrgica como balastro ferroviário, desenvolvidos em diferentes contextos
- Avaliar propriedades mecânicas e morfológicas
 - Resistência à fragmentação e desgaste, deformabilidade, módulo resiliente, parâmetros morfológicos, comparando o **ASIC (Agregado Siderúrgico Inerte para Construção)** com o granito convencional
- Analisar a viabilidade técnica com foco no contexto nacional
 - Identificar os benefícios e as limitações da adoção do ASIC em linhas ferroviárias portuguesas, tendo como base critérios de desempenho e não apenas prescritivos.

Materiais analisados e preparação de provetes

- Agregados para balastro
 - Agregado granítico – referência convencional
 - Escória de forno de arco elétrico (ASIC) – SN Maia
- Provetes cilíndricos moldados (150x300 mm)
 - curvas granulométricas escaladas (1:2,5) - AREMA N.24 (Sevi & Ge, 2012; Delgado et al., 2017)
 - índices de vazios 0,70–0,80: representativo de balastro após ataque mecânico pesado (Suiker, 2002; Nåsund, 2014)
 - moldados a seco, compactados com aux. sucção

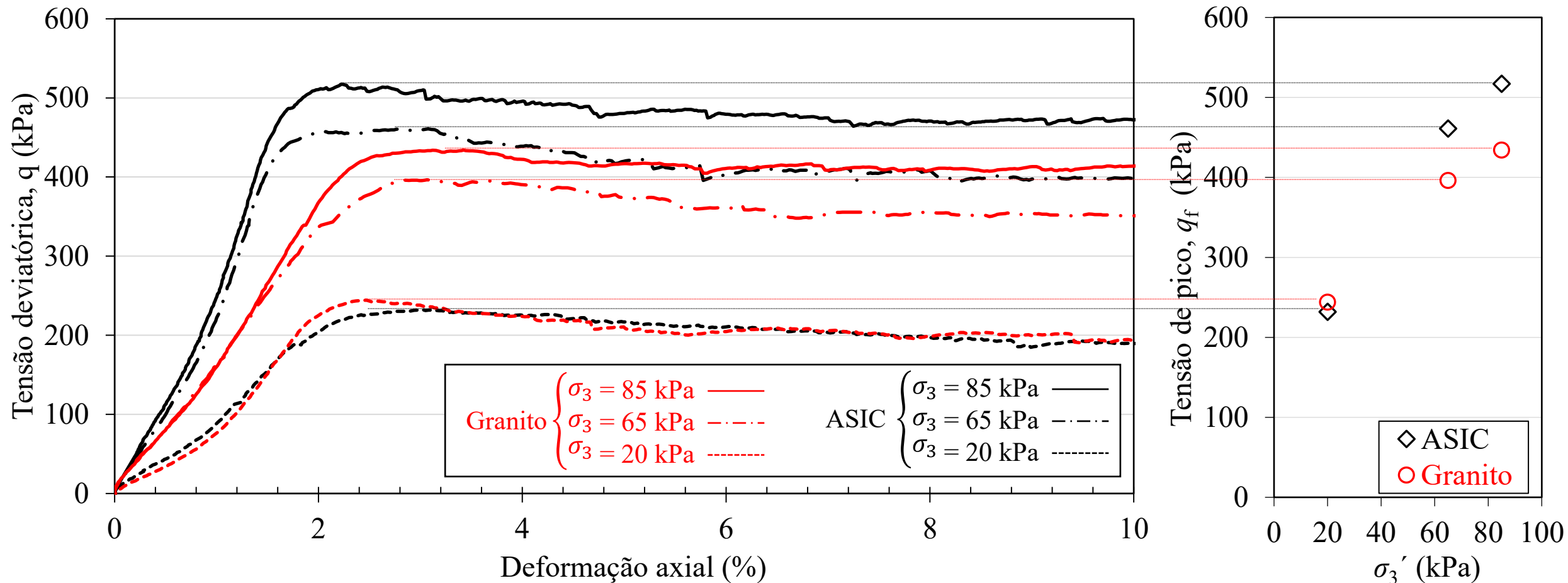


Ensaio triaxiais monotônicos

três níveis de confinamento:

$$\sigma_3 = 20, 65 \text{ e } 85 \text{ kPa}$$

- **ASIC maior resistência ao corte** (resistência de pico e estado crítico), especialmente sob confinamento elevado
- **ASIC comportamento mais dilatante** - envolvente de resistência e linha de estado crítico posicionadas mais acima
- Melhor desempenho do ASIC devido a >angularidade e rugosidade superficial? (favorecem o atrito entre partículas e a transferência de carga)

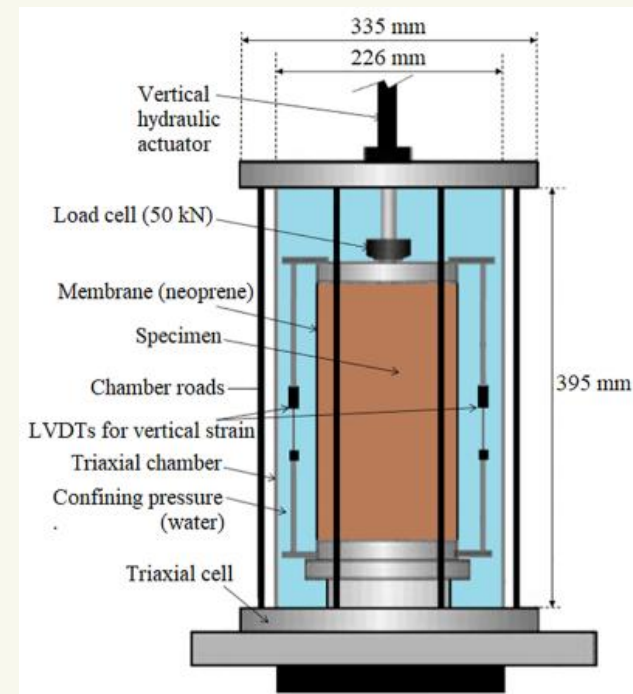
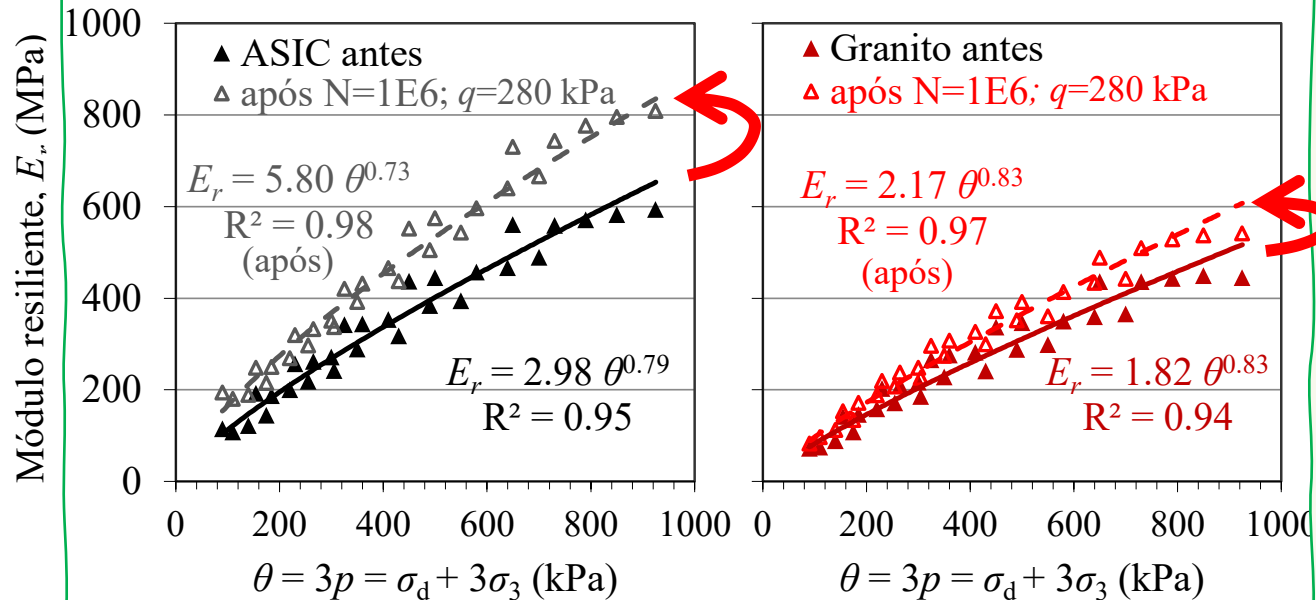


Ensaio triaxiais cíclicos – Comportamento resiliente

- Protocolo B da EN 13286-7, drenado, $\sigma_{d,max} = 30$ a 475, $\sigma_{3,const} = 20$ a 150 [kPa]
- ASIC > E_r e coerentes com outros estudos (Ferreira, 2010); diferenças $\geq 30\%$ após 2E6 ciclos
 - Resultados evidenciam > rigidez do ASIC e sugerem > estabilidade a longo prazo
- A evolução positiva de E_r com o número de ciclos no ASIC para 40 t/eixo, sugere um comportamento estruturante, em contraste com a tendência de ligeira degradação do granito.

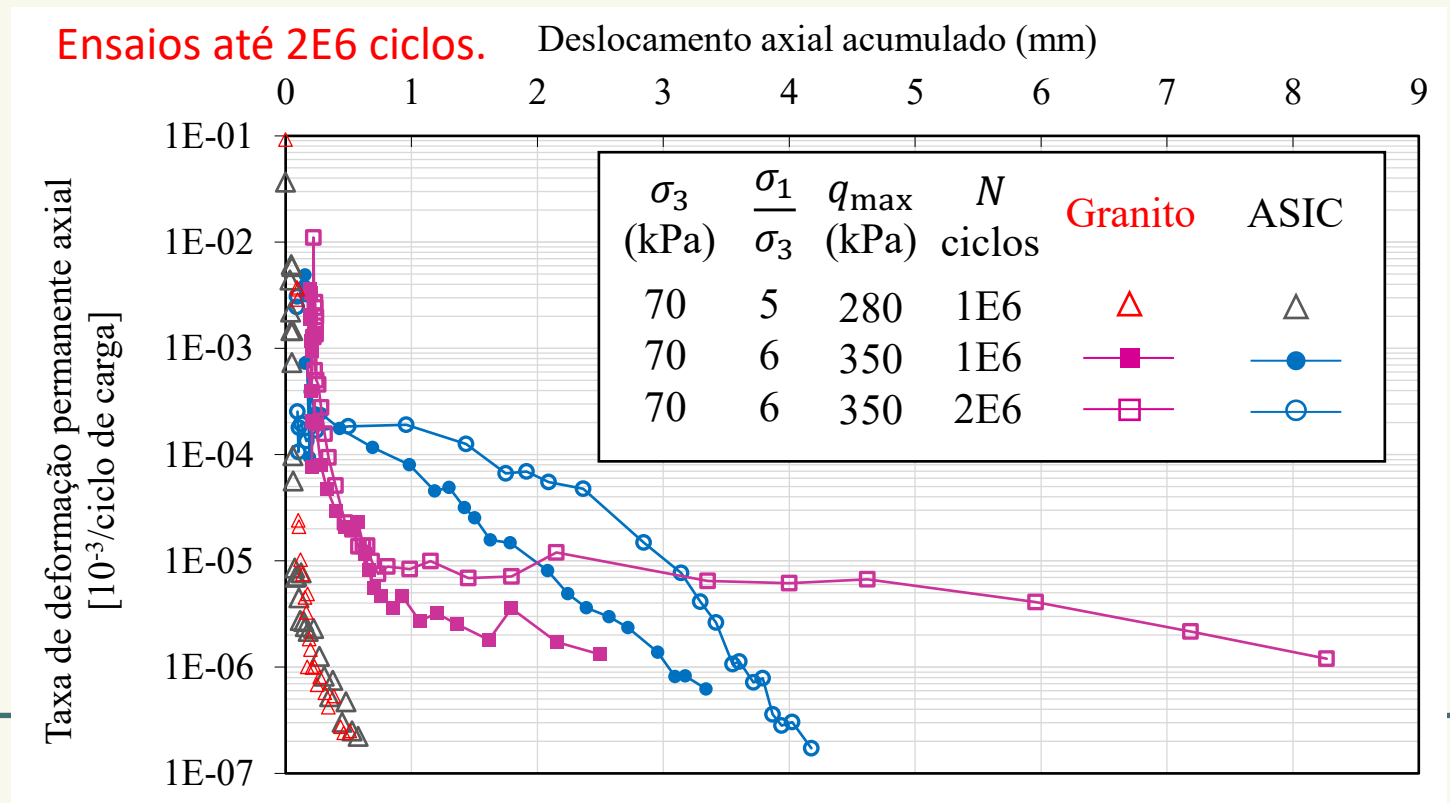
Antes e após 1E6 ciclos de carga

32,5 t/eixo



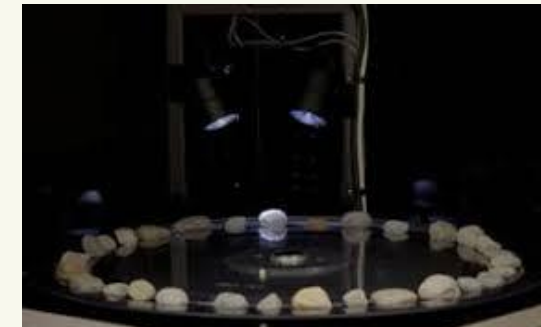
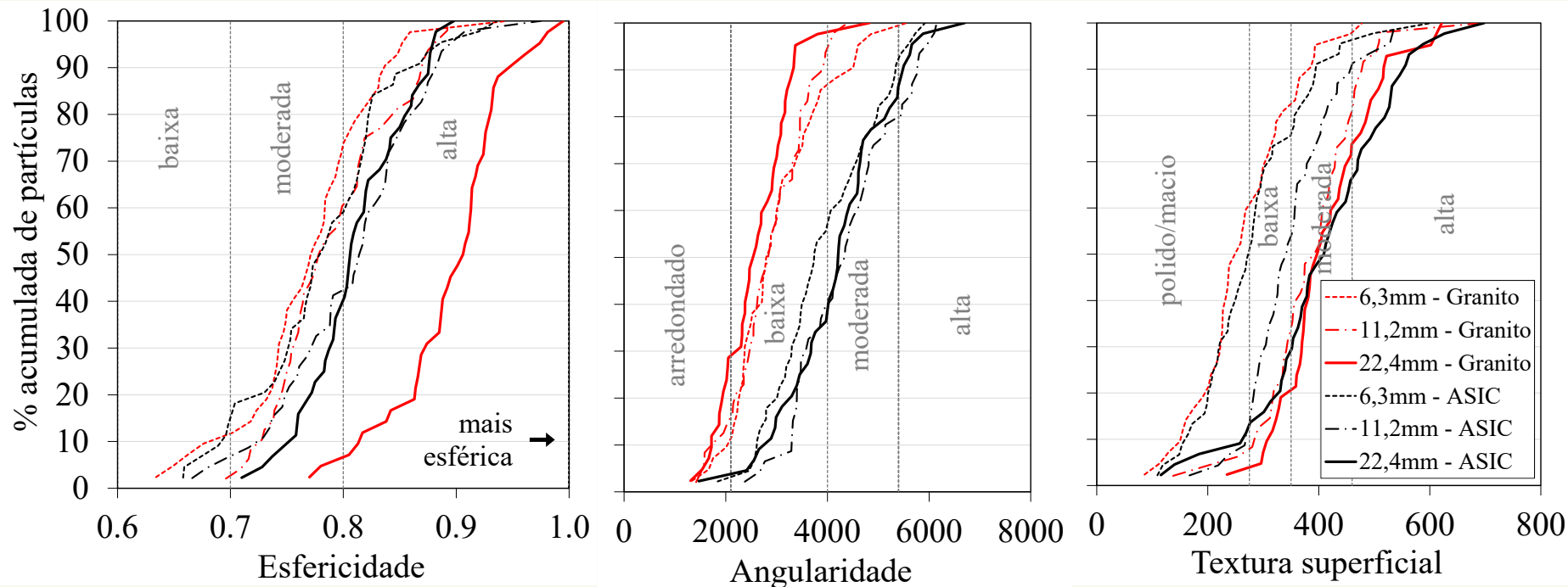
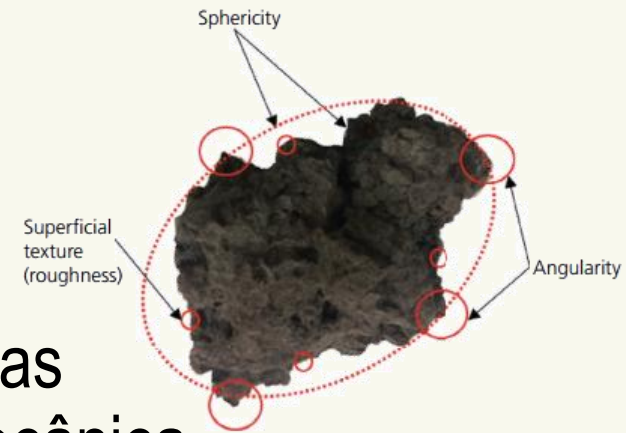
Ensaio triaxiais cíclicos – Comportamento def. permanente

- Para 32,5 t/eixo ($\sigma_d = 280$, $\sigma_3 = 70$ kPa), ambos os materiais estabilizaram, mas o ASIC atingiu o regime de *shakedown* com menor deformação acumulada
- Para 40 t/eixo ($\sigma_d = 350$, $\sigma_3 = 70$ kPa), o granito manteve-se em regime de fluência plástica, enquanto o ASIC estabilizou, indicando melhor comportamento estrutural.
- O ASIC exibiu menores taxas de deformação ao longo dos ciclos, refletindo maior resistência à degradação por carregamentos cíclicos intensos, independentemente do índice de vazios inicial.



Caracterização morfológica das partículas

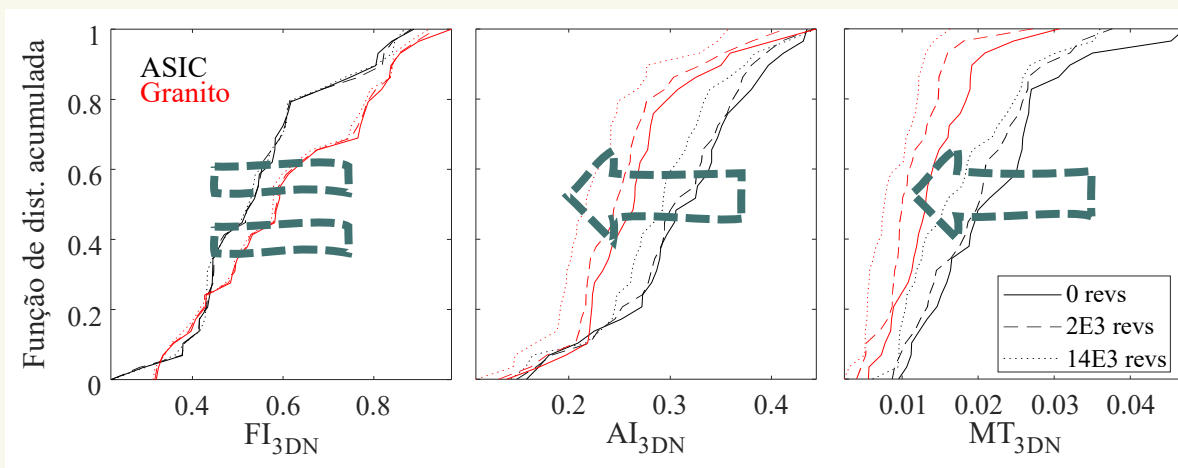
- A análise 2D com o equipamento AIMS2 (Gates et al., 2011)
- ASIC apresenta maior angularidade em todas as frações analisadas (6,3, 11,2 e 22,4 mm): favorece o imbricamento e a resistência mecânica



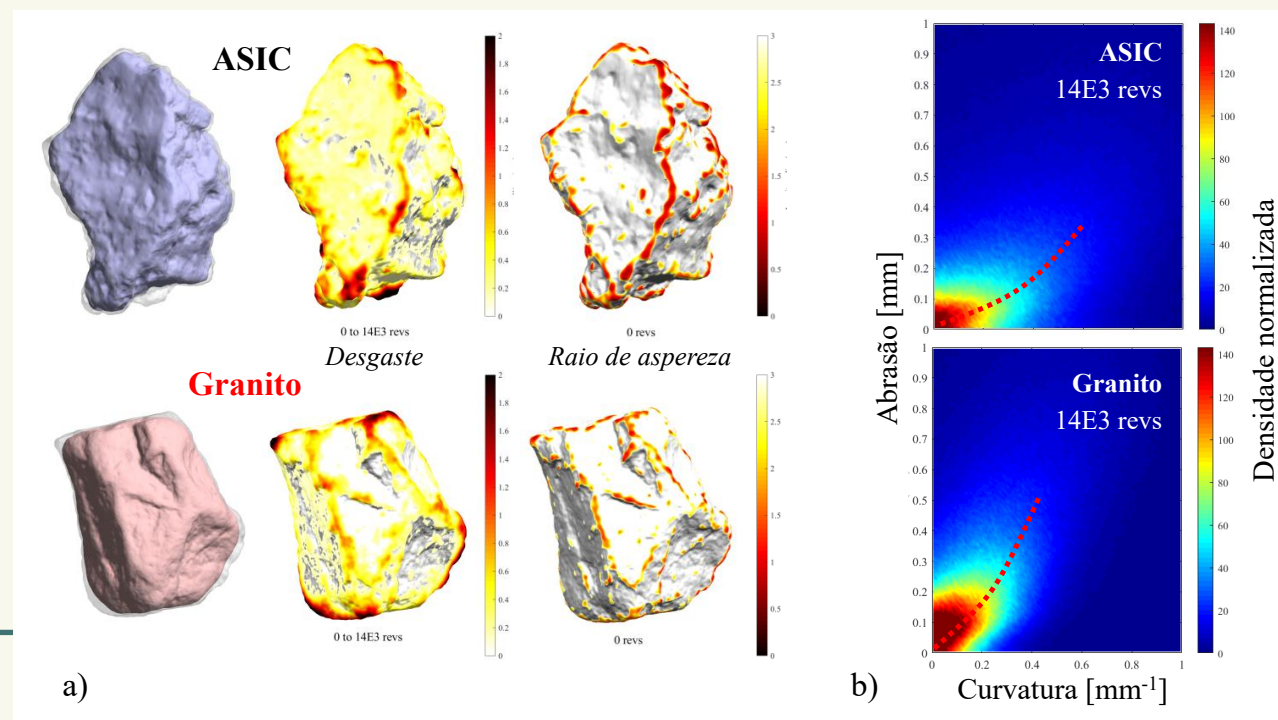
Caracterização morfológica e análise de abrasão das partículas

A análise 3D – evolução morfológica durante o ensaio Micro-Deval:

- ASIC revelou menor desgaste superficial, com preservação da sua geometria complexa mesmo após 14 000 rotações
- Os parâmetros FI_{3DN} , AI_{3DN} e MT_{3DN} confirmam > complexidade geométrica e angularidade do ASIC, mantendo-se mais estável face à abrasão - suporta o melhor desempenho mecânico observado nos ensaios TC

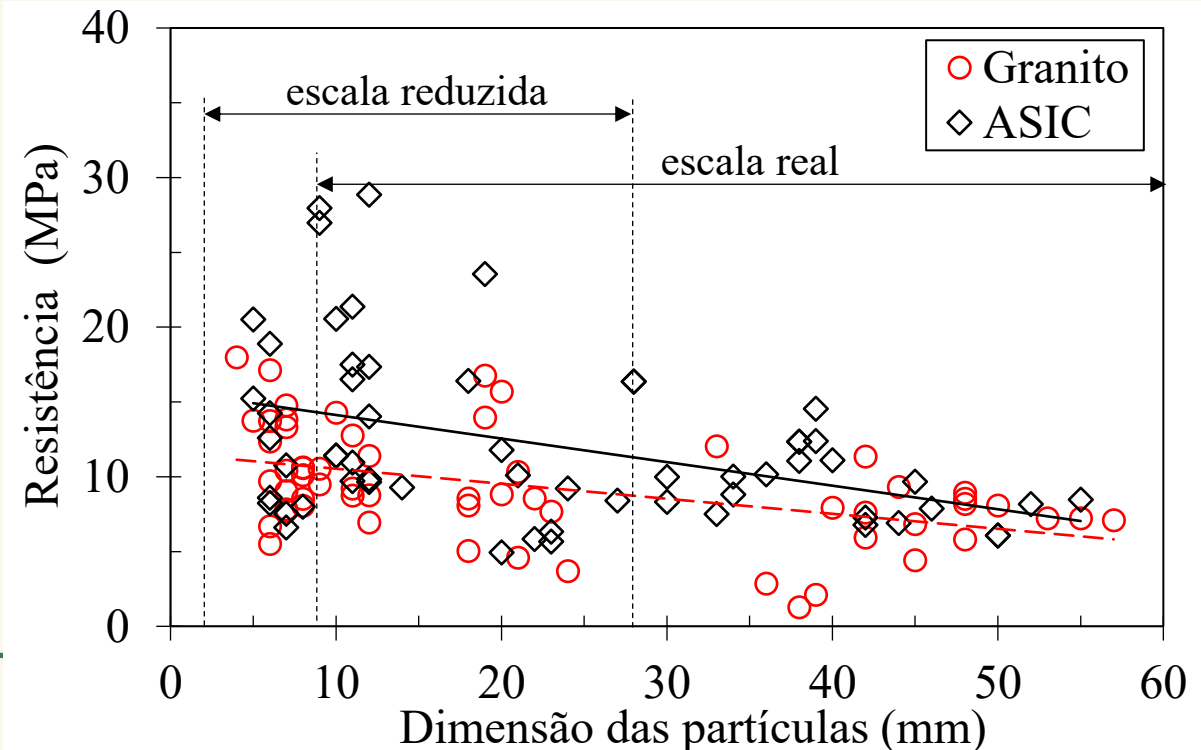
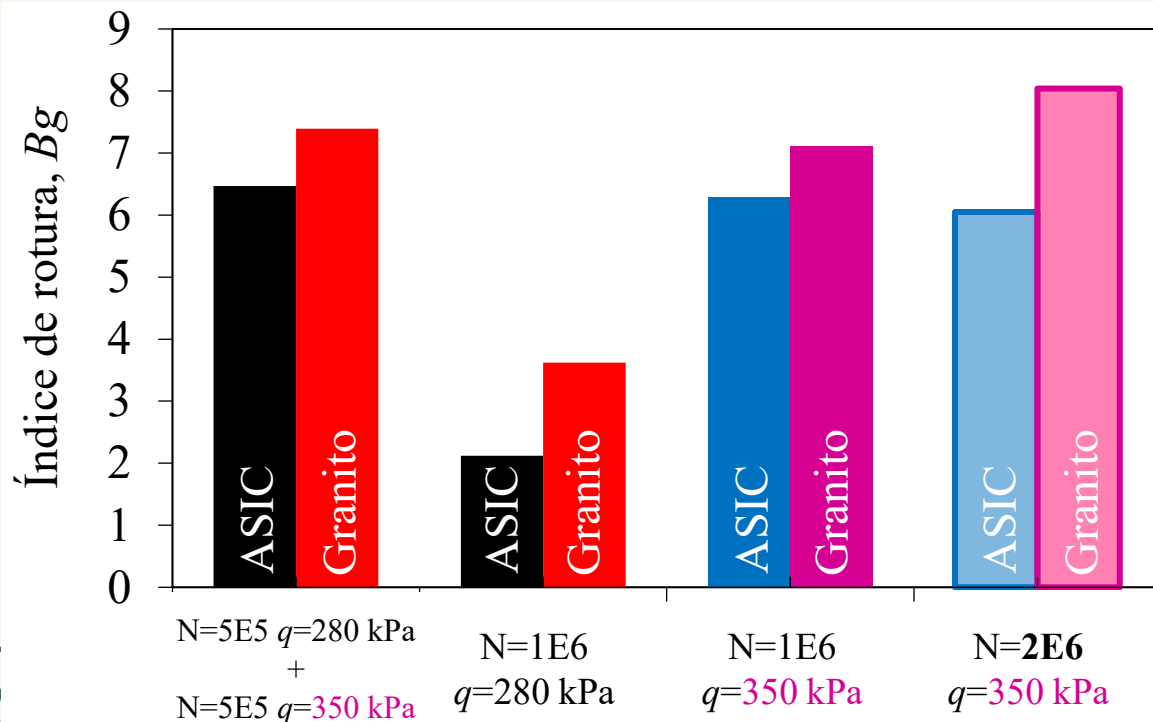
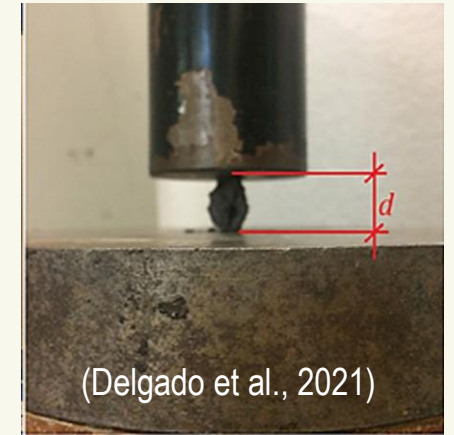


Granulometria: 31,5 - 50,0 mm



Quebra de partículas – índice Bg e resistência ao esmagamento

- Ensaios triaxiais cíclicos: ASIC < índice de rotura, B_g (Marsal, 1967)
- Ensaio de compressão uniaxial: ASIC mais resistente ao esmagamento
- A combinação entre maior resistência ao esmagamento e angularidade do ASIC contribui para a integridade estrutural do balastro



Considerações finais

- ASIC, certificado como agregado inerte, é superior ao granito em:
 - Resistência mecânica do agregado: >resistência ao corte; > rigidez; < def. plástica; shakedown
 - Resistência das partículas: < abrasão, < índice rotura, B_g , > resistência ao esmagamento
 - Morfologia: mais “rica” e > estabilidade da mesma
 - Desempenho mecânico para cargas muito elevadas (40 t/eixo)
- Promove:
 - Imbricamento entre partículas; estabilidade da camada; condições de drenagem adequada
 - Menor esforço de manutenção
- Viável como balastro alternativo com base em desempenho, embora não cumpra alguns requisitos da IT.VIA.015 (i.e. LA , M_{DE})
- A sua aplicação poderá contribuir para uma economia mais circular, (i) valorizando subprodutos, reduzindo (ii) o consumo de agregados naturais e (iii) o esforço de manutenção

Perspetivas futuras

- Estudos de validação em campo, em condições representativas de tráfego ferroviário
- Exploração da aplicação combinada de ASIC com outros materiais (borracha?), avaliando sinergias e variabilidade no desempenho da camada de balastro
- Avaliação do comportamento elétrico do ASIC, especialmente em condições de elevada humidade, garantindo conformidade com os requisitos dos circuitos de via
- Revisita de critérios normativos (LA , M_{DE}): mais foco em desempenho mecânico; menos em parâmetros-índice
- Promoção da utilização do ASIC em contextos ferroviários, articulando investigação, indústria e regulamentação para acelerar a sua adoção

OBRIGADO!

CONTACTOS

apaixao@lnec.pt

MAIS INFORMAÇÕES

- <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122438>
- <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121225>
- <https://doi.org/10.1680/jenge.18.00203>

AGRADECIMENTOS

- Siderurgia Nacional da Maia pela disponibilização do material ASIC
- 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.
- Apoio do 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).

