



As Engenharias frente a Sociedade, a Economia e o Meio Ambiente 3

Henrique Ajuz Holzmann
(Organizador)

Henrique Ajuz Holzmann
(Organizador)

As Engenharias frente a Sociedade, a
Economia e o Meio Ambiente 3

Atena Editora
2019

2019 by Atena Editora
Copyright © Atena Editora
Copyright do Texto © 2019 Os Autores
Copyright da Edição © 2019 Atena Editora
Editora Executiva: Prof^a Dr^a Antonella Carvalho de Oliveira
Diagramação: Natália Sandrini
Edição de Arte: Lorena Prestes
Revisão: Os Autores

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores. Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Conselho Editorial

Ciências Humanas e Sociais Aplicadas

Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília
Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Prof^a Dr^a Cristina Gaio – Universidade de Lisboa
Prof. Dr. Deyvison de Lima Oliveira – Universidade Federal de Rondônia
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Prof^a Dr^a Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense
Prof^a Dr^a Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins
Prof^a Dr^a Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Prof^a Dr^a Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Prof^a Dr^a Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

Ciências Agrárias e Multidisciplinar

Prof. Dr. Alan Mario Zuffo – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Alexandre Igor Azevedo Pereira – Instituto Federal Goiano
Prof^a Dr^a Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná
Prof. Dr. Darllan Collins da Cunha e Silva – Universidade Estadual Paulista
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul
Prof^a Dr^a Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Prof. Dr. Jorge González Aguilera – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas

Ciências Biológicas e da Saúde

Prof. Dr. Benedito Rodrigues da Silva Neto – Universidade Federal de Goiás
Prof.^a Dr.^a Elane Schwinden Prudêncio – Universidade Federal de Santa Catarina
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria
Prof. Dr. José Max Barbosa de Oliveira Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará

Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande

Ciências Exatas e da Terra e Engenharias

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

Conselho Técnico Científico

Prof. Msc. Abrãao Carvalho Nogueira – Universidade Federal do Espírito Santo
Prof. Dr. Adaylson Wagner Sousa de Vasconcelos – Ordem dos Advogados do Brasil/Seccional Paraíba
Prof. Msc. André Flávio Gonçalves Silva – Universidade Federal do Maranhão
Prof.ª Drª Andreza Lopes – Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento Acadêmico
Prof. Msc. Carlos Antônio dos Santos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Msc. Daniel da Silva Miranda – Universidade Federal do Pará
Prof. Msc. Eliel Constantino da Silva – Universidade Estadual Paulista
Prof.ª Msc. Jaqueline Oliveira Rezende – Universidade Federal de Uberlândia
Prof. Msc. Leonardo Tullio – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Prof.ª Msc. Renata Luciane Polsaque Young Blood – UniSecal
Prof. Dr. Welleson Feitosa Gazel – Universidade Paulista

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)	
E57	As engenharias frente a sociedade, a economia e o meio ambiente 3 [recurso eletrônico] / Organizador Henrique Ajuz Holzmann. – Ponta Grossa (PR): Atena Editora, 2019. – (As Engenharias Frente a Sociedade, a Economia e o Meio Ambiente; v. 3) Formato: PDF Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader Modo de acesso: World Wide Web Inclui bibliografia ISBN 978-85-7247-432-0 DOI 10.22533/at.ed.320192506 1. Engenharia – Aspectos sociais. 2. Engenharia – Aspectos econômicos. 3. Desenvolvimento sustentável. I. Holzmann, Henrique Ajuz. II. Série. CDD 658.5
Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422	

Atena Editora
Ponta Grossa – Paraná - Brasil
www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br

APRESENTAÇÃO

As obras As Engenharias frente a Sociedade, a Economia e o Meio Ambiente Volume 1, 2, 3 e 4 abordam os mais diversos assuntos sobre métodos e ferramentas nas diversas áreas das engenharias a fim de melhorar a relação do homem com o meio ambiente e seus recursos.

O Volume 1 está disposto em 31 capítulos, com assuntos voltados a engenharia do meio ambiente, apresentando processos de recuperação e reaproveitamento de resíduos e uma melhor aplicação dos recursos disponíveis no ambiente, além do panorama sobre novos métodos de obtenção limpa da energia.

Já o Volume 2, está organizado em 32 capítulos e apresenta uma vertente ligada ao estudo dos solos e águas, com estudos de sua melhor utilização, visando uma menor degradação do ambiente; com aplicações voltadas a construção civil de baixo impacto.

O Volume 3 apresenta estudos de materiais para aplicação eficiente e econômica em projetos, bem como o desenvolvimento de projetos mecânico e eletroeletrônicos voltados a otimização industrial e a redução de impacto ambiental, sendo organizados na forma de 28 capítulos.

No último Volume, são apresentados capítulos com temas referentes a engenharia de alimentos, e a melhoria em processos e produtos.

Desta forma um compendio de temas e abordagens que facilitam as relações entre ensino-aprendizado são apresentados, a fim de se levantar dados e propostas para novas discussões em relação ao ensino nas engenharias, de maneira atual e com a aplicação das tecnologias hoje disponíveis.

Boa leitura

Henrique Ajuz Holzmann

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	1
ANÁLISE DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DE COMPÓSITOS CERÂMICOS DE ALUMINA-ZIRCÔNIA PARA APLICAÇÃO COMO FERRAMENTAS DE CORTE	
Miguel Adriano Inácio Maria do Carmo de Andrade Nono José Vitor Cândido de Souza Sergio Luiz Mineiro Daniel Alessandro Nono	
DOI 10.22533/at.ed.3201925061	
CAPÍTULO 2	10
SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE MODELO ELASTOPLÁSTICO EM ROCHA CARBONÁTICA CARSTIFICADA	
Rayane Conceição Ribeiro da Silveira Mattos Daniel Araújo Farias de Melo Marinésio Pinheiro de Lima Tiago de Freitas Viana Igor Fernandes Gomes Leonardo José do Nascimento Guimarães	
DOI 10.22533/at.ed.3201925062	
CAPÍTULO 3	26
A INFLUÊNCIA DO NITROGÊNIO EM AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS COM APLICAÇÃO EM PRÓTESES ORTOPÉDICAS	
Glauber Rodrigues Cerqueira de Cerqueira Pedro Eliézer de Araújo Júnior	
DOI 10.22533/at.ed.3201925063	
CAPÍTULO 4	42
MICROPOROUS ACTIVATED CARBON FIBER FELT FROM BRAZILIAN TEXTILE PAN FIBER: PREPARATION, CHARACTERIZATION AND APPLICATION AS SUPERCAPACITOR ELECTRODE	
Jossano Saldanha Marcuzzo Aline Castilho Rodrigues Andres Cuña Nestor Tancredi Eduardo Mendez Heide Heloise Bernardi Mauricio Ribeiro Baldan	
DOI 10.22533/at.ed.3201925064	
CAPÍTULO 5	55
ANÁLISE COMPARADA DE UM AGREGADO DE ESCÓRIA DE ACIARIA COMO MATERIAL ALTERNATIVO PARA LASTRO DE VIAS FÉRREAS DO TIPO <i>HEAVY HAUL</i> POR MEIO DE ENSAIOS TRIAXIAIS	
Bruno Guimarães Delgado Antônio Viana da Fonseca Eduardo Fortunato Daniela Raquel Ferreira Coelho	
DOI 10.22533/at.ed.3201925065	

CAPÍTULO 6	71
CARACTERIZAÇÃO EM FADIGA POR FLEXÃO ROTATIVA DE FIOS DE ARAME DE SOLDA	
Ingrid Ariani Belineli Barbosa	
Heide Heloise Bernardi	
William Marcos Muniz Menezes	
DOI 10.22533/at.ed.3201925066	
CAPÍTULO 7	80
ESTUDO DA MICROESTRUTURA NA ZONA TERMICAMENTE AFETADA COM A VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM	
Luís Henrique Pires da Silva	
Alex Sander Chaves da Silva	
DOI 10.22533/at.ed.3201925067	
CAPÍTULO 8	92
ESTUDO DA USINAGEM DA SUPERLIGA A BASE DE FERRO-NÍQUEL UTILIZANDO FERRAMENTA CERÂMICA	
Eduardo Pires Bonhin	
Sarah David Müzel	
Marcel Yuzo Kondo	
Lúcia de Almeida Ribeiro	
José Vitor Candido de Souza	
Marcos Valério Ribeiro	
DOI 10.22533/at.ed.3201925068	
CAPÍTULO 9	100
CONSTRUÇÃO DE UMA MÁQUINA DE NÉVOA SALINA ATENDENDO AOS REQUISITOS MÍNIMOS CONTIDOS NAS NORMAS ISO 9227 e ASTM B-117	
Leonardo de Souza Coutinho	
Alexandre Alvarenga Palmeira	
DOI 10.22533/at.ed.3201925069	
CAPÍTULO 10	111
MECANIZAÇÃO AGRÍCOLA: COLHEITADEIRAS AXIAIS X RADIAIS	
Filipi José Arantes Lemos	
João Mario Mendes de Freitas	
DOI 10.22533/at.ed.32019250610	
CAPÍTULO 11	127
MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA PARA O PROJETO DE MODELOS DE BIELAS E TIRANTES	
Jamile Maria Araujo Tavares	
Rejane Martins Fernandes Canha	
DOI 10.22533/at.ed.32019250611	
CAPÍTULO 12	142
ESTUDO NUMÉRICO DE UM EQUIPAMENTO DE SECAGEM	
Eduardo Dal Piva Schuch	
Magaiver Gabriel Lamp	
Conrado Mendes Morais	
Ângela Beatrice Dewes Moura	
DOI 10.22533/at.ed.32019250612	

CAPÍTULO 13	153
SISTEMA DE AQUECIMENTO DE ÁGUA A COMBUSTÃO DE GASOLINA	
Felipe Michael Grein	
Jean Lucas Pereira	
Luiz Felipe Weck	
Olaf Graupmann	
DOI 10.22533/at.ed.32019250613	
CAPÍTULO 14	156
MODELAGEM DE PID PARA SISTEMA DE CONTROLE DE RAMPAS DE TEMPERATURA EM BRASSAGEM	
Gabriel Queiroz	
Marcelo Barros de Almeida	
Márcio Jose da Cunha	
DOI 10.22533/at.ed.32019250614	
CAPÍTULO 15	168
MODELAGEM MATEMÁTICA DE SISTEMAS DINÂMICOS: UMA ABORDAGEM DIDÁTICA	
Lucas Divino Alves	
Neylor Makalister Ribeiro Vieira	
Emerson Paulino dos Reis	
DOI 10.22533/at.ed.32019250615	
CAPÍTULO 16	183
APLICAÇÃO E ANÁLISE VIA MEC EM PROBLEMAS DE TERMOELASTICIDADE 2D	
Luis Vinicius Pereira Silva	
Gilberto Gomes	
João Carlos Barleta Uchôa	
DOI 10.22533/at.ed.32019250616	
CAPÍTULO 17	198
SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA INJEÇÃO DE ÁGUA EM RESERVATÓRIO DE PETRÓLEO HETEROGÊNEO	
Raquel Oliveira Lima	
José Arthur Oliveira Santos	
Antônio Jorge Vasconcellos Garcia	
Felipe Barreiros Gomes	
DOI 10.22533/at.ed.32019250617	
CAPÍTULO 18	207
TANQUES FLASH: DIMENSIONAMENTO E ANÁLISE DE CUSTOS NO SOFTWARE DE MODELAGEM E SIMULAÇÃO EMSO	
Erich Potrich	
Sérgio Correia da Silva	
Larissa Souza Amaral	
DOI 10.22533/at.ed.32019250618	

CAPÍTULO 19	215
AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE DEPOSIÇÃO ORGÂNICA EM OPERAÇÕES DE MISTURA DE PETRÓLEOS NO TANQUE DE ESTOCAGEM EM REFINARIAS DE PETRÓLEO	
Rosberguer de Almeida Camargo	
Mauren Costa da Silva	
Rafael Beltrame	
Darci Alberto Gatto	
Antônio Carlos da Silva Ramos	
DOI 10.22533/at.ed.32019250619	
CAPÍTULO 20	223
AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA EMBARCADO PARA MENSURAR A ILUMINÂNCIA EM UM AVIÁRIO EXPERIMENTAL	
Giovanni Polette Dalla Libera	
Victor Moreira Leão	
Vitor Augusto de Sousa	
Matheus Fernando Lima Zuccherelli de Souza	
Renata Lima Zuccherelli de Oliveira	
Marcelo Eduardo de Oliveira	
Adriano Rogério Bruno Tech	
DOI 10.22533/at.ed.32019250620	
CAPÍTULO 21	230
CONTROLADOR FUZZY SINTONIZADO POR ALGORITMO GENÉTICO EM SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA	
Lenon Diniz Seixas	
Diego Solak Castanho	
Hugo Valadares Siqueira	
Fernanda Cristina Corrêa	
DOI 10.22533/at.ed.32019250621	
CAPÍTULO 22	243
CONTROLADORES ROBUSTO APLICADO A CONVERSORES CC-CC	
Luiz Otávio Limurci dos Santos	
Luiz Antonio Maccari Junior	
DOI 10.22533/at.ed.32019250622	
CAPÍTULO 23	261
PROPOSTA DE PLATAFORMA PARA ESTUDO DE MOTOR A RELUTÂNCIA VARIÁVEL 8/6	
Marcos José de Moraes Filho	
Luciano Coutinho Gomes	
Darizon Alves de Andrade	
Josemar Alves dos Santos Junior	
Wanberton Gabriel de Souza	
Cássio Alves de Oliveira	
DOI 10.22533/at.ed.32019250623	

CAPÍTULO 24	275
ESTUDO COMPARATIVO DE MODELAGENS DE ENROLAMENTOS DE UM TRANSFORMADOR UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS PARA ANÁLISES DE ESFORÇOS ELETROME CÂNICOS	
Pedro Henrique Aquino Barra Arnaldo José Pereira Rosentino Junior Antônio Carlos Delaiba	
DOI 10.22533/at.ed.32019250624	
CAPÍTULO 25	287
PROCEDIMENTO PARA AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DO LAÇO DE HISTERESE MAGNÉTICA	
Vitor Hörbe Pereira Da Costa Antônio Flavio Licarião Nogueira Leonardo José Amador Salas Maldonado	
DOI 10.22533/at.ed.32019250625	
CAPÍTULO 26	294
SIMULAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO DE CAMPO E CORRENTE ELÉTRICA EM TECIDOS BIOLÓGICOS	
Guilherme Brasil Pintarelli Afrânio de Castro Antonio Jr. Raul Guedert Sandra Cossul Daniela Ota Hisayasu Suzuki	
DOI 10.22533/at.ed.32019250626	
CAPÍTULO 27	307
SISTEMA DE PRESENÇA UTILIZANDO IDENTIFICAÇÃO POR RADIOFREQUÊNCIA	
Giovani Formaggio Mateus Ricardo Barroso Leite	
DOI 10.22533/at.ed.32019250627	
CAPÍTULO 28	322
SISTEMAS DEFASADORES EM ALTA FREQUÊNCIA UTILIZANDO MICROFITA EM SUBSTRATO FR4	
Jobson De Araújo Nascimento José Moraes Gurgel Neto Alexsandro Aleixo Pereira da Silva Regina Maria de Lima Neta	
DOI 10.22533/at.ed.32019250628	
CAPÍTULO 29	333
ANÁLISES DA RUPTURA EM TRECHO DA BR-060 NO MUNICÍPIO DE ALEXÂNIA, GOIÁS, E CONDIÇÕES APÓS SEIS ANOS DA RECUPERAÇÃO	
Rideci Farias Tiago Matias Lino Haroldo da Silva Paranhos Itamar de Souza Bezerra Ranieri Araújo Farias Dias Alexsandra Maiberg Hausser	
DOI 10.22533/at.ed.32019250629	
SOBRE O ORGANIZADOR	346

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

Bruno Guimarães Delgado

CONSTRUCT-GEO, Faculdade de Engenharia da
Universidade do Porto
Porto – Portugal

António Viana da Fonseca

CONSTRUCT-GEO, Faculdade de Engenharia da
Universidade do Porto
Porto – Portugal

Eduardo Fortunato

Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Lisboa – Portugal

Daniela Raquel Ferreira Coelho

Faculdade de Engenharia da Universidade do
Porto
Porto – Portugal

RESUMO: Este artigo apresenta uma etapa de uma pesquisa mais abrangente que está em andamento na Universidade do Porto, no âmbito do grupo de pesquisa Construct-Geo, que visa avaliar os aspectos geomecânicos de materiais alternativos para uso como camada de lastro em vias férreas do tipo *heavy haul*. São apresentados resultados de ensaios triaxiais monotônicos e cíclicos conduzidos em corpos de prova de 150 mm de diâmetro por 300 mm de altura, em escala reduzida numa proporção de 1:2,5 em relação à granulometria de lastro padrão AREMA N. 24. Analisou-se um agregado de escória de aciaria, quimicamente

e ambientalmente, inerte comparativamente a um agregado de granito, relativamente à resistência e à deformabilidade. Os ensaios cíclicos foram conduzidos em dois escalões de carga de 500.000 ciclos, sendo cada escalão compatível com o carregamento imposto por vias do tipo *heavy haul* com, respectivamente, 32,5 toneladas/eixo e 40 toneladas/eixo. Os resultados mostraram que o lastro de escória de aciaria apresentou parâmetros de resistência superiores comparativamente ao lastro de granito e um melhor comportamento quanto à deformabilidade, expresso por maiores valores de módulo de resiliência, menores índices de quebra e degradação de partículas e uma maior tendência de estabilização das deformações plásticas, fenómeno conhecido como *shakedown* e que também foi investigado.

PALAVRAS-CHAVE: Lastro Ferroviário, Escória de Aciaria, Ensaio Triaxiais.

ABSTRACT: This paper presents a stage of a more embracing research, in progress at the University of Porto by Construct-Geo research group, to evaluate the geomechanical behaviour of alternative raw materials as ballast layer for heavy haul rail tracks. Are shown monotonic and cyclic triaxial tests results carried out on scaled ballast specimens with 150 mm diameter and 300 mm height in a ratio of 1:2.5 from the ballast standard AREMA N. 24. Was evaluated

an aggregate, chemically and environmentally inert, of steel slag in comparison with a granite aggregate regards to shear strength and deformability. The triaxial cyclic tests were conducted in two load steps of 500,000 cycles, each step being compatible with heavy haul loads of 32.5 tonnes/axle and 40 tonnes/axle, respectively. The results showed that the steel slag ballast presented has higher values of shear strength parameters in comparison with the granite ballast and better deformability behaviour, expressed by higher resilient modulus values, lower particle breakage and degradation and a faster tendency for plastic strains stabilization, phenomenon known as 'shakedown' and also investigated.

KEYWORDS: Railway Ballast, Steel Slag, Triaxial Tests.

1 | INTRODUÇÃO

As pressões ambientais têm imposto a adoção de novas abordagens no que tange ao uso dos recursos naturais. No século XXI, nomeadamente na área de engenharia civil, o uso racional dos recursos naturais impõem-se como um novo paradigma de concepção, projeto e construção. Este fato justifica a busca por materiais alternativos aos convencionalmente empregados na indústria ferroviária, como é o caso dos agregados naturais oriundos de rochas britadas.

Em Portugal, segundo Ferreira (2010), os resíduos que satisfaçam os requisitos relativos a geração de lixiviados para aterros inertes podem ser utilizados, conforme previsto no Decreto-Lei nº 183/2009 (Ferreira, 2010). Este decreto estipula valores limites de lixiviação obtidos em ensaios realizados de acordo com as normas Europeias EN 12457-2 (2002) ou EN 12457-4 (2002), dependendo da dimensão das partículas a ensaiar. Os agregados de escória obtidos em Portugal, após processamento pelas usinas, encontram-se hoje classificados como agregados inertes, tendo dado origem à denominação comercial "Agregado Siderúrgico Inerte para Construção (ASIC)".

Dessa forma, diversos estudos foram conduzidos visando o aproveitamento de materiais deste tipo para aplicações rodoviárias, seja como constituinte das camadas de base e sub-base ou como agregado para misturas asfálticas (Mathur et al., 1999; Rohde, 2002; Castelo Branco, 2004; Pacheco, 2017). Tais estudos avaliaram tanto as propriedades ambientais quanto as características mecânicas quando solicitados por níveis de tensão compatíveis com a aplicação analisada, e têm mostrado ser promissor o emprego do ASIC para as diversas finalidades propostas.

O emprego como material de lastro em vias férreas torna-se atrativo, principalmente em função da grande maioria das usinas siderúrgicas instalarem-se, por questões de competitividade, próximas às malhas ferroviárias. Porém, poucas pesquisas vêm sendo conduzidas no sentido de avaliar este material nas condições de carregamento e contorno da camada de lastro, sendo que os poucos estudos disponíveis concentram-se em avaliar o material sob o ponto de vista ambiental, sua resistividade elétrica ou à luz de parâmetros que possam ser correlacionados com o comportamento mecânico

do agregado, com destaque para parâmetros empíricos, como os obtidos dos ensaios Los Angeles e Micro-Deval, ou baseando-se em resultados de ensaios de compressão simples das partículas (Fernandes et al., 2006; Morata e Saborido, 2016; Kuo e Lin, 2017).

Neste momento, está em curso, no Laboratório de Geotecnia (LabGEO) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), um estudo para avaliar a aplicabilidade do ASIC como material de lastro para vias-férreas de carga, nomeadamente vias do tipo *heavy haul* com 32,5 t/eixo e 40 t/eixo. Para isso estão sendo realizados ensaios triaxiais com corpos de prova em escala reduzida na proporção de 1:2,5, visando comparar o material alternativo proposto (ASIC) com um material convencionalmente empregado na camada de lastro (agregado britado de granito), ambos na mesma granulometria, com parâmetros índice enquadrados dentro de valores admissíveis em Portugal (RF.IT.VIA.015, 2015) e na Europa (EN 13450, 2002), e em níveis de tensão compatíveis com os induzidos na camada de lastro pela passagem dos comboios.

Neste trabalho são apresentados alguns resultados já obtidos, tanto para carregamentos monotônicos quanto para carregamentos cíclicos. Os ensaios monotônicos objetivaram avaliar o potencial do material em proporcionar estabilidade para a via-férrea que, segundo Indraratna et al. (2011), tende a ser tão mais elevado quanto maior for o valor do seu ângulo de resistência ao cisalhamento (ϕ), e verificar a viabilidade de aplicação das tensões limite propostas para ciclagem nos ensaios triaxiais de carga repetida, de maneira a não ultrapassar a tensão de ruptura do material durante estes ensaios. Os ensaios de carga cíclica permitiram avaliar o comportamento resiliente e a evolução da deformação permanente dos materiais.

2 | PRINCÍPIOS FUNDAMENTAIS

2.1 Propriedades do Lastro Ferroviário

A algumas décadas, pesquisadores vêm realizando estudos em laboratório no sentido de compreender o comportamento mecânico de agregados com partículas de grandes dimensões, seja para lastro ferroviário, seja para enrocamentos (Lowe, 1964; Morgan, 1966; Raymond e Davies, 1978; Kolisoja et al., 1998; Varadarajan et al., 2003; Fortunato, 2005; Indraratna et al., 2011). Tais estudos concentram-se, em sua maioria, na avaliação das propriedades resilientes destes materiais sob carregamento triaxial cíclico.

No que se refere aos estudos de deformação permanente, têm sido empregadas três abordagens na previsão do nível de plastificação do material sob carregamento repetido: i) em função do estado de tensão cíclico aplicado (Morgan, 1966); ii) em função do número de ciclos de aplicação do carregamento repetido, N (Selig e Waters, 1994; Paute et al., 1996; Kolisoja et al., 1998); e iii) segundo a teoria do *shakedown*

(Werkmeister et al., 2001).

Pesquisadores diversos têm concordado que para o estudo das propriedades mecânicas do lastro sob carregamento repetido é fundamental situar o estado de tensão aplicado relativamente ao estado de tensão de ruptura do material sob carregamento monotônico, pois aquele deve situar-se suficientemente afastado deste último (Selig e Waters, 1994; Indraratna et al., 2011; Sevi e Ge, 2012). Alguns autores propõem que após a realização dos ensaios monotônicos, os possíveis estados de tensão cíclicos a serem aplicados sejam situados em relação à envoltória de ruptura do material (; Suiker, 2002; Sevi e Ge, 2012) segundo a razão de tensão cíclica (n), dada por:

$$n = q_{cic}/q_f \quad (1)$$

onde q_{cic} é a tensão desvio cíclica a ser aplicada nos ensaios de carga repetida e q_f é a tensão desvio de ruptura obtida dos ensaios triaxiais monotônicos, sendo:

$$q = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (2)$$

no qual σ_1 é a tensão principal maior (vertical) e σ_3 é a tensão principal menor, ou de confinamento, aplicada isotropicamente na amostra no caso de ensaios axissimétricos. Estas tensões podem ser monotônicas, estáticas ou cíclicas consoante o tipo de ensaio e conforme o protocolo utilizado (EN 13286-7, 2004).

2.2 Ensaios Triaxiais em Escala Reduzida

Objetivando a representatividade das amostras em ensaios triaxiais, pesquisadores diversos têm recomendado que o diâmetro máximo da partícula utilizada seja igual ou inferior a 1/6 do diâmetro do corpo de prova. Estando tal relação prevista, também, na norma norte-americana ASTM D5311 (2004) para solos, sendo que uma razão de até 1/5 tem, segundo Skoglund (2002), mostrado bons resultados. Bishop e Green (1965) recomendam que a relação entre a altura e o diâmetro da amostra (H/D) seja da ordem de 2, sendo tal recomendação adotada de maneira quase generalizada nos laboratórios de geotecnia. Tais restrições implicam na utilização de equipamentos triaxiais de grande porte (Suiker et al., 2005; Indraratna et al., 2011).

Visando viabilizar a realização de ensaios de materiais grosseiros a custos menores, Lowe (1964) propôs a realização de ensaios com o material em escala reduzida por meio da técnica de decalagem por graduação paralela, onde a granulometria do agregado poderia ser definida pela translação da curva granulométrica em escala real, e com isso se obter parâmetros de resistência e deformabilidade do material a partir de corpos de prova menores.

As técnicas de redução de escala visando avaliar as propriedades mecânicas de

geomateriais não são consensuais entre os pesquisadores. Alguns autores verificaram o aumento de resistência com a diminuição da dimensão máxima das partículas (Marsal, 1965; Fumagalli, 1969; Marachi et al., 1972; Donaghe e Cohen, 1978); outros verificaram o contrário (Dunn e Bora, 1972; Shenton, 1978); e outros, ainda, concluíram que essa variação não era relevante (Vallerga et al., 1956; Holtz e Gibbs, 1956; Selig e Roner, 1987).

Relativamente a parâmetros de deformabilidade, Sevi e Ge (2012) conduziram estudos que apontaram para a possibilidade de realização de ensaios em escala reduzida pela técnica de decalagem por graduação paralela, desde que as características individuais das partículas (principalmente a forma dos grãos) sejam semelhantes, no sentido de garantir que o material se encontre no mesmo nível de compactidade (densidade relativa) seja na escala real, seja na escala reduzida.

Estudos conduzidos por Ferreira (2010) mostraram que pelo menos um aspecto importante na caracterização mecânica de agregados granulares foi pouco afetado pelo fator escala, que foi, nomeadamente, o parâmetro de estado crítico, dado pelo coeficiente angular da linha de estados críticos do material no plano p' - q (Roscoe et al., 1958; Roscoe et al., 1963) onde p' representa a tensão efetiva média aplicada na amostra, para um estado de tensão axissimétrico, sendo dada por:

$$p' = (\sigma'_1 + 2\sigma'_3) / 3 \quad (3)$$

Independente, de se buscar a obtenção de parâmetros de projeto por meio de ensaios triaxiais em escala reduzida, entende-se que tal expediente pode ser uma boa alternativa para uma análise comparada entre os materiais, visto que em agregados de granulometria essencialmente grosseira os possíveis efeitos de redução de escala devem se verificar de maneira similar em ambos os materiais, sendo os ensaios em escala reduzida um bom indicativo do comportamento do material na escala real (Aingaran et al., 2018).

3 | MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais Analisados

A Figura 1 mostra os dois materiais ensaiados (ASIC e agregado de granito), já devidamente peneirados e homogeneizados, com a mesma curva granulométrica, em escala reduzida na proporção de 1:2,5, obtidas por decalagem paralela de uma curva teórica que se insere nos limites granulométricos da curva de lastro padrão AREMA N. 24 (Figura 2).

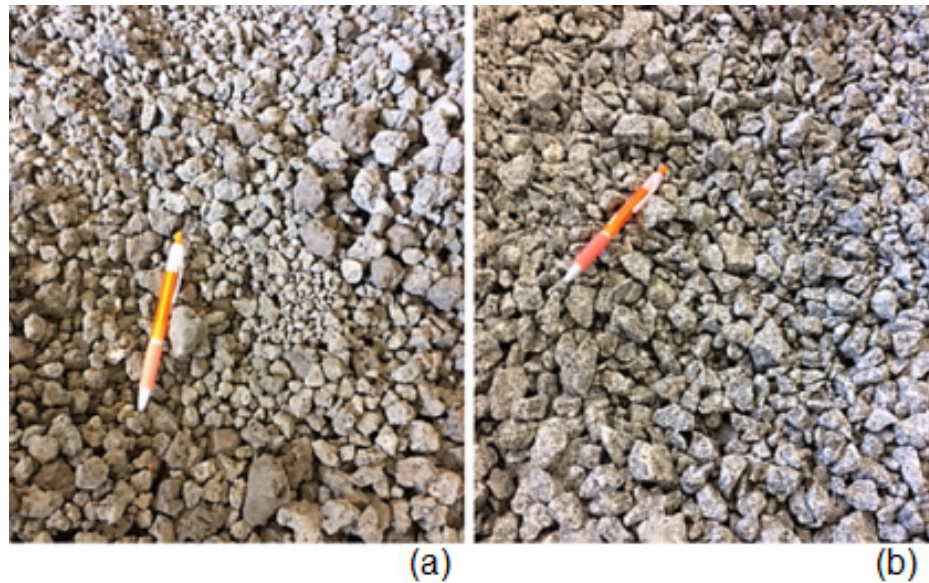


Figura 1. Detalhe do lastro em escala reduzida (1:2,5): (a) ASIC e (b) agregado de granito.

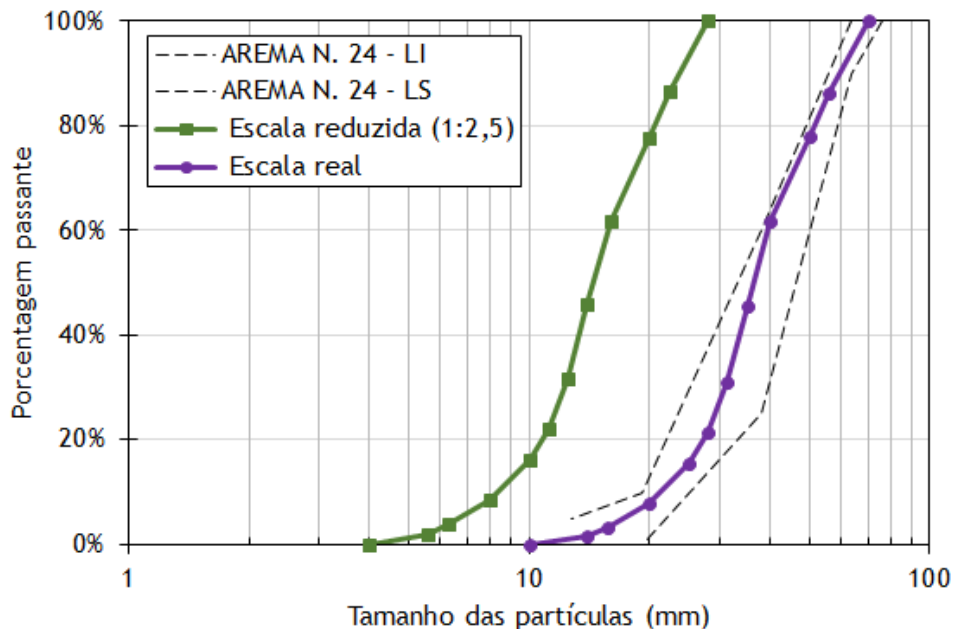


Figura 2. Curva granulométrica do lastro em escala reduzida obtida por decalagem por graduação paralela.

O coeficiente de uniformidade (C_u) e o coeficiente de curvatura (C_c) da curva utilizada foram de, respectivamente, 1,94 e 1,02, os quais são típicos de materiais granulares mal graduados, mas, ainda assim, mais bem graduados do que os materiais de lastro normalmente utilizados na Europa, cujas curvas são apresentadas na norma EN 13450 (2002). Os valores da densidade real dos grãos para ambos os materiais, ASIC e agregado de granito, obtidos em laboratório foram, respectivamente, de 3,2 e 2,7.

Com relação aos parâmetros índice dos materiais, ambos, ASIC e agregado de granito, conforme já mencionado, encontram-se enquadrados nos parâmetros índice estipulados para material de lastro em Portugal e na Europa, segundo a Instrução Técnica RF.IT.VIA.015 (2015) e a norma EN 13450 (2002), respectivamente.

3.2 Procedimentos Laboratoriais

Na compactação dos corpos de prova encontraram-se dificuldades relacionadas com o emprego de métodos de impacto como, por exemplo, o método Proctor (EN 13286-2, 2010). Tais problemas estão relacionados com a moldagem dos corpos de prova (visto tratar-se de materiais completamente desprovidos de coesão e com baixo imbricamento interparticular) e com a ruptura das membranas por puncionamento. Assim, optou-se por adotar um procedimento no qual os agregados eram colocados “soltos” num molde de PVC, especialmente desenvolvido no LabGeo da FEUP, já com a membrana posicionada. Este molde era removido após aplicação de uma tensão de sucção (70 kPa) para manutenção da geometria do corpo de prova, o que é possível em função de todos os corpos de prova serem moldados com total ausência de umidade. Em seguida o corpo de prova era condicionado na câmara triaxial, tendo sido adotado um procedimento semelhante ao descrito na norma Europeia EN 13286-7 (2004) para ensaios de determinação do módulo de resiliência, que prevê o condicionamento prévio do corpo de prova em 20.000 ciclos de aplicação da tensão desvio cíclica com o valor de 340 kPa (nível de tensão elevado, de acordo com a referida norma), com uma tensão de confinamento de 70 kPa. Nos casos testados observou-se que após 10.000 ciclos de carga o material já apresentava um nível de compacidade satisfatório, pelo que este foi o número de ciclos definido para o fim do condicionamento (Delgado et al., 2017). Na Figura 3 é apresentada a sequência de preparação dos corpos de prova.

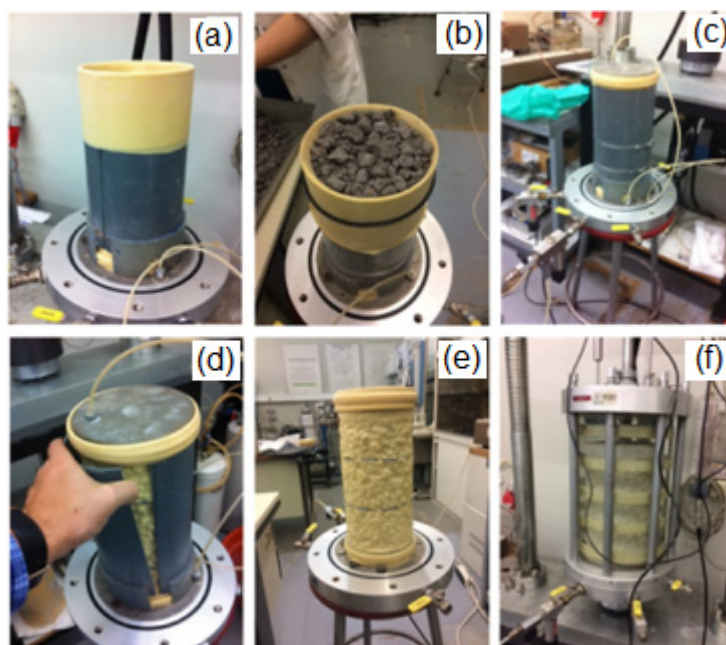


Figura 3. Sequência para moldagem de corpos de prova de lastro em escala reduzida: (a) colocação do molde com a membrana na célula triaxial; (b) colocação manual do material no molde devidamente fixado por meio de duas braçadeiras metálicas; (c) vedação do molde com a colocação do *top-cap* e aplicação do vácuo; (d) remoção do molde após estabilização da sucção imposta pelo vácuo; (e) aspecto do corpo de prova moldado com 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura; e (f) colocação do corpo de prova na câmara triaxial para início do condicionamento/compactação.

O procedimento descrito evidenciou boa repetibilidade e garantiu corpos de prova com índices de vazios iniciais situados entre 0,70 e 0,80, valores tipicamente relatados como representativos de uma via-férrea recém entregue para o tráfego dos comboios (Suiker et al., 2005; Indraratna et al., 2011).

Após o condicionamento, os corpos de prova eram removidos da câmara triaxial para medição do diâmetro e consequente determinação do índice de vazios, bem como para instalação de transdutores de deslocamento do tipo LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*) diretamente nos corpos de prova, tendo sido utilizados 2 LVDTs, posicionados diametralmente opostos um em relação ao outro, em todos os ensaios.

Relativamente aos ensaios monotônicos foram realizados 3 ensaios do tipo CID (Consolidado Isotropicamente Drenado) para cada material, variando a tensão de confinamento em cada ensaio. Para os dois primeiros ensaios monotônicos em cada material, foram empregadas tensões de consolidação e confinamento ligeiramente inferiores (65 kPa) e superiores (85 kPa) ao confinamento que se pretendia impor nos ensaios cíclicos (70 kPa). O terceiro ensaio foi realizado com tensão de confinamento de 20 kPa com o intuito de melhor caracterizar os parâmetros de resistência, principalmente em níveis de tensão mais baixos, onde as envoltórias de resistência tendem a apresentar uma pronunciada não linearidade.

Em todos os ensaios monotônicos a velocidade de aplicação do carregamento axial foi de 0,028 mm/min, e os dados adquiridos automaticamente a cada 15 segundos, o que foi suficiente para uma boa definição das curvas tensão-deformação, incluindo a aquisição dos valores de pico na ruptura.

Com relação aos ensaios cíclicos foi realizado um ensaio em cada material, com dois escalões de carga consecutivos (500.000 ciclos por escalão) no mesmo corpo-de-prova, sendo o primeiro e o segundo escalões de carga equivalentes ao carregamento imposto na camada de lastro por vias de carga do tipo *heavy haul* com 32,5 t/eixo e com 40 t/eixo, cujas tensões desvio cíclicas, estimadas por meio de métodos analíticos e majoradas em 25%, foram de 280 kPa para o primeiro e de 350 kPa para o segundo escalões, impondo razões de tensão (σ_1/σ_3) de, respectivamente, 5 e 6.

Os ensaios cíclicos foram conduzidos com frequência de 2 Hz (considerada representativa para vias com velocidade máxima de circulação de 100 km/h) por meio de um carregamento senoidal onde a tensão mínima era de 10 kPa (EN 13286-7, 2004). A taxa de aquisição de dados foi de 20 pontos por ciclo, tendo sido satisfatória para uma boa definição das curvas.

4 | RESULTADOS OBTIDOS

4.1 Triaxiais Monotônicos

Os parâmetros de resistência obtidos, bem como as condições de cada um dos ensaios monotônicos estão expressos na tabela 1.

Observa-se que ambos os materiais apresentaram um comportamento dilatante na ruptura, ocorrendo, no entanto, uma tendência de convergência da linha de estados críticos e da envoltória de ruptura de pico na medida em que se aumenta a tensão de confinamento, implicando que a partir do ponto de convergência destas curvas os materiais passam a apresentar um comportamento contrátil. Indraratna et al. (2011) reportam que essa mudança de comportamento (dilatante para contrátil), sob os níveis de carregamento vertical correntes numa viafêrrea, em geral, ocorre a partir de tensões de confinamento de 100 kPa, o que é coerente com os resultados obtidos neste estudo.

Conforme esperado, a resistência é fortemente influenciada pela tensão de confinamento. Pôde observar-se que nos ensaios realizados com um baixo nível de tensão de confinamento (20 kPa), ambos os materiais apresentaram um padrão de comportamento quase idêntico. Na medida em que a tensão de confinamento era incrementada, o ASIC apresentava um desempenho superior, comparativamente com o do agregado de granito, tanto no pico (ruptura) quanto no estado crítico. Este comportamento superior do ASIC é, provavelmente, influenciado pela maior rugosidade superficial das partículas. Ressalta-se que, embora o agregado de granito tenha índices de vazios iniciais um pouco mais baixos, este aspecto parece não ser suficiente para sobrepujar o maior atrito interparticular mobilizado no ASIC consoante o aumento do nível de confinamento.

Material	Ensaio	M	\varnothing'_{cv} ($^{\circ}$)	\varnothing'_p ($^{\circ}$)	Ψ ($^{\circ}$)	e_o	q_f (kPa)	σ_3 (kPa)
ASIC	TM1-PE_A			51,3	3,2	0,78	405	65
	TM2-PE_A	1,98	48,1	48,8	0,7	0,79	457	85
	TM3-PE_A			58,5	10,4	0,79	150	20
Agregado de granito	TM1-PE_G			48,8	2,1	0,75	355	65
	TM2-PE_G	1,91	46,7	46,9	0,2	0,73	413	85
	TM3-PE_G			59,2	12,5	0,74	153	20

Tabela 1. Condições experimentais e parâmetros mecânicos obtidos dos ensaios triaxiais monotônicos.

$M = p'/q$ – Parâmetro de estado crítico / \varnothing'_{cv} – Ângulo de atrito no estado crítico / \varnothing'_p – Ângulo de resistência ao cisalhamento / Ψ – Ângulo de dilatância / e_o – Índice de vazios inicial / q_f – Tensão desvio de pico (ruptura) / σ_3 – Tensão de confinamento.

Os ensaios monotônicos possibilitaram, ainda, avaliar a magnitude da tensão desvio cíclica, a ser aplicada nos ensaios de carga repetida, em relação a tensão

desvio de ruptura (tabela 2), evidenciando que ambas as trajetórias de tensão cíclicas que foram empregadas nos ensaios de carga repetida situam-se abaixo do limite de ruptura do material, porém em níveis de tensão bastante elevados.

Material	Ensaio	q_{cici} (kPa)	n
ASIC	Escalão I	280	0,59
	Escalão II	350	0,68
Agregado de granito	Escalão I	280	0,74
	Escalão II	350	0,85

Tabela 2. Razão de tensão cíclica (r) para os ensaios de carga repetida.

4.2 Triaxiais Cíclicos

Os resultados dos ensaios triaxiais cíclicos sobre ambos os materiais são apresentados no gráfico da Figura 4, na qual, por simplificação, somente os valores associados a alguns dos ciclos são representados, nomeadamente (EN 13286-7, 2004): 1 a 20; 50; 100; 200; 400; 1.000; 2.500; 5.000; 7.500; 10.000; 12.500; 15.000; 20.000; 30.000; 50.000; 70.000; 100.000; 150.000; 200.000; 300.000; 400.000; 500.000.

Os índices de vazios iniciais dos corpos de prova (e_0), após o condicionamento, foram de 0,74 para o ASIC e de 0,70 para o agregado de granito.

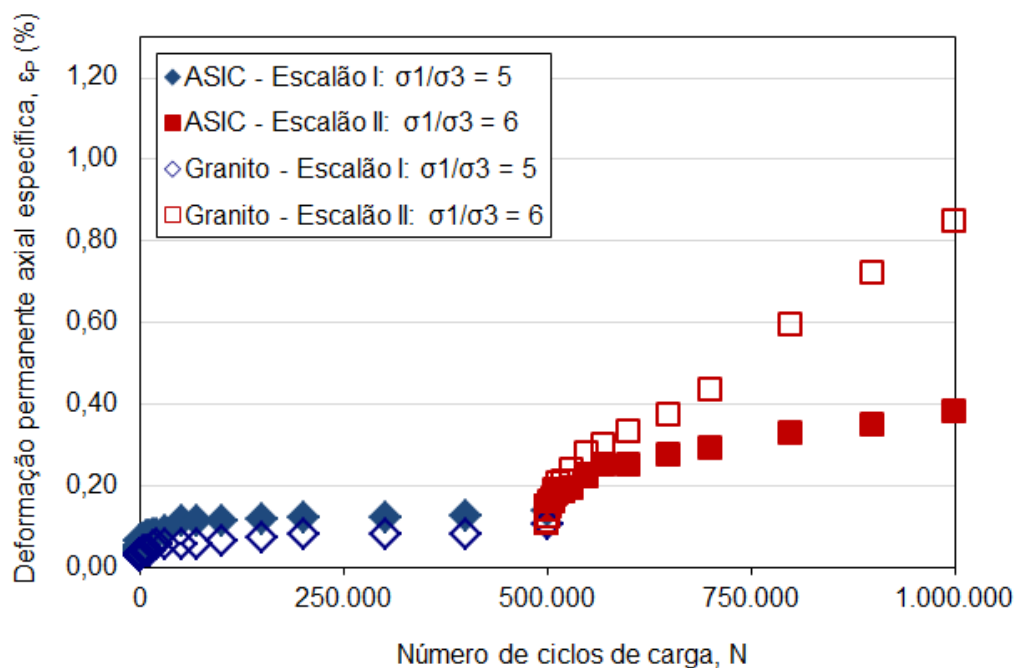


Figura 4. Curvas de deformação permanente específica (%), para o ASIC e para o agregado de granito, em função do número de ciclos de aplicação da carga repetida (N) para os dois escalões de carga ensaiados.

Observa-se que para o primeiro escalão de carga (Escalão I) a performance dos materiais foi bastante similar, sendo que o ASIC apresentou uma maior tendência de

estabilização das deformações permanentes, conforme critério expresso pelo modelo de Dawson e Wellner, no qual a deformação permanente é considerada estabilizada quando a taxa de acréscimo da deformação permanente a cada ciclo de aplicação de carga é da ordem de grandeza de 10^7 mm/ciclo de carga, sendo tal aspecto indicativo da ocorrência do fenômeno conhecido como *shakedown* (Dawson e Wellner, 1999 *apud* Werkmeister et al., 2001).

Para o segundo escalão de carga (Escalão II) observa-se que 500.000 ciclos não foram suficientes para conduzir nenhum dos materiais a estabilização das deformações permanentes. Ainda assim, o ASIC apresentou uma maior tendência de estabilização, que deve ser confirmada com ensaios futuros com um maior número de ciclos de carga. A Figura 5 apresenta as curvas de incremento de deformação permanente consoante o modelo proposto por Dawson e Wellner.

Foi analisada ainda a evolução do módulo de resiliência (MR) ao longo dos ciclos de carga, sendo que o ASIC, além de apresentar valores superiores de MR para ambos os escalões de carga, manifestou por ocasião da aplicação do carregamento mais gravoso (Escalão II) uma tendência de maior estabilidade do módulo ao longo dos ciclos de carga (Figura 6).

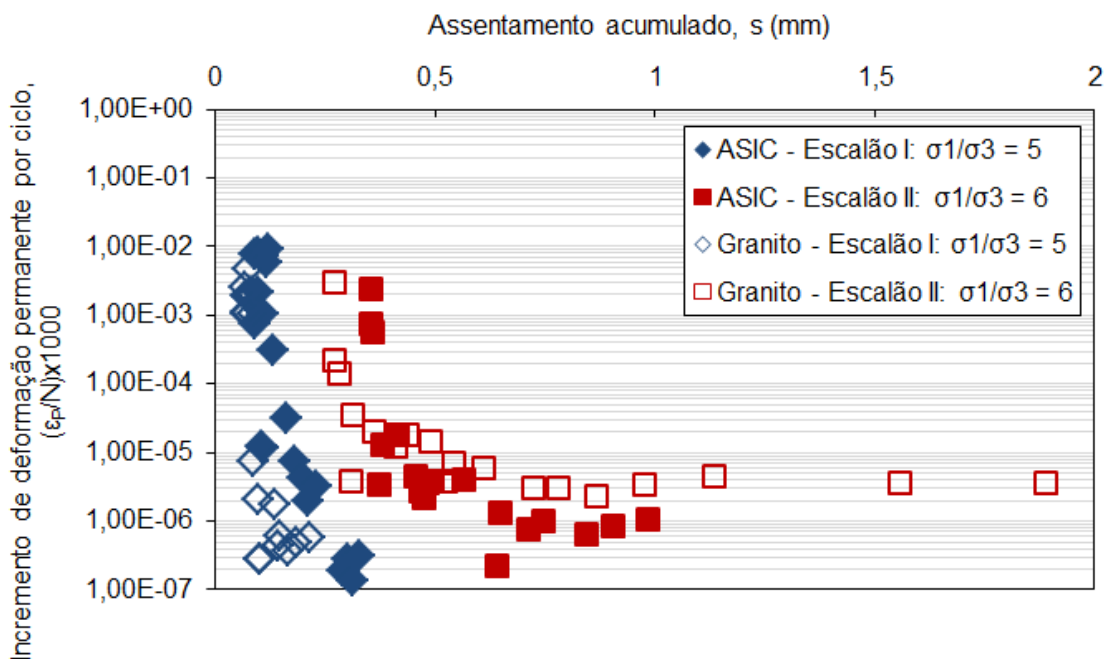


Figura 5. Pesquisa da ocorrência de *shakedown*, para o ASIC e para o agregado de granito segundo modelo de Dawson e Wellner.

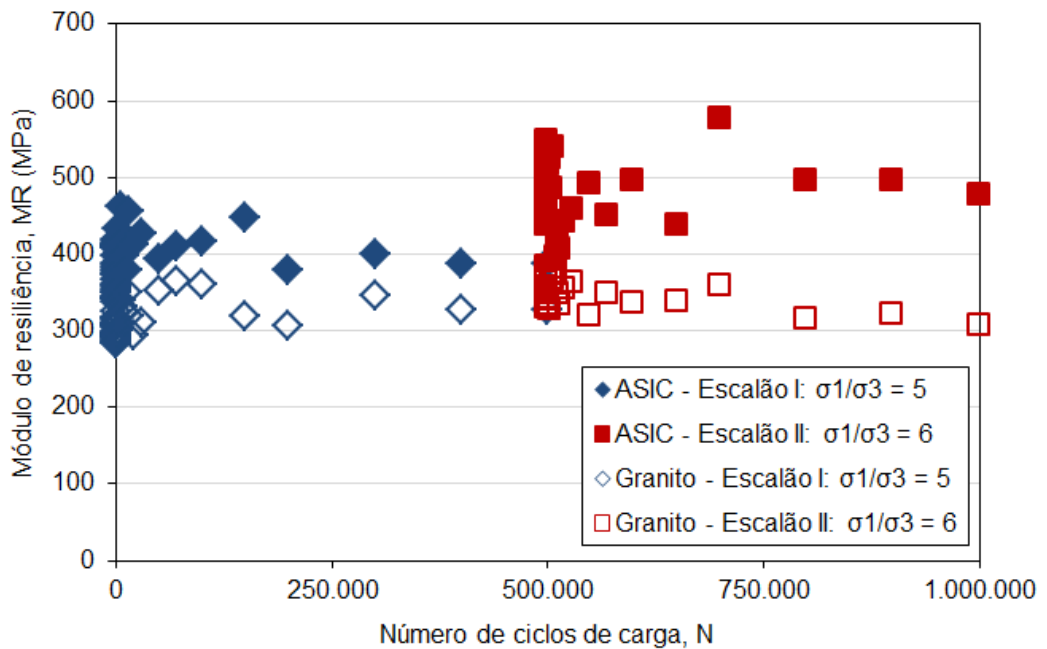


Figura 6. Módulo de resiliência ao longo dos ensaios.

Essa diferença verificada no comportamento plástico, e principalmente no elástico, deve-se a uma ligeira tendência do agregado de granito apresentar uma maior degradação devido a quebra e desgaste superficial dos grãos, provavelmente condicionado pelo regime de ciclagem mais próximo da ruptura neste material. A ocorrência de maior quebra de partículas no agregado de granito foi confirmada pela medição da alteração das curvas granulométricas dos materiais após os ensaios cíclicos, tendo sido utilizado para tal o índice de quebra, (Marsal, 1967). O índice obtido para o ASIC foi de 6,47% e para o agregado de granito foi de 7,39%.

A Figura 7 apresenta a degradação granulométrica para ambos os materiais analisados, indicando as perdas e ganhos de massa por peneira utilizada. No eixo das abcissas são plotadas as aberturas das peneiras e no eixo das ordenadas plotam-se as diferenças entre a massa retida em cada uma das peneiras, ΔW_k , antes e após os ensaios cíclicos (em %).

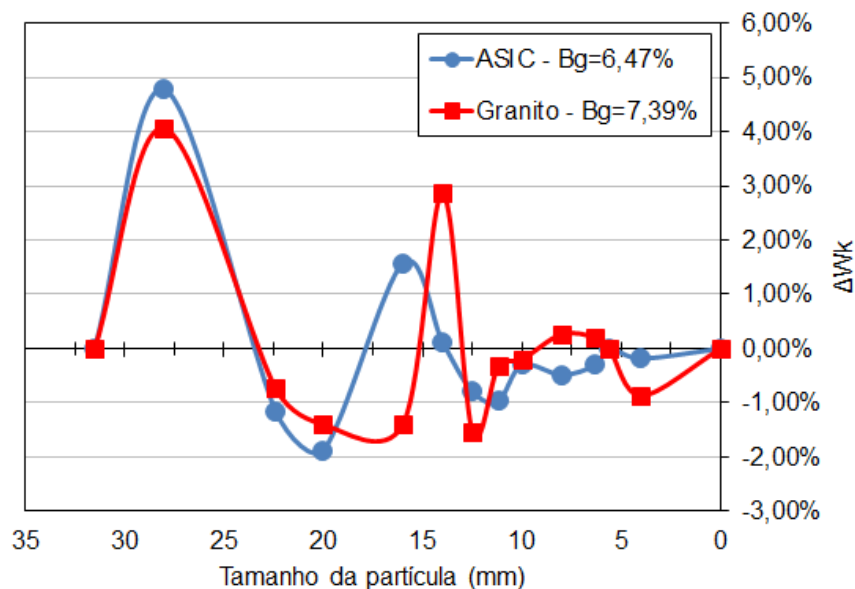


Figura 7. Alteração da curva granulométrica do lastro em escala reduzida (B_g) para ambos os materiais.

Pode observar-se que a maior quebra se deu na peneira de maior abertura (#28mm), o que é coerente, visto que grãos maiores tendem a apresentar menor resistência à fragmentação (Lambe e Whitman, 1969). No entanto, a maior diferença entre a curva granulométrica do ASIC e do agregado de granito se deu nos grãos intermediários (#14mm).

5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos estudos desenvolvidos até o momento, percebe-se que pode ser promissor o emprego da escória de aciaria na camada de lastro, o que pode vir a ser, para além da mais valia ambiental, um atrativo econômico às operadoras ferroviárias. Tal possibilidade de aproveitamento requer ainda estudos complementares, seja através de ensaios laboratoriais, análises numéricas, ou principalmente, pela observação de trechos experimentais instrumentados.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro, aos colaboradores do LabGEO da FEUP, pelo seu continuado apoio, e à Siderurgia Nacional da Maia pela disponibilização do ASIC.

REFERÊNCIAS

Aingaran, S.; Le Pen, L.; Zervos, A.; Powrie, W. (2018). Modelling the effects of trafficking and tamping on scaled railway ballast in triaxial tests. *Transportation Geotechnics*, 15(1), pp. 84-90.

- ASTM D5311 (2004). Standard test method for load cyclic triaxial strength of soil. *American Society for Testing Materials*, USA.
- Bishop, A.W.; Green, G.E. (1965). The influence of end restraint on the compression strength of a cohesionless soil. *Géotechnique*, Vol. 15, pp. 243-266.
- Castelo Branco, V.T.F. (2004). *Caracterização de misturas com o uso de escória de aciaria como agregado*. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.
- Delgado, B.G.; Viana da Fonseca, A.; Fortunato, E.; Paixão, A.; Coelho, D.R.F. (2017). A proposal for molding of reduced scale ballast samples for repeated load triaxial tests. *Proc. of 3th Symposium International GEORAIL*, Champs Sur Marne, France.
- Donaghe, R.; Cohen, M. (1978). Strength and deformation properties of rockfill. *U.S. Army Engineer W.E.S., Technical report S-78-1*, Vicksburg, USA.
- Dunn, S.; Bora, P.K. (1972). Shear strength of untreated road base aggregates measured by variable lateral pressure triaxial cell. *Journal of Mechanics*, Vol. 7, No. 2, pp. 131-142.
- EN 12457-2 (2002). Characterisation of waste – Leaching – Compliance test for leaching of granular waste materials and sludges: One stage batch test at liquid to solid ratio of 10l/kg for materials with particle size below 4mm (without or with size reduction). *European Committee for Standardization*: Brussels, Belgium.
- EN 12457-4 (2002). Characterisation of waste – Leaching – Compliance test for leaching of granular waste materials and sludges: One stage batch test at liquid to solid ratio of 10l/kg for materials with particle size below 10mm (without or with size reduction). *European Committee for Standardization*: Brussels, Belgium.
- EN 13286-2 (2010). Unbound and hydraulically bound mixtures – Part 2: test methods for laboratory reference density and water content - Proctor compaction. *European Committee for Standardization*: Brussels, Belgium.
- EN 13286-7 (2004). Unbound and hydraulically bound mixtures – Part 7: cyclic load triaxial test for unbound mixtures. *European Committee for Standardization*: Brussels, Belgium.
- EN 13450 (2002). Aggregates for railway ballast. *European Committee for Standardization*: Brussels, Belgium.
- Fernandes, G.; Gomes, R.C.; Sousa, G.M. Palmeira, E.M. (2006). Caracterização de escória de aciaria utilizada como lastro de ferrovia de tráfego pesado. *XIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*, Curitiba, Brasil.
- Ferreira, S.M.R. (2010). *Comportamento mecânico e ambiental de materiais granulares. Aplicação às escórias de aciaria nacionais*. Tese de Doutorado, Universidade do Minho, Escola de Engenharia, Guimarães, Portugal.
- Fortunato, E.M.C. (2005). *Renovação de plataformas ferroviárias: Estudos relativos à capacidade de carga*. Tese de Doutorado, LNEC/Universidade do Porto, Lisboa, Portugal.
- Fumagalli, E. (1969). Tests on cohesionless materials for rockfill dams. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, No. SM1, pp. 313-330.
- Holtz, W.G.; Gibbs, H.J. (1956). Triaxial shear tests on previously gravelly soils. *Journal of soil mechanics and foundation engineering division*, ASCE, Vol. 82, No. SM 1, pp.1-22.

- Indraratna, B.; Salim, W.; Rujikiatkamjorn, C. (2011). *Advanced rail geotechnology – ballasted track*. Taylor & Francis Group, London, England.
- Kolisoja, A.K.; Brown, S.F.; Pell, P.S. (1998). Large scale dynamic triaxial tests. *III. Delprosjektrapport20*, Arbeidsfelleskapet KPG, Oslo, Norway.
- Kuo, C.; Lin, C. (2017). Engineering performance of steel slag as railway ballast. *Proc. Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields*, pp. 1859-1864.
- Lambe, T.W.; Whitman, R.V. (1969). *Soil mechanics*. John Willey & Sons: New York, USA.
- Lowe, J. (1964). Shear strength of coarse embankment dam materials. *Proc. 8th Congress on Large Dams, Transactions*, Vol. III, International Commission on Large Dams, Paris, pp. 745–761.
- Marachi, N.D.; Chan, C.K.; Seed, H.B. (1972). Evaluation of properties of rockfill materials. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering Division*, ASCE, Vol. 98, No. SM 1, pp. 95-113.
- Marsal, R.J. (1965). Soil properties-shear strength and consolidation. *Proceedings of 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 3, pp. 310-316.
- Marsal, R.J. (1967). Large scale testing of rockfill materials. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Div.:* ASCE, Vol. 93, No. SM2, p. 23-47.
- Mathur, S.; Soni, S.K.; Murty, A. (1999). Utilization of industrial wastes in low-volume roads. *Transportation Research Record*, Washington D.C. N°. 1652, pp. 246-256
- Morata, M.; Saborido, C. (2016). Slag aggregates with enhanced performance for railway track bed layers. *Proceedings of the Third International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance*, pp. 1-17.
- Morgan, J.R. (1966). The response of granular materials to repeated loading. 3rd Conf. *Proc., of ARRB*, ARRB, Victoria, Australia, pp. 1178–1192.
- Pacheco, J.S. (2017). *Estudo sobre o uso da escória de aciaria de forno elétrico como agregado em misturas asfálticas*. Monografia de Conclusão de Curso. Centro Universitário Univates, Lajeado, Brasil.
- Paute, J.L.; Hornych, P.; Benaden, J.P. (1996). Repeated load triaxial testing of granular materials in the French network of laboratoires des ponts et chaussees. *Proc., Flexible Pavements European Symp.* Euroflex 1993, Balkema, Rotterdam, Netherlands, pp. 53–64.
- Raymond, G.P.; Davies, J.R. (1978). Triaxial testing on dolomite railroad ballast. *J. Geotech. Eng. Div.*, 104(6), pp. 737–751.
- RF.IT.VIA.015 (2015). Especificações técnicas para fornecimento de balastro novo. REFER – Rede Ferroviária Nacional: Portugal.
- Rohde, L. (2002). *Escória de aciaria eléctrica em camadas granulares de pavimentos – Estudo laboratorial*. Tese de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.
- Roscoe, K.H.; Schofield, A.N.; Wroth, C.P. (1958). On yielding of soils. *Géotechnique*, Vol. 8, N. 1.
- Roscoe, K.H.; Schofield, A.N.; Thuarairajah, A. (1963). Yielding of clays in states wetter than critical. *Géotechnique*, Vol. 13, N. 3.
- Selig, E.T.; Roner, C.J. (1987). Effects of particle characteristics on behavior of granular material. *Transportation Research Record 1131*, Transportation Research Board, National Research Council,

Washington, D.C., USA, pp. 1-6.

Selig, E.T.; Waters, J.M. (1994). *Track geotechnology and substructure management*. Thomas Telford Publishers, London.

Sevi, A.; Ge, L. (2012). Cyclic Behaviors of Railroad Ballast within the Parallel Gradation Scaling Framework. *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, 24, pp. 797–804.

Shenton, M.J. (1978). Deformation of railroad ballast under repeated load conditions. *Railroad Track Mechanics and Technology*, New York, Pergamon Press.

Skoglund, K.A. (2002). *A study of some factors in mechanistic railway track design*. PhD Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Norway.

Suiker, A.S.J. (2002). *The mechanical behaviour of ballasted railway tracks*. Ph.D. Thesis. Delft University of Technology, Netherlands.

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. 6.

Vallerga, B.A.; Seed, H.B.; Monismith, C.L.; Cooper, R.S. (1956). Effect of shape, size and surface roughness of aggregate particles on the strength of granular materials. *ASTM STP 212*, pp.63-76.

Varadarajan, A.; Sharma, K.G.; Venkatachalam, K.; Gupta, A.K. (2003). Testing and modeling of two rock fill materials. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 129(3), pp. 206–218.

Werkmeister, S.; Dawson, A.R.; Wellner, F. (2001). Permanent deformation behavior of granular materials and the shakedown concept. *Transportation Research Board, 80th Annual Meeting*, Transportation Research Board, Washington, DC.

Agência Brasileira do ISBN
ISBN 978-85-7247-432-0

