

Análise da influência da umidade nos ensaios de perda de massa por abrasão e por impacto em um agregado siderúrgico para utilização em lastro ferroviário

Analysis on the influence of moisture in the tests of mass loss by abrasion and by impact on steel slag aggregate for use in railway ballast

DOI:10.34117/bjdv8n7-196

Recebimento dos originais: 23/05/2022

Aceitação para publicação: 30/06/2022

Maelckson Bruno Barros Gomes

Mestrando em Engenharia de Transportes pelo Instituto Militar de Engenharia (IME)

Instituição: Instituto Militar de Engenharia (IME)

Endereço: Praça Gen. Tibúrcio, 80, Urca, Rio de Janeiro - RJ

E-mail: bruno.gomes@ime.eb.br

Antônio Carlos Rodrigues Guimarães

Professor Associado do Departamento de Engenharia de Fortificação e Construção pelo Instituto Militar de Engenharia (IME)

Instituição: Instituto Militar de Engenharia (IME)

Endereço: Praça Gen. Tibúrcio, 80, Urca, Rio de Janeiro - RJ

E-mail: guimaraes@ime.eb.br

Filipe Almeida Corrêa do Nascimento

Professor Associado do Departamento de Engenharia de Fortificação e Construção pelo Instituto Militar de Engenharia (IME)

Instituição: Instituto Militar de Engenharia (IME)

Endereço: Praça Gen. Tibúrcio, 80, Urca, Rio de Janeiro - RJ

E-mail: filipe.nascimento@ime.eb.br

RESUMO

Os agregados siderúrgicos são subprodutos resultantes do processo de fabricação do aço, para as quais têm-se demonstrado que, após adequado procedimento de estabilização química e ambiental, podem constituir uma excelente alternativa aos agregados naturais. Esse artigo buscou caracterizar a escória de aciaria visando aplicação em lastro ferroviário, segundo as normas brasileira e americana. Normalmente os ensaios, por norma, são conduzidos com o agregado na condição seca. Por outro lado, é improvável que as partículas que compõem a camada de lastro estejam durante todo o seu ciclo de vida nessas condições. Em situações reais de uma via permanente, os agregados podem estar secos ou úmidos. Sendo assim, o objetivo desse artigo é avaliar a influência da umidade na resistência ao choque e na perda de massa por abrasão de um agregado siderúrgico, em específico a escória de aciaria. Os ensaios conduzidos e a análise estatística realizada, possibilitaram concluir que a escória não mostrou sensibilidade a saturação das partículas em relação à produção de finos nos ensaios de impacto e abrasão.

Palavras-chave: agregado siderúrgico, lastro, influência da umidade.

ABSTRACT

Aggregate steel (steel slag) are by-products resulting from the steel manufacturing process, material which has been shown that, after adequate chemical and environmental stabilization procedures, they can be an excellent alternative to natural aggregates. This article sought to characterize the steel slag for application in railway ballast, according to Brazilian and American standards. As a rule, the tests are carried out with the aggregate in the dry condition. However, it is unlikely that the particles that make up the ballast layer are in these conditions during their entire life cycle. In real situations of a permanent way, the aggregates can be dry or humid. Therefore, this article aims to evaluate the influence of moisture on the shock resistance and loss of mass by abrasion of a steel aggregate, specifically steel furnace slag. The tests carried out and the statistical analysis performed, made it possible to conclude that the slag did not show sensitivity to particle saturation in relation to the production of fines in the impact and abrasion tests.

Keywords: steel slag aggregate, ballast, influence of humidity.

1 INTRODUÇÃO

A malha ferroviária é um elemento importante do sistema de transportes de um país e desempenha um papel vital em sua economia. É responsável, por exemplo, pelo transporte de cargas e mercadorias a granel entre as principais cidades produtoras, aos portos e indústrias. Além disso, pode transportar passageiros, principalmente nas áreas urbanas. Vultuosos investimentos são realizados ano após ano para a construção e manutenção de ferrovias, sobretudo em países com dimensões territoriais extensas, como Estados Unidos (EUA), Canadá, China, Austrália, Rússia, Brasil, etc. O uso eficiente e otimizado dos recursos empregados é uma tarefa desafiadora que exige tecnologias inovadoras na engenharia ferroviária (SELIG e WATERS, 1994; INDRARATNA e SALIM, 2005).

Nos últimos anos um dos principais produtos que vem sendo estudado visando reaproveitamento são as escórias de aciaria, particularmente em obras geotécnicas e em infraestruturas de transportes. As escórias de aciaria são subprodutos resultantes do processo de fabricação do aço, para as quais tem-se demonstrado que, após adequado processamento, estabilização química e ambiental, podem constituir uma excelente alternativa aos agregados naturais. Ainda mais em locais onde a origem da escória está próxima ao ponto de aplicação para construção do pavimento. (SOFILIC, SOFILIC E BRNARDIC, 2012; DELGADO, et al., 2019; GUIMARÃES, ET AL., 2021). A sua utilização pode trazer vantagens econômicas e ambientais considerando a possibilidade de reaproveitar por volta de 400 milhões de toneladas de escórias de ferro e de aço produzidas anualmente em todo o mundo (WORLDSTEEL, 2021).

Diversos órgãos, associações e instituições nos diversos países e/ou continentes publicam normas técnicas voltadas para orientar a utilização de materiais para o emprego na camada de lastro. Observa-se que as normas técnicas voltadas para lastro ferroviário possuem diferenças quando comparadas entre si. Cada uma com sua particularidade, considerando os materiais pétreos disponíveis em seus países, a carga por eixo e o clima. A título de comparação, a norma brasileira para lastro ferroviário, a ABNT NBR 5564 de 2011, limitava-se a trazer os ensaios a serem realizados com um conjunto de partículas, porém sem citar a litologia. Já a mesma norma, republicada em outubro de 2021, já traz os limites a serem observados a depender da litologia, contudo, não cita os agregados siderúrgicos, que podem ser visualizados na norma americana, por exemplo.

Em relação à determinação da resistência ao impacto e à abrasão, as normas trazem alguns ensaios tradicionais, como o teste de resistência ao desgaste com o equipamento Micro-Deval e com o equipamento Los Angeles e a resistência ao choque com o aparelho Treton (estes dois últimos bastante difundidos no Brasil). Normalmente esses ensaios são conduzidos com o agregado na condição seca.

Por outro lado, é improvável que as partículas que compõem a camada de lastro estejam durante todo o seu ciclo de vida na condição seca. Em situações reais de uma via permanente em serviço, os agregados podem estar secos ou úmidos, diferente da rotina estabelecida para realização dos ensaios. Nãlsund (2014), por exemplo, realizou vários testes de abrasão Los Angeles com as partículas secas e úmidas. Ele verificou que algumas litologias eram mais susceptíveis a perder massa por abrasão quando submetidas a saturação antes dos ensaios. Contudo, o referido autor conduziu ensaios somente com agregados de origem natural.

Sendo assim, o objetivo desse artigo é avaliar a influência da umidade na resistência ao choque e na perda de massa por abrasão das partículas de agregado siderúrgico, em específico a escória de aciaria.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 LASTRO FERROVIÁRIO

Segundo Fortunato (2005), ainda é difícil estabelecer padrões e modelos constitutivos rigorosos para as propriedades da camada de lastro, sendo o comportamento da camada essencialmente condicionado pelas suas características mecânicas (resistência e deformabilidade) e hidráulicas (permeabilidade), para as quais é desejável que se mantenham relativamente constantes ao longo da passagem das composições ferroviárias

e do tempo de vida útil da via, o que não acontece devido ao aumento da rigidez gradual do material a longo prazo quando carregado ciclicamente. Fenômeno que pode ser acelerado ou acentuado caso as partículas empregadas na camada tenham propensão a produzir finos quando submetidos à esforços.

A norma brasileira vigente para seleção de material para uso como lastro ferroviário é a ABNT NBR 5564:2021. Ela lista 10 ensaios obrigatórios e 4 ensaios opcionais. Além disso, traz orientações de limites a serem observados de acordo com a litologia analisada e estabelece que o lastro ferroviário deve ser constituído por fragmentos formados pela britagem de material extraído de rocha dura e sã, reconhecido como de característica petrografia, própria ao uso em lastro na via férrea.

Percebe-se similaridade da norma brasileira com a norma americana Manual for Railway Engineering de 2010 da American Railway Engineering Maintenance-of-way Association (AREMA), tanto nos ensaios exigidos quanto nos limites a serem observados. Contudo, a norma americana prevê a utilização de agregado siderúrgico, conforme Tabela 1.

Tabela 1: Requisitos e métodos de ensaio para o lastro constituído de escória.

Propriedade	Escória de Alto-Forno	Escória de Aciaria	Instrução normativa (ASTM)
Máximo de material pulverulento, %	1,0	1,0	C 117
Massa específica mínima, kg/m ³	2.300	2.900	C 127
Absorção máxima, %	0,5	2,0	C 127
Máximo de partículas macias e friáveis, %	0,5	0,5	C 142
Degradação máxima (Abrasão Los Angeles), %	40	30	C 535 e C 131
Resistência à intempérie química (sulfato de sódio), máxima perda de massa, %	5,0	5,0	C 88
Partículas não cúbicas, limite máximo, %	5,0	5,0	D 4791

Fonte: Adaptado de AREMA (2010).

Percebe-se que as especificações de lastro vêm restringindo o emprego de materiais que apresentem porosidade e absorção em torno de 2,0 %, o que em algumas situações, pode levar à não utilização de bons materiais que tenham um baixo nível de degradação mesmo em condições de porosidade superiores a esta. Apesar de vários autores encontrarem baixos valores de absorção - Delgado et al., (2021) encontraram 1,7%, Esmaili, Yousefian e Ghahroudi (2020) obtiveram 0,9% e Logeshwari e Sivapullaiah (2021) acharam 0,63% - a escória é um material que tende a ter uma maior absorção, muito por conta da maior quantidade de poros que são gerados na sua solidificação quando comparados aos agregados de origem natural.

É importante entender em quais aspectos seria prejudicial para o pavimento, caso fosse empregado materiais com porosidade e/ou absorção maiores que os limites estabelecidos em norma. Barreto et al. (2018) realizaram ensaios de carga pontual para determinar a resistência a compressão axial de partículas de agregados siderúrgicos e partículas de gnaisses, bem como suas respectivas absorção e porosidade. Eles concluíram que os limites adotados na norma não devem ser considerados para a escória, tendo em vista que mesmo para valores de porosidade e absorção superiores aos limites estabelecidos na norma brasileira, as partículas apresentaram resistência a compressão elevada (maior que 100 MPa). Estes valores estão semelhantes aos encontrados por Koh et al. (2018), que apesar de não ter determinado a porosidade, obteve resistência a compressão da ordem de 180 MPa após 6 meses de cura para a escória proveniente de uma siderúrgica da Coreia do Sul. Os estudos aqui relatados, mostraram ser promissor o emprego deste material em lastro ferroviário. Porém, são necessárias investigações mais específicas e aprofundadas no sentido de estabelecer padronizações normativas e uma melhor compreensão do seu comportamento mecânico. Tanto através de ensaios mais representativos do material quando em serviço, quanto através de instrumentação e monitoramento de vias em operação constituídas de escória.

2.2 PRESENÇA DE ÁGUA

A resposta do lastro às forças externas é adversamente afetada pelo aumento do grau de saturação (INDRARATNA, SALIM e RUJIKIATKAMJORN, 2011). A presença de água no lastro, pode influenciar o seu comportamento mecânico alinhado a porosidade das partículas constituintes dos agregados. Isso é agravado em locais de clima temperado, onde o pavimento ferroviário experimenta, ao longo da vida útil, temperaturas que levem a água contida nos poros das partículas aos ciclos de congelamento e degelo. A água congelada nos poros das partículas sofre expansão e induz tensões nas partículas de lastro, consequentemente, as enfraquece e causa mais degradação consoante ao carregamento imposto pelas composições ferroviárias.

Em locais de clima tropical, que dificilmente submetam a água presente no pavimento ferroviário ao congelamento, é improvável que essa água absorvida e contida nos poros apresente expansão. O cenário que mais descreve as condições a que o lastro seria submetido, são os ciclos de saturação e secagem.

Quintanilla (2018) realizou ensaios Micro-Deval e ensaios de cisalhamento cíclico em um granito. Em relação aos ensaios Micro-Deval as amostras em que foi adicionada

água produziram quase o dobro de finos do que as amostras testadas em condições secas. Isso pode ser devido ao efeito de lavagem da água, removendo a camada de proteção que as partículas finas criam ao redor das partículas maiores quando grudam nelas. Na via permanente, a água da chuva pode lavar os grãos da mesma forma, principalmente a área ao redor de um contato e empurrando os finos para a parte inferior da camada de lastro. No entanto, os contatos entre os grãos na via são mais rígidos - em relação aos observados no Micro-Deval - e permanecem por mais tempo, evitando que a interface de contato acumule finos suficientes para criar uma camada de proteção. Assim, o efeito de lavagem da água na via-férrea será presumivelmente menos importante do que no Micro-Deval. O autor constatou que o efeito químico da água foi descartado, pelo menos para uma exposição relativamente curta dos grãos à água como no Micro-Deval, pois não foram observadas diferenças significativas nos resultados dos testes quando as amostras foram deixadas em água por horas ou dias.

Em relação aos ensaios de cisalhamento, Quintanilla (2018) concluiu que a umidade parece não ter grande influência na geração de finos. Uma vez que a mistura de água e finos cria uma pasta que fica fortemente colada ao grão que se seca, cobrindo as pequenas asperezas. Ele verificou que a tensão crítica calculada é a mesma, independentemente das condições do teste. As principais diferenças vêm do coeficiente de atrito, que parece ser ligeiramente reduzido.

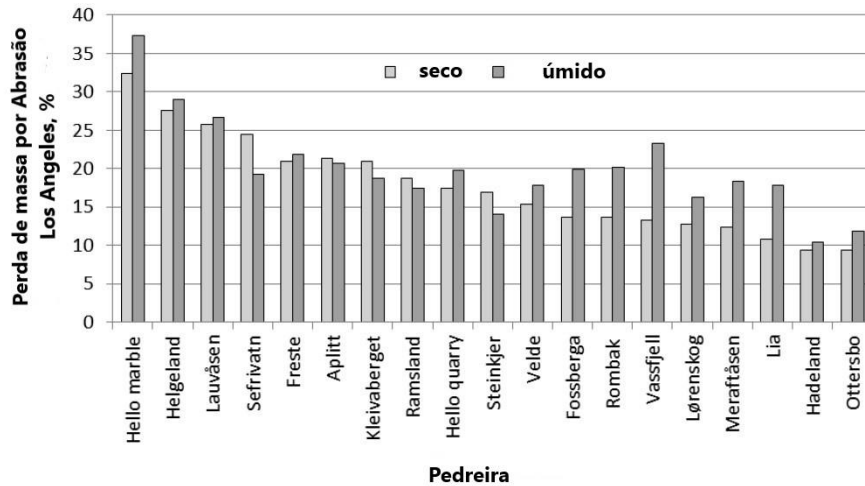
Ainda avaliando a presença de água no comportamento ao desgaste, Nãlsund (2014) realizou vários testes de abrasão Los Angeles com as partículas secas e úmidas na fração 31,5 / 50 mm. Os resultados dos ensaios são mostrados na Figura 1 e podem ser divididos em três grupos:

- a) algumas rochas aumentaram sua resistência à abrasão em contato com a água;
- b) algumas rochas diminuíram sua resistência quando absorveram água; e
- c) outras apresentaram desempenho não afetado.

Uma característica comum para várias litologias dentro do grupo (a) é que eles constituem principalmente os minerais quartzo e feldspato (composição granítica), alguns deles contêm uma grande quantidade de quartzo mineral (40-60%) e alguns têm uma alta quantidade do mineral feldspato (até 80%). As três amostras de teste com maior perda de resistência (grupo (b) têm em parte uma grande quantidade do mineral anfibólio. O autor relata que há indicações de que talvez outras propriedades, ainda desconhecidas, estejam afetando os resultados. A perda significativa de resistência para Fossberga (grauvaca) e

Rombak (micagneiss) apesar de um conteúdo mineral de 82 e 67% com quartzo + feldspato pode ter sido afetado por seu conteúdo de mica (15 e 27% respectivamente).

Figura 1: Ensaios realizados com o aparato Los Angeles nos cenários seco e úmido por Nålsund (2014).



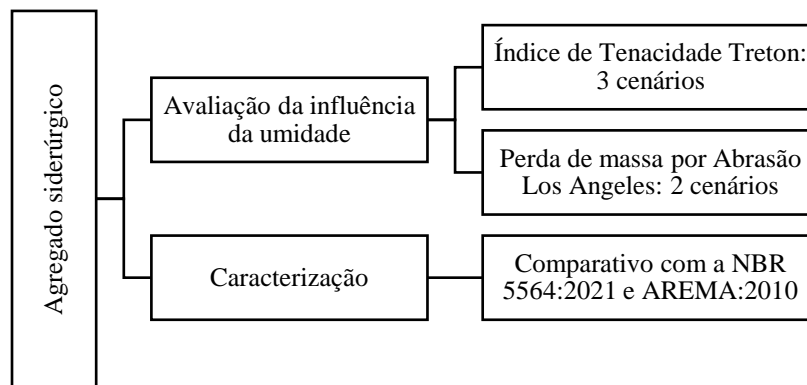
Fonte: Adaptado de Nålsund (2014).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O material utilizado no presente estudo foi uma escória de aciaria química e ambientalmente inerte, proveniente da siderúrgica Ternium. Foram realizados ensaios de caracterização tradicionais, segundo a norma brasileira NBR 5564:2021 e comparado os valores obtidos com a norma americana AREMA (2010).

Foi verificado a influência da umidade nos ensaios de resistência ao choque (Índice de tenacidade Treton) e Perda de massa por abrasão (Los Angeles). Para isso, foram realizados os ensaios com as partículas secas e após 30 dias de saturação. Adotou-se a nomenclatura de cenário “seco” e “saturado”, respectivamente. No ensaio de Tenacidade Treton, além dos ensaios com o agregado seco e após 30 dias de saturação, foi realizado o ensaio com uma lâmina d’água (170 ml), esse último cenário foi chamado de “saturado e submerso”. Na Figura 2 é possível observar a estratégia de pesquisa estabelecida.

Figura 2: Estratégia de pesquisa.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Como observou-se um aspecto poroso de algumas partículas (que foi confirmado no ensaio de laboratório para determinar a porosidade e a absorção), procurou-se avaliar como essa porosidade poderia impactar na produção de finos, para isso, foram realizados ensaios de Tenacidade Treton e Abrasão Los Angeles com as partículas ora secas, ora úmidas. Por fim, foi realizada uma inferência estatística dos resultados para verificar se a escória mostrou tendência a produzir finos quando suas partículas estavam úmidas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os ensaios realizados com a escória seguiram as prescrições da ABNT NBR 5564:2021, e foram: para determinação da forma das partículas, massa específica aparente, porosidade aparente, absorção de água, resistência à intempérie, resistência ao desgaste (Abrasão Los Angeles) e Resistência ao Choque (Índice de tenacidade Treton). Na Tabela 2 é possível observar os valores encontrados bem como as recomendações da norma brasileira (para outras litologias) e americana (para escória de aciaria).

Em relação a forma, partículas não cúbicas, massa específica aparente, resistência ao desgaste e resistência ao choque, a escória atendeu os limites a serem observados.

Tabela 2: Valores encontrados x valores de referência.

Parâmetro	Valor obtido	Limite ABNT	Limite AREMA
		Outras litologias	Escória de Aciaria
Forma média das partículas	Cúbica	Cúbica	Cúbica
Partículas não cúbicas	7,0%	<15,0%	<5,0%
Massa específica aparente	3.153 kg/m ³	>2.500 kg/m ³	>2.900 kg/m ³
Absorção de água	3,9%	<2,0%	<2,0%
Porosidade aparente	11,0%	<2,0%	-
Resistência ao desgaste (abrasão Los Angeles máxima)	10,6%	<30%	<30,0%
Resistência ao choque (índice de tenacidade Treton máximo)	5,2%	<25%	-
Material pulverulento	0,1%	<1,0%	<1,0%
Torrões de argila	0,0%	<0,5%	<0,5%
Limite de massa unitária no estado solto	1.585 kg/m ³	>1.250 kg/m ³	-

Fonte: Elaborado pelos autores.

4.1 AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA UMIDADE

Os parâmetros de absorção de água e porosidade aparente foram os únicos que não atenderam o estipulado em normas. Tendo sido obtido para a absorção 3,9 % e para a porosidade 11,0%, valores bastante elevados frente os limites recomendados (máximo de 2,0% para os dois parâmetros). Este acontecimento requer análises mais abrangentes, todavia considerando que o agregado retornou valores aceitáveis nos demais ensaios, é necessário compreender quais os impedimentos de utilização de um material com porosidade acima dos 2,0% acarretaria a via permanente.

Uma das formas de avaliar o impacto da umidade absorvida pelo agregado no comportamento mecânico é submetendo o agregado a solicitações na condição saturada, assim como fez Quintanilla (2018) e Nåsund (2014). Nos ensaios treton as partículas do cenário “Seco”, foram ensaiadas segundo a NBR 5564 (2021), as do cenário “Saturado” após 30 dias imersas em água e as do cenário “Saturado e Submerso”, após 30 dias imersas em água e com uma lâmina d’água de 170 ml no aparato Treton (Figura 3).

Figura 3: Da esquerda para direita e de cima para baixo: Treton no cenário seco, saturado, saturado e submerso e material plástico utilizado para conter a lâmina d'água no decorrer do ensaio.



Fonte: Elaborado pelos autores.

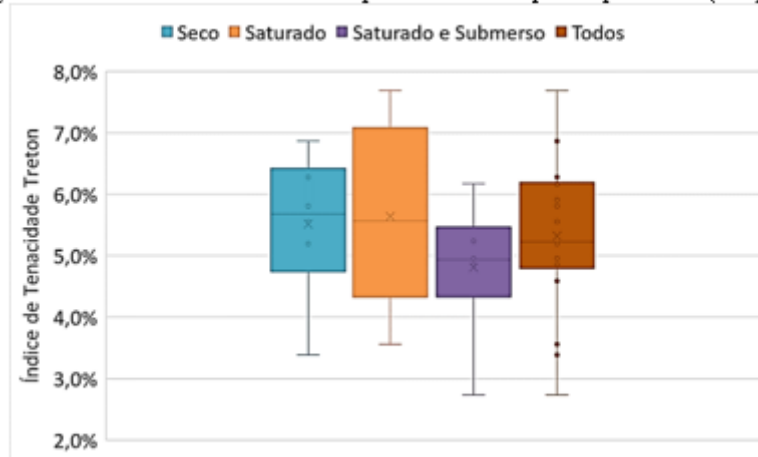
Os resultados obtidos nos três cenários estão na Tabela 3 e na Figura 4. Em uma primeira análise, de modo geral, percebe-se pouca variação dos resultados nos três cenários. Com o auxílio do *bloxpot* (Figura 8), observa-se que 50% dos resultados ficaram 4,8% e 6,2%. O menor valor encontrado foi de 2,7% no cenário “Saturado e Submerso”, já a maior perda por choque foi observada no cenário saturado, 7,7%, porém ainda inferior ao valor restritivo de norma, que é no máximo 25%.

Tabela 3: Resultados dos Ensaio de perda de massa por impacto.

Cenário	Ensaio	Resistência ao choque	Média
Seco	1	6,9%	5,5%
	2	5,2%	
	3	5,6%	
	4	6,3%	
	5	5,8%	
	6	3,4%	
Saturado	7	7,7%	5,6%
	8	5,2%	
	9	4,6%	
	10	3,6%	
	11	5,9%	
	12	6,9%	
Saturado e submerso	13	4,9%	4,8%
	14	2,7%	
	15	4,9%	
	16	6,2%	
	17	5,2%	
	18	5,0%	

Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 4: Resultados dos Ensaios de perda de massa por impacto em (boxplot).



Fonte: Elaborado pelos autores.

Tabela 4: Resultados dos Ensaios de perda de massa por abrasão.

Cenário	Ensaio	Resistência à abrasão	Média
Seco	1	11,6%	10,2%
	2	9,5%	
	3	9,6%	
Saturado	4	7,0%	8,2%
	5	6,5%	
	6	10,4%	

Fonte: Elaborado pelos autores.

Nos ensaios de perda de massa por abrasão, observou-se um aparente acréscimo de resistência à abrasão, uma vez que no cenário saturado obteve-se média inferior ao cenário seco ($8,2\% < 10,2\%$). Todavia, foi observado na condução dos ensaios com partículas úmidas a criação de uma película de lama (finos umidificados produzidos pelas partículas em contato com as esferas), o que de certa maneira pode ter atenuado a abrasão que a partícula pode potencialmente sofrer no decorrer do ensaio.

Ao analisar dados, uma das mais frequentes questões é apontar se um grupo de dados é estatisticamente diferente do outro ou não. Por exemplo, os dados oriundos da Tabela 3, podem ser considerados iguais ou diferentes? Apesar de nos três cenários os valores de resistência ao choque permanecerem abaixo do limite estipulado em norma, essa diferença (ou igualdade) estatística se mostra relevante uma vez que pode nos fornecer uma possível sensibilidade do agregado à água quanto a perda de massa por impacto. Nesse contexto, o Teste-T e a Análise de Variância – ANOVA se apresentam como ferramentas interessantes. A ANOVA, por exemplo, permite comparar as médias de três ou mais populações. Para executar-se a análise de variância, deve-se primeiro formular as hipóteses nula e alternativa.

$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \dots = \mu_k$. (Todas as médias populacionais são iguais.) (1)

H_a : Pelo menos uma média é diferente das demais. (2)

Logo, se a hipótese nula é rejeitada a um determinado nível de significância, sabemos então que existe pelo menos uma das médias de um tratamento que é diferente das demais. (Larson e Farber, 2015)

Para proceder a análise das médias optou-se pelo método de análise de médias de tamanhos iguais, tendo em vista que cada grupo (cenário) temos 6 amostras. Na Tabela 4 temos o resumo do teste ANOVA para os 3 cenários realizados no ensaio de resistência ao choque com a escória de aciaria.

Tabela 4: Teste ANOVA para os ensaios de perda de massa por impacto.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,00024	2	0,00012	0,721033	0,502356	3,68232
Dentro dos grupos	0,002494	15	0,000166			
Total	0,002733	17				

Fonte: Elaborado pelos autores.

A partir da Tabela 4, constatamos que $F_{calc} < F_{crit}$. ($0,72 < 3,68$), logo, podemos afirmar, ao nível de confiança de 95%, que as médias são estatisticamente iguais. Isso vale para os ensaios conduzidos nos ensaios de perda de massa por abrasão, que através do teste estatístico (Teste-T) tiveram a hipótese nula confirmada. Portanto, não houve variação de perda de massa por impacto e abrasão, significativa estatisticamente, nos cenários considerados.

5 CONCLUSÃO

A partir dos ensaios realizados, da análise das normas, dos trabalhos referenciados e dos valores estatísticos gerados, conclui-se que o agregado siderúrgico atendeu os limites normativos previstos na norma internacional (AREMA), exceto para absorção e porosidade, contudo, não manifestou sensibilidade em relação aos ensaios de resistência ao impacto e à abrasão, quando submetida a saturação.

É necessário ensaios adicionais para investigar o comportamento mecânico do agregado siderúrgico quando submetido à saturação, como por exemplo através dos ensaios: triaxiais de carga repetida, box test e, principalmente, em vias instrumentadas. De tal modo a selecionar corretamente o agregado tanto do ponto de vista mecânico quanto do ponto de vista hidráulico e estabelecer parâmetros normativos mais condizentes com o potencial desempenho dos agregados siderúrgicos.

REFERÊNCIAS

ABNT, NBR. 5564 - Via férrea-Lastro ferroviário-Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, Brasil, 2014.

ABNT, NBR. 5564 - Via férrea-Lastro ferroviário-Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, Brasil, 2021.

AREMA, L. American railway engineering and maintenance-of-way association. Manual for railway engineering, 2010.

BARRETO, R. A. M.; OLIVEIRA, R. W. H.; FERNANDES, G. ; SANTANA, M. V. B.; HILARIO, R. Q. . Determinação da Resistência a Partir da Porosidade e Absorção da Brita de Gnaiss e da Escória de Aciaria LD.. *ENGEVISTA* , v. 12, p. 623, 2018.

DELGADO, B. G., DA FONSECA, A. V., FORTUNATO, E., PAIXÃO, A., e 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*, 279, 122438.

DELGADO, B. G., DA FONSECA, A. V., FORTUNATO, E., e MOTTA, L. Aproveitamento de Escórias de Aciaria em Infraestruturas de Transportes—estudos e aplicações em Portugal e no Brasil. In *Atas do 9º Congresso Rodoviário Português. Lisboa, Portugal, 2019.*

ESMAEILI, M., YOUSEFIAN, K., e ASGHARZADEH GHAHROUDI, P. An investigation of abrasion and wear characteristics of steel slag and granite ballasts. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Construction Materials*, 173(1), 41-52, 2020.

FORTUNATO, E. Renovação de plataformas ferroviárias: Estudos relativos à capacidade de carga. Tese de Doutorado. LNEC/Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Lisboa, Portugal, 2005.

GUIMARÃES, A. C. R., COSTA, K. Á., DE MIRANDA REIS, M., SANTANA, C. S. A., & CASTRO, C. D. Study of controlled leaching process of steel slag in Soxhlet extractor aiming employment in pavements. *Transportation Geotechnics*, 27, 100485, 2021.

INDRARATNA, B., SALIM, W., & RUJIKIATKAMJORN, C. *Advanced rail geotechnology-ballasted track*. CRC press, 2011.

KOH, T., MOON, S. W., JUNG, H., JEONG, Y. e PYO, S. A feasibility study on the application of basic oxygen furnace (BOF) steel slag for railway ballast material. *Sustainability*, 10(2), 284, 2018.

LOGESHWARI, J. e SIVAPULLAIAH, P. V. Physical, chemical, morphological and strength characteristics of steel slags in view of its potential application in geotechnical engineering. *Materials Today: Proceedings*, 45, 6282-6286, 2021.

NÅLSUND, Roar. Railway ballast characteristics, selection criterion and performance. Universidade Norueguesa de Ciência e Tecnologia, Tese, 2014.

QUINTANILLA, Ivan Deiros. Multi-scale study of the degradation of railway ballast. Tese de Doutorado. Université Grenoble Alpes, 2018.

SELIG, E. T., e WATERS, J. M. *Track geotechnology and substructure management*. Thomas Telford, 1994.

SOFILIC, T., SOFILIC, U., & BRNARDIC, I. The significance of iron and steel slag as by-product for utilization in road construction. In *12th International Foundrymen conference Sustainable Development in Foundry Materials and Technologies*, pp. 419-436, 2012.

WORLD STEEL ASSOCIATION. Global crude steel output decreases by 0.9% in 2020. Acessado 13 Jun. 2022. Disponível em: <<https://worldsteel.org/media-centre/press-releases/2021/global-crude-steel-output-decreases-by-0-9-in-2020/>>.