



Determinação da resistência a partir da porosidade e absorção da brita de Gnaisse e da escória de Aciaria LD

Determination of the resistance from the porosity and absorption of Gnaisse crushed stone and the LD steel slag

Rairane Aparecida Miranda Barreto

Ralph Werner Heringer Oliveira

Gilberto Fernandes

Murillo Vinicius Bento Santana

Ronderson Queiroz Hilario

Resumo: Há décadas o agregado rochoso (Gnaisse) devido a sua grande variação mineralógica e seu grau de metamorfismo, tem sua resistência à compressão elevada e uma porosidade e absorção baixa, por isso, é amplamente empregado como lastro ferroviário. Com o objetivo de substituir o Gnaisse por um coproduto siderúrgico (Escória de Aciaria LD), esse trabalho de pesquisa correlacionou resistência com a porosidade e a absorção da brita de gnaisse e da escória de aciaria LD utilizados como lastro ferroviário. Este estudo foi realizado por meio dos ensaios de carga pontual, massa específica aparente, absorção de água, porosidade aparente (preconizados pelas normas NBR 5564: ABNT 2014 - Associação Brasileira de Normas Técnicas, Anexo B e D5731: ASTM 2008 - American Society of Testing Materials), adsorção de nitrogênio-Técnica B.E.T., análise microscópica dos poros e um modelo matemático de regressão polinomial. Para correlacionar a sua resistência com a absorção e porosidade foi identificado a morfologia, organização, distribuição e tamanho dos poros da escória e da brita. Segundo a NBR 5564: ABNT 2014, o material para ser utilizado como lastro ferroviário deve apresentar uma absorção máxima 0,8 % e uma porosidade máxima de 1,5 % para uma resistência a compressão uniaxial mínima de 100 MPa. Seguindo este conceito, os resultados do modelo matemático da escória de aciaria LD, comprovaram que a escória ao atingir o valor mínimo de resistência a compressão uniaxial de 100 MPa apresenta uma absorção de 4 % e porosidade de 6 %. Sendo assim, os valores preconizados pela norma NBR 5564/2014, não se aplicam as escórias de aciaria LD.

Palavras-chave: Lastro ferroviário; Escória de aciaria LD; Correlação da resistência / absorção / porosidade.

Abstract: For decades the rock aggregate (Gnaiss) due to its great mineralogical variation and its degree of metamorphism, has its high compression resistance and a low porosity and absorption, therefore, it is widely used as railway ballast. With the objective of replacing the Gnaiss by a steel co-product (LD steel slag), this research correlated resistance with the porosity and the absorption of gnaiss crushed stone and LD steel slag used as railway ballast. This study was carried out by means point load essay, apparent specific mass, water absorption, apparent porosity (recommended by NBR 5564: ABNT 2014 - Associação Brasileira de Normas Técnicas, Anexo B e D5731: ASTM 2008 - American Society of Testing Materials), nitrogen adsorption-BET technique, microscopic analysis of pores and a mathematical model of polynomial regression. In order to correlate its resistance with the absorption and porosity the morphology, organization, distribution and pore size of the slag and the crushed stone were identified. According to NBR 5564: ABNT 2014, the material to be used as railway ballast should have a maximum absorption of 0.8 % and a maximum porosity of 1,5 % for a minimum uniaxial compressive strength of 100 MPa. For the strength of a material is also linked to its porosity and absorption. Following this concept, the results of the mathematical model of LD steel slag proved that the slag when reaching the minimum value of uniaxial compressive strength of 100 MPa presents an absorption of 4 % and a porosity of 6 %. Therefore, the values recommended by the standard NBR 5564/2014, do not apply LD steel slag.

Keywords: Railway ballast; LD steel slag; Resistance / absorption / porosity correlation.

1. Introdução

O Brasil precisa ampliar sua visão de maneira mais sistêmica em se tratando da atuação de todos os modais, com isso melhorando sua infraestrutura de transporte. Para reduzir os custos, aumentar a competitividade, fornecer mais segurança e conforto, e para alavancar a economia, é necessário investir mais para modernizar e ampliar os modais. Um dos elementos de maior importância para o desenvolvimento de países e regiões é um sistema de transporte eficiente.

O modal ferroviário, em função de suas características que lhe conferem grande eficiência, consagrou-se como um veículo de transformação econômica, assumindo um importante papel estratégico na composição da matriz de transporte dos países desenvolvidos.

Na busca por novas tecnologias, têm se procurado investigar novos materiais destinados à pavimentação ferroviária. Oriundos do desmonte de rochas vivas, os materiais rochosos são os mais utilizados na pavimentação, e mesmo sendo um excelente agregado segundo as normas do antigo DNER - Departamento Nacional de Estradas e Rodagem e atual DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte, possuem custo elevado. Por este motivo nos últimos anos, a pesquisa sobre a reciclagem de coproduto siderúrgico vem sendo intensificada em todo o mundo.

Muitas empresas e universidades vêm investindo em pesquisa e tecnologia para reaproveitamento do coproduto siderúrgico, o que aumenta a qualidade do produto reciclado e propicia maior eficiência do sistema produtivo (TAKANO et al., 2000).

Um dos coprodutos de maior volume gerado nas usinas siderúrgicas são as escórias, dentre elas, em especial para este estudo, a escória de aciaria LD. Obtida mediante transformação do ferro gusa líquido e sucata em aço, a escória de aciaria possui características físicas e mecânicas iguais ou superiores aos agregados naturais (BALTAZAR, 2001) e, já vêm sendo utilizada para algumas aplicações na construção civil, havendo, porém, a necessidade de passar por um tratamento que proporcione a estabilização. Já que a escória de aciaria LD sofre o fenômeno da expansão, corrosão e oxidação do ferro metálico residual existente na mesma.

A hidratação de cal livre (CaO) e do periclásio (MgO) e a corrosão e oxidação do ferro metálico residual, geram tensões internas que originam trincas e até resultam na fragmentação do material, ou seja, numa expansão destrutiva. A hidratação de cal livre (CaO) e do periclásio (MgO) são os maiores responsáveis pela desintegração e enfraquecimento por diferença de volume molar nas suas reações (FERNANDES, 2010).

Ainda segundo Fernandes (2010), os problemas provenientes da expansibilidade das escórias podem ser impedidos por meio de um tratamento que proporcione o equilíbrio dos óxidos expansivos, obtido mediante a um período de estabilização química, ou cura, dessas escórias na forma sólida, ou também por meio de tratamento de escórias líquidas, modificando-se o processo de resfriamento aplicado nas escórias, ou ainda, adicionando-se agentes redutores e estabilizantes, visando à estabilização e a melhoria das propriedades das escórias estudadas.

A cura distingue pelo fim das reações de hidratação e carbonatação das substâncias expansivas por meio da exposição da escória ao intemperismo.

Após sua estabilização a escória de aciaria LD se caracteriza como um ótimo substituto dos materiais naturais utilizados como lastro ferroviário, devido ao baixo custo, produção contínua, comportamento e o desempenho superiores.

Mas por não haver normas técnicas específicas para coprodutos siderúrgicos utilizados como agregados para pavimentação ferroviária no Brasil, as utilizações dos mesmos tornam-se difíceis, pois demandam vários tipos de estudos em função da utilização, como do tipo de coprodutos.

2. Materiais e métodos

Tendo com propósito correlacionar a resistência da brita e da escória, com as suas respectivas porosidade e absorção de água, foram identificadas a morfologia, a organização e a distribuição dos poros das mesmas. Para a realização destes ensaios foram selecionadas, aleatoriamente, uma amostra de cada material, ambas contendo 15 fragmentos com dimensões entre 50 mm e 75 mm.

As amostras foram submetidas aos ensaios de análise microscópica dos poros, massa específica aparente, porosidade aparente, absorção de água e carga pontual. Com os valores de todos os ensaios realizados com as mesmas amostras, foram geradas modelagens matemáticas de regressão polinomial e exponencial, que proporcionaram obter correlações entre os mesmos.

2.1. Ensaios de massa específica aparente, porosidade aparente e absorção de água

Para a realização dos ensaios de massa específica aparente, porosidade e absorção de água, as amostras de gnaiss e escória foram lavadas e escovadas, sendo então colocadas em recipiente adequado, no qual foi adicionada água destilada até 1/3 da altura das amostras. Após 4 horas adicionou-se mais água até atingir 2/3 da altura das amostras, as quais foram novamente deixadas em descanso por mais 4 horas, até que as amostras foram totalmente cobertas por água destilada, ficando submersas por um tempo total de 48 horas. Após 48 horas as amostras foram retiradas da água e enxugadas com um pano levemente umedecido, sendo, então, pesadas separadamente, para obter a massa saturada M_{sat} .

Em seguida, as amostras foram submersas em água e novamente pesadas separadamente usando o dispositivo da balança para pesagem hidrostática. Para assim, serem determinadas as respectivas massas submersas M_{sub} . Por último, as amostras foram colocadas na estufa a uma temperatura de $70 \pm 5^\circ \text{C}$ por 48 horas. Após este tempo, as amostras foram retiradas da estufa e

deixadas em repouso para resfriamento, sendo, pesadas individualmente para a obtenção da massa seca M_{sec} .

De posse dos valores das massas, foram calculados os valores da massa específica aparente, porosidade e absorção de água. Estas propriedades foram determinadas de acordo com a norma NBR 5564 (ABNT, 2014), Anexo B – Determinação da massa específica aparente, porosidade aparente e absorção de água. As Figuras 1 e 2 apresentam os equipamentos utilizados no ensaio.



Figura 1: Bécheres para a determinação da massa específica, absorção e porosidade.



Figura 2: Balança e dispositivo de pesagem hidrostática para a determinação da massa específica, absorção e porosidade.

2.2. Ensaio de carga pontual

Um método alternativo de aferir a resistência à compressão simples de uma amostra consiste na determinação do índice de resistência ou índice de carga pontual através do ensaio de carga pontual prescrito pela norma D5731 (ASTM, 2008).

O ensaio tem como objetivo provocar a ruptura da amostra com forma aproximadamente prismática, com diâmetros variando entre 30 e 80 mm. A amostra é comprimida entre duas ponteiros na posição correspondente à metade do comprimento e à metade da largura de cada

amostra. Para cada ensaio determinou-se o índice de carregamento pontual (I_s) a partir da carga de ruptura, estimado com base na equação:

$$I_s = \frac{P}{D_e^2} \quad (1)$$

Onde:

P - Carga de ruptura;

D_e - Diâmetro equivalente das partículas.

O diâmetro equivalente das partículas dos materiais foi definido pela seguinte equação:

$$D_e^2 = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \quad (2)$$

Onde:

A - Área de seção mínima do plano através dos pontos de apoio e carga.

Com isso, as áreas do plano de ruptura são definidas de forma aproximada. A Figura 3 mostra o equipamento utilizado no ensaio de carga pontual.



Figura 3: Sistema de aplicação de carga pontual.

2.3. Análise microscópica dos poros

As amostras de gnaiss e escória de aciaria LD foram submetidas a uma análise microscópica por meio de um microscópio óptico trinocular, acoplado a uma microcâmera digital de captura de vídeo e imagem com zoom de até 800 x, da marca PANTEC, na qual foram identificados e analisados os poros do gnaiss e da escória (Figura 4).



Figura 4: Microscópio óptico trinocular.

2.4. Ensaio de adsorção de nitrogênio-técnica B.E.T.

Muitos parâmetros que descrevem a estrutura de poros de uma amostra, podem ser determinados por meio da adsorção de nitrogênio. Dependendo do equipamento utilizado para realizar o ensaio de adsorção de nitrogênio, faixa de diâmetro de poro de 0,3 – 300 nm, ou seja, mesoporos e macroporos são determinados.

No ensaio de adsorção de nitrogênio, apenas os poros abertos são determinados, e com o modelo de poros cilíndricos é assumida nas medições do tamanho de poros de distribuição. O volume total de poros, tamanho dos poros e a distribuição de tamanho dos poros podem ser determinados a partir da adsorção e dessorção da fase e de dados da isoterma.

A área de superfície específica é calculada de acordo com a equação (BRUNAUER et al., 1938), análise microscópica dos poros.

$$\frac{P}{V \cdot (p_0 - p)} = \left[\frac{1}{V_m \cdot c} \right] + \left\{ \left[\frac{c-1}{V_m \cdot c} \right] \cdot \left(\frac{p}{p_0} \right) \right\} \quad (3)$$

Sendo:

V - Volume adsorvido;

V_m - Volume da monocamada;

p - Pressão da amostra;

p_0 - Pressão de saturação;

c - Constante relacionada à entalpia de adsorção (B.E.T. constante).

Conhecendo o valor de V_m pode-se calcular a área superficial específica pela equação abaixo:

$$S_{\text{BET}} = \frac{V_m \cdot n_a \cdot a_m}{m \cdot v_L} \quad (4)$$

Onde:

n_a - Número Avogadro que é constante;

a_m - Área transversal ocupada por cada molécula de nitrogênio (0,162 nm²);

m - Peso da amostra;

v_L - Volume molar de gás nitrogênio (22.414 cm³).

A teoria se baseia no pressuposto de que a primeira camada adsorvida envolve adsorbato/adsorvente energias, e as seguintes camadas as energias do adsorbato/interação adsorbato.

2.5. Modelagem matemática de regressão polinomial

Todo material possui certa porosidade associada a ele, decorrente de imperfeições no que tratamos ser um contínuo de massa. A existência dos poros está associada ao processo de geração do material, seja este processo natural ou artificial (Yoshimura *et. al.*, 2005; Norton, 1973).

Para determinar experimentalmente como a porosidade influencia nas tensões geradas no sólido, foi utilizada uma série de ensaios, determinando assim a porosidade e a tensão de ruptura de diversos fragmentos.

Então, usou-se o método da interpolação polinomial para construir uma função que relaciona as duas grandezas. Esta função designa-se por função aproximante.

A escolha da função aproximante é aqui um polinômio, mas poderia ser outra. Um exemplo de interpolação pode ser visto na Figura 5.

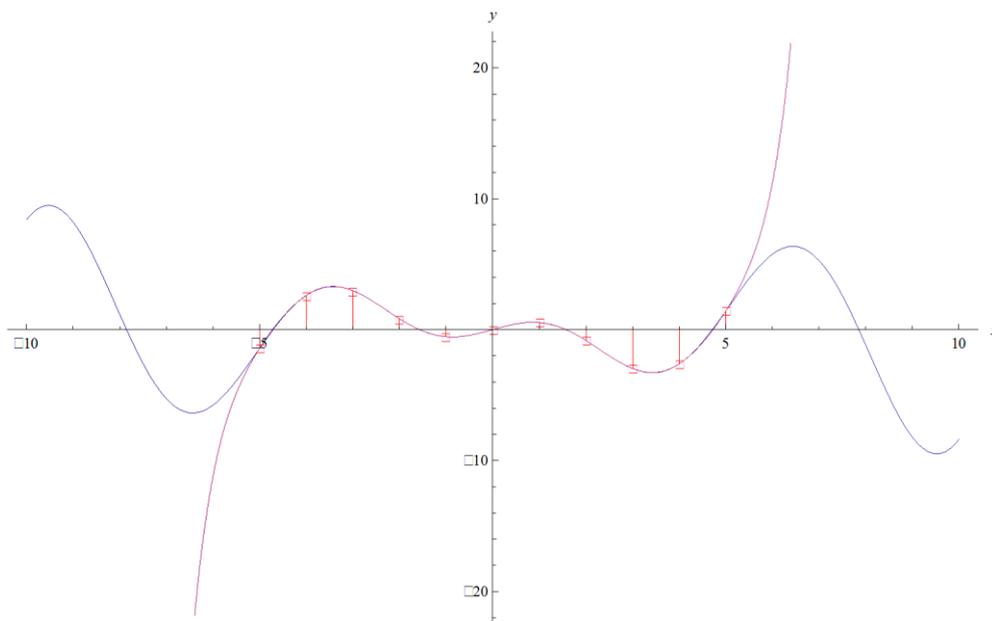


Figura 5: Exemplo de interpolação.

Na Figura 5 a função verdadeira é a que está em azul e a função aproximante é a que está em vermelho. Nota-se que no intervalo dos pontos a função aproximante e a função real são praticamente iguais, contudo fora deste intervalo há uma rápida divergência entre as duas.

Os resultados da carga pontual, massa específica aparente, absorção e porosidade aparente, foram aplicados no modelo de regressão polinomial e exponencial, sendo que a equação polinomial de quinto grau foi a que melhor se ajustou à curva experimental, A equação apresentou um grau de confiabilidade de 70 % para os intervalos especificados.

3. Resultados

3.1. Ensaio de massa específica aparente, porosidade aparente e absorção de água

A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos nos ensaios.

Tabela 1: Resultados dos ensaios de massa específica, porosidade e absorção de água dos materiais.

Material	Massa específica (g/cm ³)	Absorção de água (%)	Porosidade aparente (%)
Gnaisse	2,69	0,51	0,87
Escória	3,44	1,66	4.20

3.2. Ensaio de Carga pontual

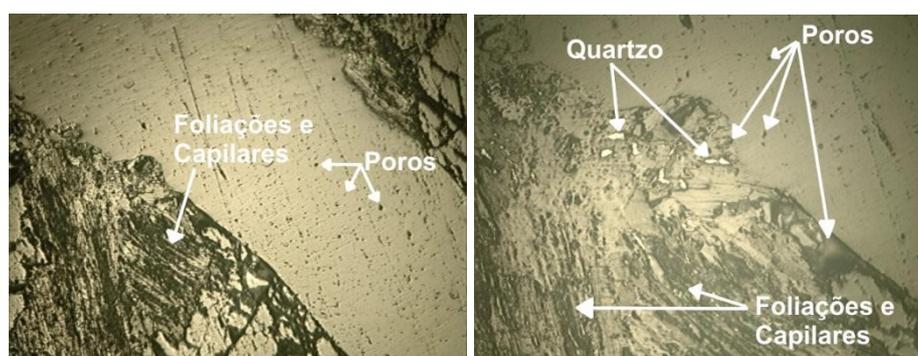
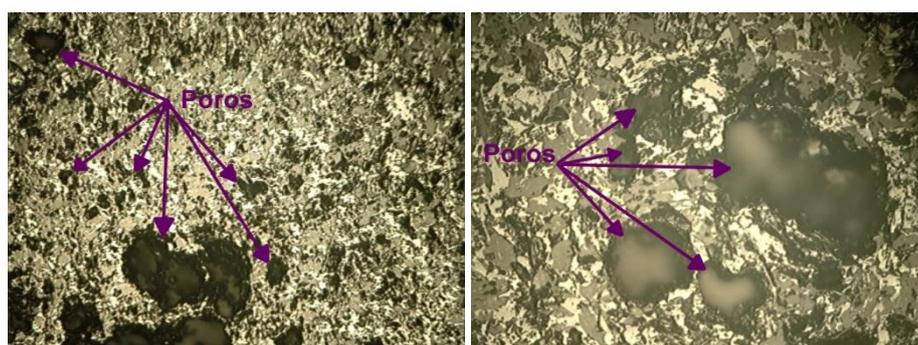
Os resultados do ensaio de carga pontual se encontram na Tabela 2.

Tabela 2: Resultado do ensaio de carga pontual dos materiais.

Material	Índice de Carregamento $I_{S(50)}$ (MPa)		Resistência à Compressão Uniaxial δ_{uc} (MPa)		Índice de Anisotrópico $I_{a(50)}$
	Plano \perp	Plano $//$	Plano \perp	Plano $//$	
Gnaisse	8,49	7,58	182,94	159,98	1,12
Escória	7,49	7,65	183,38	187,38	0,97

3.3. Análise microscópica dos poros

As amostras de gnaisse e escória foram submetidas a uma análise microscópica realizada com um microscópio óptico trinocular, na qual foram identificados e analisados os poros do gnaisse e da escória. As Figuras 6 a 7 mostram como é a morfologia, organização, distribuição e tamanho de poros do gnaisse e da escória de aciaria LD.

**Figura 6:** Poros do gnaisse (aumento de 50x e de 250x).**Figura 7:** Poros da escória (aumento de 50x e de 250x).

As microfotografias da escória de aciaria LD permitem identificar a morfologia, a organização e a distribuição dos poros, e possibilitam identificar que não existe ligações por capilares entre os poros, e nem foliações e segregação de minerais em camadas. Os poros da escória de aciaria LD são em sua maioria abertos.

Já nas microfotografias do gnaïsse é possível identificar claramente as foliações (disposição orientada dos seus minerais segundo planos paralelos) bem como a presença de alguns minerais (quartzo), as ligações por capilares, variação do tamanho dos poros, quantidade de poros e bandado gnaïssico (alternância de bandas de cor clara e escura, provenientes da recristalização de minerais de granularidade elevada que são segregados em camadas). Demonstrando com isso que o gnaïsse é formado por poros aberto e abertos cilíndricos, mas em diâmetro menores, o que possibilita uma menor porosidade, absorção e massa específica.

3.4. Adsorção de nitrogênio-técnica B.E.T.

Os parâmetros mais comumente utilizados para a caracterização da forma de partículas ou de superfície são apresentados na Tabela 3 abaixo que mostra os resultados do ensaio de adsorção de nitrogênio do gnaïsse e da escória.

Tabela 3: Resultado do ensaio de adsorção de nitrogênio-técnica B.E.T.

Material	Gnaïsse	Escória
Massa específica (g/cm ³)	2,65	3,14
Superfície Específica B.E.T. (m ² /g)	2,14	3,44
Volume de Microsporos (cm ³ /kg)	0,0010	0,0016
Área de Microsporos (m ² /g)	2,82	4,63
Tamanho Médio dos Microsporos (mn)	5,91	5,06
Volume Total de Poros (cm ³ /kg)	0,00648	0,01159
Diâmetro Máximo dos Poros (Å)	1331,1	1458,1
Diâmetro Médio dos Poros (Å)	121,1	134,6

O gnaïsse apresentou uma massa específica menor que a escória. A baixa densidade do gnaïsse é decorrente dos poros com cavidades de formas irregulares, que são conectadas por capilares e possuem forma e diâmetro variados.

Observou-se também que volume e a área dos micrósporos bem como volume total dos poros são menores em comparação com a escória de aciaria LD, isso ocorre em função do processo de formação de ambos, pois o gnaïsse é uma rocha metamórfica com alto grau de compactação, mas não o suficiente para eliminar por completo os poros.

Em se tratando do tamanho médio dos micrósporos, diâmetro máximo e o diâmetro médio dos poros, houve uma variação dos resultados do gnaïsse com a escória, esta variação de tamanhos e diâmetro se torna visível nos ensaios da análise microscópica apresentados acima.

4.5. Modelagem matemática de regressão polinomial

Com os dados obtidos dos ensaios de carga pontual, de massa específica, de absorção de água e de porosidade aparente, foram realizados os ajustes matemáticos de modo a obter as equações polinomiais que mais se ajustam a curva experimental.

Os ajustes foram obtidos utilizando-se o software Wolfram Mathematica 7.0. Para a porosidade e absorção até 6 % x resistência, as curvas experimentais estão representadas pelas Figuras 8 a 11 que mostram os gráficos da curva plotada até 6 % da porosidade e absorção x resistência.

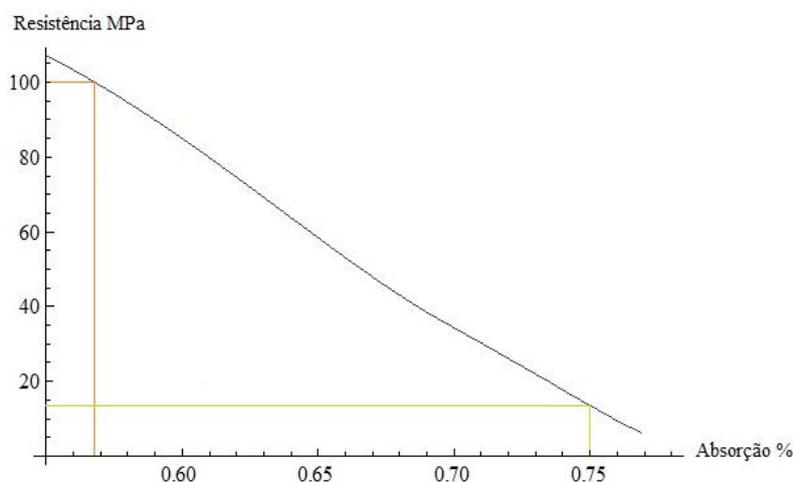


Figura 8: Gráfico da absorção x resistência do gnaisse.

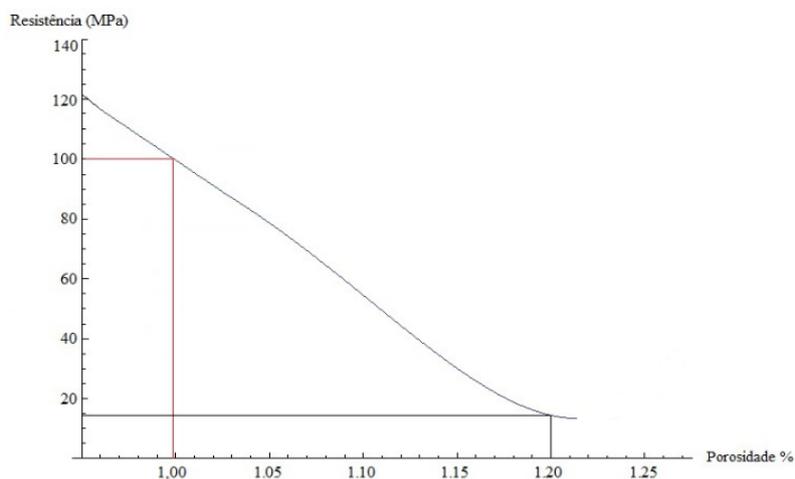


Figura 9: Gráfico da porosidade x resistência do gnaisse.

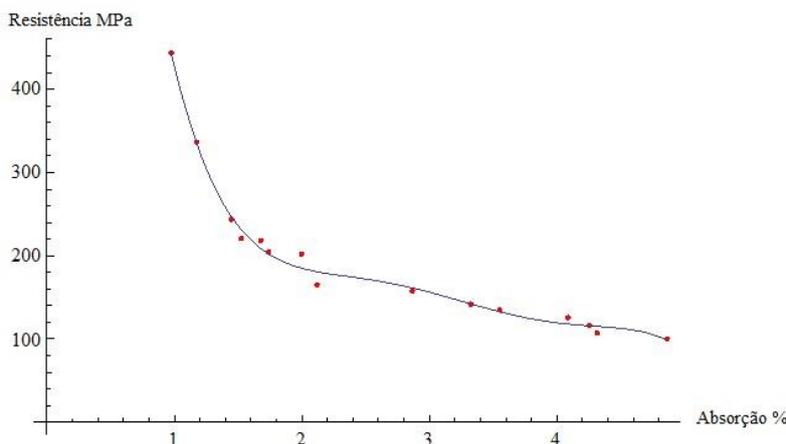


Figura 10: Gráfico da absorção x resistência da escória.

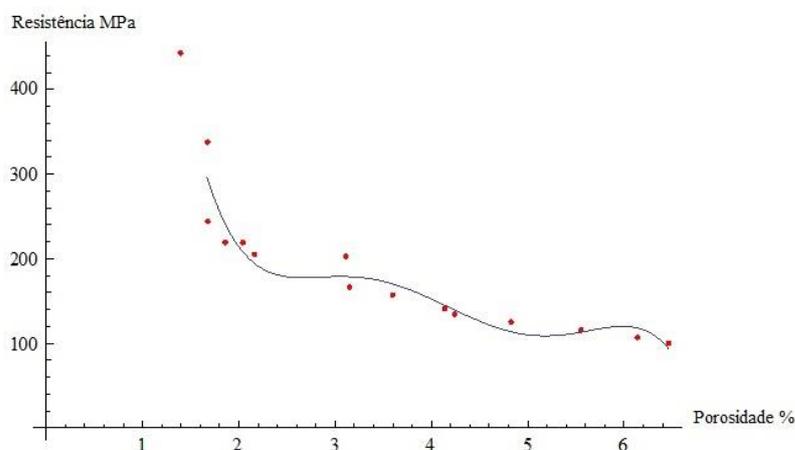


Figura 11: Gráfico da porosidade x resistência da escória.

O modelo matemático possibilitou a obtenção das equações polinomiais e das curvas experimentais, as quais, comprovaram que a escória de aciaria LD com absorção de 4,87 % e um porosidade de 6,47 % apresenta uma resistência de 100 Mpa.

Por meio destes resultados, a escória, mesmo com uma absorção e porosidade acima do preconizado pela norma apresenta uma resistência à compressão uniaxial igual ao limite da norma.

A amostra de gnaïsse com uma resistência à compressão uniaxial de 100 MPa apresentou uma absorção igual a 0,568 % e porosidade igual a 0,99 %, ficando assim dentro dos limites da norma em relação ao ensaio de resistência a compressão uniaxial. Porém, para uma absorção acima de 0,75 % e porosidade acima de 1,20 %, apresentou uma resistência a compressão uniaxial de aproximadamente 14 Mpa.

2 Conclusão

De acordo com a norma NBR 5564/2014 para um material ser classificado com lastro deve ter uma resistência à compressão uniaxial de no mínimo de 100 Mpa e apresentar uma absorção de água máxima igual a 0,8 % e porosidade máxima igual a 1,5 %.

A escória de aciaria LD com uma resistência à compressão uniaxial de 100 MPa, apresenta uma absorção igual a 4,87 % e um porosidade de 6,47 %.

Estes resultados comprovam que a escória em estudo pode ter uma absorção de água igual a 4 % e uma porosidade igual a 6 %. Demonstrando que os valores atualmente preconizados pela norma NBR 5564/2014 para a absorção de água e para a porosidade não se aplicam à escória de aciaria LD.

3 Referências

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 5564 - Via férrea – Lastro ferroviário – Requisitos e métodos de ensaios*. Rio de Janeiro, 2014. 26 p.
- American Society for Testing and Materials. *D5731 - Determination of the point load strength index of rock and application to rock strength classifications*. West Conshohocken, PA, USA, 2008. 12 p.
- BALTAZAR, R. P. 2001. *Caracterização do fator expansão de uma escória de aciaria em diferentes processos de cura para uso em pavimentação*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Viçosa.
- BRUNAUER S; EMMETT P. H; TELLER E. 1938. *Adsorption of gases in multimolecular layers*. J. Am. Chem. Soc. 309 – 319.
- BARRETO, R. A. M., OLIVEIRA, R. W. H., FERNANDES, G., SANTANA, M. B. & HILARIO, R. Q. Determinação da Resistência a partir da Porosidade e Absorção de Agregado Rochoso e Coproduto Siderúrgico. XVIII COBRAMSEG Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2016. Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil. 1-8.
- NORTON, F. H. 1973. *Introdução à Tecnologia Cerâmica*. Editora Edgar Blucher Ltda: São Paulo.
- YOSHIMURA, H. N; MOLISANI, A. L; SIQUEIRA, G. R; CAMARGO, A. C; NARITA, N. E; CESAR, P. F; GOLDENSTEIN, H. Efeito da porosidade nas propriedades mecânicas de uma alumina de elevada pureza. *Cerâmica*, 2005. São Paulo, Brasil. vol.51 no.319.