

Determinação da Resistência a Partir da Porosidade e Absorção de Agregado Rochoso e Coproduto Siderúrgico.

Rairane Aparecida Miranda Barreto
UFOP, Ouro Preto, Brasil, rairanebarreto@hotmail.com

Ralph Werner Heringer Oliveira
UFOP, Ouro Preto, Brasil, ralph@em.ufop.br

Gilberto Fernandes
UFOP, Ouro Preto, Brasil, gilberto@em.ufop.br

Murillo Vinicius Bento Santana
UFOP, Ouro Preto, Brasil, mac_archangel@hotmail.com

Ronderson Queiroz Hilario
NUGEO - Núcleo de Geotécnica da Escola de Minas, UFOP, Ouro Preto, Brasil,
rondimq@yahoo.com.br

RESUMO: No passado o agregado rochoso (Gnaiss) se encontrava em abundância na natureza e devido a sua grande variação mineralógica e seu grau de metamorfismo, tem sua resistência à compressão elevada e porosidade baixa, bem com sua absorção, por isso, é amplamente empregado como lastro na pavimentação ferroviária, brita na construção civil e na pavimentação rodoviária como agregado para revestimento e base, além do uso ornamental. Durante anos, a exploração descontrolada das jazidas de gnaiss tem tornado o mesmo cada vez mais escasso, além de degradar o meio ambiente, com isso, é necessário a utilização de novos materiais que possam substituí-lo. Por isso, novas pesquisas vêm sendo realizadas e seus resultados têm comprovado que o coproduto siderúrgico (Escória de Aciaria LD) vem se mostrando um ótimo substituto para o gnaiss, por ter uma resistência acima da do mesmo, mas em contrapartida, sua porosidade e absorção também são maiores. A dinâmica da resistência em função da ocupação dos espaços porosos pela água ou ar (ou seja, em função da porosidade e absorção) em agregados rochosos e coprodutos siderúrgicos sujeitos ao estresse mecânico ainda é pouco conhecida. O objetivo dessa pesquisa foi estudar a relação da resistência em função da porosidade e absorção da brita de gnaiss e da escória de aciaria LD utilizados como lastro na pavimentação ferroviária. Este estudo foi realizado por meio dos ensaios de carga pontual, massa específica aparente, absorção de água, porosidade aparente (preconizados pelas normas ASTM D 5731/2008 e NBR 5564/2014 - Anexo B), adsorção de nitrogênio-Técnica B.E.T., análise microscópica dos poros e um modelo matemático de regressão polinomial e exponencial. Por este motivo foi identificada a morfologia, organização, distribuição e tamanho dos poros da escória e da brita, obtendo assim um conhecimento maior dos materiais para correlacionar a sua resistência com a absorção e porosidade. 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 apresentou uma absorção de 4% e porosidade de 6%. Sendo assim, os valores preconizados pela norma NBR 5564 (2014), não se aplicam às escórias de aciaria LD, pois a mesma demonstra que, mesmo tendo uma absorção e porosidade acima do estipulado pela norma, sua resistência a compressão uniaxial se mantém elevada.

PALAVRAS-CHAVE: Lastro Ferroviário, Escória de Aciaria LD, Correlação da Resistência/Absorção/Porosidade.

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.

O transporte ferroviário brasileiro registrou significativo crescimento desde o início das concessões à iniciativa privada. Nas duas últimas décadas, houve considerável aumento do volume de produtos transportados e da produção ferroviária, além de melhorias na segurança e na qualidade do serviço (CNT, 2015).

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 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

provenientes de cada processo de produção do aço, ligas etc. A Figura 1 apresenta alguns dos processos de fabricação do aço e a geração de coprodutos/resíduos (Mancio, 2001).

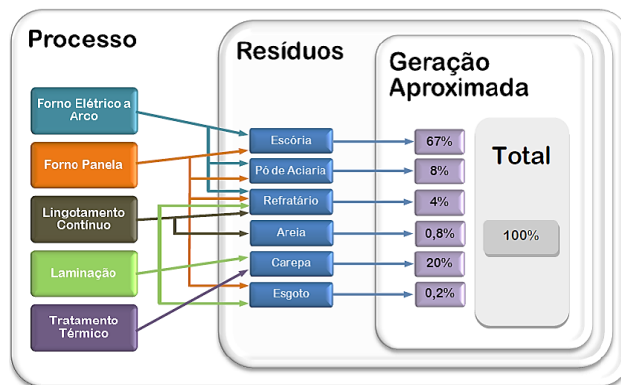


Figura 1. Processos de fabricação do aço e a geração de resíduos (Mancio, 2001).

Dentre elas, em especial para esta pesquisa, 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 vem sendo utilizada para algumas aplicações na construção civil, havendo, porém, a necessidade de passar por um tratamento que proporcione a estabilização dos óxidos expansivos por meio de um período de estabilização química ou cura, visando à estabilização e a melhoria das propriedades da mesma.

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

Mas por não haver normas técnicas específicas para coprodutos siderúrgicos utilizados como agregados na 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 OBJETIVO

O objetivo desse trabalho de pesquisa é estudar a relação da resistência em função da porosidade e absorção da brita de gnaiss 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 ASTM D5731/2008 e NBR 5564/2014 - Anexo B), adsorção de nitrogênio-Técnica B.E.T., análise microscópica dos poros e um modelo matemático de regressão polinomial e exponencial.

Por este motivo foi identificado a morfologia, organização, distribuição e tamanho dos poros da escória e da brita, obtendo assim um conhecimento maior das estruturas dos materiais para correlacionar a sua resistência com a absorção e porosidade.

Segundo a NBR 5564 (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. Pois a resistência de um material também está ligada à sua porosidade e absorção.

Seguindo este conceito, os resultados do modelo matemático de regressão polinomial e exponencial 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 máxima de aproximadamente 4% e porosidade máxima de aproximadamente de 6%.

Sendo assim, os valores preconizados pela norma NBR 5564 (2014), não se aplicam as escórias de aciaria LD.

3 METODOLOGIA

Com o intuito de comprovar que os valores de porosidade e absorção de água da escória de aciaria LD podem ser maiores que os limites estabelecidos para agregados rochosos pela norma NBR 5564 (2014). Objetivou-se alcançar maiores informações a respeito de cada

material. Tendo como propósito, correlacionar a sua resistência com a sua porosidade e absorção de água.

Para a realização destes ensaios foram selecionadas, aleatoriamente, duas amostras, sendo uma de gnaiss e uma de escória de aciaria LD, 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.

3.1 Ensaios de massa específica aparente, porosidade aparente e absorção de água

Para os ensaios de massa específica aparente, porosidade e absorção de água, as amostras de gnaiss e de 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, em seguida, 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 (2014) – Anexo B – Determinação da massa específica aparente, porosidade aparente e absorção de água. A Figura 2 apresenta os equipamentos utilizado no ensaio.



Figura 2. Beckers e balança para a determinação da massa específica, absorção e porosidade.

3.2 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 ASTM D5731 (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 a partir da carga de ruptura, estimado com base na equação:

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

Sendo:

I_s - Índice de carregamento pontual;

P - Carga de ruptura;

D_e - Diâmetro equivalente das partículas.

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

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

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.

3.3 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 800x, da marca PANTEC, na qual foram identificados e analisados os poros do gnaiss e da escória (Figura 4).



Figura 4. Microscópio óptico trinocular.

3.4 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 podem ser identificados.

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

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

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:

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

Onde:

n_a - Número Avogadro que é constante;

a_m - Área transversal ocupada por cada molécula de nitrogênio ($0,162 \text{ nm}^2$);

m - Peso da amostra;

v_L - Volume molar de gás nitrogênio (22.414 cm^3).

A teoria se baseia no pressuposto de que a primeira camada adsorvida envolve energias

adsorção/adsorvente, e as seguintes camadas as energias de interação absorção/adsorção.

3.5 Modelagem matemática de regressão polinomial e exponencial

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.

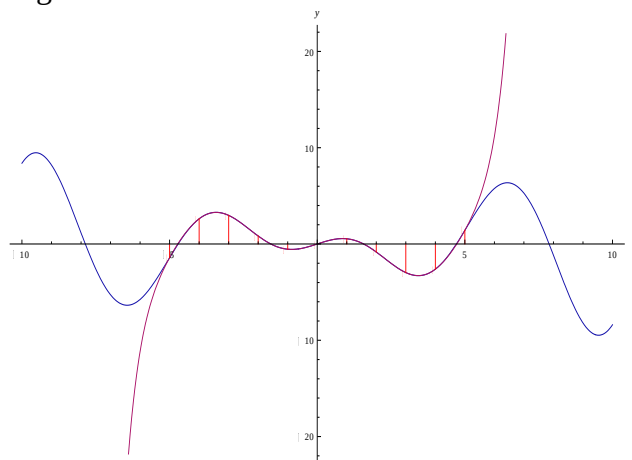


Figura 5. Microscópio óptico trinocular.

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.

4 RESULTADO DOS ENSAIOS

4.1 Ensaios 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 (%)
Gnaise	2,69	0,51	0,87
Escória	3,44	1,66	4.20

4.2 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 a Compressão Uniaxial δ_{uc} (MPa)		Índice de Anisotrópico $I_{a(50)}$
	Plano perpendicular	Plano paralelo	Plano perpendicular	Plano paralelo	
Gnaise	8,49	7,58	182,94	159,98	1,12
Escória	7,49	7,65	183,38	187,38	0,97

4.3 Análise microscópica dos poros

As amostras de gnaise e escória foram submetidas a uma análise microscópica realizada com um microscópio óptico trinocular, na qual foram identificados e analisados os poros do gnaise e da escória.

As Figuras 6 a 9 mostram como é a morfologia, organização, distribuição e tamanho de poros do gnaise e da escória de aciaria LD.

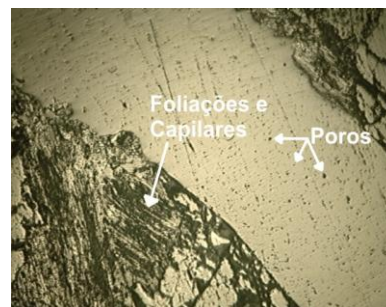


Figura 6. Poros do gnaise (aumento de 50x).



Figura 7. Poros do gnaise (aumento de 250x).

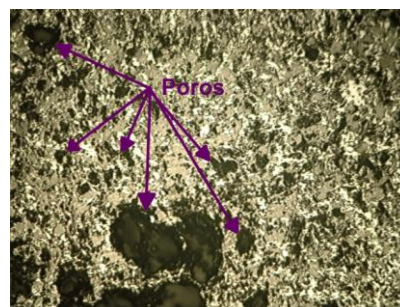


Figura 8. Poros da escória (aumento de 50x).

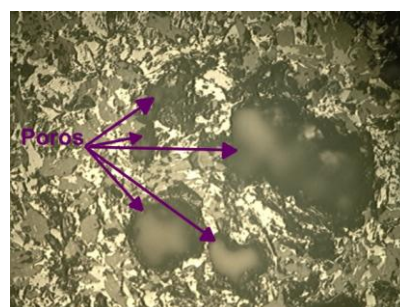


Figura 9. Poros da escória (aumento de 250x).

As microfotografias da escória de aciaria LD permitem identificar a morfologia, a organização e a distribuição dos poros, e possibilitam identificar que não existem 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 gnaiss 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 gnáissico (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 gnaiss é formado por poros aberto e abertos cilíndricos, mas em diâmetro menores, o que possibilita uma menor porosidade, absorção e massa específica.

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

Os parâmetros mais comumente utilizados para a caracterização da forma de partículas ou de superfície são apresentados nas Tabelas 3 a 5 abaixo que mostram os resultados do ensaio de adsorção de nitrogênio do gnaiss e da escória.

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

Material	Densidade (g/cm ³)	Superfície Específica B.E.T. (m ² /g)	Volume de Micrósporos (cm ³ /kg)
Gnaiss	2,65	2,14	0,0010
Escória	3,14	3,44	0,0016

Tabela 4. Resultado do ensaio de adsorção de nitrogênio-técnica B.E.T.

Material	Área de Micrósporos (m ² /g)	Tamanho Médio dos Micrósporos (nm)	Volume Total de Poros (cm ³ /kg)
Gnaiss	2,82	5,91	0,00648
Escória	4,63	5,06	0,01159

Tabela 5. Resultado do ensaio de adsorção de nitrogênio-técnica B.E.T.

Material	Diâmetro Máx. dos Poros (Å)	Diâmetro Médio dos Poros (Å)
Gnaiss	1331,1	121,1
Escória	1458,1	134,6

O gnaiss apresentou uma densidade menor que a escória. A baixa densidade do gnaiss 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 gnaiss 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 gnaiss 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 e exponencial

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 que melhor se ajustaram aos polinômios estão representadas pelas Figuras 10 a 13 que mostram os gráficos da curva plotada até 6 % da porosidade e absorção x resistência.

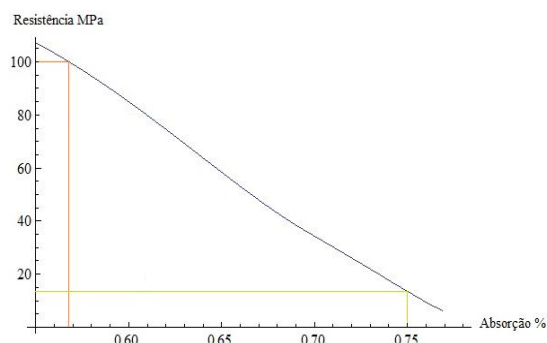


Figura 10. Gráfico da absorção x resistência do gnaiss.

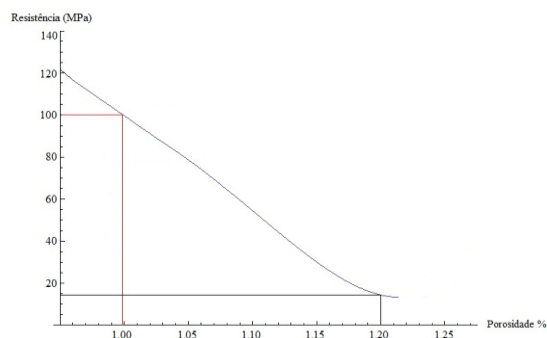


Figura 11. Gráfico da porosidade x resistência do gnaíse.

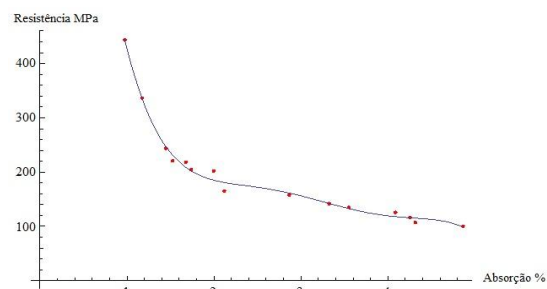


Figura 12. Gráfico da absorção x resistência da escória.

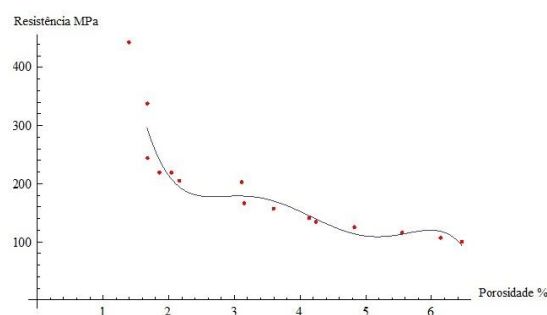


Figura 13. Gráfico da porosidade x resistência da escória.

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 gnaíse 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 à compressão uniaxial de aproximadamente 14 MPa.

5 CONCLUSÕES

Segundo a norma NBR 5564 (2014), o material classificado como lastro deve ter uma resistência à compressão uniaxial mínima de 100 MPa e apresentar uma absorção máxima de 0,8 % e porosidade máxima de 1,5 %.

A escória de aciaria LD para uma resistência à compressão uniaxial de 100 MPa apresentou uma absorção de até 4 % e uma porosidade de até 6 %. Demonstrando que os valores da norma para a absorção e para a porosidade não se aplicam à escória. Pois a mesma demonstra que, mesmo tendo uma absorção e porosidade acima do estipulado pela norma, sua resistência à compressão uniaxial se mantém elevada.

REFERÊNCIAS

- ASTM (2008). Determination of the point load strength index of rock – D5731. American society for testing and materials, west conshohocken, PA, USA, 7p.
- Baltazar, R.P. Caracterização do fator expansão de uma escória de aciaria em diferentes Processos de cura para uso em pavimentação. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 77p, 2001.
- Brunauer S.; Emmett P. H.; Teller E., (1938). Adsorption of gases in multimolecular layers. J. Am. Chem. Soc.
- CNT - Confederação Nacional do Transporte, (2015). Pesquisa CNT de Ferrovias 2015. Brasília.
- NBR 5564/2014. Via férrea – Lastro ferroviário – Requisitos e métodos de ensaios. Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- MANCIO, M. Caracterização e avaliação das escórias de aciaria elétrica. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.
- Norton, F. H. (1973). Introdução à Tecnologia Cerâmica. Edgar Blucher Ltda: São Paulo.
- Takano, C.; Capocchi J. D. T.; Nascimento, R. C.; Mourão, M. B.; Santos, D. M.; Lenz G. A reciclagem de resíduos siderúrgicos sólidos. Seminário nacional sobre reuso/reciclagem de resíduos sólidos industriais, São Paulo, 2000.
- Yoshimura, H. N, A. L. Molisani, G. R. Siqueira, A. C. de Camargo, N. E. Narita, P. F. Cesar, H. Goldenstein. (2005). Efeito da porosidade nas propriedades mecânicas de uma alumina de elevada pureza.