CBPAT 2020 ANAIS
CONGRESSO BRASILEIRO DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES
DE 15 A 17 DE ABRIL | FORTALEZA - CE
http://dx.doi.org/10.4322/CBPAT.2020.096
ISBN 978-65-86819-05-2

RESISTIVIDADE ELÉTRICA EM CONCRETOS DE ESCÓRIA DE ACIARIA COM BAIXO CONSUMO DE CIMENTO

MELO, TAINÁ
Mestranda em Construção Civil
Universidade Federal de Minas Gerais
Minas Gerais; Brasil
tainavarela@hotmail.com

AGUILAR, MARIA
Professora, D.Sc
Universidade Federal de Minas Gerais
Minas Gerais; Brasil
mtpaguilar@gmail.com

PEIXOTO, RICARDO
Professor, D.Sc
Universidade Federal de Ouro Preto
Minas Gerais; Brasil
fiorotti.ricardo@gmail.com

COSTA, LAÍS
Doutoranda em Engenharia Civil
Universidade Federal de Ouro Preto
Minas Gerais; Brasil
lais.cristina.costa@gmail.com

AZZI, SARAH
Mestranda em Construção Civil
Universidade Federal de Minas Gerais
Minas Gerais; Brasil
saraazzi@hotmail.com

RESUMO

Com a análise da resistividade elétrica pode-se inferir a capacidade de penetração de agentes agressivos na matriz do concreto. Visto que, a técnica avalia o fluxo de íons que percorrem o concreto através da solução aquosa situada em seus poros. É crescente a busca por materiais alternativos que substituam os agregados naturais e cimento, portanto, avaliar as matrizes que os contém perante a durabilidade é imprescindível. Este trabalho se propõe a avaliar concretos com baixo consumo de cimento (inferior a 90 kg/m³) perante a resistividade elétrica, com a utilização da escória de aciaria LD como agregados graúdo, miúdo e material cimentício suplementar (MCS), com consumos de materiais reciclados de até 96,5% em volume de sólidos. Avaliou-se a potencialidade de corrosão das armaduras de dois tipos de concretos: com agregados convencionais, outro com agregados de escória. Ambos possuem a mesma quantidade de finos de escória como MCS. Todos os concretos foram classificados como de excelente qualidade, quanto a velocidade de pulso ultrassônico, já a resistividade indicou alto risco de corrosão. Esse resultado pode ser justificado pelas caraterísticas físicas e químicas dos componentes da matriz, que interferem diretamente no seu desempenho. Além disso, o significativo volume de resíduo utilizado contribui para viabilidade desse concreto em outros ambientes.
Palavras-chave: Resistividade elétrica, escória de aciaria, concreto, baixo consumo de cimento, agregados, corrosão.

ABSTRACT

With the analysis of the electrical resistivity one can infer the penetration capacity of aggressive agents in the concrete matrix. Since, the technique evaluates the flow of ions that travel the concrete through the aqueous solution located in its pores. The search for alternative materials that replace natural aggregates and cement is increasing, so evaluating the matrices that contain them in the face of durability is essential. This work aims to evaluate low cement consumption concretes (less than 90 kg / m³) in relation to electrical resistivity, using basic oxygen furnace slag as coarse aggregates, fine aggregate and cementitious material (MCS), with material consumptions up to 96.5% by volume of solids. The corrosion potential of the reinforcement of two types of concrete was evaluated: with conventional aggregates, another with slag aggregates. Both have the same amount of slag fines as MCS. All concretes were classified as of excellent quality, as the ultrasonic pulse speed, while the resistivity indicated high risk of corrosion. This result may be justified by the physical and chemical characteristics of the matrix components, which directly interfere with their performance. In addition, the significant volume of waste used contributes to the viability of this concrete in other environments.
Keywords: Electrical resistivity, steel slag, concretes, low cement consumption, aggregates, corrosion.

ISBN 978-65-86819-05-2

1. INTRODUÇÃO

Existe uma pressão crescente na indústria da construção para melhora da sua ecoeficiencia e redução do consumo de recursos naturais. Um dos métodos mais eficientes nesse sentido é o uso de sistemas com baixo consumo de cimento, o através de modelos de empacotamento de partículas e utilização de materiais cimentícios suplementares é obtido o concreto de baixo consumo de cimento (LCC), (YOUSUFA, SANCHEZB e SHAMMEH, 2019). Embora seja ecoeficiente, o uso de LCC estrutural é algo novo e seu desempenho e sua performance a longo prazo ainda são relativamente desconhecidos.

A NBR 12655 (ABNT, 2006) estabelece o mínimo de 260 kg/m³ consumo de cimento para concretos estruturais, enquanto o respectivo limite da Norma Europeia é 240 kg/m³, para não haja risco de corrosão em concretos armados (DAMINELI, KEMEID, et al., 2010). Entretanto Wassermann citado por Damineli et al (2010) demonstra que a performance dos indicadores de durabilidade não são afetados (retração e profundidade de carbonatação) ou até melhoram (penetração de cloretos e absorção de água), quando o consumo de cimento é reduzido dentro dos limites investigados.

A escória de aciaria beneficiada pode ser usada como matéria-prima em diversos setores industriais, destacando-se o seu uso como agregados para pavimentações e na construção civil (TOFFOLO, 2015). Tal reaproveitamento diminuirá o uso de recursos naturais, reduzindo o acúmulo de resíduos em pátios e incrementando o desenvolvimento regional e tecnológico, além de agregar valores para esse coproduto do processo siderúrgico (OLIVEIRA, PEIXOTO e ALVES, 2007).
A utilização da escória de aciaria como agregados e materiais cimentícios suplementares vem ganhando espaço no que compete ao desenvolvimento de concretos ecoeficientes com desempenhos similares aos dos concretos com materiais convencionais. Esse fato se deve às boas propriedades químicas e mecânicas da escória de aciaria, que incentiva a sua incorporação em concretos na forma de agregados ou como material cimentício suplementar (CARVALHO, 2019).

A avaliação de parâmetros de durabilidade é imprescindível quando se refere a avaliação do desempenho de concretos com baixo consumo de cimento. A realização de ensaios de resistividade elétrica e velocidade pulso ultrassônico são uma alternativa para análise das caracteríticas do concreto, no que se refere a uniformidade, permeabilidade, compacidade e por consequência, durabilidade. Entretanto, aspectos como composição química dos agregados e porosidade da matriz contribuem intesamente nos resultados obtidos, fazendo-se necessário correlacionar vários ensaios para inferir algum comportamento perante a durabilidade.

O ensaio de resistividade elétrica do concreto é uma técnica de análise não destrutiva e pode ser utilizado para monitoramento e inspeção de estruturas de concreto, bem como, inferir o potencial de corrosão da armadura . Além disso, trata-se de uma propriedade que está diretamente vinculada à composição química da solução aquosa dos poros, da própria estrutura dos poros, além da temperatura e umidade do concreto (JESUS, 2018). Diante dessas características a matriz pode atuar como um isolante ou um semicondutor elétrico. Segundo Monfore (1968) a condução da corrente elétrica através do concreto é de origem eletrolítica e ocorre por meio dos íons presentes na água evaporável das pastas de cimento (Ca+ +, Na+, K+, OH- e SO4- -). A resistividade elétrica é inversamente proporcional a relação água/cimento, o que indica que a utilização de metologias de empacotamento e uso de partículas finamente cominuídas podem contribuir para o aumento da resistividade (H.M. GHASEMZADEH, 2009).

O ensaio de velocidade pulso ultrassônico possibilita a realização de inferâncias no que compete a porosidade, uniformidade e possíveis defeitos presentes nas matrizes avaliadas, e desse modo analisar o estados de conservação dos elementos de concreto armado atuantes (KOMLOS, POPOVICS, *et al.*, 1996). Baseando-se com os resultados de velocidade pulso ultrassônico, os concretos podem ser classificados quanto a sua integridade e qualidade, sendo classificados em excelente, bom, duvidoso e pobre de acordo com as suas respectivas velocidades de pulso (SAINT-PIERRE, PHILIBERT, *et al.*, 2016).

O presente trabalho se propõe a produzir concretos com baixo consumo de cimento com a utilização da escória de aciaria com base em metodologia descrita na literatura, com o uso desse subproduto como agregados graúdo, miúdo e material cimentício suplementar na matriz. Além disso, será realizada a avaliação do seu desempenho perante o ensaio de resistividade elétrica em concomitância ao estudo do seu comportamento diante ao ensaio de velocidade pulso ultrassônico e da composição química dos seus materiais constituintes.

ISBN 978-65-86819-05-2

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

O aglomerante utilizado será o cimento de alta resistência inicial CPV-ARI-MAX (Brennand cimentos, Sete lagoas, MG), cuja massa específica é de 3,04 g/cm³. Esse cimento foi escolhido por se tratar de um produto de elevado teor de clínquer. Como agregado miúdo convencional, foi empregado uma areia natural quartzosa de rio, cuja massa específica é de 2,68 g/cm³, proveniente da região de Ponte Nova, MG. Uma rocha britada de origem gnaissica, cuja massa específica é de 2,64 g/cm³, proveniente de Ouro Preto, MG foi utilizada como agregado graúdo.

Para a produção dos agregados de escória e do material cimentício suplementar, denominado finos de escória, foram utilizadas escórias de aciaria, do tipo Linz-Donawitz (LD), cuja massa específica é de 3,77 g/cm³, proveniente de João Monlevade, MG. Este material foi recebido e estocado no pátio do Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal de Ouro Preto, onde foi submetido a processo de intemperização por meio de ciclos de molhagem e secagem por 4 anos. Processo eficiente na estabilização dos seus óxidos (TOFFOLO, 2015)

A fim de melhorar a trabalhabilidade das matrizes produzidas e reduzir seu teor de água foi empregado o aditivo superplastificante Powerflow 4000 (McBauchemie). Além disso, as matrizes foram produzidas com água potável fornecida pelo sistema público de abastecimento da cidade de Ouro Preto.

2.2 Métodos

2.2.1 Caracterização dos materiais

Para a caracterização química dos materiais empregados foi efetuada a técnica de Fluorescência de Raios-X (FRX), utilizando-se o equipamento PANalytical Epsilon3x. A análise semi-quantativa foi feita empregando-se o banco de dados Omnia constante no software do fabricante do equipamento.

A distribuição granulométrica dos finos de escória, bem como do cimento, foram feitas utilizando-se a técnica de granulometria de laser. O equipamento empregado foi o analisador de partículas Bettersizer 2000 e o líquido utilizado foi álcool isopropílico.

2.2.2 Produção dos materiais

2.2.2.1 Produção dos agregados de escória de aciaria LD

Os agregados foram produzidos de modo a se obter um material que atenda o quantitativo de material necessário para a produção dos concretos, estimados em função do traço, conforme proposto por Carvalho (2019) para tanto os procedimentos utilizados serão:

- Separação da fração magnética por via seca em rolo magnético (Inbras CC Ø12 x 12, intensidade 5000 Gauss) e armazenamento das frações não-magnéticas.
- Cominuição do material retido na peneira 25 mm, proveniente da separação magnética, em britador de mandíbula.

Os agregados graúdos foram produzidos após o protocolo citado por meio de peneiramento e separação das frações, afim de se obter um material na faixa granulométrica referente aos retidos nas peneiras 2,36 mm; 4,75 mm; 6,30 mm e 9,50 mm. Enquanto os agregados miúdos foram produzidos inicialmente a partir do material excedente da produção do agregado graúdo, de modo semelhante à metodologia apresentada para a produção do agregado graúdo. E a separação das frações que compõem a faixa granulométrica foi feita por peneiramento e a montagem do material foi feita posteriormente de modo a se obter um material separado nas fações retidas das peneiras 0,15 mm; 0,30 mm; 0,60 mm e 1,18 mm. O material excedente será descartado.

2.2.2.2 Produção dos agregados convencionais

Os agregados convencionais (miúdo e graúdo) foram submetidos à peneiramento a fim de que todos estivessem com curva granulométrica idêntica aos agregados de escória de aciaria LD, conforme o traço proposto por Carvalho (2019).

ISBN 978-65-86819-05-2

Ambos agregados graúdos e miúdos foram beneficiados de forma a atender as especificações da ABNT NBR 7211:2005. Desse modo, foi possível produzir concretos fisicamente semelhantes, no intuito de compreende a verdadeira influência da morfologia e composição do material nas suas propriedades.

2.2.2.3 Produção dos finos de escória

Os finos de escória foram produzidos a partir dos agregados miúdos de escória produzidos. Duas granulometrias distintas foram produzidas: o Fino Grosseiro (FG), obtido por meio de moagem convencional em moinho de bolas (Marconi, MA500) durante 3 horas com velocidade de 200 rpm; e o Fino Refinado (FR), produzido a partir da moagem adicional do fino grosseiro por meio de moagem adicional em moinho de alta eficiência (Retsch, PM100) durante 15 minutos e com velocidade 400 rpm.

2.2.3 Determinação dos traços

A escolha do traço foi determinada a partir do trabalho de Carvalho (2019) e estão expostos na Tabela 1.

Tabela 1. Traço dos concretos estudados

Traço	Concreto com agregados convencionais	Concreto com escória de aciaria LD
Volume (%)	Materiais	Materiais
3,47	Cimento	Cimento
3,47	Fino de escória refinado	Fino de escória refinado
29,17	Fino de escória grosseiro	Fino de escória grosseiro
5,56	Areia de Rio 0,15-0,30mm	Areia de escória 0,15-0,30mm
8,33	Areia de Rio 0,30-0,60mm	Areia de escória 0,30-0,60mm
9,03	Areia de Rio 0,60-1,18mm	Areia de escória 0,60-1,18mm
10,42	Areia de Rio 1,18-2,36mm	Areia de escória 1,18-2,36mm
11,11	Brita Gnaisse 2,36-4,75mm	Brita de escória 2,36-4,75mm
6,25	Brita Gnaisse 4,75-6,30mm	Brita de escória 4,75-6,30mm
6,25	Brita Gnaisse 6,30-9,50mm	Brita de escória 6,30-9,50mm
6,94	Brita Gnaisse 9,5-12,5mm	Brita de escória 9,5-12,5mm

O traço desenvolvido possui uma água / sólidos ótima de 0,23 em concretos com agregados convencionais e 0,24 em concretos com agregados de escória para o alcançe de uma reologia semelhante. Foi utilizado 1% de aditivo da massa de finos, de acordo com o protocolo adaptado de dosagem ótima proposto por Aitcin (2000) e determinado por Carvalho (2019). Essas condições implicam no empacotamento ótimo dos protótipos, resultando em uma diminuição significativa de vazios e menor consumo de água.

Além da abordagem de empacotamento ótimo, o traço estudado visa um maior consumo de materiais reciclados, afim de avaliar sua eficiência. Assim, as matrizes estudas é composta por 96,5% de materiais reciclados tendo um consumo de cimento de 86,6 Kg/m³.

2.1.3.1 Produção dos concretos

Para determinação do protocolo de produção do concreto foi utilizada a metodologia adaptada proposta por Carvalho (CARVALHO, 2019). Devido à dificuldade de homogeneização das adições, estas foram misturadas a água junto com o aditivo e utilização do método manual de concretagem, com a utilização de um recipiente de plástico e espátula. Os agregados miúdos foram secos em estufa a 105ºC durante 24 horas e os agregados graúdos foram utilizados na condição saturada em superfície seca. Com esse protocolo alcançou-se maior dispersão das partículas e melhor trabalhabilidade do concreto no estado fresco.

A cada mistura eram inseridos materiais suficientes para moldagem de 5 corpos de prova. A ordem de preparo foi: agregado miúdo; finos de escória de aciaria; cimento; agregado graúdo, sendo que a cada incremento de material granular, houve uma homogeneização de um tempo médio de 30 segundos. Após a mistura, metade do volume de água com aditivo foram inseridos no sistema, durante um tempo médio de mistura de 2 minutos, e posteriormente a outra metade foi

ISBN 978-65-86819-05-2

adicionada cuidadosamente afim de alcançar uma consistência igual em ambos os traços. Em seguida foram realizados o ensaio de índice de consistência, conforme a NBR 13276 (ABNT, 2016), sendo fixado um espalhamento de 30 $\pm$ 1 cm para ambos os traços, visando manter as características reológicas do concreto independente das variáveis morfológicas dos agregados.

Todo o processo de fabricação do concreto teve como tempo máximo, por traço, o intervalo de 1 hora, evitando qualquer alteração no traço devido à pega do cimento. Os corpos de prova foram adensados em 3 intervalos de camadas, com 10 golpes por camada, e curados por 7 e 28 dias em câmara úmida com umidade e temperatura controlada (23±2°C e 95%). Foram moldados e nivelados com serra diamantada 90 corpos de prova cilíndricos (Ø50x100mm) para o desenvolvimento do projeto.

3.2.1.2 Resistividade elétrica

Nesse trabalho será utilizado a metodologia de teste de resistividade elétrica adaptada da normatização brasileira NBR 9204 (ABNT, 2004) pelo Laboratório de Caracterização de Materiais da UFMG. Assim, utilizando um aparelho composto por: um gerador de Sinais da Politerm de modelo FG-8102, banco de Resistências, osciloscópio da Tektronix TDS 1012B, duas placas de cobre.

Essa metodologia é uniaxial volumétrica onde o corpo de prova de concreto será submetido a dois eletrodos (duas placas quadradas de cobre de espessura referente a 2mm e arestas de 100 mm). Uma corrente alternada de frequência aproximada de 40 Hz será aplicada e a medidas as quedas dos potenciais entre os eletrodos serão verificadas.

Para determinar a resistividade elétrica, deve-se conhecer a seção transversal, e o comprimento do material. Quanto maior a seção transversal, menor a resistência, devido a facilidade da passagem dos elétrons pelo material. A Figura 1 expõe as variáveis envolvidas no corpo de prova durante a realização do ensaio.

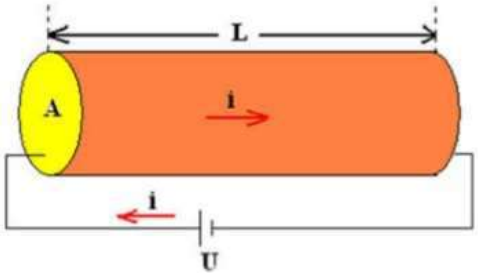


Figura 1. Modelo esquemático das variáveis envolvidas no corpo de prova

Fonte: Silva 2015

Assim, relacionando as grandezas determinadas do corpo de prova e com o resultado obtido pelo aparelho, obtêm-se uma equação para determinação da resistividade elétrica, indicada na Equação 1.

$$\rho = \frac{(A*R)}{L}$$ Equação 1:

Onde que:
R é a resistência elétrica (Ω/m);
ρ é a resistividade elétrica específica do material (Ω.m);
L é o comprimento (m);
A é a área de seção transversal (m²).

Foram moldados 3 corpos de prova cilíndricos por traço, com dimensões (Ø50x100mm), e partir dos resultados obtidos, poderemos inferir o risco de penetração de íons cloreto no concreto analisado de acordo com a Tabela 2. Na Figura 2 são apresentados os componentes necessários para a realização do ensaio.

ISBN 978-65-86819-05-2

Tabela 2. Classificação quanto à penetração de íons cloreto

Resistividade do concreto (Ohms/m)	Classificação quanto à penetração de íons
< 52	Alto
52 – 104	Moderado
208 – 2070	Médio
> 2070	Desprezível

Fonte: AASHTO TP 119 15 adaptado

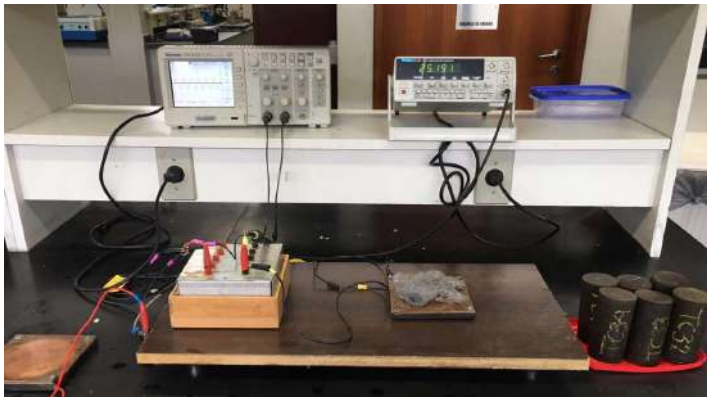


Figura 2. Conjunto do ensaio de resistividade elétrica

2.2.1.3 Velocidade de pulso ultrassônico

O método de ensaio para determinar a velocidade de propagação de ondas longitudinais, obtidas por pulsos ultrassônicos, através de um componente de concreto, é prescrevido pela NBR 8802 (ABNT, 2019). Desse modo, foram moldados 3 corpos de prova cilíndricos (Ø50x100mm) para avaliação desse parâmetro. O ensaio foi realizado após 28 dias de cura, sendo que sua base e o topo foram polidos e recobertos por uma camada de vaselina para homogeneizar o contato entre as superfícies e o transdutor.

A velocidade de pulso ultrassônico (VPU) foi obtida com o equipamento TICO (Proceq), exposto na Figura 3, com pulsos ultrassônicos de 54Hz e medições diretas. Com base no resultado de VPU os concretos foram classificados quanto a sua qualidade/integridade. O concreto é classificado como excelente, bom, duvidoso e pobre para os respectivos intervalos de velocidade de pulso: >4500 m/s; 4500-3500 m/s; 3500-3000 m/s; e <3000 m/s (SAXENA e TEMBHURKAR, 2018; SAINT-PIERRE, PHILIBERT, *et al.*, 2016).

A Norma C597-09 (ASTM, 2019) propõe uma estimativa de determinação do módulo de elasticidade baseado na velocidade de onda, massa específica do elemento e coeficiente de Poisson do material por meio do uso da Equação 2.

$$E = \rho V^2 \frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{(1-\mu)} \quad \text{Equação 2:}$$

Em que,
E é o módulo de elasticidade (MPa),
V é a velocidade Pulso Ultrassônica (Km/s);
μ é o coeficiente de Poisson;
ρ é a massa específica (Kg/m³);

ISBN 978-65-86819-05-2



Figura 3. Conjunto do ensaio de velocidade pulso ultrassônico

2.2.1.4 Resistência à compressão uniaxial

Foram moldados 4 corpos de prova cilíndricos por traço, com dimensões (Ø50x100mm), os quais foram submetidos a ensaio de compressão, conforme metodologia prescrita pela NBR 5739 (ABNT, 2018). Todos os corpos de prova foram nivelados em uma serra diamantada e capeados com enxofre afim de mitigar qualquer possível desnivelamento Os ensaios foram realizados com 7 e 28 dias de idade, na prensa hidráulica EMIC.

3. RESULTADOS

3.1. Caracterização dos materiais

Na Tabela 3 são apresentados os resultados das análises químicas dos materiais utilizados no projeto obtidos por FRX.

Tabela 3. Resultados da análise química dos materiais

Composto	Escória LD	Areia de Rio	Brita Gnaisse
SiO_2	14,40%	60,60%	69,40%
Al_2O_3	3,60%	30,30%	15,90%
Fe_2O_3	30,30%*	4,70%	1,70%
CaO	36,20%	0,50%	2,60%
MgO	5,00%	-	0,70%
K_2O	-	1,70%	2,60%
SO_3	0,30%	1%	-
MnO	3,70%	0,10%	-
Cr_2O_3	0,008	-	-

*Após separação magnética

Os dados obtidos mostraram-se condizentes com o reportado pela literatura (CARVALHO, BORGES, *et al.*, 2017; ANDRADE, 2019). Os resultados da análise granulométrica obtida pela técnica do espalhamento do feixe de laser dos dois finos de Escória LD produzidos (grosseiro e refinado)e do cimento são apresentados na Tabela 4.

ISBN 978-65-86819-05-2

Tabela 4. Parâmetros granulométricos dos finos estudados

Parâmetro	Fino grosseiro	Cimento	Fino refinado
D90 (µm)	126,8	36,81	39,49
D50 (µm)	27,13	10,85	8,45
D10 (µm)	1,86	1,74	1,10

Observa-se que os finos de escória LD grosseiro e refinado alcançaram D50 respectivamente maior e menor que a do cimento estudado, atendendo ao objetivo da etapa de produzir um material que complementasse a distribuição granulométrica do cimento. Tal granulometria provavelmente influenciará na qualidade da nucleação proporcionada pelo efeito filer dos finos de escória e consequentemente na ação cimentícia dos mesmos (WANG, YANG e YAN, 2013; DINIZ, CARVALHO , *et al.*, 2017).

3.2 Produção dos concretos

A utilização do ensaio de índice de consistência a fim de parametrizar o comportamento reológico de ambos os traços foi adequado, de forma que todos os concretos apresentaram aspectos visuais semelhantes. O método de moldagem e adensamento mostrou-se eficiente, uma vez que os concretos apresentaram-se com poucos poros aparentes e boa uniformidade ao longo da matriz, sem ser notado brocas, o que pode ser verificada na Figura 5.



Figura 4. Ensio de índice de consistência



Figura 5. Corpos de prova recém desmoldados

3.3 Velocidade pulso ultrassônico e módulo de elasticidade dos concretos

Os resultados obtidos no ensaio de velocidade de pulso ultrassônico (VPU) e módulo de elasticidade são mostrados na Figura 6. Os valores de velocidade de pulso são condizentes com o estudo de Pang, Zhou, & Xu (2015), que afirmam que quando se aumenta o percentual de substituição dos agregados por escória, percebe-se também o aumento da velocidade de pulso ultrassônico dos concretos. Isto ocorreria pois segundo Mehta & Monteiro (2014) e Mendes, et al. (2017) a porosidade e a forma com o que os vazios estão conectados, interferem diretamente o valor da velocidade de pulso ultrassônico.

Os valores de velocidade pulso ultrassônico ficaram entre 4500-3500 m/s. De acordo com a literatura, os dados indicam que ambas as matrizes se encontram uniformes, coesas e compactas(SAINT-PIERRE, PHILIBERT, et al., 2016; SAXENA e TEMBHURKAR, 2018). Dessa forma, pode-se inferir a eficácia da metodologia de empacotamento e moldagem, e competência dos finos de escória como material cimentício suplementar, que tem seu desempenho potencializado com o uso de agregados de escória.

ISBN 978-65-86819-05-2

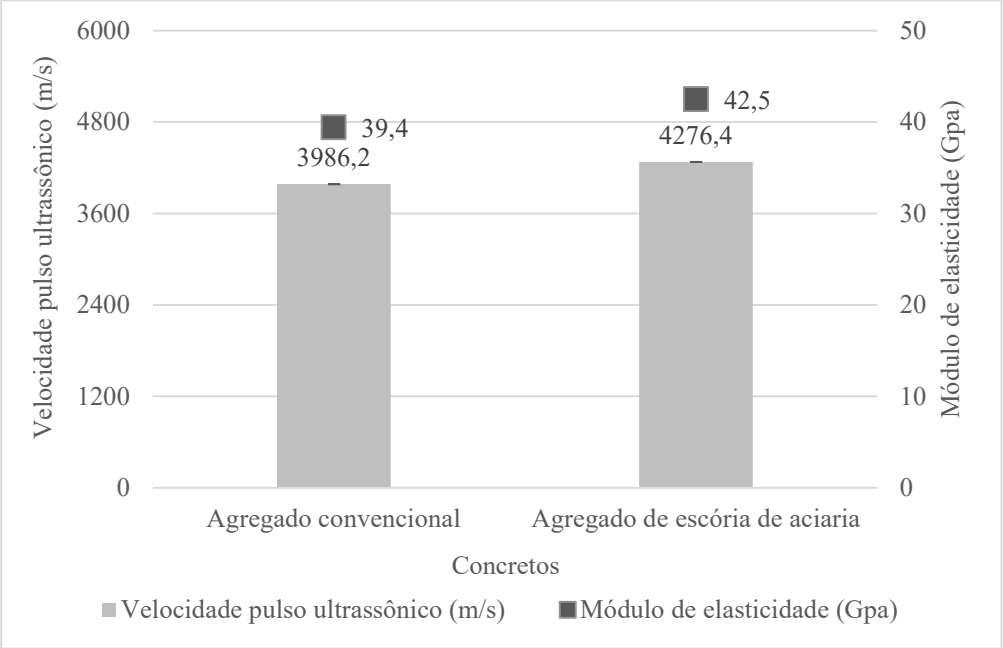


Figura 6. Resultados obtidos no ensaio de velocidade pulso ultrassônico e valores do módulo de elasticidade

Para ambos os concretos, os módulos de elasticidade calculados correspondem a concretos de classe de resistência de 50 MPa produzidos com agregados de granito, segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014). Os dados indicam que o concreto de escória apresenta um módulo de elasticidade ligeiramente superior. Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014), a deformação elástica do concreto está diretamente relacionada a composição do traço, e principalmente da natureza dos agregados. Apesar das diferenças, ambos os concretos apresentam alto módulo de elasticidade o que indica boa coesão e uniformidade, demostrando assim que a distribuição granulométrica foi efetiva no empacotamento das matrizes.

3.4 Resistividade elétrica dos concretos

Os resultados obtidos no ensaio de resistividade elétrica são indicados na Figura 7. Os resultados deste ensaio ficaram entre 35-40 Ohm/m. De acordo com a literatura, os dados indicam que ambas as matrizes possuem alta potencialidade de penetração de íons, já que seus resultados foram inferiores a 54 Ohm/m (AASHTO, 2015).

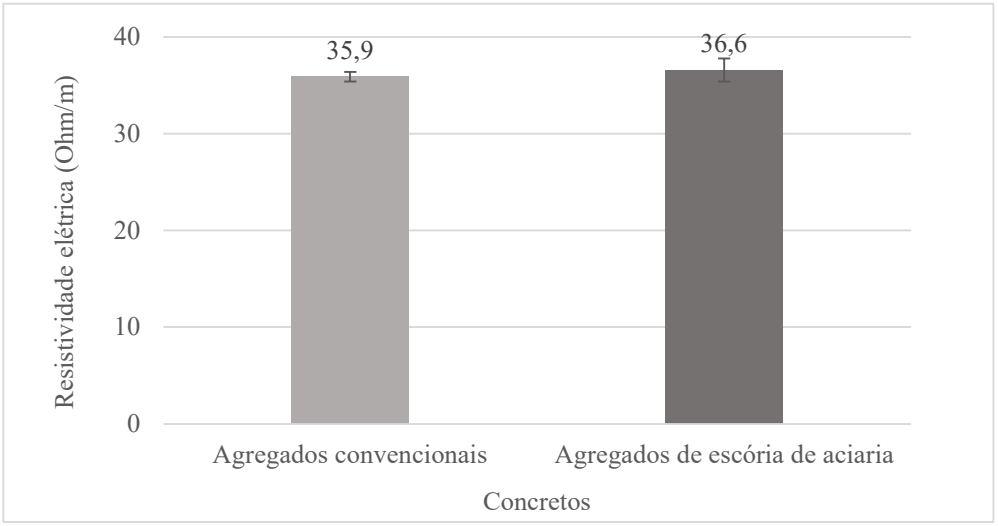


Figura 7 . Resultados do ensaio de resistividade elétrica

ISBN 978-65-86819-05-2

Os resultados de resistividade elétrica não corroboraram com os de velocidade de pulso e nem com a literatura, que afirma que matrizes densamente empacotadas possuem elevada resistividade elétrica. Enquanto o resultados de VPU indicaram uniformidade, coesão e compacidade das matrizes, os valores de resistividade reveleram uma elevada potencialidade de penetração por íons, de acordo com a classificação proposta pela AASHTO (2015), e por consequência elevado risco de corrosão da armadura. Como a penetração de agentes agressivos depende diretamente da estrutura de poros dos concretos, percebe-se a divergência entre os resultados obtidos.

Isso pode ser explicado, devido a composição química da matriz que teve grande influência no resultado do ensaio de resistividade. A escória de aciaria LD apresenta altos teores de materiais metálicos como o ferro e cálcio que elevam a condutividade elétrica da matriz influenciando assim no seu resultado. A normativa da AASHTO (2015) leva em consideração a avaliação de concretos completamente desenvolvidos com agregados convencionais, não sendo capaz de atender as essas especificações provenientes da utilização de materiais reciclados. Desse modo pode-se inferir por meio da correlação dos dois ensaios e da caracterização química dos materiais, que a matriz obteve baixos valores de resistividade não pela potencialidade de penetração de íons e sim pela elevada condutividade elétrica da matriz.

3.4 Resistência à compressão uniaxial

Os resultados de resistência à compressão com 7 e 28 dias de idade, podem ser observados na Figura 8. Constatou-se que ambos os concretos, cujo teor de cimento corresponde a 3,47% do volume de sólidos alcançaram resistências prescritas concretos segundo a normativa NBR 6118 (ABNT, 2014) para concretos estruturais.

A evolução da resistência a compressão nas primeiras idades indica que o concreto de escória alcançou menor resistência, cerca de 32% a menos que o concreto com agregado convencional. Pode-se inferir que esse fato se justifica por meio da morfologia da escória de aciaria, que devido a sua irregularidade, não libera tão rapidamente a água para o sistema quanto a brita gnaisse, levando a menor produção de produtos de hidratação nas primeiras idades.

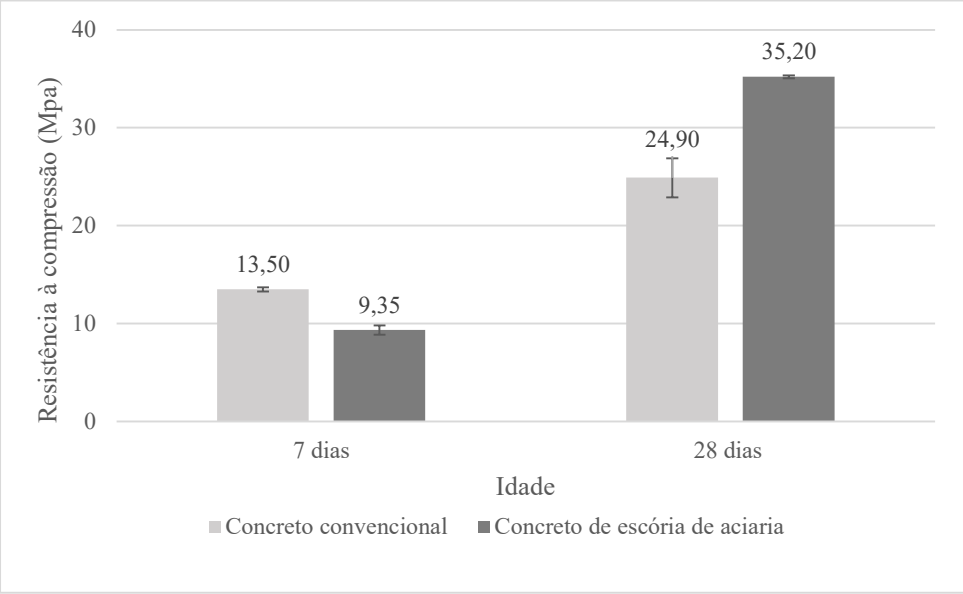


Figura 8. Resultados obtidos no ensaio de compressão simples

O aumento significativo da resistência a compressão de ambos os concretos aos 28 dias se deve em parte à ação cimentante dos finos de escória que possui ação retardada, conforme reportada pela literatura (DINIZ, CARVALHO , *et al.*, 2017; GUMIERI, 2002),. Porém, destaca-se o desempenho do concreto com agregados de escória (35,05 MPa), cerca de 40% mais resistente que o concreto com agregados convencionais, mesmo com 96,5% de consumo de materiais reciclados.

Esse fato estaria diretamente relacionado ao tipo de agregado constituinte. A morfologia do agregado de escória proporciona a liberação lenta de água dos seus poros e irregularidades, que facilitam a hidratação dos finos em idades tardias e facilita o melhor entrosamento entre a pasta e agregados, estando em concordância com a literatura (SANTOS e

ISBN 978-65-86819-05-2

BRITO, 2017) . Nesse contexto, justifica-se a maior uniformidade e compacidade, baixa porosidade, que implicam a um melhor desempenho mecânico.

Os fatores indicados como justificativa ao desempenho satisfatório dos concretos avaliados corroboram com o proposto por Mehta e Monteiro (1994).Tendo em vista que ambos os concretos tiveram um consumo de cimento de 86,6 Kg/m³, os resultados indicam que o traço com agregados de escória de aciaria foi destaque alcançando uma intensidade de cimento de 2,47 kg/m³/MPa, enquanto o traço com agregados naturais alcançou 3,51 kg/m³/MPa.

4. CONCLUSÕES

A partir do programa experimental estabelecido nessa pesquisa é possível inferir que a caracterização física e química dos materiais foi eficiente e condizente com a literatura. A caracterização química expôs a grande quantidade de óxidos metálicos nos materiais provenientes da escória de aciaria LD. Já a caracterização granulométrica dos finos empregados no estudo indicou uma boa uniformidade das curvas, o que poderia implicar a um bom empacotamento entre as partículas.

Os ensaios de velocidade pulso ultrassônico indicaram elevada uniformidade, coesão e compacidade dos concretos produzidos. Devido a essas características, o módulo de elasticidade de ambos os concretos também se apresentou com valores significativos para um concreto baixo consumo de cimento. Tais resultados indicam a efetividade do protocolo de concretagem, empacotamento e da elevada qualidade dos agregados empregados no estudo.

Os resultados dos ensaios de resistividade elétrica indicaram alta potencialidade de penetração de íons nas matrizes avaliadas, implicando a um elevado risco de corrosão da armadura. Entretanto, tais resultados não corroboraram com os valores de velocidade pulso ultrassônico e de módulo de elasticidade. Essa inconsistência é justificada pelas características químicas dos materiais empregados em ambos os traços, que são em sua maioria metais e bons condutores elétricos.

Aos 7 dias, a resistência compressão dos concretos com agregados convencionais foram superiores aos de escória de aciaria LD. Aos 28 dias ambos os concretos tiveram um significativo incremento de resistência a compressão devido a ação cimentante tardia dos finos de escória. No entanto, os concretos com agregados de escória superaram os resultados dos concretos com agregados convencionais nas duas análises. O destaque dos ensaios mecânicos foi a resistência a compressão dos agregados de escória aos 28 dias, que foi cerca de 40% maior que a matriz com agregado convencional. Tais resultados também corroboraram com os valores de velocidade pulso ultrassônico.

O trabalho conclui que a resistividade elétrica se trata de um ensaio não destrutivo, que por meio da avaliação dos seus resultados nos permite inferir a potencialidade de penetração de íons na matriz e por consequência o risco de corrosão da armadura. Entretanto tais resultados são passíveis de distorções, uma vez que a composição química e granulométrica dos materiais empregados, a porosidade e compacidade do concreto interferem diretamente nos resultados. Por esse motivo, para consolidarmos tais resultados, faz-se necessário corroborá-los com outros ensaios que avaliam uniformidade e porosidade, sem influência da composição química, como a velocidade pulso ultrassônico em consonância com a resistência a compressão das matrizes.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem as instituições FAPEMIG, CAPES, Fundação Gorceix, UFMG, UFOP e CNPq pelo apoio para a realização e apresentação dessa pesquisa. Também somos gratos pela infraestrutura e colaboração do Grupo de Pesquisa em Resíduos Sólidos – RECICLOS – CNPq.

BIBLIOGRAFIA

AASHTO. **TP 119-15 - Classificação quanto à penetração de íons cloreto no concreto**. [S.l.]: American Association of State Highway and Transportation Officials , 2015.
ABNT. **NBR 9204:** Concreto endurecido – Determinação da resistividade elétrica-volumétrica – Método de ensaio. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004.
ABNT. **NBR 12655:** Concreto de cimento Portland - Preparo, controle e recebimento - Procedimento. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2006. 18 p.
ABNT. **NBR 6118:** Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2014.

ISBN 978-65-86819-05-2

ABNT. **NBR 13276:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016.
ABNT. **NORMA 5739:** Concreto — Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndrico. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2018.
ABNT. **NBR 8802:** Concreto endurecido — Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2019.
AICTIN, P. C. **HIGH PERFORMANCE CONCRETE**. São Paula: PINI, 2000.
ANDRADE, H. D. **Carbonatação em Concreto de Escória de Aciaria**. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto. 2019.
ASTM. **ASTM C597-09:** StandardTest for Pulse Velocity Trought Concrete. West Conshohocken: [s.n.], 2019.
CARVALHO, J. C. L. et al. Study of mechanical behavior of block for structural masonry produced with steel slag in substitution of natural aggregates. **Masonry International**, v. 30, p. 31-60, 2017.
CARVALHO, J. M. F. D. **Obtention of eco-efficient cement based composites using industrial waste**. Ouro Preto. 2019.
CARVALHO, J. M. F. D. **Obtention of eco-efficient cement based composites using industrial waste**. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto. 2019.
DAMINELI, B. L. et al. Measuring the eco-efficiency of cement use. **Cement & Concrete Composites**, São Paulo, n. 32, p. 555-562, 2010.
DINIZ, D. H. et al. Blast Oxygen Furnace Slag as Chemical. **Journal of materials in civil engineering**, v. 29, Maio 2017. Disponivel em: <http://www.reciclos.ufop.br/media/uploads/downloads/dissertao__dayse_diniz.pdf>. Acesso em: 18 Maio 2017.
GUMIERI, A. **Estudo da Viabilidade Técnica da Utilização de Escórias de Aciaria do Processo LD como Adição em Cimentos**. Porto Alegre: UFRGS, 2002. Tese de Doutorado.
H.M. GHASEMZADEH, Y. M. G. N. S. E. N. An Investigation of the Effect of the Different Mix Constituents on Concrete Electric Resistivity. **World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Civil and Environmental Engineering**, 2009.
JESUS, L. S. D. A Resistividade Elétrica do Concreto e a sua Correlação com a Durabilidade das Estrutura. **Engenharia Estudo e Pesquisa. ABPE**, 2018.
KOMLOS, K. et al. Ultrassonic pulse velocity test of concrete properties as specified in various standards. **Cement and Concrete Research**, 1996. ISSN 357-364.
MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. **Concrete:** microestructure, propreties and materials. São Paulo: IBRACON, 2014.
MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **CONCRETO:** ESTRUTURA, PROPRIEDADES E MATERIAIS. 1ª. ed. São Paulo: PINI, 1994.
MENDES, J. C. et al. Mechanical, rheological and morphological analysis of cement-based composites with a new LAS – based air entraining agent. **Construction and Building Materials**, 2017. 648-661.
OLIVEIRA, T. N.; PEIXOTO, R. A. F.; ALVES, V. D. J. G. Comportamento de blocos de concreto produzidos com escória de aciaria para alvenarias. **Grupo de Pesquisa em Resíduos Sólidos (RECICLOS)**, 2007. Disponivel em: <http://www.acquacon.com.br/cobesa/apresentacoes/pap/pap002027.pdf>.
PANG, B.; ZHOU, Z.; XU, H. Utilization of carbonated and granulated steel slag aggregate in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 84, p. 454-467, 2015.
REBMANN, M. S. **Durabilidade de concretos com baixo consumo de cimento Portland e alta resistência**. Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos. 2011.
SAINT-PIERRE, F. et al. Concrete Quality Designation based on Ultrasonic Pulse Velocity. **Construction and Building Materials**, v. 125, p. 1022-1027, 2016.
SANTOS, M. B.; BRITO, J. D. Susceptibilidade dos agregados reciclados no desenvolvimento da reacção álcalis-sílica: o que pode mudar? **Revista de Engenharia Civil**, Lisboa, v. 55, p. 36-46, fev. 2017.
SAXENA, S.; TEMBHURKAR, A. Impact of use of steel slag as coarse aggregate and wastewater on fresh and hardened properties of concrete. **Construction and Building Materials**, p. 126–137, 2018.
TOFFOLO, R. V. **PAVIMENTOS SUSTENTAVEIS** ´. Ouro Preto: Dissertação de Mestrado, 2015.
WANG, Q.; YANG, J.; YAN, P. Cementitious properties of super-fine steel slag. **Powder Technology**, v. 245, p. 35-39, 2013.
YOUSUFA, S.; SANCHEZB, L. F. M.; SHAMMEH, S. A. The use of particle packing models (PPMs) to design structural low cement concrete as an alternative for construction industry. **Journal of Biulding Engineering**, Canada, n. 25, 2019.