

CARACTERÍSTICAS E LIMITAÇÕES DO USO DA ESCÓRIA DE ACIARIA LD COMO AGREGADO NA PRODUÇÃO DE CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND*

Sara de Carvalho Zago¹

Fernando Vernilli²

Oswaldo Cascudo³

Sidney Nascimento Silva⁴

André Tarcizo de Oliveira Vieira⁵

Resumo

Os agregados naturais da indústria da construção são os insumos minerais mais explorados no mundo e sua demanda se expande com o aumento da infraestrutura. Para garantir a conservação dos agregados naturais, é imperativo o estudo de agregados alternativos, como os resíduos gerados pelas siderúrgicas. A escória de aciaria LD é o principal resíduo do processo de refino de aço. No contexto da excessiva extração de agregados naturais, o uso de resíduos siderúrgicos pode ser justificado em função de sua estrutura cristalina de elevada resistência à abrasão e dureza. Deste modo, neste trabalho foram avaliadas as características da escória de aciaria LD para o uso como agregado de concreto, bem como o efeito gerado no concreto de cimento Portland pelo uso da escória de aciaria LD em substituição da areia natural nas proporções 0%; 25%; 50% e 75%, em massa. Os concretos com escória estudados apresentaram melhorias significativas na resistência à compressão, semelhante comportamento ao de referência na resistência à tração, e significativa redução do módulo de elasticidade em função da estrutura porosa apresentada pela escória. Bem como os agregados apresentaram comportamento expansivo em cura alcalina.

Palavras-chave: Escória de aciaria LD; Concreto; Resíduo siderúrgico, Agregados.

CHARACTERISTICS AND LIMITATIONS OF BASIC OXYGEN FURNACE SLAG FOR THE USE AS AN AGGREGATE FOR PORTLAND CEMENT CONCRETE

Abstract

The natural aggregates of the construction industry are the most exploited mineral inputs in the world and their demand expands with increasing infrastructure. To ensure the conservation of natural aggregates, it is imperative to study alternative aggregates, such as wastes generated by steel mills. LD mill slag is the main residue of the steel refining process. In the context of the excessive extraction of natural aggregates, the use of steel residues can be justified due to its crystalline structure of high resistance to abrasion and hardness. Thus, in this work the characteristics of LD steel slag for the use as concrete aggregate were evaluated, as well as the effect generated in Portland cement concrete by the use of LD slag in substitution of natural sand in proportions 0%; 25%; 50% and 75% by weight. The slag concretes studied showed significant improvements in the compressive strength, similar to the reference behavior in the tensile strength, and a significant reduction in the modulus of elasticity as a function of the porous structure presented by the slag. As well as the aggregates presented expansive behavior in alkaline cure.

Keywords: BOF slag; Concrete; Steel waste; Aggregate.

¹ Engenheira química, mestre, Universidade de São Paulo, Lorena, SP, Brasil.

² Engenheiro químico, doutor, professor associado, Universidade de São Paulo, Lorena, SP, Brasil.

³ Engenheiro civil, doutor, professor associado, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO, Brasil.

⁴ Engenheiro civil, doutor, consultor, Refraservices, Volta Redonda, RJ, Brasil.

⁵ Químico, doutor, coordenador de gestão de Resíduos, CSN, Volta Redonda, RJ, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

A escória de aciaria LD é gerada no processo de transformação do ferro gusa em aço em conversores a oxigênio, conhecidos como conversores Linz-Donawitz (LD). Os conversores LD são os principais responsáveis pelo refino do ferro gusa, originando cerca de 70% do aço produzido mundialmente. Durante a conversão do gusa em aço objetiva-se a remoção de carbono, silício e fósforo de sua composição.

As intensas reações de oxidação minimizam os níveis de impurezas que se combinam com a cal adicionada ao longo da operação, formando a escória de aciaria LD [1,2]. De maneira que as reações químicas entre os escorificantes e os elementos de impureza removidos determinam a composição química da escória de aciaria LD, podendo existir variações de acordo com as condições de operação e as especificações do aço produzido [1,2].

Os principais componentes químicos da escória de aciaria LD são CaO, FeO, e SiO₂, tal que podem exceder a 80% dos constituintes da escória. Elevados teores de CaO são encontrados nas escórias de aciaria, comumente acima de 30%, devido à adição da cal (ou dolomita), que durante a conversão pode não ser completamente dissolvida, de modo que o teor de cal livre pode ser superior a 12%, o que conhecidamente se torna sua principal limitação LD [2,3]. Durante a conversão de ferro gusa, uma porcentagem do ferro pode ser incorporada à escória, o que a torna consideravelmente rica em ferro, comumente encontrado próximo a 30%, na forma de wustita (FeO), além de poder apresentar partículas de ferro metálico (Fe⁰). O silício oxidado, absorvido pela escória, confere um teor de sílica entre de 7 a 18%; os conteúdos de Al₂O₃ e MgO estão compreendidos nos intervalos de 1 a 17% e 0,7 a 15%, respectivamente. E em quantidades bastante inferiores são reportados os óxidos de sódio, potássio, manganês, titânio e o enxofre [2-4].

Quanto as fases mineralógicas cristalinas, majoritariamente são encontradas: silicato dicálcico - 2CaO.SiO₂ ou C₂S (40–55%); ferrita dicálcica - 2CaO.Fe₂O₃ ou C₂F (20–30%); wustita - FeO (10–13%), óxido de cálcio - CaO (1–7%), portlandita - Ca(OH)₂ (1–8%), calcita - CaCO₃ (2–4%). A presença de periclásio (MgO) e brownmillerita (4CaO·Al₂O₃·FeO₃ ou C₄AF) também costuma ser reportada, enquanto a do MnO ocorre com menor frequência [5].

As escórias de aciaria têm como destinação mais comum a de agregado na pavimentação de estradas de rodagem e como lastro de ferrovias, uma vez que estes materiais têm boas propriedades mecânicas e um baixo custo, sendo sua restrição justificada pelo teor de cal livre que pode provocar expansões volumétricas e a ruptura do pavimento asfáltico [4-8]. Ademais, pesquisas têm mostrado que a escória de aciaria LD, finamente moída, pode ser usada como um substituto do cimento em argamassas e concretos, do clínquer e da escória de alto forno para a produção do cimento, devido a presença de silicatos de cálcio hidráulicos em sua composição mineral. De modo a obter cimentos com características mecânicas semelhantes, com menor liberação de calor de hidratação porém com superior tempo de pega [7, 9-13].

No entanto, em função da elevada demanda por agregados para a produção de concreto e da exigência energética para moagem da escória à granulometria fina do cimento, verificou-se a oportunidade do emprego da escória de aciaria LD como agregados alternativos para a produção de concretos hidráulicos. Assim sendo, este trabalho estudou as características físicas, químicas e minerais da escória para avaliar o efeito mecânico de seu uso como agregado na produção de concreto de cimento Portland, bem como compreender as limitações de seu uso pela avaliação das propriedades mecânicas dos concretos.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Agregados

Para o concreto de referência, utilizou-se como agregado miúdo a areia natural de leito de rio, e granito como agregado graúdo, sem incorporação de agregados de escória. A escória de aciaria LD obtida pela Companhia Siderúrgica Nacional - CSN foi utilizada com dimensões entre 150 μm e 4,75 mm e tempo de cura a condições externas, superiores a 12 meses para reduzir a expansão de agregados de escória. As propriedades físicas dos agregados avaliadas incluíram distribuição granulométrica, massa específica, absorção de água, resistência ao desgaste superficial dos grãos de agregado de escória, a partir da resistência a abrasão Los Angeles. O potencial de reatividade da escória para a reação álcali-agregado foi avaliado pelo método acelerado. A fim de comparar a absorvidade da escória e da areia natural foi realizado o ensaio de porosimetria de adsorção-desorção gasosa, com nitrogênio gasoso, em equipamento Autosorb-iQ, da marca Quatachrome Instrument.

2.2. Técnicas de análise

A composição química da escória foi obtida por Fluorescência de Raios X (FRX), no equipamento Axios MAX, da PANalytical, para o qual a amostra foi preparada por prensagem com ácido bórico, e O teor de cal livre presente na escória foi obtido pelo método de extração com etilenoglicol. A difração de raios X (DRX) foi utilizada para determinar sua composição mineralógica, foi empregado um Bruker-D8 XRD, que utiliza radiação $\text{CuK}\alpha$, equipado com detector Dectris, modelo Pilatus 3R 100K-A. A faixa de varredura foi de 5 a 70° com um incremento de 0,005° e velocidade de varredura de 0,6 graus por segundo. A análise química das fases presentes nos grãos de escória foi feita por um microanalisador de sonda eletrônica JEOL JXA-8230 acoplado a análises de EDS.

2.3. Dosagem do concreto

O cimento utilizado nesta pesquisa foi o cimento Portland CPV-ARI, Votorantim Cimentos. O concreto foi projetado com o objetivo de alcançar a resistência à compressão na faixa de 30 ± 5 MPa após 28 dias de cura, com trabalhabilidade de 120 ± 20 mm e relação água/ligante (a/c) de 0,5. Com o objetivo de avaliar a influência dos agregados de escória sobre as propriedades do concreto, a substituição parcial do agregado natural pela escória foi realizada nas seguintes proporções: 0% (CR); 25% (CE25); 50%(CE50) e 75% (CE75), em massa. Especificações das proporções de mistura de concreto são dadas na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros de dosagem dos concretos

Característica da dosagem dos concretos		CR	CE25	CE50	CE75
Dados da composição	Cimento (kg/m^3)	299	303	305	309
	Água (kg/m^3)	162	164	165	167
	Areia Natural (kg/m^3)	754	574	384	195
	Escória LD (kg/m^3)	-	191	384	586
	Granito (kg/m^3)	1180	1197	1203	1222
	Aditivo (%)	0,8	0,8	0,8	0,8
	a/c	0,54	0,54	0,54	0,54
Propriedades do concreto fresco	Abatimento (mm)	120	120	90	55
	Ar incorporado (%)	2,12	1,37	1,72	1,31
	Massa unitária (kg/m^3)	2397	2432	2441	2480

Após a mistura, o concreto fresco foi vertido em moldes para a preparação de amostras cilíndricas (100 x 200 mm) para avaliar a resistência à compressão (NBR 5739), resistência à tração por compressão diametral (NBR 7222) e módulo de elasticidade (NBR 8522). Após 24 h de moldagem, os corpos-de-prova foram retirados dos moldes e submetidos à cura em câmara úmida [U. R de $95 \pm 5\%$ e temperatura ($23 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$)] até a data de rompimento (28 e 180 dias).

3 Resultados

3.1 Caracterização de escória de aciaria LD

A escória de aciaria LD e a areia natural apresentaram distribuições granulométricas consideravelmente distantes. A escória apresentou distribuição granulométrica mais grossa, extrapolando os limites da zona utilizável e da grande zona ótima, conforme representado graficamente na Figura 1(A). No entanto, as composições de escória e areia (25%; 50% e 75%), apresentaram curva granulométrica dentro dos limites utilizáveis, o que reduz as chances de gerar prejuízos no empacotamento e trabalhabilidade do material produzido com escória Figura 1(B).

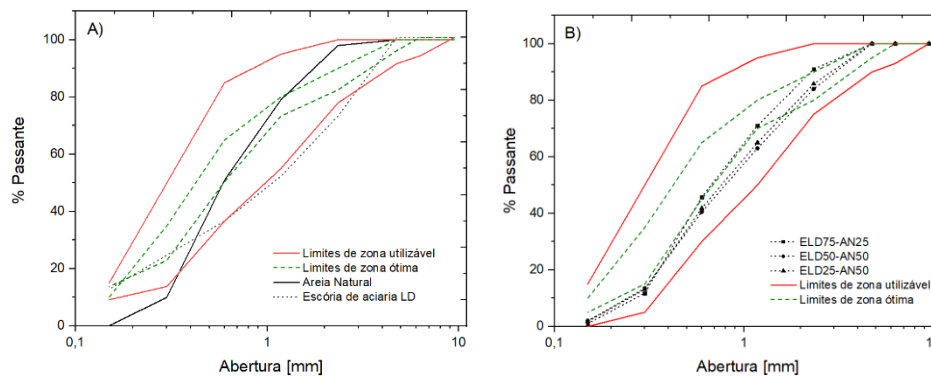


Figura 1. Distribuição granulométrica de A) escória de aciaria LD e Areia; B) das composições de escória de aciaria LD (ELD) e Areia (AN).

As propriedades físicas dos agregados de escória são exibidas na Tabela 2. Verifica-se que devido ao alto teor de ferro, a escória possui elevada massa específica, quando comparada a areia natural. Apesar de pouco realizado para o agregado miúdo, o ensaio de abrasão de Los Angeles demonstrou que a capacidade do agregado de escória em resistir ao desgaste ou fragmentação devido à força de impacto entre o agregado e a carga abrasiva utilizada no teste foi baixa, com uma perda de massa de 33%. Este resultado pode ser bastante influenciado pela porosidade do material, que devido à alta absorção de água, pode ser considerada elevada, além de justificar o alto teor de material pulverulento na escória, gerado pela quebra dos grãos de escória.

Tabela 2. Caracterização física do agregado miúdo de areia natural e escória

Determinação	Escória LD	Areia Natural	Métodos de Ensaio
Absorção de água (%)	4,8	0,3	NBR NM 30/2001
Módulo de Finura	3,3	2,6	NBR NM 248/2003
Massa Específica (g/cm ³)	3,1	2,7	
Abrasão Los Angeles (%)	33 "D"	-	NBRNM 51/2001

Teor de material pulverolento (%)	2,83	-	NBR NM 46/2003
-----------------------------------	------	---	----------------

Como citado, a absorção de água dos agregados de escória é significativamente superior à da areia (Tabela 2), um fator relevante em relação à trabalhabilidade do concreto no estado fresco e a resistência mecânica do concreto endurecido, pois pode elevar a demanda de água para manter a consistência do concreto. Essa tendência de maior absorvidade também foi observada por outros autores [14-17]. Dado que o teste de absorção de água dos agregados é um indicativo do número de vazios interligados que permite o livre movimento da água para o interior, essa maior capacidade de absorção pode demonstrar a maior probabilidade de que o agregado de escória tenha baixo módulo de elasticidade e não seja durável, bem como de elevar a permeabilidade do concreto [18].

Na Tabela 3, são exibidos os resultados da porosimetria por adsorção – dessorção de nitrogênio gasoso dos agregados de areia e escória.

Tabela 3. Resultados da porosimetria por adsorção de N₂ para agregados de areia e escória

Determinações	Areia natural	Escória de aciaria LD
Área superficial específica – BET [m ² /g]	1,18	6,1
Raio médio de poros [Å]	19,1	19,18
Volume de poros [cm ³ /g]	0,002	0,02

A área superficial específica da escória se mostrou significativamente superior, cerca de cinco vezes a da areia, isto demonstra que para a escória mais superfícies estão expostas, resultado da porosidade das partículas que a constituem, tanto no que envolve poros, quanto na ocorrência de fissuras. Essa discussão se confirma quando observados os valores relativos à porosidade da escória e da areia. Ambos materiais apresentam raio médio de poros em intervalo semelhante, com predominância de classes de poros com raios próximos a 20 Å, de modo a serem classificados como Mesoporos. O volume de poros, entretanto, exibe forte distinção para ambos materiais, de maneira que para a escória é cerca de dez vezes superior ao da areia. Tal resultado demonstra que uma maior área de superfície está disponível para a adsorção de água nas paredes dos poros das escórias.

Segundo a análise química, Tabela 4, os principais componentes da escória correspondem ao SiO₂, CaO, Fe₂O₃, MgO e Al₂O₃, comumente encontrados na escória de aciaria LD, que totalizam em mais de 90% dos constituintes da escória, além dos demais constituintes minoritários. Verificou-se que o teor de álcalis (Na⁺ e K⁺) presente na escória é baixo, não atuando como aporte externo de álcalis no concreto para o desenvolvimento das reações álcali-agregado.

Tabela 4. Composição química da escória de aciaria LD

Composto	SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	MnO	K ₂ O	SO ₃	P ₂ O ₅	TiO ₂
Teor [%]	28,2	26,9	18,2	10,2	8,9	1,5	1,5	1,3	1,2	0,9	0,9

A cal livre, presente na escória de aciaria, obtida no ensaio normalizado pela NBR 7227, pelo método de extração por etilenoglicol, a % de CaO livre encontrada foi de 3,8% e compreende tanto os teores de óxido de cálcio livre quanto de hidróxido de cálcio, igualmente identificado na análise de DRX.

As principais fases mineralógicas identificadas na escória de aciaria correspondem ao alumino-silicato de cálcio e sódio (labradorita), fases que podem ter tido origem do processo lento de resfriamento da escória fundida, a identificação da larnita (C_2S) também pode ser justificada a partir do resfriamento lento da escória que transforma o C_3S em C_2S e CaO , Tabela 5.

Tabela 5. Composição mineralógica da escória de aciaria LD

Fase mineral	Teor [%]	Fase mineral	Teor [%]
Labradorita	17,6	Biotita	3,7
Larnita	16,9	Hematita	5,7
Alita	15,8	Calcita	4,6
Quartzo	11,3	Cal	1,7
Brownmillerita	4,2	Portlandita	2,2
Cordierita	3,4	Periclásio	1,7
Wustita	5,2	Troilita	3,3

Foram identificadas também fases compostas por ferro, tais como wustita, hematita, traços de magnetita, goetita e ainda de ferro metálico. Ademais, responsáveis pela expansão volumétrica da escória, foram verificadas a cal, a portlandita e a calcita, em quantidade superior devido ao período de envelhecimento.

Pela análise em microsonda eletrônica, verificou-se a grande heterogeneidade apresentada pela escória, Figura 2. Para a qual os grãos de escória apresentam elevado número de fases misturadas, de modo que poucas fases independentes foram observadas, e mesmo estas fases não apresentaram composição química livre de impurezas. Uma das poucas fases homogêneas identificadas foi o FeO , Figura 2 (A), assim como, partículas de ferro metálico nas Figuras (C) envoltas por silicato de cálcio e alumínio ($CaAl_2Si_2O_8$) e calcita, e (D) envolta por C_2S e uma fase de silicato de magnésio e alumínio.

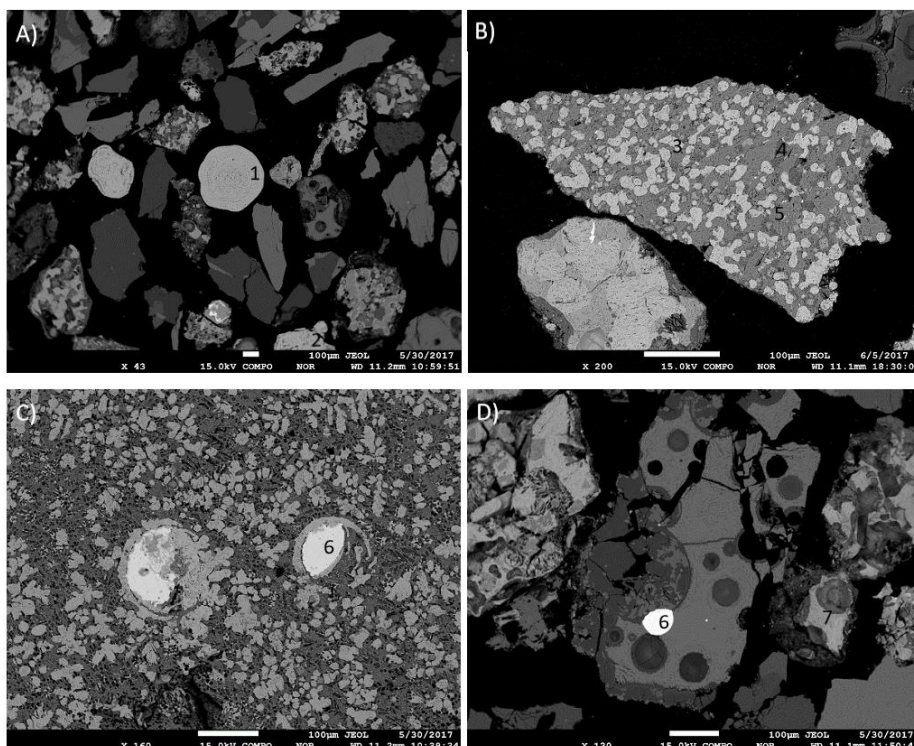


Figura 2. Análise em microsonda da escória de aciaria LD: 1-FeO, 2-C₂F, 3-MgFe₂O₄, 4-MgAl₂O₄, 5-C₂S, 6-FeO, 7-C₄AF.

O resultado do ensaio de determinação do potencial de reatividade álcali-agregado (RAA) da escória, é apresentado na Figura 3. Verificou-se que a argamassa contendo agregado de escória (Escória – CPV) apresentou expansão superior a 0,19% aos 30 dias, equivalente a 0,35%, o que caracteriza o seu comportamento como potencialmente reativo para o uso em concreto. Deve-se ressaltar que o cimento empregado não possui adições minerais, o que o torna uma importante fonte de álcalis advinda do clínquer, bem como, é produzido com uma moagem mais fina comparada aos demais, tornando-o altamente reativo.

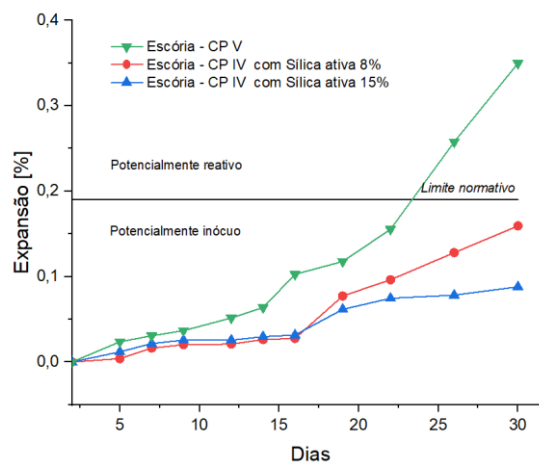


Figura 3. Expansão apresentada pelas argamassas de escória com e sem mitigação.

Afim de verificar a possibilidade da mitigação e da prevenção do desenvolvimento de reações expansivas do tipo RAA, foi realizada a substituição do cimento CP V pelo CP IV-32, que apresenta potencial inibidor para esta reação e a adição de 8 e 15% de sílica ativa (massa específica: 2,27 g/cm³ e área específica 22,02 m²/g) em relação à massa de cimento. O emprego do cimento CP IV foi definido devido a sua composição apresentar até 50% de material pozolânico em substituição ao clínquer, reduzindo o teor de álcalis do cimento e auxiliando no desenvolvimento de reações pozolânicas. Assim de maneira semelhante, é conhecido que o emprego da sílica ativa conduz a inibição da reação RAA, com teor máximo de adição de 15%, em relação à massa do cimento, pelo aumento da produção de C-S-H e redução dos coeficientes de difusão e da permeabilidade da pasta de cimento, o que reduz a migração dos álcalis em direção aos agregados reativo [19].

Os resultados mostram que a substituição do cimento e a adição de 8% e 15% de sílica ativa, em massa, foram suficientes para reduzir a expansão a valores abaixo do limite normativo. Até os 16 dias ambas apresentaram expansão semelhante, de cerca de 0,03%, contudo, a partir desta idade a expansibilidade foi mais pronunciada para a mistura com menor teor de sílica ativa. Considerando as fases minerais presentes na escória e os resultados obtidos pelo ensaio de mitigação, pode-se concluir que a expansão apresentada pela escória não corresponde a uma expansão resultante do tipo álcali-agregado, que teria efetivamente sido suprimida pela troca do cimento e da adição de sílica ativa. Nessa conformidade, caracterizam-se como reações expansivas dos constituintes da escória de aciaria LD. Deve-se ressaltar que o comportamento expansivo apresentado difere do comportamento, comumente, apresentado por agregados reativos [19,20], pois estes podem

apresentar expansão superior a 0,2% logo nos primeiros dias de ensaio. Em contrapartida, sabe-se que a hidratação dos constituintes expansivos da escória ocorre em idades tardias, após a cura da matriz cimentícia.

3.2 Resistência mecânica dos concretos com escória

Os ensaios de resistência à compressão axial, tração por compressão diametral e módulo de elasticidade estático foram realizados aos 28 e 180 dias de cura, a fim de fornecer informações quanto ao efeito da escória na resistência mecânica do concreto após um período de hidratação superior. Para os três ensaios, foi realizada pelo teste de Duncan a união dos resultados em grupos estatisticamente iguais, com base na comparação múltipla de médias.

Na Figura 4, é evidenciado que para as duas idades, pelos resultados de resistência à compressão, os concretos foram divididos em dois grupos distintos, delimitados pela linha vertical tracejada. Bem como, foi evidenciado o aumento da resistência à compressão dos concretos com a substituição da areia por escória, em todos os teores de substituição.

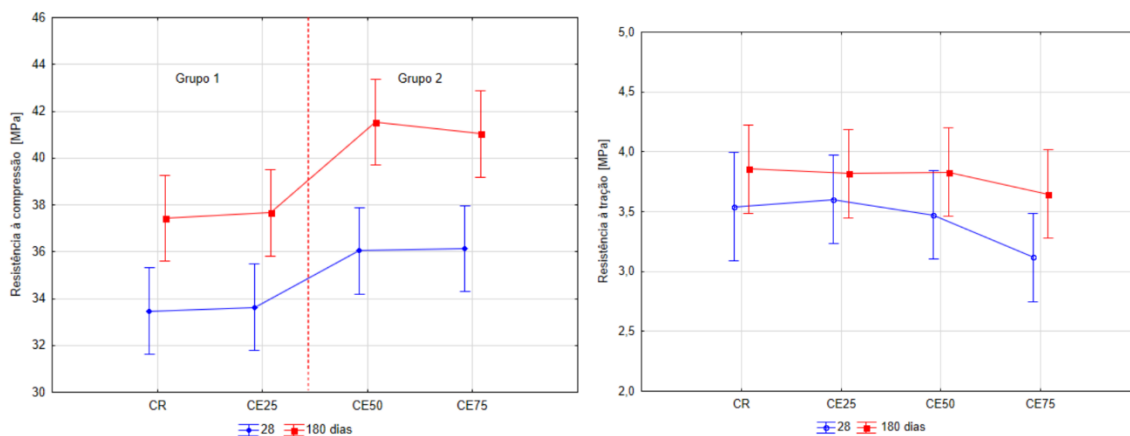


Figura 4. Médias de resistências à compressão e à tração dos concretos, com intervalo de confiança de 95%.

Em termos gerais, pode-se discutir o aumento da resistência à compressão em função de alterações na aderência mecânica do concreto, que devido à alta angulosidade das partículas da escória, associada à sua textura superficial áspera, proporcionou o aumento do atrito entre os agregados. Por outro lado, como visto na Tabela 1, estes mesmos fatores reduziram o abatimento, ou seja, a fluidez do concreto com o aumento do índice de substituição. Pode-se ainda inferir que o uso de escória provocou melhorias na interface do agregado miúdo dado que a escória apresenta absorção superior, e seu emprego muito provavelmente levou a absorção local de água adsorvida na superfície dos grãos de escória, tendo a redução da espessura de filmes d'água adsorvido no entorno do agregado miúdo de escória, fato que leva a redução local da porosidade da pasta na zona de transição do agregado miúdo e, conseqüentemente, à elevação da resistência mecânica do concreto. Ainda sob o enfoque da interface do grão, pode-se inferir que devido a composição da escória, reações na superfície dos agregados de escória tenham elevado a aderência do agregado com a pasta, propiciando a formação de aluminatos e silicatos hidratados.

Quanto a resistência à tração por compressão diametral, pela resistência média dos concretos verificou-se que estes caracterizavam-se como um único grupo de concretos, Figura 4. A distinção entre os concretos não é considerada significativa

do ponto de vista estatístico, e a variação percentual entre as médias é pouco relevante, entretanto, indicam uma tendência do comportamento apresentado pelo concreto composto por escória, principalmente quando observados os valores de resistência obtidos para o concreto com máximo teor de escória.

Aos 180 dias, por exemplo, foi verificada uma redução de resistência em todos os níveis de substituição, equivalentes a 0,95%; 0,69% e 5,45% para os concretos CE25; CE50 e CE75, respectivamente. Redução esta que pode estar associada ao desenvolvimento de reações expansivas da escória, que levam ao desenvolvimento de microfissuras resultantes do aumento de volume de componentes expansivos na matriz confinada após a hidratação da pasta cimentícia. No entanto, as idades de ensaio podem não ter sido suficientemente longas para se constatar este efeito de maneira clara. Segundo [21], a expansão pode ser imperceptível até os 28 dias de hidratação, dada a lenta reação do CaO e MgO livres, e podem começar a ser significativas após 360 dias, dependendo do teor de escória presente no concreto.

Quando avaliado o módulo de elasticidade dos concretos, Figura 5, estes foram divididos em três grupos distintos, de modo que nenhum dos concretos contendo escória foram agrupados com o concreto de referência. Em virtude de todos os concretos com substituição terem apresentado a redução do módulo de elasticidade, pode-se atribuir essa redução a baixa rigidez do agregado de escória quando comparado ao agregado natural.

Tal afirmação pode ser justificada em função de algumas propriedades observadas na caracterização do agregado de escória, tais como a porosidade do agregado de escória, caracterizada pelo elevado resultado de absorção de água, que demonstra a porosidade aberta e interconectada apresentada pela escória ao permitir a livre entrada de água para o seu interior. Bem como, pelo elevado valor obtido no ensaio de abrasão Los Angeles para a escória, que demonstrou apresentar uma baixa resistência ao desgaste superficial.

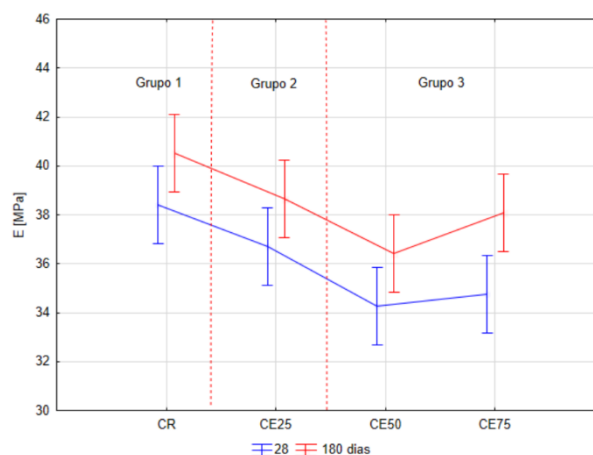


Figura 5. Médias do módulo de elasticidade dos concretos, com intervalo de confiança de 95%.

3 CONCLUSÃO

No presente estudo foram avaliadas as propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos com substituição do agregado miúdo natural por escória de aciaria LD. Comparados ao agregado natural, os agregados de escórias se mostraram mais porosos, absorptivos e com baixa resistência ao desgaste superficial. As misturas de concreto com e sem agregados de escória de aciaria obtiveram resistência à tração e compressão satisfatórias, entretanto foi observado o decréscimo do módulo de

elasticidade com a incorporação de agregados de escória, dada a baixa rigidez apresentada pela escória, bem como a redução da trabalhabilidade dos concretos. Em síntese, os agregados de escória promoveram desempenho satisfatório ou, em alguns casos, até superior nas propriedades dos concretos. No entanto, seu emprego é limitado em função de suas características expansivas. Ao avaliar a expansibilidade das argamassas pela análise da reação álcali-agregado, os corpos de prova expandiram além do limite normativo e mesmo após a mitigação da reação foram verificadas expansões, demonstrando serem resultado da ação de componentes da escória.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

- 1 GUMIERI, A. G. Estudo da viabilidade técnica das escórias de aciaria do processo LD como adição de cimento. 2002. 251 f. (Tese) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.
- 2 YILDIRIM, I. Z.; PREZZI, M. Chemical, mineralogical, and morphological properties of steel slag. *Advances in Civil Engineering*, 2011, 1 – 13.
- 3 Wang Q, Yan P, Mi G. Effect of blended steel slag–GBFS mineral admixture on hydration and strength of cement. *Construction and Building Materials*, 2012, 35, 8-14.
- 4 DAS, B. et al. An overview of utilization of slag and sludge from steel industries. *Resources, Conservation and Recycling*, 2007, 50, 40-57.
- 5 Piatak, N. M., Parsons, M. B., Seal, R. R. Characteristics and environmental aspects of slag: A review. *Applied Geochemistry*, 2015, 57, 236–266.
- 6 NSA, Types of iron and steel slag. Disponível em: <http://www.slg.jp/e/slag/kind.html>. Acesso em: 15 set. 2016.
- 7 Belhadj, E., Diliberto, C., & Lecomte, A. Characterization and activation of basic oxygen furnace slag. *Cement & Concrete Composites*, 2012, 34, 34 – 40.
- 8 Pan, S.-Y., Adhikari, R., Chen, Y.-H., Li, P., & Chiang, P.-C. Integrated and innovative steel slag utilization for iron reclamation, green material production and CO₂ fixation via accelerated carbonation. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 137, 617 – 631.
- 9 MURPHY, J., MEADOWCROFT, T., & BARR, P. Enhancement of the cementitious properties of steelmaking slag. *Canadian metallurgical quarterly*, 1997, 36, 315-331.
- 10 Lun, Y., Liu, S., & Luo, X. Mechanical mechanism for expansion and crack of mortars containing basic oxygen furnace slag sand. *Materials Research Innovations*, 2015, 19, 865-869.
- 11 Tsakiridis, P. E., Papadimitriou, G. D., Tsvilis, S., & Koroneos, C. Utilization of steel slag for Portland cement clinker production. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 152, 805–811.

- 12Carvalho S.Z., Vernilli F., Almeida B., Oliveira M.D, Silva S.N. Reducing environmental impacts: The use of basic oxygen furnace slag in portland cement. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 172, 385-390.
- 13Bodor, M., Santos, R. M., Cristea, G., Salman, M., Cizer, Ö., Iacobescu, R. I., ... van Gerven, T. Laboratory investigation of carbonated BOF slag used as partial replacement of natural aggregate in cement mortars. *Cement & Concrete Composites*, 2016, 65, 55-66.
- 14BRAND, A. S.; ROESLER, J. R. Steel furnace slag aggregate expansion and hardened concrete properties. *Cement & Concrete Composites*, 2015, 60, 1–9.
- 15Palankar, N., Ravi Shankar, A. U., & Mithun, B. M. Studies on eco-friendly concrete incorporating industrial waste as aggregates. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 2015, 4, 378–390.
- 16Li, Q., Ding, H., Rahman, A., & He, D. (2016). Evaluation of basic oxygen furnace (BOF) material into slag-based asphalt concrete to be used in railway substructure. *Construction and Building Materials*, 2016, 115, 593–601.
- 17Xie, J., Wu, S., Zhang, L., Xiao, Y., & Ding, W. Evaluation the deleterious potential and heating characteristics of basic oxygen furnace slag based on laboratory and in-place investigation during large-scale reutilization. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 133, 78-87.
- 18Kambole, C., Paige-Green, P., Kupolati, W. K., Ndambuki, J. M., & Adeboje, A. O. Basic oxygen furnace slag for road pavements: A review of material characteristics and performance for effective utilisation in southern Africa. *Construction and Building Materials*, 2017, 48, 618–631.
- 19CARLES-GIBERGUES, A.; HORNAIN, H. A durabilidade do concreto frente às reações expansivas de origem endógena. Tradução de Helena Carasek. São Paulo: Ibracon, 2014.
- 20ABCP - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. Determinação da reação álcali-agregado pelo método acelerado. São Paulo: ABCP, 2011. 5 p. (Série de texto técnico, Relatório n°:73908)
- 21WANG, Q; WANG, D.; ZHUANG, S. The soundness of steel slag with different free CaO and MgO contents. *Construction and Building Materials*, 2017, 151, 138–146.