

DOI: <http://dx.doi.org/10.18265/1517-0306a2021id5214>

ARTIGO ORIGINAL

Bloco de concreto com incorporação de escória de aciaria BSSF: um estudo para substituição de agregados naturais

RESUMO: A incorporação de resíduo gerado pela indústria siderúrgica em componentes cimentícios contribui na destinação final sustentável de um passivo ambiental. Este estudo tem o objetivo de analisar as características físicas e mecânicas de blocos de concreto de vedação fabricados com escória de aciaria BSSF em substituição aos agregados naturais. Assim, foram realizadas substituições parciais de 20%, 40%, 60%, 80% dos agregados naturais pelo agregado artificial na produção dos blocos. Foram utilizados na fabricação dos blocos cimento Portland, areia natural, pedrisco, pó de pedra, escória de aciaria BSSF, aditivo e água. Os blocos de concreto foram fabricados em uma indústria de artefatos de cimento para obter resultados em escala. Em seguida, os blocos foram ensaiados quanto à análise dimensional, absorção de água, área líquida e resistência à compressão aos 28 dias de idade. Os resultados mostraram que é viável a incorporação de escória de aciaria BSSF em blocos de concreto, uma vez que os blocos produzidos atenderam aos requisitos normativos. Destaca-se que os blocos com a substituição de 60% de agregados apresentaram melhores resultados. O estudo é inovador e contribui para utilização de um resíduo sólido industrial considerado, atualmente, um passivo ambiental, além de agregar qualidade ao produto fabricado.

Palavras-chave: bloco com agregado artificial; bloco de concreto; escória de aciaria BSSF.

Concrete block with BSSF steel slag incorporation: a study for the replacement of natural aggregates

ABSTRACT: The incorporation of waste generated by the steel industry into cement components contributes to the sustainable final destination of an

SUBMETIDO 29/12/2020

APROVADO 05/04/2021

PUBLICADO ON-LINE 17/08/2021

PUBLICADO 30/09/2022

EDITORA ASSOCIADA

Nelma Mirian Chagas Araújo Meira

 Leandro Henrique Benitz ^[1] *

 José da Costa Marques Neto ^[2]

 Fernanda Giannotti da Silva Ferreira ^[3]

 Fabiano Ferreira Chotoli ^[4]

 Rafael Francisco Cardoso dos Santos ^[5]

 Mário Sérgio Guilge ^[6]

[1] leandrohbenitz@icloud.com

[2] joseneto@ufscar.br

[3] fgjannotti@ufscar.br. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGECiv), Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), Brasil

[4] fchotoli@ipt.br

[5] rafaelfc@ipt.br. Laboratório de Materiais de Construção Civil, Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), Brasil

[6] mario.guilge@cimentoapodi.com.br. Companhia de Cimento Apodi, Brasil

*Autor para correspondência.

environmental liability. This study aims to analyze the physical and mechanical characteristics of concrete sealing blocks manufactured with BSSF steel slag as a substitute for natural aggregates. Thus, partial replacements of 20%, 40%, 60%, 80% of the natural aggregates were carried out by the artificial aggregate in the production of the blocks. Portland cement blocks, natural sand, gravel, stone powder, BSSF steel slag, additive and water were used in the manufacture of blocks. The concrete blocks were manufactured in a cement artifacts industry to obtain results in scale. Then, the blocks were tested for dimensional analysis, water absorption, net area and compressive strength at 28 days of age. The results showed that the incorporation of BSSF steel slag in concrete blocks is feasible, since the produced blocks met the normative requirements. It is noteworthy that the blocks with the replacement of 60% of aggregates showed better results. The study is innovative and contributes to the use of solid industrial waste, currently considered an environmental liability, in addition to adding quality to the manufactured product.

.....
Keywords: : block with artificial aggregate; concrete block; steel slag BSSF.

1 Introdução

A construção civil, por ser grande consumidora de agregados naturais, passou a procurar materiais alternativos utilizando resíduos do próprio setor e de outras indústrias, tornando-se uma grande usina recicladora. Dessa forma, o setor contribui para diminuição do impacto ambiental e, conseqüentemente, para o menor consumo de materiais naturais (FARIA, 2007). Por ser a maior indústria consumidora de matérias-primas do mundo, a construção civil tem a responsabilidade de utilizar agregados reciclados em substituição aos naturais. O concreto, material industrial mais consumido mundialmente, é composto por matérias-primas não renováveis que, embora ainda sejam abundantes no planeta, são finitas (ANGULO; FIGUEIREDO, 2011).

De acordo com a Companhia Siderúrgica do Pecém (CSP, 2021), para cada tonelada de aço líquido processado são gerados de 100 kg a 150 kg de escória de aciaria. A produção brasileira de aço bruto nos anos de 2017 e 2018 foi de 34,8 e 35,4 milhões de toneladas, respectivamente, o que mostra um crescimento de 1,7%. Portanto, apenas nesses dois anos foram gerados de 7 a 10,5 milhões de toneladas de escória de aciaria. A produção mundial nesse biênio foi de 3,5 bilhões de toneladas de aço bruto e de 354 a 532 milhões de toneladas de escória de aciaria. Em 2019, por sua vez, a produção de aço brasileira retraiu em relação aos anos anteriores, apresentando 32,6 milhões de toneladas; já a produção mundial apresentou 1,87 bilhões de toneladas. Contudo, foi gerado no Brasil e no mundo 4,89 e 280 milhões de toneladas de escória de aciaria, respectivamente, considerando 150 kg por tonelada de aço (IABR, 2020).

A escória de alto-forno, gerada como subproduto na fabricação do aço, é utilizada na indústria cimenteira para a produção do cimento há mais de 100 anos. Já a escória de aciaria tem sua utilização limitada na construção civil, não possuindo destinação bem definida e, muitas vezes, sendo acumulada nos pátios de estocagem (RAPOSO, 2005). A escória de aciaria é um subproduto resultante do processo de refino do ferro-gusa, que é transportado à Aciaria LD ainda em estado líquido. Na aciaria de arco elétrico, o ferro-gusa é inserido em estado sólido. Ao término do processo de refino, o aço é separado da escória sobrenadante por diferença de densidade. Sua composição química e mineralógica é formada principalmente por CaO, SiO₂, MgO, FeO, Fe₂O₃, silicatos de cálcio, ferrita

dicálcica, wustita de composição variável, CaO livre e MgO livre, que variam em função dos processos de produção de aço, tipo de refino, matérias-primas, adições, sucatas e velocidade de resfriamento (CHOTOLI, 2006).

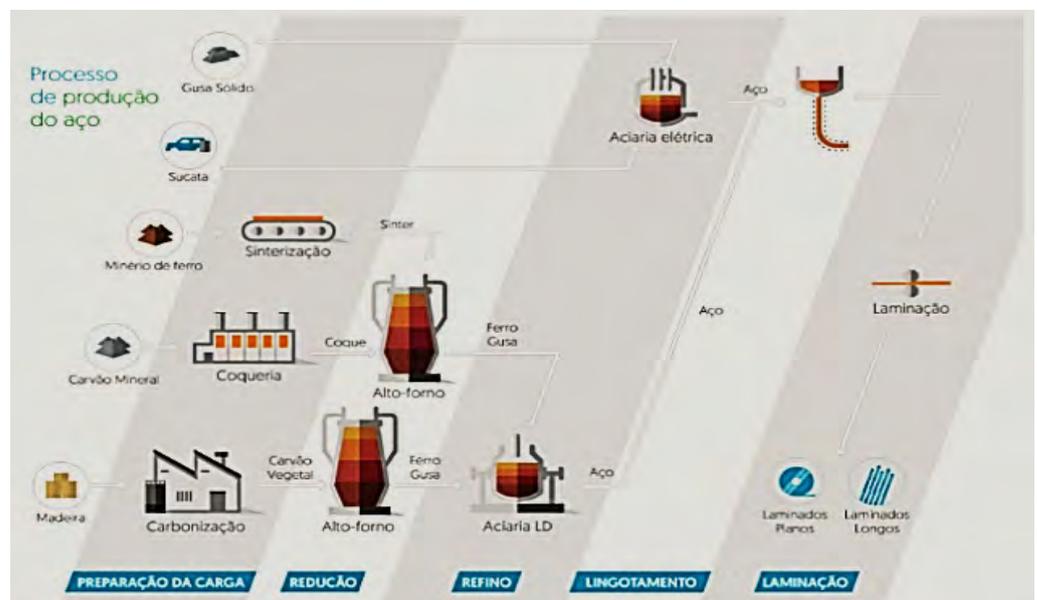
Para que a escória possa ser utilizada na construção civil, o material deve passar por uma estabilização de, no mínimo, seis meses para se tornar menos reativo quimicamente (SILVA, 2011). Em torno de 40% das escórias de aciaria, após serem estabilizadas, são reaproveitadas em obra de infraestrutura rodoviária, estabilização de bases e sub-bases, lastro de ferrovias e outros. O restante, representando 60% da geração desse resíduo, é estocado nos pátios de siderurgias, causando um grande passivo ambiental (PACHECO, 2017).

Para entender melhor como a escória de aciaria é gerada, é preciso conhecer como o aço é produzido e em que momento o material é formado. Basicamente, o processo de fabricação do aço é constituído por cinco etapas, iniciando com a preparação da carga e finalizando com a laminação do aço para comercialização. Essas etapas são apresentadas na Figura 1.

Figura 1 ►

Processo de produção do aço.

Fonte: Instituto Aço Brasil (IABR, 2018, p. 30)



O processo de fabricação do aço utilizado pela Companhia Siderúrgica do Pecém (CSP), de onde se obteve a escória de aciaria do estudo, é de usina integrada LD, com conversores de oxigênio, ou seja, passa pelas cinco etapas apresentadas anteriormente.

A maneira mais comum de beneficiamento da escória, embora menos eficiente, é realizada da seguinte forma: a escória é transportada ainda em estado líquido, com temperatura de 1.400 °C a 1.700 °C, para o pátio de escória, onde é basculada em baias para seu processamento e beneficiamento. Para ser beneficiada, a escória precisa ser resfriada. O método utilizado no resfriamento influencia diretamente nas características físicas distintas que o material apresentará. O resfriamento pode ser ao ar, por pelletização ou brusco com água. Após resfriada, a escória passa por processos de britagem, classificação e recuperação magnética. O ferro recuperado é reutilizado na aciaria na produção de aço, sendo novamente classificado como sucata (GEYER, 2001). O restante da escória, com menor propriedade metálica, é separado, classificado e armazenado em pátios a céu aberto para ser curado pelo tempo mínimo de seis meses e, então, comercializado (FARIA, 2007). Na Figura 2 são apresentadas as etapas descritas.

Figura 2 ►

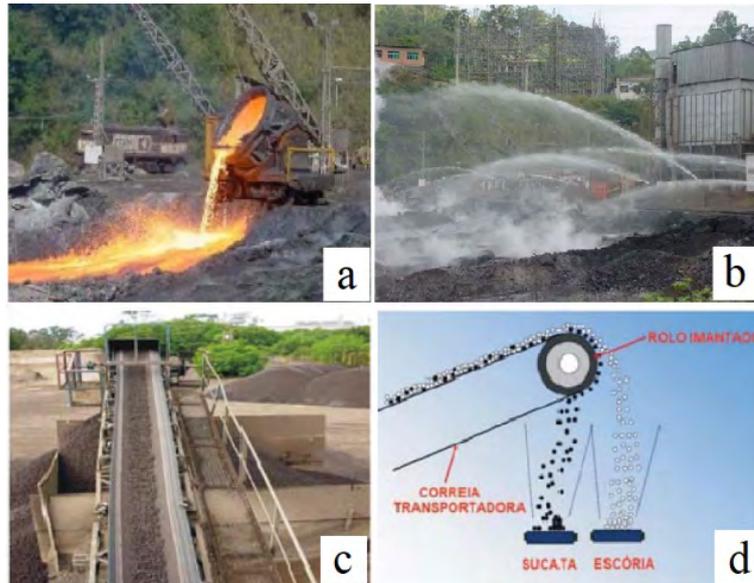
Beneficiamento da escória de aciaria

a) Escória líquida; b) Resfriamento;

c) Classificação;

d) Separação magnética.

Fonte: adaptado de Sousa (2007, p. 30-31)

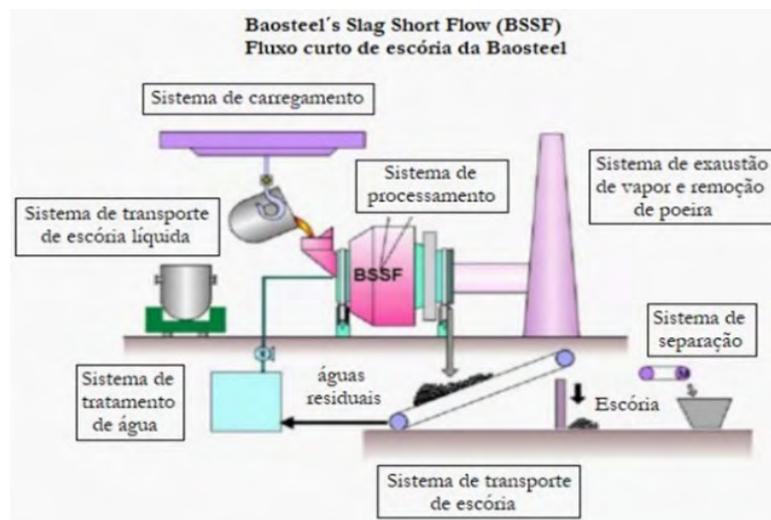


A outra forma, mais atual, de resfriamento e beneficiamento da escória foi desenvolvida pela empresa chinesa Baosteel Metal Company e é conhecida como BSSF (*Baosteel's Slag Short Flow*/fluxo curto de escória da Baosteel). Esse processo resfria e estabiliza instantaneamente a escória. A grande diferença do BSSF é a forma e o tempo de resfriamento, uma vez que em poucos minutos o procedimento produz uma escória de aciaria estabilizada e granulada (BAOSTEEL, 2015). Nesse processo a escória líquida, ainda em altas temperaturas, é lançada em um recipiente rotativo e, através da ação combinada de força mecânica por esferas de aço e resfriamento, ela é solidificada e triturada em pequenas partículas. Uma grande vantagem desse método é que o metal residual não se mistura com a escória no momento do descarregamento, devido aos diferentes pontos de solidificação. O processo é bastante rápido, com duração de três a cinco minutos, e ainda reduz significativamente a quantidade de cal livre que não reagiu (SOUZA, 2016). A escória de aciaria resfriada por esse procedimento sofre estabilização rápida, isso porque os grãos de escória reagem com o vapor e CO_2 , fazendo com que a cal livre seja estabilizada rapidamente. Contudo, o material perde grande parte de sua capacidade expansiva (LI; NI, 2011). Na Figura 3 é apresentado o processo de resfriamento e beneficiamento da escória através do método BSSF.

Figura 3 ►

Beneficiamento escória de aciaria processo BSSF.

Fonte: adaptado de Li e Ni (2011, p. 13)



A escória de aciaria é classificada segundo NBR 10004 (ABNT, 2004) como resíduo sólido não inerte, classe IIA, ou seja, não apresenta periculosidade para o uso. Por ser resultante do processo de refino do aço, é formada por ferro metálico, silicatos de cálcio, óxidos de magnésio e de cálcio, bem como por outros elementos químicos em menor escala.

A escória de aciaria apresenta grande capacidade expansiva devido à elevada presença de óxido de cálcio livre (CaO) e de óxido de magnésio livre (MgO). O processo de produção em que a escória é gerada interfere diretamente na porcentagem dos elementos e compostos. A hidratação, carbonatação e oxidação ocasionam um aumento considerável do volume dos elementos em relação às dimensões originais, acarretando a expansão destrutiva. A utilização da escória de aciaria requer bastante cuidado devido, principalmente, a sua propriedade expansiva. Porém, ela pode ser empregada com a adoção de critérios de valores limites e parâmetros de classificação, dado que experimentos práticos demonstram instabilidade dimensional para alguns teores (MACHADO, 2000). Quanto ao tempo para estabilização da escória, ainda existem muitas divergências entre autores. Para Machado (2000), a escória, sujeita às condições de hidratação e carbonatação ao longo do tempo, por um período mínimo de três meses, alcança a estabilização através da formação de produtos estáveis. Para Geyer (2001), por sua vez, o período de estabilização varia de três a doze meses, dependendo de como a escória foi armazenada. Já para Souza (2016), o período é de pelo menos um ano. Ainda existem autores que afirmam que o período de estabilização pode levar dezoito meses.

Uma grande vantagem da utilização de agregado reciclado, além do ganho ambiental, é a economia gerada no canteiro de obra, visto que normalmente os agregados reciclados possuem preços muito inferiores aos dos agregados naturais (SANTOS, 2012). Yanik (2016) aponta que, em um curto prazo de tempo, o pó produzido a partir do agregado reciclado de concreto, cinza volante ou escória, superará o consumo atual de areia e pedrisco naturais. A tendência é que isso ocorra nos grandes centros urbanos, já que as jazidas naturais estarão distantes do ponto de utilização e, portanto, será mais viável a produção de agregado reciclado do que o transporte do agregado natural.

No que se refere aos blocos de concreto, eles são definidos como componentes da alvenaria, com ou sem função estrutural, e normalizados pela NBR 6136 (ABNT, 2016) e NBR 12118 (ABNT, 2013). São vazados nas faces superior e inferior e possuem área líquida igual ou inferior a 75% da área bruta. São produzidos por equipamentos manuais, pneumáticos ou hidráulicos através da vibro compactação e extrusão imediata (FERNANDES, 2015). Quanto aos requisitos físico-mecânicos, que garantem a qualidade dos blocos de concreto, a NBR 6136 (ABNT, 2016) determina os limites de resistência, absorção e retração linear por secagem.

Motivado pela preocupação ambiental referente à grande geração de resíduos pelas indústrias, em especial a siderúrgica, e a ampla utilização de blocos de concreto na construção civil, neste trabalho é analisada a potencialidade da substituição parcial de agregados naturais por artificial (reciclado), proveniente de escória de aciaria BSSF, na fabricação de blocos de concreto sem função estrutural (vedação). Foram examinadas as propriedades físicas e mecânicas dos blocos através de ensaios laboratoriais previstos na NBR 6136 (ABNT, 2016), a fim de validar o estudo quanto à utilização desse material no mercado.

2 Materiais e métodos

O trabalho foi dividido em três etapas distintas: a primeira foi a caracterização dos agregados, aglomerante e escória; a segunda, por sua vez, foi a fabricação dos blocos; por fim, a terceira etapa caracterizou-se pelos ensaios dos blocos.

Nos agregados naturais foram utilizados os seguintes materiais: areia natural de origem quartzosa, pó de pedra e pedrisco de dimensão máxima ($D_{máx}$) igual a 6,3 mm de origens basáltica. Já no agregado artificial foi utilizada a escória de aciaria BSSF em substituição aos agregados miúdo e graúdo. O aglomerante utilizado foi o cimento Portland CPV ARI, além do aditivo plastificante redutor de água, isento de cloretos.

2.1 Caracterização dos agregados e do aglomerante

Para a caracterização dos agregados, foram realizados ensaios de análise granulométrica, massa unitária e volume de vazios, massa específica e teor de material pulverulento.

Os ensaios de análise granulométrica foram realizados de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003c) e os limites aceitáveis e limites ótimos de utilização propostos pela NBR 7211 (ABNT, 2009a). Tanto a areia natural quanto o pó de pedra apresentaram módulo de finura de 2,2, ficando dentro da zona ótima de utilização para concreto. A curva granulométrica do pedrisco ficou abaixo do limite da faixa 4,75/12,5, no entanto, o material é empregado em blocos de concreto devido à pequena espessura de sua parede (18 mm para bloco vedação), que permite que seja utilizado pedrisco com dimensão máxima de 6,3 mm. A escória de aciaria BSSF utilizada neste estudo apresenta curva granulométrica bem distribuída, com $D_{máx}$ igual a 12,5 mm e módulo de finura de 4,35. Os resultados da caracterização física dos agregados estão resumidos na Tabela 1.

Tabela 1 ▼

Caracterização física dos agregados.

Fonte: dados da pesquisa

Propriedades avaliadas		Norma ABNT	Areia média	Pó de pedra	Pedrisco	Escória de aciaria
Massa unitária (kg/m ³)	Estado solto	NBR NM 45:2006	1480,18	1809,41	1618,14	2079,31
	Estado compactado		1576,61	1960,57	1687,24	2128,02
Volume de vazios (%)	Estado solto		42,34	29,65	47,43	39,01
	Estado compactado		38,58	23,77	45,19	37,58
Massa específica aparente no estado seco (g/cm ³)		NBR NM 52:2003; NBR NM 53:2009	2,56	2,57	3,07	3,41
Massa específica na condição SSS (g/cm ³)			2,58	2,70	2,85	3,50
Massa específica absoluta (g/cm ³)			2,60	2,97	2,75	3,74
Teor de material pulverulento (%)		NBR 46:2003	0,11	21,25	-	1,74

Quanto ao aglomerante, foram realizadas análise química, ensaios físicos e mecânicos de acordo como especificado na NBR 16697 (ABNT, 2018), e os resultados constam na Tabela 2. O aditivo utilizado tem função plastificante, é isento de cloretos, e apresenta como aplicabilidade a redução de água.

Tabela 2 ▼

Caracterização do cimento.

Fonte: dados da pesquisa

Características e propriedades		Valores obtidos	Limites da NBR 16697 (ABNT, 2018)
Pasta de consistência normal (% massa de cimento)		28,5	*
Início de pega		02h20min	> 60 min
Fim de pega		03h15min	< 600 min
Expansibilidade a quente (mm)		0,5	≤ 5
Expansibilidade a frio (mm)		1,0	*
Massa específica (g/cm ³)		3,09	*
Finura	Retido 75µm (#200)	1,1	< 6,0%
	Área específica ^a	5480	*
Resistência à compressão (<i>f_{cj}</i>)	1 dia	25,5	> 14 MPa
	3 dias	35,7	> 24 MPa
	7 dias	40,5	> 34 MPa
	28 dias	48,1	*

2.2 Caracterização da escória de aciaria

No caso da escória, foram realizados ensaios de perda ao fogo de acordo com a NBR NM 18 (ABNT, 2012b), assim como análise química semiquantitativa por fluorescência de raios X (FRX), com base em diretrizes gerais da NBR 14656 (ABNT, 2001). Para isso utilizou-se espectrômetro de fluorescência de raios-X (marca Panalytical, modelo Minipal Cement), a partir de pastilhas fundidas em máquina de fusão (marca Claisse, modelo M4), além de fundentes à base de mistura de tetraborato de lítio/metaborato de lítio (marca MAXXIFLUX), 66,67% de Li₂B₄O₇, 32,83% de LiBO₂ e 0,7% de LiBr, com proporção de 0,6 g de amostra e 6,75 g de fundente. Também foi utilizado óxido de cálcio livre (CaO livre) de acordo com a NBR NM 13 (ABNT, 2012a), bem como óxido de Ferro II (FeO) e ferro Metálico (FeM) conforme diretrizes da ASTM E246 (ASTM, 2010).

Já a análise mineralógica quantitativa por difração de raios X foi realizada em um difratômetro de raios X (marca Panalytical, modelo EMPYREAN) com detector PIXcel3D, operando na radiação K α do cobre com 40 kV - 40 mA e varredura de 2°2 θ /min. A identificação dos compostos foi executada por meio do software X-pert HighScore Plus [versão 4.8 (4.8.0.25518)] da Panalytical, padrões difratométricos e de estruturas fornecidos pelo banco de dados gratuito do COD (*Crystallography Open Database*, atualizado em 2017) e, eventualmente, padrões difratométricos e de estruturas do ICDD (*International Center for Diffraction Data*) e ICSD (*International Center for Structure Data*). Cabe ressaltar que o indicador estatístico utilizado para verificar os resultados do refinamento foi o GOF (*Goodness of Fitting*), além do gráfico das diferenças entre os difratogramas observados e calculados. A seguir, estão listados alguns dos parâmetros de refinamento utilizados em cada difratograma para a obtenção dos percentuais das fases presentes, na respectiva ordem de aplicação: refinamento do fator escala; ajuste da linha base; refinamento da constante do difratômetro (Zero Shift); refinamento da cela unitária

das fases maiores; refinamento da cela unitária das fases menores; refinamento do perfil de pico (para fases presentes com mais de 5%); refinamento da orientação preferencial (para compostos suscetíveis). Na Tabela 3 são apresentadas a composição química e mineralógica da escória de aciaria BSSF utilizada.

Tabela 3 ▼

Caracterização da escória de aciaria.

Fonte: dados da pesquisa

Análise química			
Determinações	Resultados (%)	Determinações	Resultados (%)
Perda ao fogo (PF)	-0,5 ^{Nota 1}	Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	1,4
		Óxido de fósforo (P ₂ O ₅)	1,4
Óxido de cálcio (CaO)	37,3	Óxido de titânio (TiO ₂)	0,6
Ferro total (Fe)	27,2	Ferro metálico (FeM)	0,6
Óxido de ferro II (FeO)	21	Óxido de vanádio (V ₂ O ₅)	0,2
Óxido férrico (Fe ₂ O ₃) ^{Nota 2}	14,6	Óxido de potássio (K ₂ O)	0,1
Anidrido silícico (SiO ₂)	13,2	Óxido de cromo (Cr ₂ O ₃)	0,1
Óxido de magnésio (MgO)	6,6	Anidrido sulfúrico (SO ₃)	0,1
Óxido de manganês (MnO)	3,5	Óxido de estrôncio (SrO)	< 0,1
Óxido de cálcio livre (CaO)	1,8	Óxido de cobre (CuO)	< 0,1
Análise mineralógica			
Compostos ou fases mineralógicas	Fórmula molecular	Fichas de estruturas	Resultados (%)
Wustita	FeO	96-900-2670	21,8
Brownmillerita	Ca ₈ Fe _{6,37} Al _{1,63} O ₂₀	96-900-3342	20,3
---	Ca _{14,92} (PO ₄) _{4,2,35} (SiO ₄) _{4,5,65}	96-810-3588	16,7
Larnita	CaO ₂ SiO ₃	96-901-2795	16,5
		96-901-2791	
Periclásio	MgO	96-900-6460	10,1 ^{Nota 3}
Ca ₂ Fe ₂ O ₅	Ca ₂ Fe ₂ O ₅	96-210-6287	6,6
Kirschsteinita	Ca ₄ Fe _{3,08} Mg _{0,88} Si ₄ O ₁₆	96-900-5316	3,7
Cohenita	Fe ₃ C	96-901-4399	3,3
Hematita	Fe ₂ O ₃	96-900-0140	1

Nota 1: O valor de perda ao fogo negativo possivelmente se deve a fenômenos de óxido-redução que ocorrem no ensaio de perda ao fogo, inerentes ao material ensaiado.

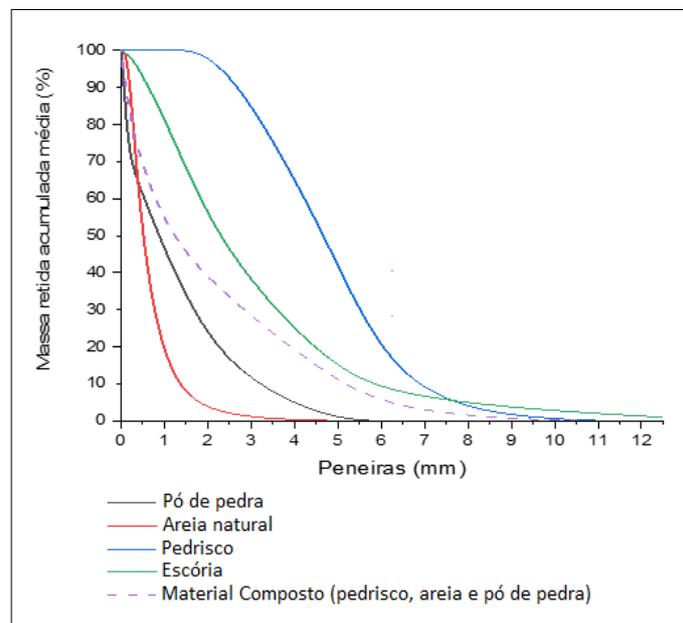
Nota 2: A determinação do óxido de ferro (Fe₂O₃) foi obtida por estequiometria com a seguinte equação: Fe₂O₃ = ((Ferro total (Fe) – (Óxido de ferro II (FeO) x 0,78) – Ferro metálico (FeM))) x 1,43.

Nota 3: O resultado pode estar sobrestimado, devendo ser considerado o mais correto a soma de wustita e periclásio, pois ocorre a sobreposição dessas estruturas.

2.3 Fabricação dos blocos

Na segunda etapa da pesquisa foi realizada a definição dos traços a serem estudados. Para tanto, realizou-se em laboratório o empacotamento das partículas através do ensaio de massa unitária, de acordo com a NBR NM 45 (ABNT, 2006), objetivando encontrar um traço com o menor índice de vazios (composição pedrisco/areia e posteriormente pedrisco/areia/pó de pedra). Esse traço empacotado serviu de referência para as substituições propostas. Também foram fabricados blocos com o traço utilizado pela empresa a fim de confrontar os resultados. Em um comparativo granulométrico, observou-se que escória de aciaria apresenta comportamento próximo do traço empacotado encontrado, ou seja, percentuais de agregados graúdo e miúdo semelhantes, conforme ilustra a Figura 4. Portanto, optou-se por substituir o agregado graúdo e miúdo pela escória.

Figura 4 ►
Curvas granulométricas.
Fonte: dados da pesquisa



Para todos os traços foi fixada a quantidade de água e aditivo, de modo que a única variável dos diferentes traços foi a substituição dos agregados naturais pelo artificial. Foram feitas as substituições de agregados graúdo e miúdo naturais por artificial, proveniente da escória de aciaria BSSF, nas proporções de 20%, 40%, 60% e 80%. Tentou-se a substituição de 100%, porém os blocos quebravam assim que saíam do molde. O principal motivo foi a falta de coesão do concreto proporcionada pela falta de finos na mistura. A nomenclatura utilizada para cada bloco foi a seguinte:

- Bloco Empresa – BE;
- Bloco Sugestão Empacotado - BSE;
- Bloco Substituição de 20% - BS 20;
- Bloco Substituição de 40% - BS 40;
- Bloco Substituição de 60% - BS 60;
- Bloco Substituição de 80% - BS 80.

Os traços unitários, em volume, dos blocos de concreto estudados são apresentados na Tabela 4. A relação água cimento utilizada para todos traços foi de 1,25, e a quantidade de aditivo fixada em 50 ml. Para conversão do cimento de massa para volume, foi utilizada a massa unitária de 1,08 kg/dm³ fornecida pela fabricante de cimento Apodi.

Tabela 4 ▶

Caracterização da escória de aciaria.

Fonte: dados da pesquisa

Insumos	BE	BSE	BS 20	BS 40	BS 60	BS 80
Cimento	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Pedrisco	4,32	3,29	2,65	1,94	1,30	0,65
Areia natural	4,32	2,38	1,89	1,46	0,97	0,49
Pó de pedra	4,32	7,29	5,83	4,37	2,92	1,46
Escória BSSF	-	-	2,59	5,18	7,78	10,37
Consumo de cimento (kg/m ³)	118,21	116,62	117,52	118,44	119,37	120,32

Os blocos foram produzidos em uma indústria de artefatos de cimento. Para tanto, foi utilizada uma máquina vibroprensa hidráulica e os processos de fabricação seguiram os passos usuais da fábrica, inclusive o processo de cura, que foi realizado por meio da cobertura dos blocos de concreto com lona plástica logo após a moldagem, mantidos nessas condições por 24 h. Os blocos fabricados foram sem função estrutural, classe C, com dimensões de 14x19x39 cm. Eles foram produzidos com o fundo fechado e apenas a parte superior vazada, similar ao padrão de fabricação e comercialização de blocos de vedação da fábrica Concretize.

2.4 Ensaaios dos blocos

Os ensaios dos blocos foram realizados após 28 dias da data de fabricação e os resultados verificados de acordo com os requisitos da NBR 6136 (ABNT, 2016) e com os métodos de ensaio da NBR 12118 (ABNT, 2013). Os ensaios realizados foram: análise dimensional; absorção de água e área líquida; e resistência à compressão axial. Foi realizada análise estatística ANOVA para observar se existia variância entre os resultados, bem como o Teste de Tukey para identificar quais resultados tinham diferença significativa.

3 Resultados

3.1 Análise dimensional dos blocos

As tolerâncias permitidas nas dimensões dos blocos são de ± 2 mm para largura e ± 3 mm para altura e comprimento. Portanto, de acordo com os requisitos normativos, todos os blocos de concreto estudados atendem à NBR 6136 (ABNT, 2016).

Com relação à espessura da parede, tanto longitudinal quanto transversal, de acordo com a norma brasileira, a tolerância é de -1,0 mm. Os blocos ensaiados apresentaram, em média, espessuras de paredes de 24 mm, sendo que para o bloco sem função estrutural, classe C, as espessuras de paredes transversal e longitudinal, devem ser de, no mínimo, 18 mm. Sendo assim, os blocos ensaiados atendem ao requisito da norma, superando a espessura mínima em torno de 6 mm.

Quanto à espessura equivalente, a referida norma apresenta como valor mínimo 135 mm/m e os blocos ensaiados apresentaram em média 188 mm/m, superando também o mínimo exigido.

Na Tabela 5 são apresentados os resultados do ensaio de análise dimensional.

Tabela 5 ▼

Resultado da análise dimensional dos blocos.
Fonte: dados da pesquisa

Amostra	Dimensões médias (mm)			Tolerância normativa (mm)			Dimensões parede (mm)		Tolerância normativa (mm)	
	Larg.	Alt.	Comp.	Larg.	Alt.	Comp.	Long.	Trans.	Long.	Trans.
BE	142	189	393	± 2	± 3	24,0	24,0	25,0	-1,0	
BSE	142	189	393				25,0			
BS20	141	189	393				24,0			
BS40	142	188	393				24,0			
BS60	141	189	393				24,0			
BS80	142	189	393				24,0			

3.2 Absorção de água e área líquida dos blocos

Na Tabela 6 são apresentados os valores de absorção de água e área líquida dos blocos de concreto com e sem a incorporação de escória. De acordo com a NBR 6136 (ABNT, 2016), nos blocos sem função estrutural, classe C, a absorção deve ser individualmente menor que 11% e, em média, menor que 10%. Portanto, os resultados de absorção encontrados satisfazem os requisitos normativos.

Tabela 6 ►

Resultados de absorção de água e área líquida dos blocos.
Fonte: dados da pesquisa

Amostra	Absorção média (%)	NBR 6136 (ABNT, 2016)	Área líquida (mm ²)
BE	5,8	Individual ≤ 11 Média ≤ 10	28389
BSE	6,3		27999
BS20	5,5		28239
BS40	5,6		28029
BS60	5,1		27578
BS80	4,7		27903

3.3 Resistência à compressão dos blocos

Na Tabela 7 são apresentados os resultados dos ensaios de resistência à compressão, e na Figura 5 um gráfico comparando resistência à compressão com absorção de água.

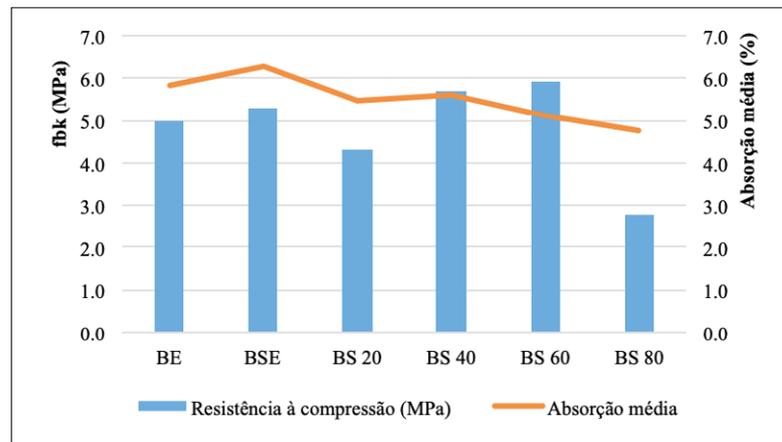
De acordo com a NBR 6136 (ABNT, 2016), para o bloco estudado, a resistência à compressão axial característica dos blocos de concreto sem função estrutural, classe C,

deve ser maior ou igual a 3 MPa aos 28 dias, por conseguinte, todas as substituições atendem a esse requisito normativo, exceto o BS80.

Tabela 7 ▶
Resultados de resistência à compressão dos blocos.
Fonte: dados da pesquisa

Amostra	Resistência característica f_{bk} , est (MPa)	$\Psi \cdot f_{bk}$	Adotar como f_{bk} , est (MPa)
BE	5,0	4,5	5,0
BSE	5,3	4,9	5,3
BS20	4,3	4,1	4,3
BS40	5,7	5,2	5,7
BS60	5,9	5,4	5,9
BS80	2,8	2,8	2,8

Figura 5 ▶
Resistência à compressão e absorção de água dos blocos aos 28 dias.
Fonte: dados da pesquisa



4 Discussão

O objetivo principal deste trabalho foi avaliar o desempenho físico e mecânico de blocos de concreto sem função estrutural, fabricados com substituição parcial de agregados naturais por artificial, proveniente de escória de aciaria BSSF. Os resultados foram satisfatórios, uma vez que os blocos BS20, BS40 e BS60 atenderam todos requisitos normativos, e os blocos com substituição máxima de 80% chegaram próximos da resistência à compressão requerida, porém atenderam aos demais requisitos. Vale destacar que na substituição de 60%, obteve-se o melhor resultado no ensaio de resistência à compressão, sendo 11,3% maior que no bloco BSE (referência), fabricado com agregados naturais.

No que se refere à absorção de água, o resultado foi 19% menor. Na análise estatística realizada, através do método ANOVA, foi comprovado que há variância nos resultados. Portanto, foi realizado o Teste de Tukey para identificar a variação. Comparados aos pares, os blocos que apresentaram diferença significativa no ensaio de absorção de água foram: BE e BS80; BSE e BS20; BSE e BS60; BSE e BS80; BS40 e BS80. Todas as demais combinações apresentaram equivalência no resultado. Na resistência à compressão, os blocos BS80 apresentaram diferença significativa comparado aos demais fabricados.

Todos os outros demonstraram resultados equivalentes entre si. Analisando a Figura 5, fica claro o ganho de resistência dos blocos com substituição até 60%, nível mais alto, e uma acentuada queda na resistência do bloco com 80%.

No momento da fabricação, o bloco BS80 se manteve coeso, contudo, menos que os demais, apresentando superfície bastante rugosa e menor intertravamento das partículas. Na Figura 6 é possível observar a diferença no acabamento dos blocos, sendo o BSE mais liso, e os com substituição, mais rugosos.

Figura 6 ►

Blocos fabricados no estudo.
Fonte: arquivo dos autores.



O presente trabalho pode ser considerado inédito, uma vez que ainda não existem pesquisas em que foram utilizadas escórias de aciaria com processo de resfriamento e beneficiamento BSSF para a fabricação de blocos de concreto. O que há na literatura são estudos em que se utilizou o mesmo tipo de escória de aciaria BSSF, porém, para a produção de argamassas e concretos ou, ainda, trabalhos com fabricação de blocos de concreto com escória de aciaria resfriadas pelo processo tradicional, curadas a céu aberto por longo período de tempo para estabilização.

Dias *et al.* (2020) estudaram os efeitos da substituição do cimento Portland por escória de aciaria BSSF nas propriedades físicas e mecânicas do concreto. A escória utilizada pelos autores teve origem da mesma siderúrgica que a utilizada no presente trabalho, a CSP. No estudo dos autores foi investigado o fenômeno de expansibilidade da escória de acordo com NBR 16697 (ABNT, 2018). A escória não apresentou expansão a frio, e para expansão a quente ficou dentro do limite máximo especificado pela norma de 5 mm.

Santos *et al.* (2014) também produziram blocos de concreto, entretanto, utilizaram a escória de aciaria elétrica, resfriada e beneficiada pelo método tradicional. Os resultados apresentados são semelhantes. Os autores produziram bloco de concreto com substituição total de agregados naturais por artificial. No estudo deles, o bloco de escória apresenta absorção de água de 4,1% e resistência à compressão de 13,08 MPa, enquanto o bloco natural aponta absorção de água de 7,9% e resistência de 11,13 MPa, ambos aos 28 dias. Portanto, o bloco com escória apresenta menor absorção de água e maior resistência à compressão.

5 Conclusões

A fabricação de blocos de concreto com utilização de agregado artificial, a partir de escória de aciaria BSSF, atende aos requisitos previstos na NBR 6136 (ABNT, 2016) quanto à resistência à compressão, análise dimensional, absorção de água e área líquida, até um percentual de substituição de 60%, sendo que nessa razão supera em 97% a resistência à compressão mínima requerida em norma.

- A produção de bloco de concreto, sem função estrutural, com escória de aciaria BSSF se mostrou viável tecnicamente;
- Os teores de substituição de agregados naturais por artificial (escória de aciaria BSSF) foram determinados e os melhores resultados para absorção de água e resistência à compressão ocorreram com teor de substituição de 60%;
- Os blocos com escória não apresentaram diferenças dimensionais dos blocos naturais, dentro das condições estudadas e sem avaliação de durabilidade;
- Embora a escória seja mais densa que os agregados naturais, o bloco que apresentou melhor desempenho (BS60) é 9% mais denso que o bloco referência, porém 11,3% mais resistente;
- A aparência dos blocos com escória não foi objeto do estudo, contudo, com ajuste do traço é possível melhorar o acabamento, ter ganho de resistência e reduzir a absorção de água. Com isso, é possível alcançar uma economia de cimento por m³ de concreto.

Os resultados obtidos na idade estudada mostraram que a aplicação da escória de aciaria estabilizada como substituta de parte dos agregados naturais em blocos de concreto é promissora. Todavia, é necessário avançar no estudo, envolvendo a avaliação da durabilidade e desempenho dos blocos de concreto, objetos de estudos futuros. Um dos objetivos da pesquisa é possibilitar a produção de blocos de concreto de forma comercial com a utilização desse resíduo sólido industrial, contribuindo, assim, para preservação do meio ambiente através da redução de um passivo ambiental nos pátios de estocagem de resíduos e menor exploração de recursos naturais.

Referências

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6136:2016**. Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – Requisitos. Rio de Janeiro, 2016. 10 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211:2009**. Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009a. 12 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004:2004**. Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004. 71 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12118:2013**. Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2013. 14 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14656:2001** (Confirmada em 2019). Cimento Portland e matérias-primas – Análise química por espectrometria de raios X – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2001. 6 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697:2018**. Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018. 12 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 13:2012** (Errata 1:2013). Cimento Portland – Análise química – Determinação de óxido de cálcio livre pelo etileno glicol. Rio de Janeiro, 2012^a. 4 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 18:2012**. Cimento Portland – Análise química – Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2012b. 4 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45:2006**. Agregados – Determinação de massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006. 8 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 46:2003**. Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003a. 6 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52:2003**. Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2003b. 6 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53:2009**. Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009b. 14 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248:2003**. Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003c. 13 p.

ANGULO, S. C.; FIGUEIREDO, A. D. Concreto com agregados reciclados. *In*: ISAIA, G. C. (ed.). **Concreto: ciência e tecnologia**. 1 ed. São Paulo: IBRACON, 2011. v. 2, p. 1731-1767.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E246:2010**. Standard test methods for determination of iron in iron ores and related materials by dichromate titrimetry. West Conshohocken, PA, 2010. 9 p.

BAOSTEEL. **Energy conservation and environmental protection**. Xangai: Companhia de Engenharia e Tecnologia da Baosteel Ltda., 2015. Disponível em: http://bsee.baosteel.com/english/tech5_6.htm. Acesso em: 15 maio 2019.

CHOTOLI, F. F. **Obtenção de clínquer de cimento a partir de escória de aciaria a oxigênio**: estudo em escala laboratorial. 2006. 170 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Habitação: Planejamento e Tecnologia) – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo, 2006. Disponível em: http://cassiopea.ipt.br/teses/2006_HAB_Fabiano_Ferreira_Chotoli.pdf. Acesso em: 12 jun. 2019.

CSP – COMPANHIA SIDERÚRGICA DO PECÉM. **Co-produtos**: escória de aciaria e alto-forno. São Gonçalo do Amarante: Companhia Siderúrgica do Pecém, 2021. Disponível em: <https://www.cspecem.com/pt-br/produtos/co-produtos/>. Acesso em: 5 mar. 2021.

DIAS, A. R. O.; AMANCIO, F. A.; SOUSA, I. L. X.; LUCAS, S. O.; LIMA, D. A.; CABRAL, A. E. B. Efeitos da substituição do cimento Portland por escória de aciaria BSSF nas propriedades físicas e mecânicas do concreto. **Revista Matéria**, v. 25, n. 4, e-12890, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620200004.1190>.

FARIA, R. A. F. **Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas e da durabilidade de concretos com escória de aciaria elétrica (EAF) como agregado graúdo**. 2007. 146 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2007. Disponível em: <http://repositorio.bc.ufg.br/tede/handle/tde/674>. Acesso em: 10 maio 2019.

FERNANDES, I. D. **Blocos e pavers**: produção e controle de qualidade. 6. ed. Ribeirão Preto: Treino Assessoria e Treinamentos, 2015. 200 p.

GEYER, R. M. T. **Estudo sobre a potencialidade do uso de escórias de aciaria como adição ao concreto**. 2001. 170 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/1508>. Acesso em: 25 abr. 2019.

IABR – INSTITUTO AÇO BRASIL. **Anuário estatístico 2020**. Rio de Janeiro, 2020. 89 p.

IABR – INSTITUTO AÇO BRASIL. **Relatório de sustentabilidade**. Rio de Janeiro, 2018. 84 p.

LI, G.; NI, H. Recent progress of hot stage processing for steelmaking slags in China considering stability and heat recovery. *In*: INTERNATIONAL SLAG VALORISATION SYMPOSIUM, 2., 2011, Leuven. **Proceedings [...]**: The transition to sustainable materials management. Leuven: University of Leuven research Centre, 2011. Disponível em: https://www.slag-valorisation-symposium.eu/2011/images/papers/s4_2_li.pdf. Acesso em: 12 jun. 2019.

MACHADO, A. T. **Estudo comparativo dos métodos de ensaio para avaliação da expansibilidade das escórias de aciaria**. 2000. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/001124858>. Acesso em: 10 jun. 2019.

PACHECO, R. F. R. **Estudo sobre a utilização das escórias de aciaria LD naturais ou modificadas para substituição parcial do cimento ou como adição ao clínquer**. 2017. 297 f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3133/tde-28112017-082247/pt-br.php>. Acesso em: 10 jun. 2019.

RAPOSO, C. O. L. **Estudo experimental de compactação e expansão de uma escória de aciaria LD para uso em pavimentação**. 2005. 163 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2005. Disponível em: <http://repositorio.ufes.br/handle/10/6184>. Acesso em: 13 maio 2019.

SANTOS, C. R. **Estudo da utilização de rejeitos de carvão na fabricação de blocos de concreto para pavimentação em substituição ao agregado miúdo natural**. 2012. 160 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/75760>. Acesso em: 10 jun. 2019.

SANTOS, D. H.; MARINHO, A. L. B.; BARROS, T. R.; SILVA, G. J. B.; PEIXOTO, R. A. F. Blocos de concreto produzidos com escória de aciaria para uso em alvenaria modular. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 56., 2014, Natal. **Anais [...]**. Natal: Ibracon, 2014.

SILVA, M. J. **Elementos de concreto para pavimentação produzidos com agregados de escória de aciaria**. 2011. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011. Disponível em: <https://docplayer.com.br/74227176-Mateus-justino-da-silva-elementos-de-concreto-para-pavimentacao-produzidos-com-agregados-de-escoria-de-aciaria-dissertacao-de-mestrado.html>. Acesso em: 18 jun. 2019.

SOUSA, G. M. **Estudo experimental de escória de aciaria para fins de caracterização tecnológica como material de lastro ferroviário em vias sinalizadas**. 2007. 142 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2007.

SOUZA, T. V. P. **Caracterização de escória de conversor a oxigênio obtida no processo BSSF antes e após tratamento hidrometalúrgico**. 2016. 67 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/22587>. Acesso em: 18 jun. 2019.

YANIK, K. **Report: global demand for aggregates to rise**. Pit&Quarry, 18 mar. 2016. Disponível em: <http://www.pitandquarry.com/report-global-demand-for-aggregates-to-rise/>. Acesso em: 18 maio 2019.