

SUBMETIDO 09/02/2022

APROVADO 27/03/2022

PUBLICADO ON-LINE 17/04/2022

PUBLICADO 10/10/2023

EDITOR ASSOCIADO
Andre Luis Christoforo

DOI: <http://dx.doi.org/10.18265/1517-0306a2021id6647>


ARTIGO ORIGINAL

Propriedades mecânicas de concretos sustentáveis com incorporação de escória de aciaria BSSF em substituição aos agregados naturais

 Fábio de Moraes Cartaxo ^[1]

 Fernanda Giannotti da Silva Ferreira ^{[2]*}

 Karoline Mariana Gonçalves Freitas ^[3]

 Lucas Clementino do Nascimento ^[4]

 Mário Sérgio Guilge ^[5]

 Cláudia Zanetti ^[6]

[1] fabimoraiscartaxo@gmail.com

[2] fgiannotti@ufscar.br

Departamento de Engenharia Civil,
Universidade Federal de São Carlos (UFSCar),
Brasil

[3] karolina.freitas@gcpat.com

GCP Applied Technologies, Brasil

[4] lucascn@ipt.br

Laboratório de Materiais para Produtos
de Construção, Instituto de Pesquisas
Tecnológicas (IPT), Brasil

[5] mario.guilge@cimentoapodi.com.br

[6] claudia.zanetti@cimentoapodi.com.br

Companhia de Cimento Apodi, Brasil

RESUMO: A escória de aciaria é coproduto siderúrgico, com comportamento expansivo, para cuja incorporação em produtos da construção civil necessita passar por processos de estabilização. O processo denominado BSSF (do inglês Baosteel Slag Short Flow – Fluxo Curto de Escória da Baosteel) é uma novidade tecnológica no Brasil, que consiste no resfriamento e estabilização de grandes montantes de material, em menor tempo quando comparado ao tratamento convencional. Embora se visualize tal processo como algo promissor, faltam, todavia, estudos que comprovem sua eficácia. Assim, este trabalho tem como objetivo investigar as propriedades mecânicas de concretos produzidos com a incorporação de agregados de escória de aciaria BSSF. Os traços de concreto foram desenvolvidos para classe de agressividade ambiental II, com resistência mínima de 25 MPa aos 28 dias. Como materiais, foram utilizados CP V-ARI, brita granítica, areia quartzosa, escória de aciaria BSSF e aditivo superplastificante. Assim, foram desenvolvidos cinco traços de concreto, com teores de substituição dos agregados naturais pela escória de aciaria BSSF de 0% (referência), 20%, 40%, 60% e 80%, em volume. Foram determinadas a consistência, massa específica e teor de ar incorporado. No estado endurecido, foram determinados a resistência à compressão axial (nas idades de 7, 28 e 91 dias) e o módulo de elasticidade estático (nas idades de 28 e 91 dias) dos concretos. Em geral, os concretos com escória de aciaria BSSF apresentaram desempenho mecânico superior ao traço de referência, com exceção do traço de 80% nas primeiras idades. Ademais, destaca-se o traço com 60% de escória, por ter alcançado os ganhos mais expressivos nas propriedades mecânicas.

Palavras-chave: agregado artificial; materiais; sustentabilidade.

*Autor para correspondência.

Mechanical properties of sustainable concrete added with BSSF steel slag in place of natural aggregates

ABSTRACT: *Steel slag is a steel co-product with expansive behavior that needs to undergo stabilization processes to be used in civil construction. The process called BSSF (Baosteel Slag Short Flow) consists of cooling and stabilizing large amounts of material in less time compared with conventional treatment and is a technological novelty in Brazil. Despite being promising, there is a lack of research proving the effectiveness of this process. Thus, this study aimed to investigate the mechanical properties of concrete added with steel slag aggregates derived from BSSF process. The concrete mixes were designed for environmental aggressiveness class II, with a minimum strength of 25 MPa at 28 days. CP V-ARI, granitic gravel, quartz sand, BSSF steel slag and superplasticizer additive were the materials used. These five concrete mixes were designed by replacing natural aggregates with 0% (reference), 20%, 40%, 60% and 80% of steel slag, by volume. Consistency, density and incorporated air content were the properties determined in the fresh state. In the hardened state, the axial compressive strength (ages 7, 28 and 91 days) and the static modulus of elasticity (ages 28 and 91 days) of the concretes were evaluated. In general, the concretes with BSSF steel slag showed superior mechanical performance over the reference mix, with the exception of the 80% mix at early ages. The mix with 60% slag stood out for having achieved the highest values in mechanical properties.*

Keywords: *artificial aggregate; materials; sustainability.*

1 Introdução

Os impactos das atividades industriais no meio ambiente são um tema crítico para as sociedades contemporâneas, cuja atividade industrial é dominante. Hoje, os setores produtivos, juntamente às comunidades científica e tecnológica, procuram alternativas e soluções para problemas característicos da atividade industrial, relacionados à emissão de gases do efeito estufa, esgotamento de recursos naturais, ineficiência energética, escassez de áreas para disposição de resíduos etc.

Nesse contexto se insere a indústria da construção civil, que é responsável, em escala global, por cerca de 50% do consumo de recursos naturais (JOHN, 2000) e 23% do total de CO₂ emitido para a atmosfera (HUANG *et al.*, 2018). Em geral, o setor procura soluções para diminuição dos efeitos nocivos de suas atividades ao meio ambiente, seja por meio do aprimoramento de seus processos industriais, desenvolvimento de novos materiais, estratégias de gestão e manejo de recursos, ou por meio da reciclagem e/ou reutilização de subprodutos gerados em sua própria cadeia produtiva ou por outros setores industriais (JOHN, 2000).

Esse anseio se alinha com as práticas modernas do setor da siderurgia, que, em busca de ganhos econômicos e menores impactos ambientais, baseia a sua cadeia produtiva no conceito de economia circular. O conceito se desdobra a partir da redução do consumo de matérias-primas e de energias de fontes não renováveis e da eliminação dos rejeitos industriais, por meio da incorporação de seus subprodutos em uma cadeia circular de reaproveitamento, remanufatura e reciclagem (IABR, 2018). A indústria siderúrgica ainda é, entretanto, um dos maiores consumidores de recursos energéticos não renováveis, sendo também responsável pela produção de milhões de toneladas de resíduos sólidos (QUADER *et al.*, 2015).

No Brasil, são gerados, anualmente, cerca de 22 milhões de toneladas de resíduos siderúrgicos, dos quais os principais são as escórias de alto-forno e de aciaria. A escória de alto-forno é um material consolidado, com altos índices de reaproveitamento (96% em 2016 e 92% em 2017), sendo vendida principalmente para a indústria cimentícia (IABR, 2018). A escória de aciaria, contudo, ainda encontra barreiras tecnológicas para sua completa absorção em setores produtivos. Nos anos de 2016 e 2017, apenas 56% e 59%, respectivamente, de seus volumes produzidos no Brasil foram reaproveitados (IABR, 2018). O baixo índice de reaproveitamento reflete em perdas econômicas e problemas ambientais, pois os montantes sem perspectiva de destinação são, na maioria das vezes, depositados em pátios siderúrgicos ou aterros a céu aberto, acumulando-se ao longo do tempo (BALTAZAR, 2001; IABR, 2018). Esses volumes, quando expostos ao meio externo e em contato com a água, podem produzir soluções altamente alcalinas e carregadas de metais pesados, tornando-se um potencial agente nocivo à vida animal aquática e terrestre (NAIDU; SHERIDAN; VAN DYK, 2020).

Em relação ao material, a escória de aciaria é um coproduto resultante da transformação de ferro gusa líquido e/ou sucata derretida em aço, sendo formada por silicatos de cálcio, óxido de silício, ferrita cálcica, magnésia e traços de outros numerosos minerais com impurezas (JIANG *et al.*, 2018; NAIDU; SHERIDAN; VAN DYK, 2020). Na Figura 1, são apresentados grãos de escória de aciaria gerada em forno LD (processo Linz-Donawitz ou conversor básico a oxigênio) (PALANKAR; SHANKAR; MITHUN, 2016).

Figura 1 ▶

Escória de aciaria LD.
Fonte: Palankar,
Shankar e Mithun (2016)



De modo geral, o material apresenta aspecto rochoso, coloração escura (devido à elevada presença de ferro), superfície angulosa e irregular, massa específica em torno de 3,3 a 3,6 g/cm³ (aproximadamente 30% mais pesada que agregados naturais comuns), além de elevada dureza e porosidade (ABU-EISHAH; EL-DIEB; BEDIR, 2012; JIANG

et al., 2018; PALANKAR; SHANKAR; MITHUN, 2016). Ressalta-se, contudo, que sua composição química e características físicas variam amplamente em função do método de refino do aço, das matérias-primas empregadas e dos pós-processamentos aos quais é submetida (NAIDU; SHERIDAN; VAN DYK, 2020; SHI, 2004; YI *et al.*, 2012).

O maior problema na utilização do material está em sua composição química, com teores de 5% a 15% de óxido de cálcio livre (*f-CaO*), que, aliado à presença (menos significativa) do óxido de magnésio livre (*f-MgO*), caracteriza riscos à integridade do próprio material e aos produtos que o incorporarem (DING *et al.*, 2017). A presença, em altos teores, desses elementos está relacionada com problemas de instabilidade volumétrica, uma vez que desencadeiam reações de hidratação expansivas, que geram esforços internos adicionais e podem causar fissuração ou mesmo o colapso de seus grãos, como exemplificado na Figura 2 (PALANKAR; SHANKAR; MITHUN, 2016).

Figura 2 ►

Agregado de escória de aciaria após expansão em concreto.

Fonte: Palankar, Shankar e Mithun (2016)



Para que a escória de aciaria possa ser empregada como um produto na construção civil, faz-se necessária, portanto, sua estabilização, de modo a torná-la menos reativa quimicamente (NAIDU; SHERIDAN; VAN DYK, 2020; PALANKAR; SHANKAR; MITHUN, 2016; SHI, 2004; SILVA, 2011). Nos últimos anos, foram desenvolvidos estudos para investigação da viabilidade de reaproveitamento da escória de aciaria estabilizada. Uma alternativa com grande potencial econômico e técnico é a utilização da escória de aciaria em substituição aos agregados naturais para confecção de compósitos cimentícios (JIANG *et al.*, 2018; NAIDU; SHERIDAN; VAN DYK, 2020).

O concreto é o material da construção civil mais utilizado no mundo, sendo constituído basicamente por uma mistura de três frações: água, aglomerante e agregados. Somente a fração de agregados corresponde a 75% de seu volume (NAIDU; SHERIDAN; VAN DYK, 2020), representando, portanto, uma opção com grande potencial para uso de materiais alternativos que, via de regra, são mais baratos que os de origem natural (SILVA, 2011).

Em relação aos aspectos técnicos, conforme Naidu, Sheridan e Van Dyk (2020), as propriedades de trabalhabilidade, resistência, estabilidade dimensional e durabilidade dos concretos são fortemente influenciadas pelas qualidades e características dos agregados empregados em sua composição. Desse modo, atualmente são desenvolvidas diversas pesquisas que visam avaliar a eficiência de processos de estabilização da escória de aciaria e as propriedades mecânicas e de durabilidade dos concretos que incorporam tais materiais (JIANG *et al.*, 2018; NAIDU; SHERIDAN; VAN DYK, 2020).

Guo *et al.* (2019) estudaram os efeitos da incorporação de diferentes porcentagens (0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 60%, 80% e 100%) de escória de aciaria, gerada em forno conversor a oxigênio, em substituição aos agregados miúdos naturais (areia), em dois tipos de concretos: convencional e de alta resistência. Os pesquisadores concluíram que substituições em teores acima de 70% podem resultar em concretos com propriedades mecânicas superiores em relação aos concretos de referência, sendo os ganhos na resistência à compressão mais significativos para os concretos convencionais. Os traços com substituições de 80% e 100% obtiveram aumentos de resistência em 14% e 12%, respectivamente. Segundo os autores, existem duas possíveis explicações para os ganhos de resistência observados. O primeiro é referente à presença de compostos hidraulicamente ativos (C_2S e C_3S , similares aos presentes em cimentos) na composição da escória de aciaria, os quais podem ter participado do processo de hidratação do concreto, interferindo positivamente em sua resistência. Outro fator corresponde à maior rugosidade da superfície da escória de aciaria em relação à areia natural, resultando em maiores forças de ligação com a pasta cimentícia.

Liu, Yu e Wang (2020) avaliaram os efeitos da incorporação da escória de aciaria (teores de 30%, 50% e 70% em volume) nas propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos destinados a aplicações em bases rodoviárias. Adicionalmente, os autores avaliaram a eficiência da sílica ativa na inibição do comportamento expansivo da escória de aciaria, que possuía 2,47% de $f-CaO$ em sua composição. Entre os resultados obtidos, destacam-se as respostas positivas em relação à adição de sílica ativa para inibição da expansão da escória, obtendo o teor ótimo de adição igual a 3% (altos teores de adição podem apresentar efeitos reversos, como observado no estudo para adição de 9%), além dos ganhos nas propriedades de resistência e rigidez obtidos para os teores de incorporação de 30% e 50% dos agregados de escória de aciaria. As justificativas dos ganhos nas propriedades mecânicas são similares ao relatado por Guo *et al.* (2019), atribuídas principalmente ao melhoramento no intertravamento mecânico da interface entre pasta cimentícia e agregado. Ainda, de modo a quantificar o efeito de ligação entre pasta e agregado, os autores desenvolveram uma simulação computacional com base no modelo de Dinâmica Molecular (MD ou *Molecular Dynamics*), concluindo que a escória de aciaria melhora a interação eletrostática e o efeito de ligação com cimento.

Liu, Yu e Wang (2020) ainda sinalizaram problemas relacionados à granulometria da escória de aciaria, gerados pela solidificação de grandes quantidades de finos na superfície de seus grãos maiores, alterando a forma, textura e dimensões dos agregados. Os finos são decorrentes da pulverização de compostos (impurezas) menos resistentes ao atrito mecânico, que se acumulam durante o processo de estocagem e empilhamento. As alterações na forma, textura e tamanho do agregado podem causar sérios prejuízos à coesão e à aderência entre a pasta cimentícia e os agregados dos concretos.

Outros estudos foram realizados para avaliação do potencial de uso das escórias de aciaria estabilizadas em diversos tipos de concretos, como sinalizam os autores Jiang *et al.* (2018), Naidu, Sheridan e Van Dyk (2020) e Benitez (2020). Os autores indicam a importância da investigação das características físicas e químicas das escórias, da eficiência dos processos de tratamento, além da avaliação do desempenho mecânico e de durabilidade dos materiais com a incorporação da escória em sua composição.

O método BSSF (*Baosteel Slag Short Flow*) é um diferencial por dois motivos: o primeiro é referente ao contexto tecnológico, pois esse processo é pioneiro no Ocidente, havendo uma única empresa siderúrgica a empregá-lo na sua linha de produção de aço, gerando um material com características diferentes do convencional (AMANCIO *et al.*, 2020). O segundo corresponde às próprias vantagens do método, que é capaz de resfriar, britar e estabilizar rapidamente grandes volumes de escória, diminuindo o tempo de

tratamento — que, no método convencional de estabilização, está na ordem de meses — para ciclos que duram poucos minutos (ENERGY, 2015 *apud* BENITTEZ, 2020, p. 19).

No processo BSSF, montantes de escória líquida são lançados em um tambor rotativo com esferas maciças de aço, sendo resfriados (e solidificados) rapidamente por jatos de água controlados, enquanto as esferas de aço britam o material através da energia mecânica dos impactos. O material resultante se apresenta na forma de grãos com características vítreas e com baixas quantidades de cal livre (AMANCIO *et al.*, 2020; BENITTEZ, 2020; WANG; CHEN, 2016).

Com base nessa exposição, o objetivo deste trabalho é investigar as características da escória de aciaria BSSF e o seu efeito nas propriedades mecânicas de concretos convencionais com a incorporação do material em substituição aos agregados naturais (teores de 20%, 40%, 60% e 80%).

Aqui se encerra a seção 1. Na seção 2, é apresentado o procedimento experimental adotado, com a apresentação e a caracterização dos materiais, definição dos traços e ensaios realizados no concreto. Os resultados e discussões desses procedimentos nos ensaios em concreto estão na seção 3 e as conclusões deste trabalho, na seção 4.

2 Procedimento experimental

Para confecção dos concretos com e sem escória de aciaria, os materiais apresentados nesta seção foram utilizados conforme descrito nas subseções a seguir.

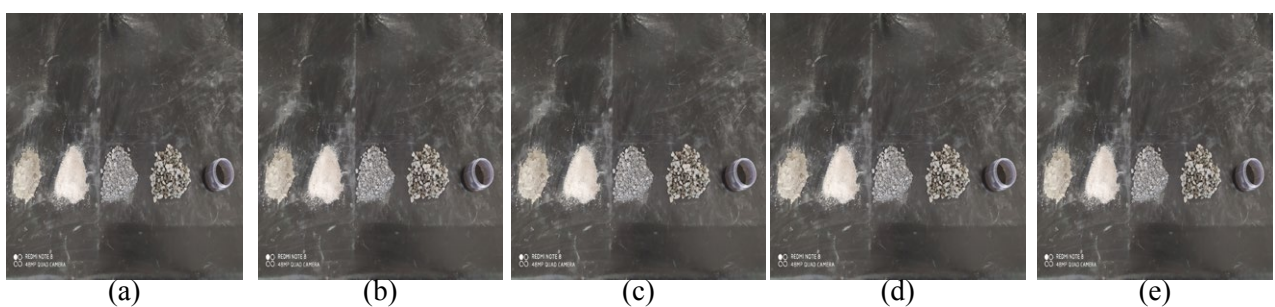
2.1 Materiais constituintes

A caracterização dos materiais empregados para confecção dos concretos (Figura 3) foi conduzida no Laboratório de Materiais para Produtos de Construção (LMPC) do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), em São Paulo.

Figura 3 ▼

Materiais: a) CP V-ARI;
b) Areia natural;
c) Escória de aciaria BSSF; d) Brita natural;
e) Aditivo químico.

Fonte: arquivo pessoal dos autores



As propriedades físico-químicas e mecânicas do CP V-ARI são listadas nas Tabelas 1 e 2. Sua composição granulométrica, determinada por granulometria a laser, é apresentada na Figura 4.

Tabela 1 ▶

Propriedades físico-químicas do CP V-ARI.

Fonte: dados da pesquisa

Propriedade determinada	Norma ABNT	Resultado	Especificações – NBR 16697:2018
Óxido de cálcio livre – f-CaO		1,87%	-
Perda ao fogo	NBR 17086-6:2023	3,85%	≤ 6,5
Resíduo insolúvel	NBR 17086-4:2023	0,72%	≤ 5,5
Anidrido carbônico – CO ₂		2,79%	-
Óxido férrico – Fe ₂ O ₃		2,77%	-
Anidrido silícico – SiO ₂		18,4%	-
Óxido de alumínio – Al ₂ O ₃		4,28%	-
Óxido de cálcio – CaO		60,6%	-
Óxido de magnésio – MgO	NBR 17086-2:2023	5,74%	≤ 6,5
Anidrido sulfúrico – SO ₂	NBR 17086-5:2023	3,73%	≤ 4,5
Óxido de sódio – Na ₂ O		0,13%	≤ 3,5
Óxido de potássio – K ₂ O		0,71%	≤ 5,5
Equivalente alcalino *		0,59%	-
Água p/ pasta de consistência normal	NBR 16606:2018	28,5%	-
Massa específica	NBR 16605:2017	3,09 g/cm ³	-
Finura (#200)	NBR 11579:2012	1,1%	< 6,0%
Finura de Blaine	NBR 16372:2015	5480 cm ² /g	-
Início de pega	NBR 16607:2018	140 min	> 60 min
Fim de pega		195 min	< 600 min
Expansibilidade a quente		0,5 mm	≤ 5 mm
Expansibilidade a frio	NBR 11582:2016	1,0 mm	≤ 5 mm

* Equivalente alcalino (em Na₂O) = % Na₂O + 0,658 x % K₂O.

Tabela 2 ▶

Resistência à compressão do CP V-ARI.

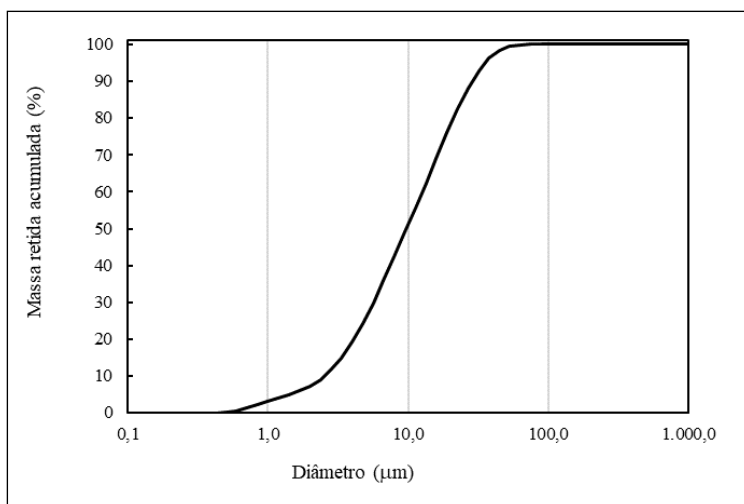
Fonte: dados da pesquisa

Norma	Idade	Resistência média (MPa)	Especificações – NBR 16697:2018
NBR 7215:2019	1 dia	25,5	≥ 14,0 MPa
	3 dias	35,7	≥ 24,0 MPa
	7 dias	40,5	≥ 34,0 MPa
	28 dias	48,1	-

Figura 4 ▶

Granulometria d CP V-ARI.

Fonte: dados da pesquisa



Os agregados naturais utilizados foram areia de origem quartzosa e brita de origem granítica, ambos satisfazendo os requisitos da NBR 7211 (ABNT, 2022a). Como objeto de estudo, empregou-se o agregado de escória de aciaria BSSF em diferentes teores de substituição dos agregados naturais na composição dos concretos.

A escória de aciaria empregada neste estudo é produto da empresa siderúrgica CSP (Companhia Siderúrgica do Pecém), cuja produção do aço líquido ocorre em conversor a oxigênio (LD), e o resfriamento/estabilização pelo método denominado BSSF.

As características físicas dos agregados e suas distribuições granulométricas são apresentadas na Tabela 3 e na Figura 5.

Tabela 3 ▼
Propriedades físicas dos agregados.
Fonte: dados da pesquisa

Propriedades avaliadas		Norma ABNT	Escória de aciaria BSSF	Areia	Brita
Massa específica (g/cm ³)	Absoluta	NBR 16916:2021	3,60	2,66	2,69
	SSS*	NBR 16917:2021**	3,47	2,65	2,67
	Aparente		3,41	2,64	2,65
Absorção de água (%)		NBR 16916:2021	1,51	0,27	0,45
Dimensão máxima característica (mm)		NBR 17054:2022	9,50	2,36	9,50
Módulo de finura			4,60	2,05	5,98
Massa unitária (kg/m ³)	Estado solto		2079	-	-
	Estado compactado		2128	-	-
Volume de vazios (%)	Estado solto	NBR 16972:2021	38,8	-	-
	Estado compactado		37,4	-	-
Material pulverulento (%)		NBR 16973:2021	1,74	-	-

* SSS = condição do agregado saturado com superfície seca

** A escória de aciaria BSSF foi ensaiada como agregado miúdo

Figura 5 ►
Granulometria dos agregados.
Fonte: dados da pesquisa

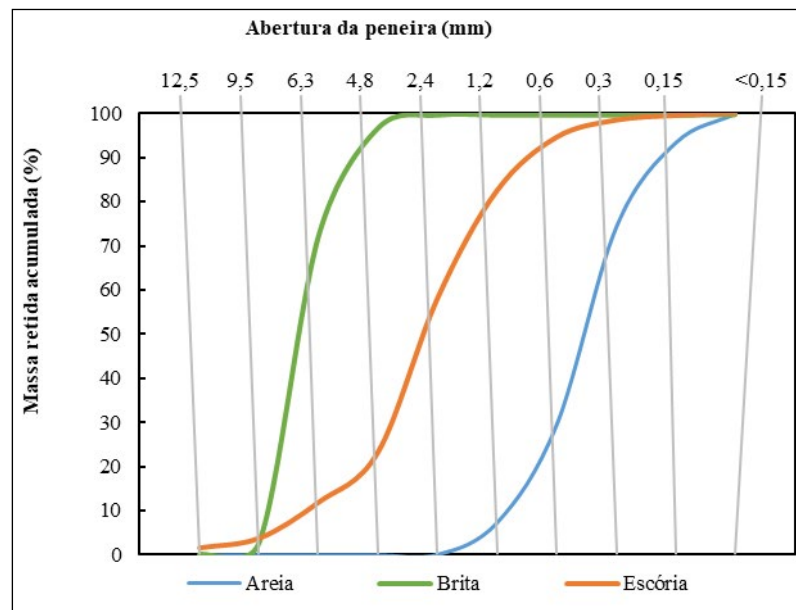


Tabela 4 ▼
Composição química (% massa) da escória de aciaria BSSF.
Fonte: dados da pesquisa

A determinação dos elementos químicos principais da escória foi realizada via análise semiquantitativa, por fluorescência de raios X (FRX), conforme diretrizes gerais da NBR 14656 (ABNT, 2023a). Adicionalmente, determinaram-se o potencial de perda de material ao fogo e os teores de óxido de cálcio livre (*f*-CaO), óxido de ferro II (FeO) e ferro metálico (FeM), conforme as metodologias das normas NBR 17086-6 (ABNT, 2023e), NBR 17086-10 (ABNT, 2023f) e E246-21 (ASTM, 2021), respectivamente. Na Tabela 4, é apresentada a composição química da escória de aciaria BSSF.

<i>f</i> -CaO	Fe Total	CaO	FeO	Fe ₂ O ₃ *	SiO ₂	MgO	MnO	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	FeM
1,8	27,2	37,3	21,0	14,6	13,2	6,6	3,5	1,4	1,4	0,6
Elementos minoritários										
TiO ₂	V ₂ O ₅	K ₂ O	Cr ₂ O ₅	SO ₃	SrO	CuO	PF **			
0,6	0,2	0,1	0,1	0,1	< 0,1	< 0,1	-0,5			

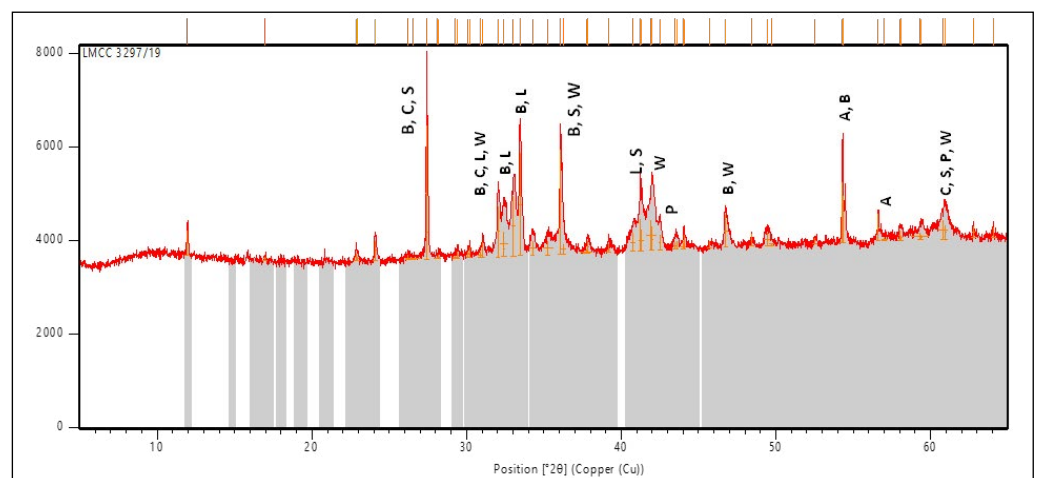
* Fe₂O₃ foi obtido via seguinte equação: Fe₂O₃ = [Ferro total (Fe) – (Óxido de ferro II (FeO) x 0,78) – Ferro metálico (FeM)] x 1,43;

** Valor de PF negativo indica a possível ocorrência de fenômenos de óxido-redução durante o ensaio.

Para análise mineralógica quantitativa da escória, empregou-se a difração de raios X (DRX), por meio do difratômetro da marca Panalytical, modelo EMPYREAN, com detector PIXcel3D, operando na radiação K α do cobre com 45 kV – 40 mA e varredura de 2 $^{\circ}$ 2 θ /min. A identificação dos compostos foi executada por meio do software X-pert HighScore Plus (versão 4.8.0.25518) da Panalytical, com base nos padrões difratométricos e de estruturas fornecidos pelo banco de dados gratuito COD (*Crystallography Open Database*) e, eventualmente, pelo ICDD (*International Center for Diffraction Data*) e pelo ICSD (*International Center for Structure Data*). Ressalta-se 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.

O difratograma da escória de aciaria BSSF e sua respectiva composição mineralógica identificada são apresentados na Figura 6 e na Tabela 5.

Figura 6 ►
Difratograma de raios X da escória de aciaria BSSF.
Fonte: dados da pesquisa



Fórmula molecular	Fichas de estruturas (códigos)	Fases mineralógicas	Abreviação (gráfico)
$Al_{0,204}Ca_2Fe_{1,796}O_5$	98-009-8824	Brownmillerita	B
$Fe_{0,925}O$	98-008-2235	Wuestita	W
SiO_2	98-019-3161	Coesita	C
Al_2SiO_5	98-017-2721	Sillimanita	S
$Ca_8Si_{14}O_{16}$	96-901-2795	Larnita	L
$Ca_{23,16}Mn_{0,19}Na_{0,14}Mg_{0,83}Al_{1,79}Ti_{5,62}Fe_{10,30}Si_{2,95}O_{96}$	96-900-5372	Andradita	A
MgO	96-900-0496	Periclásio	P

Tabela 5 ▲
Composição mineralógica da escória de aciaria BSSF.
Fonte: dados da pesquisa

Por fim, para ajuste da consistência dos traços de concreto, foi utilizado o aditivo superplastificante Sikament 370 RM, composto por dispersantes orgânicos em base aquosa, com $pH\ 8,5 \pm 1,0$ e densidade de $1,19 \pm 0,02\ g/cm^3$.

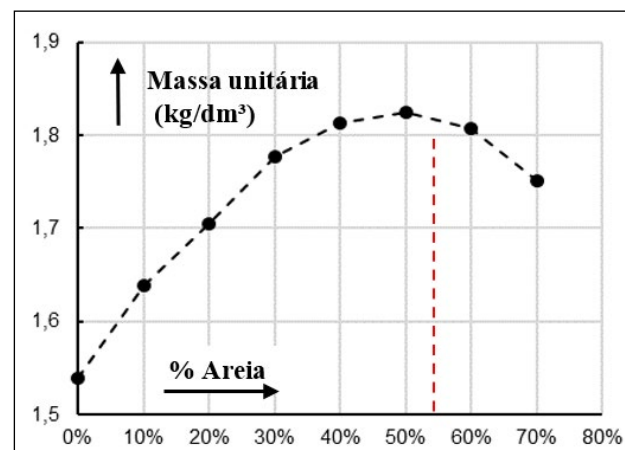
2.2 Definição dos traços

O traço referência de concreto foi projetado de modo a representar uma mistura convencional, com resistência mínima de 25 MPa na idade de 28 dias e relação água/cimento menor que 0,60 – atendendo às especificações da classe de agressividade ambiental II, de acordo com a NBR 12655 (ABNT, 2022b).

O traço unitário de referência foi de 1:4,5 (cimento: agregados), sendo determinada a proporção de agregados miúdo e graúdo a partir da composição de maior massa unitária no estado compactado, de acordo com a NBR 16972 (ABNT, 2021d). Destaca-se que a escória utilizada passou por um processo de peneiramento, eliminando os grãos retidos na peneira de abertura de 12,5 mm, a fim de aproximar a distribuição granulométrica à dos agregados naturais.

Na Figura 7, é apresentado o gráfico gerado para obtenção da relação de melhor empacotamento dos agregados, sendo o ponto de inflexão a relação ótima de compactação entre os agregados. Devido, entretanto, ao fato de a distribuição granulométrica da escória de aciaria ser predominantemente composta por material miúdo (~77% passante na peneira de 4,80 mm), foi necessária a adequação da composição de agregados para 62% de areia (12% a mais do que o teor ótimo), tornando possível a substituição de 80% dos agregados naturais pelo agregado artificial ($0,77 \cdot 0,80 \cong 0,62$). Assim, o traço de referência adotado foi de 1:2,79:1,71 (cimento: areia: brita).

Figura 7 ►
Empacotamento dos agregados.
Fonte: dados da pesquisa

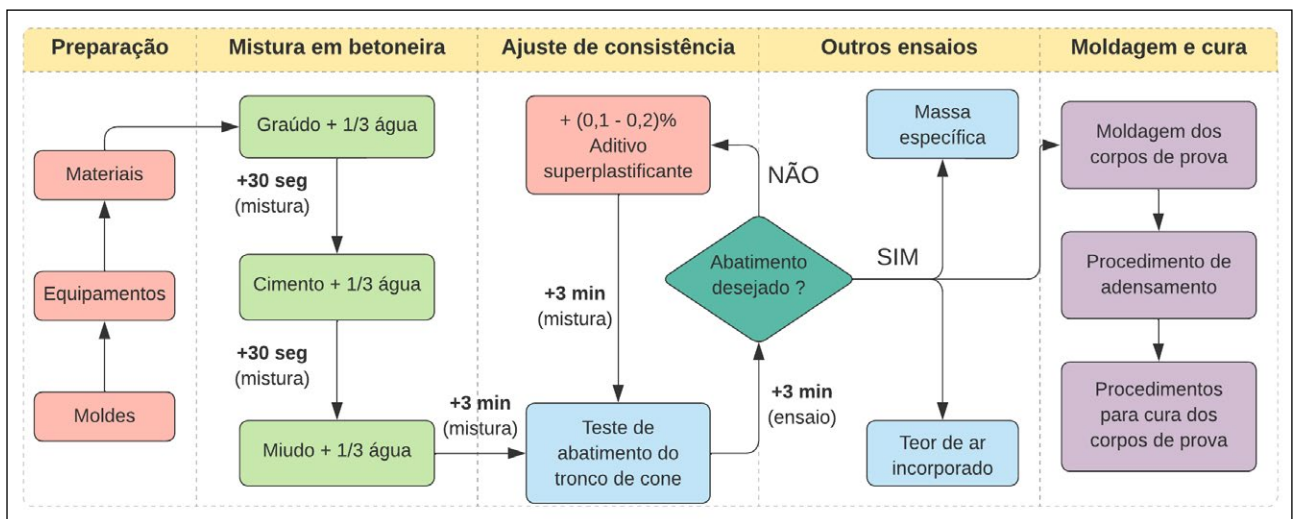


A partir do traço de referência, os outros traços foram determinados, com substituição, em volume, dos agregados naturais pelo de escória de aciaria BSSF, em teores de 20%, 40%, 60% e 80%. Ressalta-se que o teor de aditivo foi determinado durante o processo de ajuste de consistência, com o objetivo de alcançar a faixa de abatimento especificada.

2.3 Confeccão e preparação das amostras

O procedimento de confeccão dos concretos é esquematizado na Figura 8, sendo dividido nas etapas de mistura dos materiais, ajuste da consistência (via iterações de adição de aditivo superplastificante e ensaio de abatimento do tronco de cone), execução dos ensaios no estado fresco e procedimentos para moldagem, cura e armazenamento dos corpos de prova de concreto. O tempo de mistura dos materiais foi de aproximadamente 10 minutos.

Figura 8 ▼
 Processo de confeccão, cura e moldagem das amostras de concreto.
 Fonte: elaborada pelos autores



A moldagem e confeccão dos corpos de prova seguiram as especificações da NBR 5738 (ABNT, 2016a); para cada condição e idade de ensaio, foram produzidos três corpos de prova cilíndricos, com dimensões nominais de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura. Todos os traços de concreto foram adensados mecanicamente. Após a moldagem, os corpos de prova foram armazenados em condição ambiente por 24 horas, cobertos por uma lona, de modo a evitar a perda de água e a retração por secagem. Posteriormente, as amostras foram levadas para câmara úmida, com temperatura controlada de 23 ± 2 °C e umidade relativa do ar em $95 \pm 5\%$, até que as idades dos ensaios mecânicos fossem atingidas.

2.4 Ensaio em concreto

Os ensaios em concreto serão apresentados a seguir – primeiramente os realizados no estado fresco e, em seguida, no estado endurecido.

2.4.1 Estado fresco

As misturas de concreto fresco foram submetidas aos ensaios de abatimento do tronco de cone, teor de ar incorporado e massa específica, conforme as especificações da NBR 16889 (ABNT, 2020) e da NBR 9833 (ABNT, 2009), respectivamente.

2.4.2 Estado endurecido

Foram determinadas as propriedades mecânicas de resistência à compressão axial e módulo de elasticidade estático (tangente inicial) dos concretos produzidos para este estudo.

A metodologia do ensaio de resistência à compressão seguiu o estabelecido na NBR 5739 (ABNT, 2018a), com idades de ensaio de 7, 28 e 91 dias. Ademais, foram moldados três corpos de prova para cada idade, nas cinco composições de concreto, resultando no total de 45 corpos de prova.

Para o ensaio de módulo de elasticidade estático, seguiu-se o método A descrito na NBR 8522-1 (ABNT, 2021a). O ensaio foi executado nas idades de 28 e 91 dias, sendo produzidos três corpos de prova para cada idade, em todas as composições de concreto, resultando em 30 corpos de prova no total.

Para análise estatística dos resultados dos ensaios mecânicos, aplicou-se a Análise de Variância (ANOVA), com nível de confiança de 95%, e o teste de comparação múltipla (Teste de Tukey). No teste de Tukey, admitiu-se o parâmetro $\alpha = 5\%$ e que todo p -valor acima dessa tolerância indicará que não existem diferenças estatisticamente significativas.

3 Resultados dos ensaios em concreto

Tabela 6 ▼

Composição das misturas de concreto ensaiadas.

Fonte: dados da pesquisa

O consumo de materiais de cada concreto estudado é apresentado na Tabela 6. Ademais, nas subseções 3.1 e 3.2 são discutidos os resultados dos ensaios.

Traço	Teor de escória (%)	Relação a/c	Consumo de materiais constituintes por m ³ de concreto produzido					
			Água (kg)	Cimento (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Escória BSSF (kg)	Aditivo*
EA00	0	0,58	224,09	386,36	1081,82	656,92	0,00	0,155
EA20	20	0,58	224,09	386,36	814,77	576,14	469,78	0,063
EA40	40	0,58	224,09	386,36	547,71	495,47	939,57	0,031
EA60	60	0,58	224,09	386,36	280,66	414,80	1409,35	0,150
EA80	80	0,58	224,09	386,36	13,60	334,13	1879,13	0,130

* Quantidade de aditivo superplastificante adicionado para atingir a consistência desejada, conforme procedimento apresentando no item 2.3.

3.1 Propriedades em estado fresco

De acordo com os resultados do ensaio de índice de consistência (Figura 9), os traços com teores de 20% e 40% de escória de aciaria BSSF apresentaram ganhos em trabalhabilidade, alcançando maiores abatimentos com menor teor de aditivo. Os concretos com altos teores de escória apresentaram, contudo, problemas na coesão da mistura (Figura 10).

Figura 9 ▶
Consistência dos concretos.
Fonte: dados da pesquisa

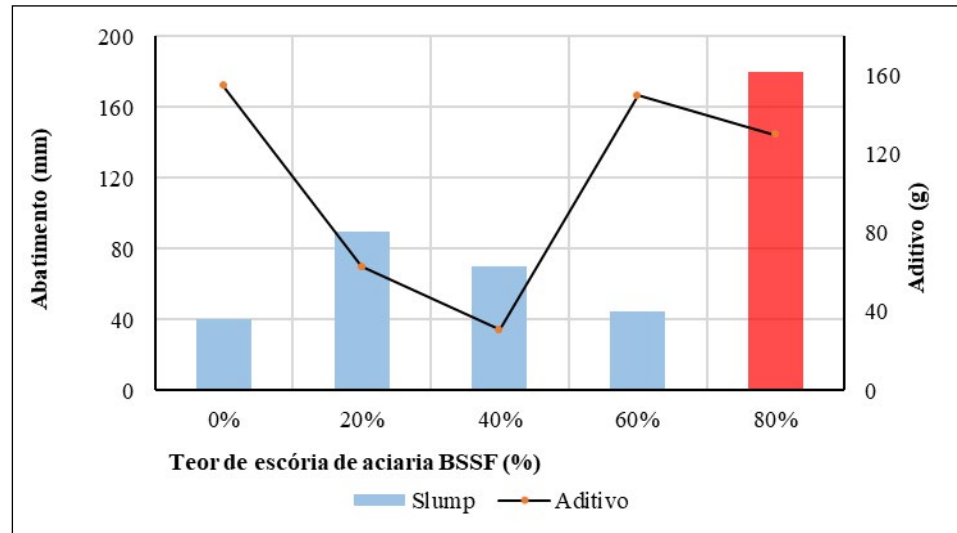


Figura 10 ▶
Desagregação do traço EA80.
Fonte: arquivo dos autores



Os ganhos de trabalhabilidade em baixos teores contradizem a tendência observada por Pang *et al.* (2016), Wang e Chen (2016) e Liu, Yu e Wang (2020), que estudaram os efeitos da substituição de agregados naturais por escória de aciaria LD (como é o caso

da BSSF) em concretos. Segundo os autores, os grãos dessas escórias possuem formato irregular e anguloso, com grande quantidade de finos e alta absorção de água.

O excesso de finos dificulta tanto a adesão entre a pasta cimentícia e os agregados quanto o intertravamento mecânico entre os materiais. As demais características da escória atuam na diminuição da água de amassamento disponível para o processo de hidratação da mistura cimentícia, afetando negativamente a plasticidade e a coesão dos concretos, conforme observado nos traços EA60 e EA80.

Uma possível explicação para tal comportamento nos traços com baixo teor de incorporação da escória (20% e 40%) pode ser em função da alteração do esqueleto granular das misturas, uma vez que o agregado de escória de aciaria BSSF possui melhor distribuição granulométrica do que os agregados naturais (Figura 5). Como o método de substituição considerou apenas a proporção entre os agregados graúdos e miúdos, a melhor graduação do agregado artificial pode ter resultado em um melhor empacotamento de partículas e, conseqüentemente, em melhor trabalhabilidade da mistura.

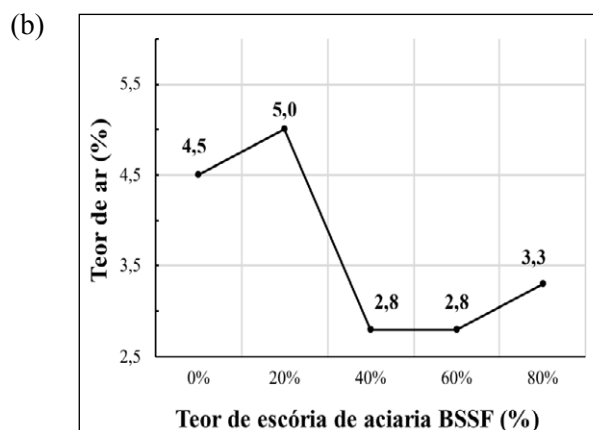
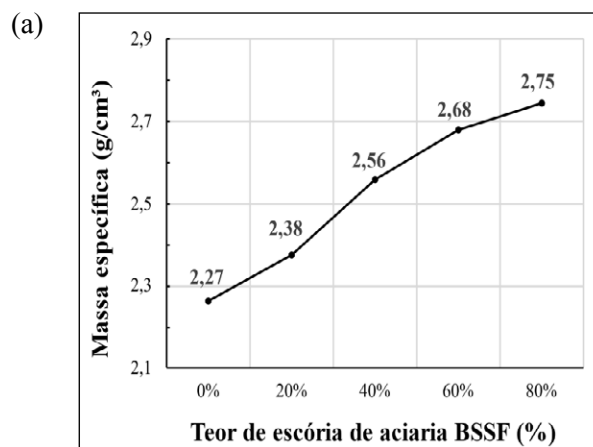
Em relação aos resultados do teor de ar incorporado (Figura 11b), observa-se que, a partir do teor de 40% de incorporação da escória de aciaria BSSF, tem-se uma queda substancial do ar incorporado nos concretos (queda > 1,5%), permanecendo em um patamar mínimo de 2,8%.

Por fim, é confirmada a tendência de aumento da massa específica dos concretos em função do teor de incorporação da escória de aciaria BSSF (Figura 11a), sendo essa uma consequência direta da maior massa específica do agregado artificial (Tabela 3), que é aproximadamente 27% mais pesado do que os agregados naturais.

Figura 11 ►

Resultados dos concretos em estado fresco: a) massa específica; b) teor de ar incorporado.

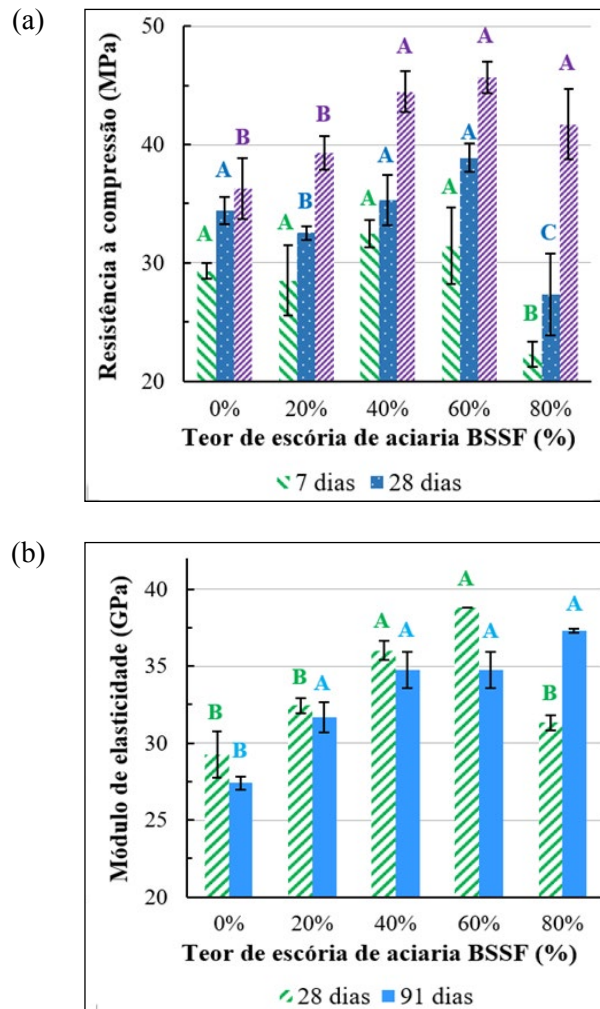
Fonte: dados da pesquisa



3.2 Propriedades mecânicas

Os resultados dos ensaios mecânicos em concreto são apresentados na Figura 12. As letras A, B, e C representam a semelhança estatística entre os valores obtidos dentro do grupo, enquanto a diferença entre as cores de letras representa as diferenças entre grupos (não foram comparados estatisticamente).

Figura 12 ►
Resultados dos ensaios mecânicos:
a) resistência à compressão;
b) módulo de elasticidade estático.
Fonte: dados da pesquisa



Em relação à resistência à compressão (Figura 12a), os resultados variaram em função do teor de escória de aciaria BSSF incorporado às misturas. Nas idades de 7 e 28 dias, apenas os concretos com teores de 40% e 60% de incorporação do agregado artificial apresentaram ganhos em relação ao traço de referência, sendo o ganho obtido pelo EA40 mais expressivo na idade de 7 dias (~11%) e o do EA60 na idade de 28 dias (~13%). Já na idade de 91 dias, todos os concretos com incorporação de escória apresentaram desempenho superior ao de referência, destacando-se o EA60, com ganho de resistência da ordem de 26%.

A análise estatística (Tabela 7) aponta que, em geral, os resultados de resistência à compressão obtidos nas idades de 7 e 28 dias não diferem significativamente entre si, com exceção do EA80, que apresentou desempenho estatisticamente inferior aos demais traços. Já na idade de 91 dias, somente os traços com 40% e 60% apresentaram ganhos estatisticamente significativos em relação ao traço de referência.

Tabela 7 ►
p-valores (Tukey).
Compressão axial.
Fonte: dados da
pesquisa

7 dias	EA 00	EA 20	EA 40	EA 60	EA 80
EA 00	-	99,1%	41,9%	74,2%	1,6%
EA 20	-	-	23,8%	49,8%	3,2%
EA 40	-	-	-	97,4%	0,1%
EA 60	-	-	-	-	0,3%
28 dias	EA 00	EA 20	EA 40	EA 60	EA 80
EA 00	-	80,4%	98,2%	13,9%	1,3%
EA 20	-	-	51,5%	2,6%	7,0%
EA 40	-	-	-	29,3%	0,6%
EA 60	-	-	-	-	0,0%
91 dias	EA 00	EA 20	EA 40	EA 60	EA 80
EA 00	-	46,1%	0,7%	0,3%	7,2%
EA 20	-	-	9,5%	3,3%	67,9%
EA 40	-	-	-	95,3%	56,3%
EA 60	-	-	-	-	24,3%

Em relação ao módulo de elasticidade (Figura 12b), todos os traços com incorporação da escória de aciaria BSSF apresentaram incrementos em relação ao traço de referência, destacando-se o EA60, com ganhos de ~39% e ~31% nas idades de 28 e 91 dias, respectivamente. O traço EA80 apresentou desempenho mecânico inferior na idade de 28 dias, mas obteve ganhos expressivos na idade de 91 dias, atingindo valores similares aos dos demais traços de concreto com incorporação da escória de aciaria BSSF.

A análise estatística dos resultados de módulo de elasticidade estático (Tabela 8) aponta que, para a idade de 28 dias, apenas os traços EA40 e EA60 apresentaram resultados estatisticamente diferentes do traço de referência. Na idade de 91 dias, todos os traços, com exceção do EA20, apresentaram ganhos estatisticamente significativos.

Tabela 8 ►
p-valores (Tukey).
Módulo de elasticidade.
Fonte: dados da
pesquisa

28 dias	EA 00	EA 20	EA 40	EA 60	EA 80
EA 00	-	26,0%	4,3%	0,3%	72,0%
EA 20	-	-	75,2%	9,0%	88,1%
EA 40	-	-	-	46,7%	28,2%
EA 60	-	-	-	-	2,1%
91 dias	EA 00	EA 20	EA 40	EA 60	EA 80
EA 00	-	16,6%	0,6%	0,1%	0,3%
EA 20	-	-	27,0%	3,4%	15,0%
EA 40	-	-	-	64,7%	99,3%
EA 60	-	-	-	-	86,1%

De acordo com Guo *et al.* (2019) e Liu, Yu e Wang (2020), as diferenças de desempenho mecânico dos concretos estudados é uma tendência esperada, uma vez que há variação dos seus efeitos em função do teor de incorporação da escória. Guo *et al.* (2019), que analisaram os efeitos da incorporação da escória em substituição aos agregados miúdos naturais (de 0% a 100%) na composição de concretos convencionais e de alto desempenho, obtiveram ganhos expressivos de resistência à compressão nos extremos das faixas de incorporação (de 0% a 30% e acima de 80%), enquanto os concretos com teores

intermediários apresentaram perda de resistência. Por outro lado, Liu, Yu e Wang (2020), que verificaram os efeitos da incorporação da escória em substituição a agregados graúdos (teores de 30%, 50% e 70%) em concretos para bases de pavimentação, obtiveram o melhor desempenho mecânico com o traço de 50% de incorporação da escória de aciaria.

Em geral, a escória de aciaria LD possui alta massa específica (Tabela 3), dureza e rugosidade, além de formato irregular. Assim, o agregado artificial também detém características que contribuem para melhor adesão e intertravamento mecânico da pasta cimentícia com os agregados. Além disso, atua no melhoramento das propriedades da zona de transição, o que, conseqüentemente, pode melhorar o desempenho mecânico dos concretos (GUO *et al.*, 2019; LIU; YU; WANG, 2020).

4 Conclusões

Por meio dos resultados obtidos nos ensaios em concreto, foi possível verificar que, em relação às propriedades em estado fresco, destacaram-se os ganhos de trabalhabilidade nos traços de concreto com baixos teores de incorporação da escória (20% e 40%), enquanto os traços com maiores teores, principalmente com 80% de substituição, apresentaram perdas de abatimento e problemas de coesão.

No que se refere às propriedades mecânicas dos concretos, verificou-se que, nas primeiras idades (7 e 28 dias), apenas os traços EA40 e EA60 apresentaram ganhos de resistência à compressão, na ordem de 10% em relação ao traço de referência. De acordo com a análise estatística, contudo, esses ganhos não configuram diferenças significativas em relação ao traço de referência. Por outro lado, nas mesmas idades, o traço EA80 apresentou perda de resistência estatisticamente significativa – da ordem de 20% em relação ao traço de referência. Na idade de 91 dias, todos os traços com incorporação da escória exibiram ganhos de resistência estatisticamente significativos em relação ao concreto de referência, com destaque para o EA60, que obteve incremento de resistência da ordem de 25%. Em relação ao módulo de elasticidade, todos os traços com incorporação de escória de aciaria BSSF apresentaram ganhos em relação ao concreto de referência, em ambas as idades experimentais (28 e 91 dias), com destaque para o EA60, que obteve os maiores ganhos relativos (39% na idade de 28 dias e 31% na idade de 91 dias). Ademais, a análise estatística apontou que, na idade de 91 dias, com exceção do EA20, todos os traços apresentaram ganhos estatisticamente significativos em relação ao traço de referência.

Assim, conclui-se que a substituição dos agregados naturais pela escória de aciaria BSSF, nos teores de 40% e 60%, pode contribuir para o melhoramento das propriedades mecânicas dos concretos, sendo o traço EA60 o que apresentou melhor desempenho mecânico. Ademais, ressalta-se que a incorporação de escória de aciaria em teores superiores a 60% não apresentou ganhos significativos no desempenho mecânico e acarretou prejuízos de trabalhabilidade no estado fresco. Para viabilizar o uso da referida escória em teores superiores a 60%, os parâmetros de dosagem devem ser, portanto, ajustados, visando à manutenção da coesão do concreto fresco e do desempenho mecânico no concreto endurecido. É importante destacar que a durabilidade dos concretos também deve ser avaliada.

Agradecimentos

À UFSCar, ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo e à Apodi.

Financiamento

Fundação de Apoio ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas.

Conflito de interesses

Os autores declaram não haver conflito de interesses.

Referências

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**. Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2016a. 9 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**. Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018a. 9 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**. Agregados para concreto – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2022a. 10 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**. Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2019. 12 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522-1**. Concreto endurecido – Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação. Parte 1: Módulos estáticos à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2021a. 24 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9833**. Concreto fresco – Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro: ABNT, 2009. 7 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11579** (Versão corrigida 2013). Cimento Portland – Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 μm (nº 200). Rio de Janeiro: ABNT, 2012. 4 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11582**. Cimento Portland – Determinação da expansibilidade Le Chatelier. Rio de Janeiro: ABNT, 2016b. 4 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**. Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2022b. 22 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14656**. Cimento Portland e matérias-primas – Análise química por espectrometria de raios X – Métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2023a. 15 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16372**. Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). Rio de Janeiro: ABNT, 2015. 11 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605**. Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2017. 4 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16606**. Cimento Portland – Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro: ABNT, 2018b. 8 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16607**. Cimento Portland – Determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro: ABNT, 2018c. 4 p.

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

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16889**. Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 2020. 5 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16916**. Agregado miúdo – Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2021b. 7 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16917**. Agregado graúdo – Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2021c. 6 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16972**. Agregados – Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2021d. 6 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16973**. Agregados – Determinação do material fino que passa pela peneira de 75 µm por lavagem. Rio de Janeiro: ABNT, 2021e. 3 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17054**. Agregados – Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2022c. 5 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17086-2**. Cimento Portland – Análise química. Parte 2: Determinações por complexometria de óxido férrico, óxido de alumínio, óxido de cálcio e óxido de magnésio. Rio de Janeiro: ABNT, 2023b. 16 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17086-4**. Cimento Portland – Análise química. Parte 4: Determinação do resíduo insolúvel. Rio de Janeiro: ABNT, 2023c. 3 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17086-5**. Cimento Portland – Análise química. Parte 5: Determinação do trióxido de enxofre. Rio de Janeiro: ABNT, 2023d. 3 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17086-6**. Cimento Portland – Análise química. Parte 6: Determinação da perda ao fogo: Rio de Janeiro: ABNT, 2023e. 4 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17086-10**. Cimento Portland – Análise química. Parte 10: Determinação de óxido de cálcio livre pelo etilenoglicol. Rio de Janeiro: ABNT, 2023f. 3 p.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E246-21**. Standard Test Methods for Determination of Iron in Iron Ores and Related Materials by Dichromate Titrimetry. West Conshohocken: ASTM, 2021. 9 p.

ABU-EISHAH, S. I.; EL-DIEB, A. S.; BEDIR, M. S. Performance of concrete mixtures made with electric arc furnace (EAF) steel slag aggregate produced in the Arabian Gulf region. **Construction and Building Materials**, v. 34, p. 249-256, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.012>.

AMANCIO, F. A.; LIMA, D. A.; DIAS, A. R. O.; MESQUITA, E. F. T.; CABRAL, A. E. B. Propriedades mecânicas de argamassas com substituição da areia natural por escória de aciaria BSSF (*baosteel's slag short flow*). **Matéria**, v. 25, n. 1, e-12562, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620200001.0887>.

BALTAZAR, R. P. **Caracterização do fator expansão de uma escória de aciaria em diferentes processos de cura para uso em pavimentação**. 2001. 93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2001. Disponível em: <http://www.locus.ufv.br/handle/123456789/7724>. Acesso em: 5 abr. 2022.

BENITTEZ, L. H. **Utilização de escória de aciaria na fabricação de blocos de concreto**. 2020. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/12909>. Acesso em: 5 abr. 2022.

DING, Y.-C.; CHENG, T.-W.; LIU, P.-C.; LEE, W.-H. Study on the treatment of BOF slag to replace fine aggregate in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 146, p. 644-651, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.164>.

GUO, Y.; XIE, J.; ZHAO, J.; ZUO, K. Utilization of unprocessed steel slag as fine aggregate in normal- and high-strength concrete. **Construction and Building Materials**, v. 204, p. 41-49, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.178>.

HUANG, L.; KRIGSVOLL, G.; JOHANSEN, F.; LIU, Y.; ZHANG, X. Carbon emission of global construction sector. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, p. 1906-1916, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.001>.

IABR – INSTITUTO AÇO BRASIL. **Relatório de Sustentabilidade**. Rio de Janeiro: IABR, 2018. 84 p. Disponível em: <https://acobrasil.org.br/site/publicacao/relatorio-de-sustentabilidade-2018/>. Acesso em: 17 abr. 2022.

JIANG, Y.; LING, T.-C.; SHI, C.; PAN, S.-Y. Characteristics of steel slags and their use in cement and concrete: a review. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 136, p. 187-197, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.04.023>.

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil**: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento. 2000. 102 f. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000. DOI: <https://doi.org/10.11606/T.3.2000.tde-27072022-082553>.

LIU, J.; YU, B.; WANG, Q. Application of steel slag in cement treated aggregate base course. **Journal of Cleaner Production**, v. 269, 121733, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121733>.

NAIDU, T. S.; SHERIDAN, C. M.; VAN DYK, L. D. Basic oxygen furnace slag: review of current and potential uses. **Minerals Engineering**, v. 149, 106234, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106234>.

PALANKAR, N.; SHANKAR, A. U. R.; MITHUN, B. M. Durability studies on eco-friendly concrete mixes incorporating steel slag as coarse aggregates. **Journal of Cleaner Production**, v. 129, p. 437-448, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.033>.

PANG, B.; ZHOU, Z.; CHENG, X.; DU, P.; XU, H. ITZ properties of concrete with carbonated steel slag aggregate in salty freeze-thaw environment. **Construction and Building Materials**, v. 114, p. 162-171, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.168>.

QUADER, M. A.; AHMED, S.; GHAZILLA, R. A. R.; AHMED, S.; DAHARI, M. A comprehensive review on energy efficient CO₂ breakthrough technologies for sustainable green iron and steel manufacturing. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 50, p. 594-614, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.026>.

SHI, C. Steel slag: its production, processing, characteristics, and cementitious properties. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 16, n. 3, p. 230-236, 2004. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2004\)16:3\(230\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2004)16:3(230)).

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.

WANG, H.-Y.; CHEN, K.-W. A study of the engineering properties of CLSM with a new type of slag. **Construction and Building Materials**, v. 102, part 1, p. 422-427, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.198>.

YI, H.; XU, G.; CHENG, H.; WANG, J.; WAN, Y.; CHEN, H. An overview of utilization of steel slag. **Procedia Environmental Sciences**, v. 16, p. 791-801, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2012.10.108>.