

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia

Departamento de Engenharia Civil

Durabilidade a longo prazo de concretos produzidos com agregados de escória de aciaria BSSF

Fábio de Moraes Cartaxo

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos como parte dos requisitos para a conclusão da graduação em Engenharia Civil.

Orientadora:

Prof.^a Dra. Fernanda Giannotti da Silva Ferreira

São Carlos
2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos entes próximos pela companhia e auxílio fornecidos durante a execução deste trabalho.

À orientadora Prof^a Dra. Fernanda Giannotti da Silva Ferreira, pelas contribuições e ensinamentos que viabilizaram e nortearam o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao recente Mestre em Engenharia Civil, Leandro Henrique Benittez, por participar da idealização, viabilização e desenvolvimento do projeto.

Ao pessoal do Laboratório de Materiais Componentes (LMC) da UFSCar, em especial ao técnico José Roberto, por me acompanhar e auxiliar no desenvolvimento dos ensaios de caracterização física dos materiais.

Ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) pela parceria e oportunidade de acompanhar e desenvolver grande parte dos ensaios laboratoriais em seu domínio. Ainda, agradeço à Fundação de Apoio ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas (FIPT) pela bolsa de auxílio à pesquisa concedida.

À equipe do Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) do IPT pelo trabalho e ensinamentos prestados no desenvolvimento desta pesquisa. Adicionalmente, sou grato ao Fabiano, Karoline, Rafael, Lucas, Edwin, Eduardo e demais pessoas que tive contato direto, pelo acolhimento e auxílio, além dos ensinamentos e experiências transmitidas.

Por fim à empresa Apodi, pela parceria no desenvolvimento deste projeto, por meio de financiamento e doações do cimento e escória de aciaria empregados neste estudo.

RESUMO

A escória de aciaria é coproduto siderúrgico com comportamento expansivo, que para incorporação em produtos da construção civil, necessita passar por processos de estabilização. O processo denominado BSSF (do inglês, *Baosteel's Slag Short Flow/ fluxo curto de escória da Baosteel*) é uma novidade tecnológica no Brasil em que se consegue resfriar e estabilizar grandes montantes do material, em menor tempo comparado ao tratamento convencional. Assim, esse trabalho tem como objetivo identificar a viabilidade técnica dos concretos produzidos com a incorporação de agregados de escória de aciaria estabilizados pelo processo 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. Foram determinadas as propriedades mecânicas de resistência à compressão axial (idades de 7, 28, 365 dias) e o módulo de elasticidade estático (nas idades de 28, 91 e 365 dias). Em relação às propriedades relacionadas a durabilidade, avaliou-se a estabilidade volumétrica ao longo de 365 dias de observação, profundidade de carbonatação (idade de 28 dias) e penetração de íons cloreto (idades de 28, 91 e 365 dias). Por fim, avaliou-se o potencial de contaminação por solubilização e lixiviação dos concretos produzidos. Em geral, em relação ao traço de referência, os concretos com agregados de escória de aciaria BSSF apresentaram desempenho mecânico superior, características de durabilidade similares, e baixo potencial de contaminação (nos limites da NBR 10004). Os traços EA40 e EA60 se destacam, com os melhores resultados mecânicos, sem perdas em relação à durabilidade. Contudo, os concretos produzidos não se adéquam para aplicações em ambientes sujeitos a ataques de íons cloretos, como regiões litorâneas.

Palavras-chaves: escória de aciaria, concretos, durabilidade, propriedades mecânicas.

ABSTRACT

The steel slag is a steel co-product with an expansive behavior, which, for incorporation into civil construction products, needs to go through stabilization processes. The process called BSSF (Baosteel's Slag Short Flow) is a technological novelty in Brazil in which large amounts of material can be cooled and stabilized in less time compared to conventional treatment. Thus, this work aims to identify the technical feasibility of concrete produced with the incorporation of steel slag aggregates stabilized by the BSSF process. The concrete mixes were developed for environmental aggressiveness class II, with a minimum strength of 25 MPa at 28 days. As materials, CP V-ARI, granitic gravel, quartz sand, BSSF steel slag and superplasticizer additive were used. The mechanical properties of axial compressive strength (ages 7, 28, 365 days) and static modulus of elasticity (ages 28, 91 and 365 days) were determined. Regarding the properties related to durability, volumetric stability over 365 days of observation, carbonation depth (age 28 days) and penetration of chloride ions (ages 28, 91 and 365 days) were evaluated. Finally, the potential for contamination by solubilization and leaching of the produced concrete was evaluated. In general, in relation to the reference mix, concretes with BSSF steel slag aggregates presented superior mechanical performance, similar durability characteristics, and low contamination potential (within the limits of NBR 10004). The EA40 and EA60 traits stand out, with the best mechanical results, without losses in terms of durability. However, the concretes produced are not suitable for applications in environments subject to chloride ion attacks, such as coastal regions.

Keywords: steel slag, concrete, durability, mechanical properties.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	8
1.1. JUSTIFICATIVA	10
1.2. OBJETIVOS	11
1.2.1. Geral	11
1.2.2. Específicos	11
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1. PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DA ESCÓRIA DE ACIARIA	12
2.2. CARACTERIZAÇÃO DA ESCÓRIA DE ACIARIA	15
2.2.1. Características gerais e propriedades físicas	15
2.2.2. Composição química e mineralógica	16
2.2.3. Características de lixiviação	18
2.3. REAPROVEITAMENTO DA ESCÓRIA DE ACIARIA	19
2.3.1. Escória de aciaria como agregados em concretos	20
2.3.1.1. <i>Propriedades relacionadas à durabilidade dos concretos</i>	21
2.3.1.2. <i>Propriedades mecânicas dos concretos</i>	23
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	25
3.1. DOSAGEM DOS CONCRETOS ESTUDADOS	26
3.1.1. Confeção dos concretos	28
3.2. ENSAIOS EM CONCRETO	30
3.2.1. Propriedades mecânicas	30
3.2.2. Propriedades relacionadas à durabilidade	30
3.2.2.1. <i>Profundidade de carbonatação</i>	30
3.2.2.2. <i>Variação dimensional</i>	31
3.2.2.3. <i>Resistência à penetração de íons cloreto</i>	31
3.2.3. Avaliação do potencial de contaminação dos concretos	32
3.2.4. Análise estatística dos resultados dos ensaios mecânicos	33
4. RESULTADOS DOS ENSAIOS EM CONCRETO	34
4.1. PROPRIEDADES MECÂNICAS	34
4.1.1. Resistência à compressão axial	34
4.1.2. Módulo de elasticidade estático	35
4.2. PROPRIEDADES RELACIONADAS À DURABILIDADE	37
4.2.1. Variação dimensional	37
4.2.2. Profundidade de carbonatação	38
4.2.3. Penetração de íons cloreto	39
4.2.4. Potencial de contaminação	41

5. CONCLUSÕES	43
REFERÊNCIAS	45
APÊNDICE A	48

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Processos de geração da escória de aciaria _____	13
Figura 2 – Processo de resfriamento por Fluxo curto de escória da Baosteel (BSSF) ____	14
Figura 3 – Escórias de aciaria _____	16
Figura 4 – Concretos com escória de aciaria após exposição em ambiente ácido _____	21
Figura 5 – Etapas do procedimento experimental gera em ordem cronológica _____	25
Figura 6 – Materiais constituintes dos concretos _____	26
Figura 7 – Processo de confecção, cura e moldagem das amostras de concreto _____	28
Figura 8 – Resultados do ensaio de resistência à compressão dos concretos _____	34
Figura 9 – Resultados do ensaio de resistência à compressão, em termos relativos ____	35
Figura 10 – Resultados do ensaio de módulo de elasticidade estático dos concretos ____	36
Figura 11 – Resultados do ensaio de módulo de elasticidade, em termos relativos ____	36
Figura 12 – Resultados do ensaio de variação dimensional dos concretos _____	37
Figura 13 – Corpos de prova após exposição de 70 dias em câmara de carbonatação ____	38
Figura 14 – Resultados de profundidade de carbonatação dos concretos _____	39
Figura 15 – Penetração de íons cloreto dos concretos _____	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Intervalos de composição química das escórias de aciaria (% de massa) ____	17
Tabela 2 – Espécies químicas e seus produtos (Weast, 1971 apud Faria, 2007) _____	18
Tabela 3 – Minerais nas escórias siderúrgicas (KUDRIN, 1985 apud SOUZA, 2016) ____	18
Tabela 4 – Características e aplicações da escória de aciaria (YI <i>et al.</i> , 2012) _____	19
Tabela 5 – Massa específica absoluta dos materiais constituintes _____	27
Tabela 6 – Traço unitário dos concretos ensaiados _____	27
Tabela 7 – Composição das misturas de concreto ensaiadas _____	28
Tabela 8 – Resumo das informações da etapa de moldagem e cura dos corpos de prova	29
Tabela 9 – Classificação do concreto quanto à aptidão à penetração de íons cloreto ____	32
Tabela 10 – Resultados dos ensaios de potencial de contaminação por lixiviação ____	41
Tabela 11 – Resultados dos ensaios de potencial de contaminação por solubilização ____	41

1. INTRODUÇÃO

O concreto é o material da construção civil mais utilizado no mundo, com uma produção superior a 20 bilhões de toneladas anualmente (GENCEL *et al.*, 2021). A composição do concreto convencional, o tipo de concreto mais empregado no mundo, é dada por materiais básicos como água, aglomerantes e agregados, sendo o último a maior parcela destes, representando cerca de 85% do volume total da composição (MARTINS *et al.*, 2021). Segundo o Programa das Nações Unidas (*United Nations Environment Programme*) esses materiais representam mais de um terço de todos os materiais extraídos do planeta anualmente (UNEP, 2019).

Os agregados naturais, isto é, extraídos diretamente da natureza (areias e britas), possuem uma demanda insustentável, já que representam a maior parcela da composição dos concretos e suas reservas levam milhões de anos para serem produzidas, possuindo volumes limitados. Assim, é seguro prever a escassez da matéria-prima de origem natural, elevando preços até patamares impraticáveis e constituindo um problema inevitável de esgotamento para o futuro, ou presente, como já ocorre em alguns lugares do mundo e nas grandes capitais do Brasil (HABERT, *et al.*, 2010; ULSEN *et al.*, 2013).

A partir desta problemática, materiais alternativos têm sido apresentados pela comunidade científica ao longo dos últimos anos, fornecendo possibilidades de substituição (parcial ou integral) frente aos de origem natural. Em geral, estes materiais que eram anteriormente vistos como rejeitos, sem destinações na escala produtiva, hoje são percebidos como coprodutos de significativo valor econômico, como as escórias de alto-forno e de aciaria. Assim, além de fornecer uma solução para escassez de matéria-prima natural, a incorporação de resíduos na cadeia produtiva do setor da construção civil, também a torna uma grande usina recicladora, promovendo uma destinação sustentável para muitos coprodutos gerados por outras indústrias.

Conforme o Instituto Aço Brasil (IABR, 2020), no ano de 2020, foram gerados, em solo nacional, cerca de 19 milhões de toneladas de resíduos siderúrgicos, dos quais os principais são as escórias de alto-forno (40%) e de aciaria (25%). Essas escórias são ambos resíduos provenientes do processo de fabricação do aço, mas apresentam destinações e graus de reaproveitamento bastante distintos.

Diferentemente da escória de alto-forno, que por possuir propriedades aglutinantes e um longo histórico de incorporação pela indústria cimenteira, alcança altos índices de

reaproveitamento (88% em 2019 e 96% em 2020), a escória de aciaria ainda encontra barreiras tecnológicas para sua completa absorção em setores produtivos (IABR, 2020).

Em 2020, apenas 63% dos volumes de escória de aciaria produzidos no Brasil encontraram destinações produtivas, como para aplicações na construção de bases e sub-bases de estradas (78%), nivelamento de terreno (8%), uso agrônômico (3%), agregados para concreto (1%) e outros (11%) (IABR, 2020). Os baixos índices de reaproveitamento se refletem 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 e representando um potencial risco ambiental, pois os depósitos de escória de aciaria quando em contato com a água, podem produzir soluções altamente alcalinas e carregadas de metais pesadas, tornando-se um potencial agente nocivo à vida animal aquática e terrestre (NAIDU *et al.*, 2020).

Em relação ao material, a escória de aciaria é formada por silicatos de cálcio, óxido de silício, ferrita cálcica, magnésia e traços de outros numerosos minerais com impurezas (JIANG *et al.*, 2018; NAIDU *et al.*, 2020). Ademais, possui aspecto rochoso com coloração escura (devido à elevada presença de ferro), superfície angulosa e irregular, massa específica em torno de 3,3-3,6 g/cm³ (aproximadamente 30% mais pesada que agregados naturais comuns), além de elevada dureza e porosidade (ABU-EISHAH; EL-DIEB, 2012; PALANKAR; SHANKAR; MITHUN, 2016; JIANG *et al.*, 2018).

Contudo, ressalta-se que as características químicas, mineralógicas e físicas das escórias de aciaria variam amplamente em função do tipo de processo das quais se originam, das matérias-primas empregadas e dos processos de beneficiamento aos quais são submetidas (SHI, 2004; YI *et al.*, 2012 e NAIDU *et al.*, 2020).

O principal entrave tecnológico para sua absorção na forma de material alternativo para construção civil, são os altos teores (5% a 15%) de óxido de cálcio livre (f-CaO) e óxido de magnésio livre (MgO) presentes em sua composição química. A presença em altos teores destes elementos está relacionada com problemas de instabilidade volumétrica destrutiva, uma vez que desencadeiam reações de hidratação expansivas, gerando esforços internos adicionais em seus grãos, culminando na fissuração ou mesmo no colapso (PALANKAR *et al.*, 2016).

Portanto, para que a escória de aciaria possa ser empregada como um produto na construção civil, faz-se necessária à sua estabilização, de modo a torná-la menos reativa quimicamente (SHI, 2004; SILVA, 2011; PALANKAR *et al.*, 2018; NAIDU *et al.*, 2020).¹

Nos últimos anos foram desenvolvidos estudos para investigação da viabilidade de reaproveitamento da escória de aciaria estabilizada em substituição aos agregados naturais para confecção de compósitos cimentícios¹ (JIANG *et al.*, 2018; NAIDU *et al.*, 2020).

Os concretos convencionais são avaliados sobre três principais óticas: trabalhabilidade (estado fresco), desempenho mecânico e durabilidade (no estado endurecido), sendo estes três aspectos fundamentais para avaliação de sua qualidade e aplicabilidade.

A trabalhabilidade está relacionada com características do concreto (consistência e dimensão máxima do agregado), ao tipo de obra (dimensões da peça, espaçamentos, taxa e distribuição das barras de aço) e aos métodos de execução (transporte, lançamento, adensamento e acabamento).

O desempenho mecânico dos concretos se refere à capacidade, sobre as condições solicitantes de projeto, do material de alcançar as características estruturais projetadas.

Por outro lado, a durabilidade dos concretos se traduz na sua habilidade de manter as propriedades de projeto ao longo de sua determinada vida útil, sob as condições e ambientes solicitantes previstos.

Assim, as propriedades dos compósitos cimentícios são consequência das características dos materiais constituintes que a compõe e das reações químicas aglutinantes. Assim, as características dos agregados, que somam a maior parcela da composição dos concretos, influenciam de forma decisiva na qualidade final da composição.

1.1. JUSTIFICATIVA

A escória de aciaria é um coproduto siderúrgico gerado em grandes montantes mundialmente, cujo reaproveitamento e destinação sustentáveis ainda são um impasse, culminando em problemas de naturezas econômicas e ambientais. Assim, a sua aplicação como material alternativo em compósitos cimentícios é um possível caminho, principalmente na forma de agregado para concretos, que compõem a parcela mais significativa (em volume) do material da construção civil mais utilizado no mundo.

¹ Compósitos cimentícios são quaisquer produtos resultantes da mistura entre aglomerantes de base cimentícia e outros materiais, como são argamassas e concretos.

Contudo, existe impasses tecnológicos em relação às características das escórias de aciaria, que por possuírem elementos químicos expansivos e potencialmente nocivos ao meio ambiente, interferem não somente em suas qualidades para aplicação em concretos, como também implicam em potencial nocividade ao meio ambiente. Portanto, são necessários processos de beneficiamento para sua estabilização química, comprovados e avaliados de forma metodológica e científica.

Existem diversos métodos para o tratamento e estabilização da escória de aciaria, mas uma tecnologia pioneira no Ocidente, denominada BSSF (*Baosteel's Slag Short Flow*) tem a finalidade de resfriar, britar e estabilizar toneladas de escória em poucos minutos, apresentando ganhos de produtividade em relação aos métodos tradicionais, que normalmente levam meses para estabilização do material. Assim, devido à natureza do processo de tratamento, produz-se escórias estabilizadas com características diferentes do convencional, como alta massa específica e elevado teor de finos (materiais pulverulentos), além de uma estrutura mineralógica diferenciada (CARTAXO *et al.*, 2021; AMANCIO *et al.*, 2020).

Deste modo, estudos são necessários para avaliação das propriedades da escória de aciaria estabilizada pelo método BSSF (escória de aciaria BSSF) e suas implicações nas características mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com sua incorporação.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Geral

O objetivo principal deste trabalho consiste na avaliação das características mecânicas e de durabilidade a longo prazo de concretos convencionais com incorporação de escória de aciaria BSSF (estabilizada) em substituição aos agregados naturais.

1.2.2. Específicos

Os objetivos específicos deste estudo são:

- Avaliar as propriedades mecânicas de resistência à compressão e módulo de elasticidade dos concretos produzidos com agregados de escória de aciaria BSSF e comparar com o concreto produzido exclusivamente com agregados naturais;
- Avaliar as propriedades de durabilidade referentes por meio dos ensaios de resistência à carbonatação, penetração de íons cloreto e variação dimensional.
- Analisar o potencial de contaminação por lixiviação e/ou solubilização de substâncias orgânicas e inorgânicas dos concretos confeccionados com a escória de aciaria BSSF.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DA ESCÓRIA DE ACIARIA

Para obtenção do aço, são utilizados minério de ferro e aço reciclado que passam por vários processos de beneficiamento em que diversos resíduos são gerados. Os principais rejeitos da indústria siderúrgica são: escória de alto-forno, escória de dessulfuração, escória de aciaria elétrica, lama grossa de aciaria, lama fina de aciaria e carepa (GEYER, 2001). Segundo Faria (2007), as escórias correspondem a 60% da geração de resíduos do processo de beneficiamento do aço.

O aço pode ser produzido por três processos distintos onde é utilizado diferentes fornos de refino. O primeiro é o Siemens-Martin (OH) onde a matéria-prima é a sucata metálica, calcário e minério de ferro. Utiliza-se a injeção de oxigênio para a fusão e agitação do banho metálico. Este processo está em desuso devido à baixa produtividade. No Brasil apenas 1,9% da produção de aço é conduzida por esse processo (SILVA, 2011). Os outros dois processos, mais utilizados atualmente são, usina integrada e semi-integrada.

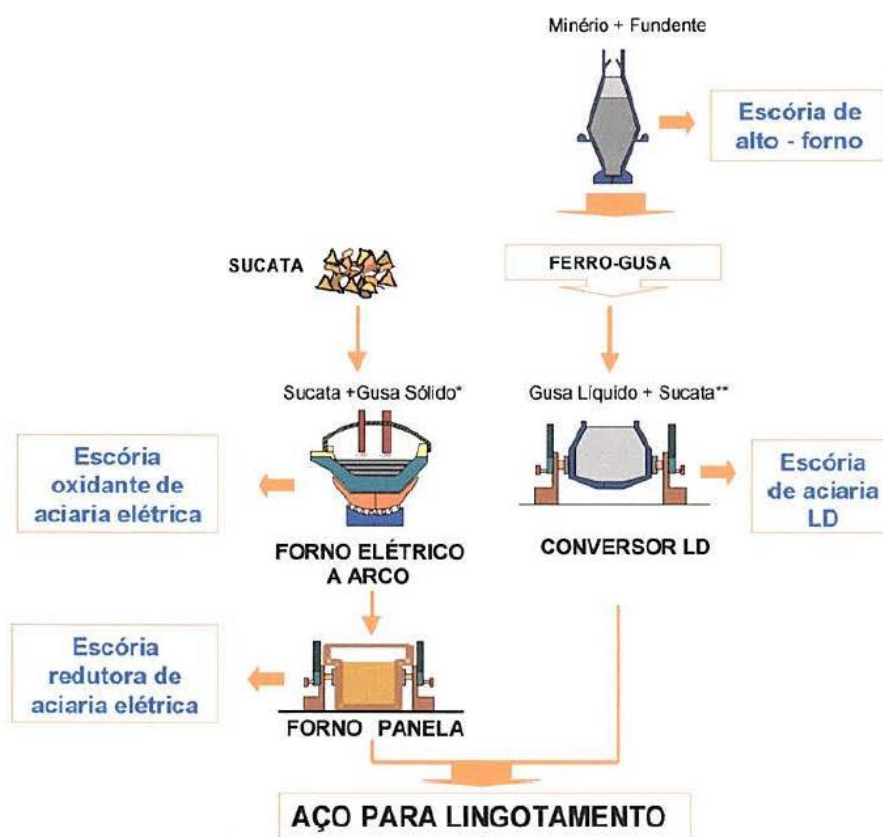
A usina integrada, opera em três fases básicas: redução, refino e laminação. Na redução são carregados no alto forno minério de ferro, carvão e cal. Na parte inferior do alto forno, é injetado oxigênio a uma temperatura de 1000°C. O oxigênio esquentando o carvão que funde a carga metálica e dá início ao processo de redução do minério de ferro transformando-o de estado sólido para líquido, obtendo o chamado ferro gusa. O ferro-gusa é uma liga de ferro e carbono, com elevado teor de carbono. Posteriormente é realizado o refino, em que se transforma gusa líquido, com adição de sucata de ferro, em aço líquido, por meio do convertedor ou conversor LD (ou à oxigênio), de onde se obtém também a escória de aciaria LD. As iniciais LD são das aciarias austríacas Linz e Donawitz que foram pioneiras mundiais na utilização industrial desse processo. Nesta etapa são removidos parte do carbono e impurezas contidos no gusa. A maior parte do aço líquido é solidificada em equipamento de lingotamento contínuo para produzir semi-acabados, lingotes e blocos. Estes vão para a última fase de produção, a laminação, onde são processados por equipamentos chamados laminadores e transformados nos produtos siderúrgicos conhecidos no mercado, como por exemplo os vergalhões, essenciais para construção civil (IABR, 2018). No Brasil, quase 80% do aço é produzido por meio desse processo (SILVA, 2011).

A outra forma de fabricação do aço se dá por meio da usina semi-integrada, que opera com duas fases básicas: refino e laminação. A grande diferença dessa usina em relação à

integrada, é que já começa seu processo de produção com o ferro gusa, ou seja, não faz a redução do minério de ferro. A matéria-prima utilizada é o ferro secundário, isto é, sucata de aço e gusa sólido. Estes vão direto para o processo de refino em forno de arco elétrico onde é produzido o aço. Nessa técnica se obtém como resíduo a escória de aciaria elétrica. A partir daí as etapas são iguais as das usinas integradas com lingotamento e laminação. O Brasil utiliza quase 20% de usinas semi-integradas para produção de aço (SILVA, 2011).

A Figura 1 ilustra o processo de produção do aço nas usinas siderúrgicas integrada e semi-integrada, de onde surgem as escórias de aciaria LD e FAE, respectivamente. Como a produção do aço é classificada conforme o forno em que é produzido, a escória também se distingue como escória de conversor LD quando é produzida na usina integrada, e escória de forno elétrico (FAE) produzida na usina semi-integrada (MASUERO, 2001).

Figura 1 – Processos de geração da escória de aciaria



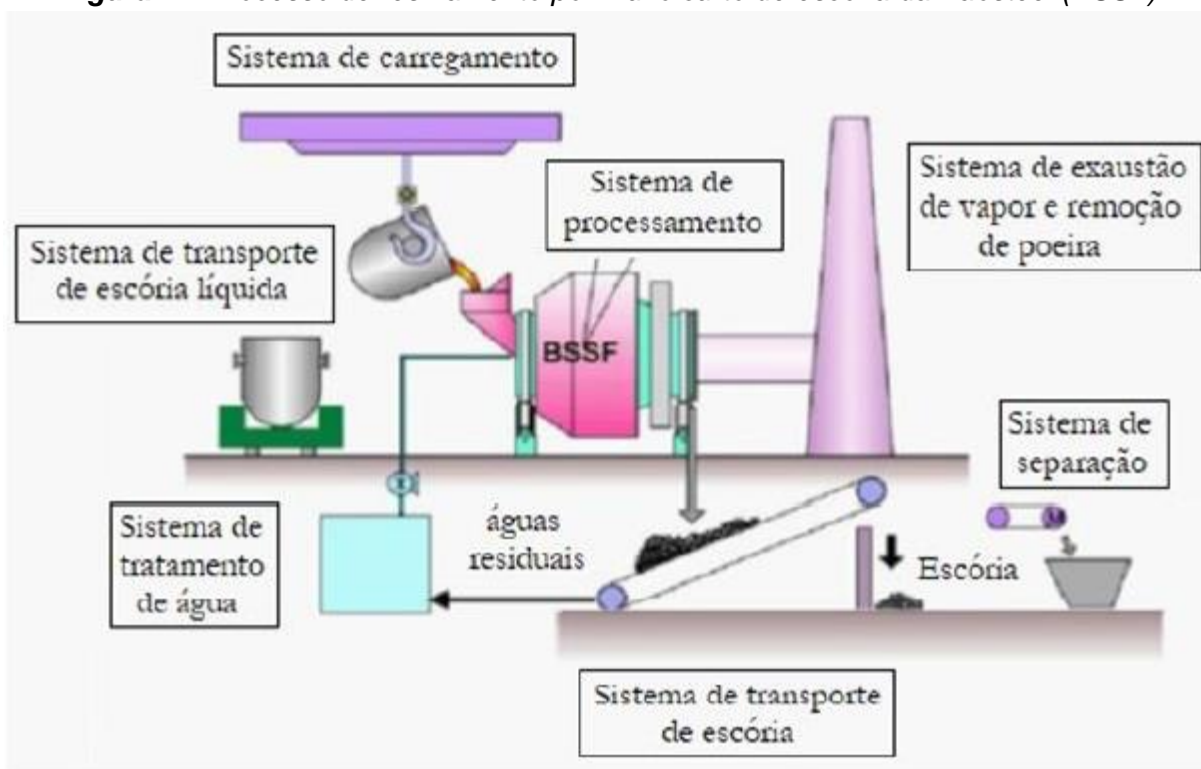
Fonte: Adaptado de MASUERO (2001)

As escórias, após serem retiradas dos fornos, precisam ser resfriadas, e dependendo do tipo de resfriamento e sua velocidade, apresentarão características distintas de composição, morfologia, propriedades de hidratação e características de lixiviação (JIANG *et al.*, 2018). Existem diversos processos de resfriamentos, tais como: a ar natural (*natural air cooling*), a jatos de água (*water spraying*), extinção à ar (*air quenching*), caixa rasa

de refrigeração (*shallow box chilling*) método do bafo quente (*hot stuffy method*), conforme descrevem Shi (2004) e Liu *et al.* (2016).

Outra forma mais atual de resfriamento e beneficiamento da escória de aciaria foi desenvolvida pela empresa chinesa *Baosteel Metal Company*, sendo conhecido como BSSF (*Baosteel's Slag Short Flow* / Fluxo curto de escória da Baosteel) que resfria e estabiliza em poucos minutos toneladas do material. Nesta tecnologia de resfriamento, montantes de escória são lançadas em um recipiente rotativo com esferas maciças de aço, cujo sistema de refrigeração com base na circulação contínua de água atua, constituindo o processo onde o material é resfriado, solidificado e britado simultaneamente. Por fim, a escória BSSF resultante é enviada para um sistema de separação, que divide os montantes em função do tamanho de seus grãos, a fim de prepará-los para sua próxima destinação (WANG *et al.*, 2016 e BENITTEZ, 2020). Na Figura 2 é apresentado o esquema que sumariza o processo de resfriamento e beneficiamento pelo método BSSF.

Figura 2 – Processo de resfriamento por Fluxo curto de escória da Baosteel (BSSF)



Fonte: GUANGQUIANG LI (2011) *apud* BENITTEZ (2020)

As grandes vantagens deste processo residem nas suas capacidades de (1) separação simples e prática do metal residual, em que este não se mistura com a escória na fase de descarregamento, pois apresentam pontos de solidificação distintos (BENITTEZ, 2020), (2) capacidade volumétrica e velocidade de resfriamento, processando toneladas de material

em ciclos com duração entre 3-5 minutos e (3) redução significativa da quantidade de cal livre na sua composição (SOUZA, 2016).

Finalmente, caso o método de resfriamento aplicado não consiga diminuir os teores de óxidos de CaO e MgO livres até níveis seguros, torna-se necessário a estabilização da escória por intemperismo prolongado, sujeitando os montantes do material à um processo de cura a céu aberto por no mínimo 6 meses (FARIA, 2007). Adicionalmente, para melhor aproveitamento do material, as escórias de aciaria podem passar por pós-processamentos, a fim de recuperar as parcelas ferro residuais ou adequar suas características para determinado uso (i.e: britagem, triagem e separação magnética) (YI *et al.*, 2012).

2.2. CARACTERIZAÇÃO DA ESCÓRIA DE ACIARIA

2.2.1. Características gerais e propriedades físicas

A escória de aciaria é um dos resíduos da produção do aço sendo classificada segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004) como resíduo sólido não inerte, classe IIA, ou seja, não apresenta periculosidade para o uso. Contudo, Shi (2004) alerta que as composições das escórias variam amplamente, podendo a sua periculosidade ser alterada em função das características de fabricação ou normas específicas de cada país.

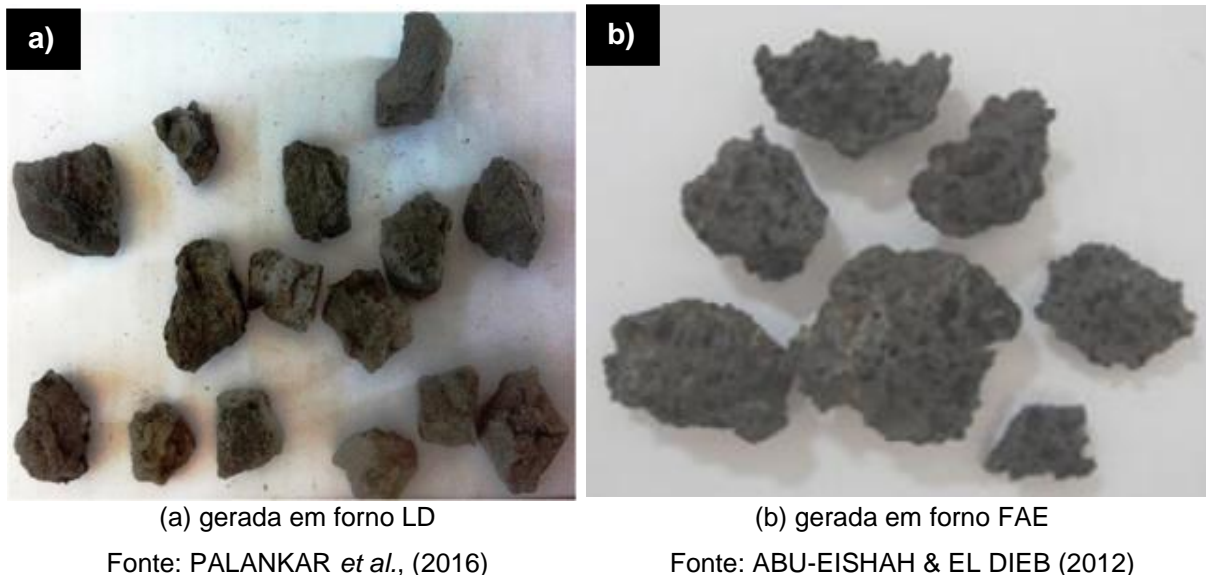
Em geral, as escórias de aciaria (Figura 3) são classificadas em função dos tipos de aços fabricados, subdivididas entre as resultantes do processo de fabricação do aço carbono ou das ligas de aço inoxidável e uma segunda classificação em função do tipo de forno das quais resultam (fornos LD, FAE ou de Panela). Estas classificações refletem características distintas de cada tipo de escória, como as escórias produzidas em forno FAE que participam do processo de fabricação das ligas de aço inoxidável, possuindo altos teores de Cr (cromo) em sua composição (0-30%) (SHI, 2004; YI *et al.*, 2012; JIANG *et al.*, 2018).

Entretanto, os processos de resfriamento e beneficiamento também alteram significativamente as propriedades resultantes das escórias, sendo um fator importante para sua caracterização (SHI, 2004, FARIA, 2007 e JIANG *et al.*, 2018). De acordo com Naidu *et al.* (2020), as escórias resfriadas lentamente apresentam estrutura cristalina, com tamanho de partículas que chegam até 300 μm , enquanto as escórias submetidas a métodos mais bruscos de resfriamento apresentam estrutura vítrea (estrutura aleatória e sem simetria).

De todo modo, as escórias de aciaria apresentam de certas semelhanças, como aspecto rochoso, coloração escura (alta presença de ferro), superfície angulosa e estrutura interna irregular, massa específica em torno de 3,3-3,6 g/cm^3 (aproximadamente 30% mais pesada

que agregados naturais comuns), elevada dureza e porosidade (ABU-EISHAH e EL-DIEB, 2012; PALANKAR *et al.*, 2016 e JIANG *et al.*, 2018).

Figura 3 – Escórias de aciaria



2.2.2. Composição química e mineralógica

De acordo com Shi (2004) e Jiang *et al.* (2018), as composições das escórias de aciaria são dadas majoritariamente por óxidos de cálcio, ferro, magnésio, alumínio e silicatos de cálcio, junto a outros elementos químicos em menor escala, como os óxidos cromo, fósforo etc. Na Tabela 1 são apresentados resumos das composições químicas de escórias de aciaria LD e FAE relatadas na bibliografia, sendo as escórias LD subdivididas em relação aos processos de resfriamento.

As composições das escórias LD e FAE são similares, mas são diferenciadas principalmente por diferentes teores de cromo (Cr) e amplitudes de variação de seus elementos, sendo as escórias resultantes do forno de arco elétrico (FAE) dotadas de maiores teores de Cr (0-30%) e acentuada variabilidade em sua composição, justificada pelo emprego de sucatas metálicas ao invés de ferro-gusa (matéria-prima no processo LD) em seu processo de fabricação (JIANG *et al.*, 2018). Adicionalmente, as escórias LD-BSSF possuem maiores teores de Fe, implicando em um material mais denso e possivelmente mais sensível aos problemas de instabilidade volumétrica.

Segundo Shi (2004), os teores de óxido cálcio livre ($f\text{-CaO}$) crescem em função do aumento na relação de alcalinidade (CaO/SiO_2) da escória, podendo representar até 15% de sua composição. A hidratação deste óxido livre é o fator predominante no problema de instabilidade volumétrica da escória de aciaria, pois ocorre por meio de reações expansivas

concentradas em curtos períodos, resultando em altas taxas de expansão (WANG *et al.*, 2017) e incrementos bruscos de pressão interna no material, podendo causar fissuração e consequentes colapsos de seus grãos (PALANKAR *et al.*, 2016).

Tabela 1 – Intervalos de composição química das escórias de aciaria (% de massa)

Elementos	Escória de aciaria LD			Escória de aciaria FAE
	SHI (2004)	JIANG <i>et al.</i> (2018)	BSSF*	JIANG <i>et al.</i> (2018)
SiO ₂	8 – 20	10,4 - 18,9	5,84 - 8,76	5 – 40
Al ₂ O ₃	1 – 6	1,4 - 5,5	0,63 - 1,77	1 – 15
Fe/FeO/Fe ₂ O ₃	10 - 35 (FeO)	18,4 - 27,3 (Fe ₂ O ₃)	29,52 - 52,98 (Fe ₂ O ₃)	1,2 – 50
CaO	30 – 55	37,4 - 56,4	33,46 - 41,67	15 - 54,0
MgO	5 – 15	1,7 - 9,3	5,67	1 - 21,4
MnO	2 - 8 (MnO)	1,9 - 3,7 (MnO)	5,09 (MnO)	1,4 - 4,18
TiO ₂	0,4 - 2,0	0,37 - 3,1	0,63	-
S/SO ₃	0,05 - 0,15 (S)	0,1 - 0,9 (SO ₃)	-	-
P/P ₂ O ₅	0,2 - 2,0 (P)	1,3 - 1,7 (P ₂ O ₅)	1,01 (P ₂ O ₅)	0,5 - 0,6 (P ₂ O ₅)
Cr/Cr ₂ O ₃	0,1 - 0,5 (Cr)	-	-	0,5 - 30 (Cr ₂ O ₃)
<i>f</i> -CaO	0 – 10	0,0 - 7,5	1,84	0,1 - 0,4
Perda ao fogo	-	0,25 - 3,12	2,63	0,1

Nota: Os limites superiores de *f*-CaO das escórias relatadas por JIANG *et al.* (2018) e SHI (2004) são referentes de escórias não-tratadas.

* Composições químicas de escórias de aciaria LD resfriadas e tratadas pelo método BSSF, retiradas dos trabalhos de WANG *et al.* (2016) e AMANCIO *et al.* (2020).

Outros dois elementos que contribuem de forma secundária para instabilidade volumétrica do agregado são o óxido de magnésio livre (*f*-MgO) e ferro metálico (FeM), que por meio de reações de hidratação (com menor taxa de expansão) e oxidação, respectivamente, geram cristais de maiores volumes, culminando na expansão volumétrica global do material (FARIA, 2007). Na Tabela 2 são descritas as relações de variação volumétrica das principais das fases minerais e seus respectivos produtos associadas às reações expansivas da escória.

Em relação às fases minerais que podem ser encontradas nas escórias de aciaria, são em sua maioria compostos sólidos cristalinos de óxidos, silicatos e outros diversos elementos. As principais fases são o silicato dicálcico (2CaO.SiO₂), ferrita dicálcica (2CaO.Fe₂O₃), wustita (FeO) ou magnésio-wustita [(Fe, Mg, Mn) O], sendo os tamanhos de grãos destas fases variáveis (SHI, 2004 e SOUZA, 2016). Adicionalmente, estão presentes grandes quantidades de partículas de ferro metálico em sua constituição, sendo um agravante para o problema de instabilidade volumétrica do agregado (FARIA, 2007 e SOUZA, 2016). As principais fases minerais das escórias siderúrgicas são listadas na Tabela 3 (KUDRIN, 1985 *apud* SOUZA, 2016).

Tabela 2 – Espécies químicas e seus produtos (Weast, 1971 apud Faria, 2007)

Espécies	Densidade (g/cm ³)	Massa molar (g/mol)	Vol. molar (cm ³ /mol)	Variação de volume (%)
CaO	3,38	56,08	16,59	Em relação ao CaO
Ca(OH) ₂	2,24	74,09	33,08	99,40
CaCO ₃	2,93	100,09	34,16	105,90
CaCO ₃ ·MgCO ₃	2,87	184,41	64,25	287,30
MgO	3,58	40,31	11,56	Em relação ao MgO
Mg(OH) ₂	2,36	58,33	24,72	119,54
FeM	7,86	55,85	7,11	Em relação ao FeM
FeO	5,70	71,85	12,61	77,04
Fe ₂ O ₃	5,24	159,69	30,48	328,07
Fe(OH) ₂	3,40	89,86	26,43	271,7
FeO(OH)	4,28	88,85	20,76	192,0

Tabela 3 – Minerais nas escórias siderúrgicas (KUDRIN, 1985 apud SOUZA, 2016)

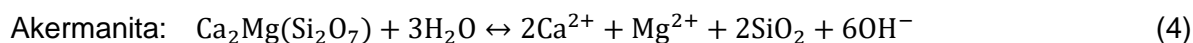
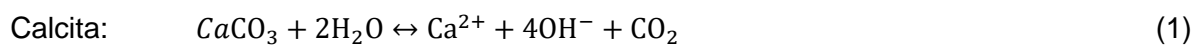
Silicatos	FeO.SiO ₂ ; (FeO).2SiO ₂ ; MnO.SiO ₂ ; (MnO) ₂ .SiO ₂ ; (CaO) ₂ .SiO ₂ ; (CaO) ₃ .SiO ₂ ; MgO.SiO ₂ ; (MgO) ₂ .SiO ₂ e Al ₂ O ₃ .SiO ₂ .
Fosfatos	(FeO) ₃ .P ₂ O ₅ ; (MnO) ₃ .P ₂ O ₅ ; (CaO) ₃ .P ₂ O ₅ ; (CaO) ₄ .P ₂ O ₅ e (MgO) ₃ .P ₂ O ₅ .
Aluminatos	FeO.Al ₂ O ₃ ; CaO.Al ₂ O ₃ e MgO.Al ₂ O ₃ .
Ferritas	FeO.Fe ₂ O ₃ e m(CaO).n(Fe ₂ O ₃), onde m e n são números inteiros.
Compostos complexos	Monticelita – CaO.RO.SiO ₂ (sendo R equivalente a Fe, Mn, Mg); Merwinita – 3CaO.RO.2SiO ₂ ; Silicocarnotita – 5CaO.P ₂ O ₅ .SiO ₂ e Espinélios de composição mista, como a alumina ferrita cálcica 4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃

2.2.3. Características de lixiviação

Em relação as características de lixiviação da escória de aciaria, tem-se que por ser um material de alta relação de alcalinidade (CaO/SiO₂) e contar com a presença de metais pesados em sua composição química, as soluções de lixiviação geradas pelo contato da água possuem a tendência de serem altamente alcalinas e carregadas de metais pesados, representando um risco para vida animal terrestre e aquática (NAIDU *et al.*, 2020).

Por fim, segundo Gomes *et al.* (2016) *apud* Naidu *et al.* (2020), os mecanismos químicos característicos da lixiviação da escória se dão pela hidratação e dissociação acelerada dos óxidos de cálcio e magnésio, e por meio da dissolução lenta dos compostos Ca-Si, como a

larnita (Ca_2SiO_4), rankinita (Ca_3SiO_4) e akermenita [$\text{Ca}_2\text{Mg}(\text{SiO}_7)$], conforme ilustrado pelas equações 1, 2, 3 e 4 (SENGUPTA, 2017 *apud* NAIDU *et al.*, 2020).



Deste modo, faz-se importante a investigação do processo de lixiviação dos produtos que incorporaram o resíduo siderúrgico, pois os tratamentos podem não ser suficientes para imobilização do seu potencial de solubilização e transferência de substâncias nocivas ao meio ambiente.

2.3. REAPROVEITAMENTO DA ESCÓRIA DE ACIARIA

Nos últimos anos, muitos estudos foram desenvolvidos para diversificação dos meios de reaproveitamento da escória de aciaria, que variam entre aplicações na forma de agregados para construções aquáticas e rodoviárias, até alternativas de uso na composição de fertilizantes ou na forma de material para beneficiamento do solo. Suas aplicações podem ser divididas em três grandes campos, sendo (1) empregadas como materiais para construção civil, (2) reaproveitadas em processos de recuperação de metais e (3) utilizadas em aplicações de remediações ambientais (PIATAK *et al.*, 2015). Yi *et al.* (2012) relaciona características das escórias de aciaria e respectivas aplicações para as quais são utilizadas, sendo apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Características e aplicações da escória de aciaria (Yi *et al.*, 2012)

Características	Aplicações
Dureza, resistência ao desgaste, aderência e rugosidade	Agregados para construções rodoviárias e aquáticas.
Propriedades cimentícias (C_3S , C_2S e C_4AF)	Produção de cimentos e concretos
Compostos de FeO , CaO , SiO_2	Matéria-prima para produção de clínquer
Porosidade e alcalinidade	Tratamento de águas de esgoto
Compostos de CaO e MgO	Captura de CO_2 e dessulfuração de gases de combustão
Compostos ferrosos	Recuperação de ferro
Componentes de fertilizantes (CaO , SiO_2 , MgO e FeO)	Fertilizantes e corretores de solo
Compostos de CaO , MgO , FeO , MgO , MnO	Adições para produção do aço

No Brasil, a principal aplicação da escória de aciaria é na forma de base para pavimentação de vias e estradas, onde são destinadas aproximadamente 50% das escórias produzidas anualmente, enquanto outras aplicações representam percentuais irrisórios (1% para produção de cimento, 2% na forma de agregados para concretos e 5% em outras aplicações), sendo o restante destinado para aterros ou estocado em pátios siderúrgicos (IABR, 2018).

Em contrapartida, estudos recentes indicam viabilidade técnica e econômica para intensificação da utilização da escória de aciaria na forma de agregados para produção de concretos e argamassas, possibilitando a redução do consumo de agregados naturais, energia, áreas de estocagem e impactos ambientais associados (JIANG *et al.*, 2018; LIU *et al.*, 2020 e NAIDU *et al.*, 2020).

2.3.1. Escória de aciaria como agregados em concretos

A utilização de agregados alternativos para substituição dos agregados naturais é uma tendência atual, motivada principalmente pelo esgotamento de recursos finitos e não-renováveis e por vantagens econômicas, pois muitas vezes, os agregados reciclados são mais baratos (SILVA, 2011). Yanik (2016) sinaliza que em breve, a utilização de agregados artificiais, como os derivados da reciclagem de concretos, cinzas volantes e escórias, superarão o consumo atual de agregados naturais, como a areia e pedrisco.

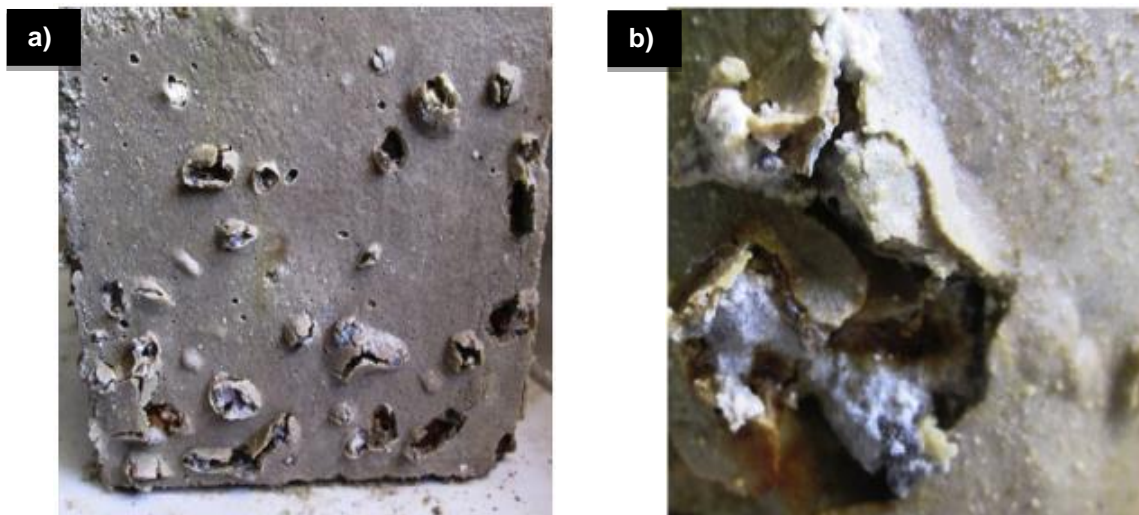
O concreto é uma mistura composta por três principais frações, água, aglomerante e agregados, sendo que este último representa aproximadamente 85% das composições totais destas misturas, representando grande potencial volumétrico para incorporação de resíduos industriais. Entretanto, de acordo Naidu *et al.* (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, tornando necessária a avaliação dos efeitos que a incorporação de produtos alternativos pode causar no desempenho dos concretos.

Em geral, as escórias de aciaria possuem propriedades físicas similares aos agregados naturais, tornando-se *à priori*, adequadas para aplicações na forma de agregados para concretos (NAIDU *et al.*, 2020). Contudo, a presença de óxidos hidratáveis em sua composição, principalmente o f -CaO, geram problemas de instabilidade volumétrica, tornando-se um obstáculo para incorporação do resíduo em concretos (WANG *et al.*, 2017).

A Figura 4 ilustra como os processos de expansão do agregado de escória de aciaria, quando desencadeados em ambientes agressivos, podem comprometer a integridade da

estrutura do próprio material, assim como dos compósitos cimentícios produzidos com sua incorporação.

Figura 4 – Concretos com escória de aciaria após exposição em ambiente ácido



(a) corpo de prova após expansão dos agregados, culminando em erupções na superfície (b) agregado de escória de aciaria deteriorado após processo de expansão

Fonte: PALANKAR *et al.* (2016)

Deste modo, são atualmente desenvolvidas pesquisas que visam avaliar (1) a eficiência de processos de estabilização da escória de aciaria, e (2) as propriedades mecânicas e de durabilidade dos concretos que incorporam escórias estabilizadas em suas composições (JIANG *et al.*, 2018 e NAIDU *et al.*, 2020).

Assim, diversos autores como Jiang *et al.* (2018), Naidu *et al.* (2020) e Benitez (2020) e Martins *et al.*, (2021) sinalizam a importância da investigação das características físicas e químicas das escórias, da eficiência dos processos de tratamento em reduzir a reatividade do material, além dos desempenhos mecânicos e de durabilidade dos materiais da construção civil resultantes da incorporação da escória em sua composição.

2.3.1.1. Propriedades relacionadas à durabilidade dos concretos

As propriedades relacionadas à durabilidade de compósitos cimentícios são importantes parâmetros para assegurar a aplicabilidade de agregados reciclados, pois avaliam a capacidade desses compósitos de resistirem e manterem suas características em meios agressivos e ao longo da vida útil projetada para estrutura (MARTINS *et al.*, 2021).

Portanto, o estudo do sistema poroso e os efeitos de agentes deletérios nas matrizes cimentícias produzidas com a incorporação de escória de aciaria são fundamentais (MARTINS *et al.*, 2021). Em estruturas de concreto armado, o concreto de cobertura é uma

barreira física e química à entrada de agentes agressivos, como o CO₂ e os íons cloreto, protegendo a armadura subjacente contra efeitos deletérios que levam à corrosão e perda de seção de aço.

Ataques de íons cloreto são encontrados em ambientes marítimos (como regiões litorâneas) por meio do transporte pela atmosfera até as estruturas de concreto, que se encontram mais frequentemente em ambientes urbanos. Os íons penetram nas camadas de concreto até encontrarem a armadura, iniciando processos de despassivação da proteção do aço, levando a corrosão e conseqüente perda de seção (DYER, 2014; BERTOLINI *et al.*, 2004; NAIDU *et al.*, 2020).

De forma geral, a bibliografia relata que os concretos produzidos com alto teor de incorporação da escória de aciaria na forma de agregados, possuem significativa vulnerabilidade a ataques de íons cloreto, principalmente em baixas idades (até 28 dias de cura). Este comportamento é atribuído geralmente ao aumento da porosidade e conectividade dos poros da matriz (MARTINS *et al.*, 2021).

A carbonatação dos concretos é um importante parâmetro de durabilidade, pois a penetração de CO₂ presente na atmosfera (com maior teor em ambientes urbanos) na camada de proteção (cobrimento) das estruturas de concreto armado, pode iniciar a formação de carbonatos de cálcio, sódio e potássio, que diminui o pH da solução contida nos poros do concreto, e quando em contato com a armadura, há a despassivação, podendo iniciar o processo de corrosão (MARTINS *et al.*, 2021).

Em relação aos efeitos da incorporação dos agregados de aciaria em concretos na resistência a carbonatação, autores como Andrade (2018) reportam resultados otimistas com diminuições expressivas (até 83,3%) na profundidade de carbonatação em relação aos concretos produzidos com agregados convencionais.

Outros diversos parâmetros podem ser avaliados para o entendimento do comportamento ao longo do tempo dos compósitos cimentícios produzidos com a escória de aciaria, como a estabilidade dimensional (tendo em vista o comportamento expansivo da escória de aciaria), ataques a sulfatos, ou o potencial de reações álcali-agregados durante o processo de cura em ambientes agressivos (NAIDU *et al.*, 2020; MARTINS *et al.*, 2021).

Palankar *et al.* (2016) avaliaram as propriedades de resistência e de durabilidade de concretos alcalinamente ativados que incorporaram a escória de aciaria LD estabilizada (em teores de substituição de 0%, 50% e 100% em volume) como agregado graúdo em sua composição. A escória foi submetida à cura por intemperismo com a céu aberto com

jateamentos de água periódicos, por 9 meses contínuos, resultando na diminuição dos teores de f -CaO de 5,33% para 0,16%.

Os autores concluíram que (1) a estabilização da escória de aciaria foi eficiente, pois não houve comportamento reverso nas propriedades mecânicas do concreto estudado durante o período de observação (360 dias); e que (2) as diferentes misturas de concretos alcalinamente ativadas cujo agregado artificial foi incorporado apresentaram propriedades mecânicas e de durabilidade inferiores aos traços de controle, mas ainda nos limites normatizados.

Segundo os autores, o desempenho mecânico inferior das misturas com a incorporação da escória de aciaria como agregado é justificado: pela formação de películas de calcita na superfície dos agregados de escória, que ocorreu durante o processo de cura e estabilização do agregado de escória de aciaria, prejudicando o intertravamento mecânico entre pasta cimentícia e o agregado, e pela deterioração do agregado artificial, causada pela lixiviação do cálcio e a formação de uma pasta expansiva decorrente da exposição prolongada em ambiente ácido (Figura 4).

2.3.1.2. Propriedades mecânicas dos concretos

Os concretos são elementos estruturais, portanto, as propriedades mecânicas são fundamentais para sua viabilidade como material para construção civil. Assim, diversos estudos são desenvolvidos para o estudo da relação entre os componentes do concreto e os respectivos efeitos em suas propriedades mecânicas, como a resistência à compressão e módulo de elasticidade (MARTINS *et al.*, 2021). Ressalta-se que as características dos agregados possuem forte impacto nas propriedades mecânicas resultantes dos concretos, sendo, portanto, parâmetro fundamental para análise da viabilidade de agregados reciclados.

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 LD em substituição aos agregados miúdos naturais (areia), em dois tipos de concretos: convencional e de alta-resistência. Os pesquisadores concluíram que, substituições em teores ótimos, podem resultar em ambos os tipos de concretos com propriedades mecânicas superiores em relação aos concretos de referência, com ganhos de resistência à compressão mais significativos para os concretos convencionais, em que os traços com substituições de 80 e 100%, obtiveram aumentos de resistência em 14% e 12%, respectivamente. Segundo os autores, são duas as possíveis explicações para os ganhos de resistência observados: (1) a 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, e (2) devido à maior rugosidade da superfície

da escória de aciaria em relação à da areia natural, resultando em maiores forças de ligação com a pasta cimentícia.

Liu *et al.* (2020) avaliaram os efeitos da incorporação da escória de aciaria (teores de 30, 50 e 70% em volume) nas propriedades mecânicas 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. Dentre os resultados obtidos, destacam-se as respostas positivas (1) 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%) e (2) dos ganhos nas propriedades de resistência e rigidez obtidas 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 pelo melhoramento no travamento mecânico na interface entre pasta cimentícia e agregado. Ainda, de modo a quantificar o efeito de ligação entre pasta-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 efeito de ligação com cimento.

Ademais, Liu *et al.* (2020) 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 ocorrem durante o processo de estocagem e empilhamento. As alterações na forma, textura e tamanho do agregado podem causar sérios danos à coesão e aderência entre pasta cimentícia e agregado dos concretos.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

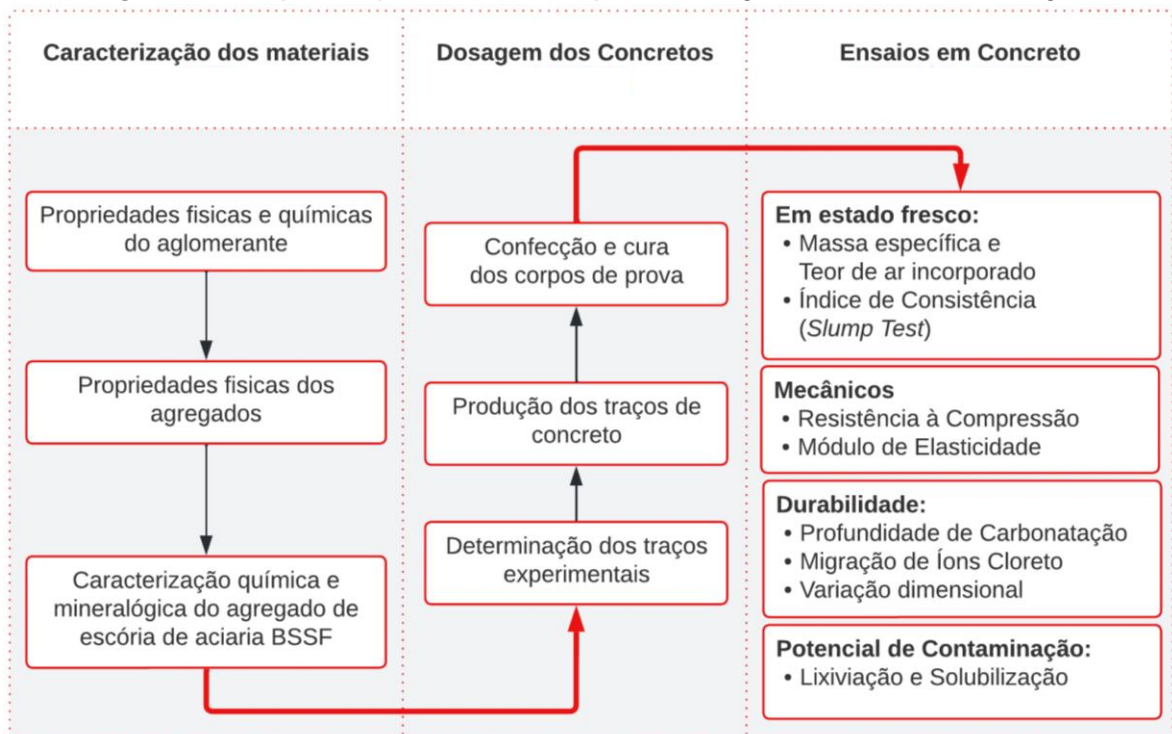
O presente trabalho de conclusão de curso é continuação de uma pesquisa de iniciação científica que foi desenvolvida em parceria com Instituto de Pesquisas de Tecnológica (IPT) de São Paulo, iniciada em 2020 e concluída em 2022. Assim, resultados parciais foram apresentados em outra publicação (CARTAXO *et al.*, 2021).

Na citada publicação foram apresentados os procedimentos para caracterização dos materiais constituintes, dosagem e confecção dos concretos, além dos resultados dos ensaios mecânicos dos concretos em nas idades de 7, 28 e 91 dias (com exceção da idade de 365 dias). De toda forma, no Apêndice A são apresentados os resultados da caracterização dos materiais constituintes e os procedimentos para dosagem e confecção dos concretos.

Enfatiza-se que o presente trabalho de conclusão de curso tem como objetivo apresentar e discutir as propriedades de durabilidade dos concretos produzidos com a incorporação de agregados (miúdos e graúdos) de escória de aciaria BSSF, caracterizando-os em uma escala de tempo coerente para este fim (idades de até 365 dias). Ademais, também são apresentados os resultados dos ensaios mecânicos em concreto, sendo inéditos os resultados para idade de cura de 365 dias.

Na Figura 5 é sumarizado o procedimento experimental geral do projeto.

Figura 5 – Etapas do procedimento experimental gera em ordem cronológica



3.1. DOSAGEM DOS CONCRETOS ESTUDADOS

Para produção dos concretos experimentais foram empregados os materiais apresentados na Figura 6. Assim, foram utilizados o aglomerante CPV-ARI, areia natural de origem quartzosa, brita granítica, agregado de escória de aciaria BSSF, e por fim, aditivo superplastificante Sikament 370 RM, composto por dispersantes orgânicos em base aquosa.

Os procedimentos das etapas de caracterização dos materiais não fazem parte do escopo deste trabalho, mas são apresentados no Apêndice A.

Figura 6 – Materiais constituintes dos concretos



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

O traço de concreto de referência (EA00) possui proporções de 1:2,80:1,70:0,58 (cimento: areia: brita: água/cimento), sendo os demais traços produzidos com substituição (em volume) parcial dos agregados naturais pelo agregado de escória de aciaria BSSF, em teores de 20% (EA20), 40% (EA40), 60% (EA60) e 80% (EA80).

Com base nos resultados de caracterização dos materiais (Apêndice A), determinou-se que os agregados de escória de aciaria BSSF possuem distribuição granulométrica correspondente a 76,8% miúdo e 23,2% graúdo. Assim, a substituição dos agregados naturais pela escória se deu com base nessas proporções.

Ressalta-se que a substituição ocorreu com base no volume, ou seja, 20% dos agregados naturais presentes no traço referência (EA00), foram substituídos por volume equivalente de escória de aciaria BSSF. A seguir são descritos os procedimentos para determinação dos traços de concreto estudados.

No traço unitário de referência, a contribuição dos agregados naturais soma 4,5 (2,8+1,7), portanto, 20% correspondente a 0,90. Assim, considerando a distribuição granulométrica da escória, a incorporação de 20% do agregado artificial deve substituir, em termos de traço unitário, 0,2088 de brita (0,90 x 23,2%) e 0,6912 de areia (0,90 x 76,8%).

A parcela equivalente de escória é determinada por meio da relação entre as massas específicas dos agregados, sendo estes parâmetros apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Massa específica absoluta dos materiais constituintes

Massa específica absoluta (g/cm ³)	CPV-ARI	Areia	Brita	Escória BSSF
	3,09	2,66	2,69	3,60

Assim, a parcela equivalente de escória em relação aos agregados naturais pode ser calculada como:

$$escória = agregado \cdot \left(\frac{\gamma_{escória}}{\gamma_{agregado}} \right) \quad (5)$$

Onde: γ é a massa específica absoluta dos agregados.

Portanto, em termos de traço unitário, a substituição volumétrica de 0,2088 de areia e 0,6912 de brita, equivalem a 1,22 do agregado de escória de aciaria BSSF, conforme:

$$escória = 0,2088 \cdot \left(\frac{3,60}{2,69} \right) + 0,6912 \cdot \left(\frac{3,60}{2,66} \right) \cong 1,22 \quad (6)$$

Os traços unitários dos concretos estudados são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Traço unitário dos concretos ensaiados

Traço	Teor de escória	Razão <i>a/c</i>	Traço unitário dos concretos			
			Cimento	Areia	Brita	Escória BSSF
EA00	0%	0,58	1,00	2,80	1,70	0,00
EA20	20%	0,58	1,00	2,11	1,49	1,22
EA40	40%	0,58	1,00	1,42	1,28	2,43
EA60	60%	0,58	1,00	0,73	1,07	3,65
EA80	80%	0,58	1,00	0,04	0,86	4,86

O consumo de cimento por m³ de concreto fresco foi calculado conforme expressão (7), sendo o consumo dos demais materiais constituintes (com exceção do aditivo) determinados por meio da relação expressa nos traços unitários.

$$\frac{Cimento (kg)}{Concreto (m^3)} = \frac{1000}{\frac{1}{\gamma_c} + \frac{a}{\gamma_a} + \frac{b}{\gamma_b} + \frac{a/c}{\gamma_{água}}} = \frac{1000}{\frac{1}{3,09} + \frac{2,80}{2,66} + \frac{1,70}{2,69} + \frac{0,58}{1,00}} \cong 386,36 \text{ kg/m}^3 \quad (7)$$

Onde: a, b, a/c, se referem aos valores no traço unitário de referência da areia, brita e relação água/cimento, respectivamente.

Na Tabela 7 são apresentados o consumo de materiais constituintes por m³ dos concretos confeccionados.

Ressalta-se que o aditivo superplastificante foi dosado em teores variados (conforme procedimento descrito na Figura 7), com a finalidade de ajustar a consistência dos concretos na faixa de 40 mm a 100 mm.

Tabela 7 – Composição das misturas de concreto ensaiadas

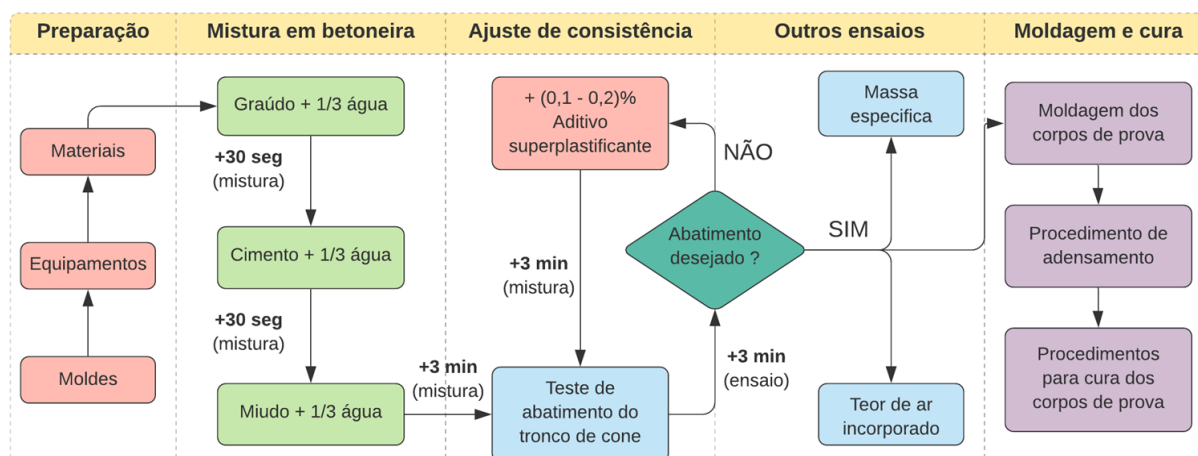
Traço	Teor de escória	Razão a/c	Consumo de materiais constituintes por m ³ de concreto produzido (kg)					
			Água	Cimento	Areia	Brita	Escória BSSF	Aditivo*
EA00	0%	0,58	224,09	386,36	1081,82	656,92	0,00	0,155
EA20	20%	0,58	224,09	386,36	814,77	576,14	469,78	0,063
EA40	40%	0,58	224,09	386,36	547,71	495,47	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 faixa de consistência desejada.

3.1.1. Confeção dos concretos

O procedimento de confeção dos concretos é esquematizado na Figura 7, 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 até a data de ensaio. O tempo de mistura foi de aproximadamente 10 minutos para cada amostra.

Figura 7 – Processo de confeção, cura e moldagem das amostras de concreto



A moldagem e confeção dos corpos de prova seguiu as especificações da NBR 5738 (ABNT, 2016). 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 retração por secagem. Posteriormente, as amostras foram levadas para suas respectivas condições de cura experimentais.

Na Tabela 8 são resumidas as principais informações da etapa de moldagem e cura dos corpos de prova de concreto.

Tabela 8 – Resumo das informações da etapa de moldagem e cura dos corpos de prova

Propriedade avaliada	Condições de cura	Idades (dias)	Corpos de prova	Quantidade de corpos de prova
Resistência à compressão axial	Em câmara úmida U (%) = 95 ± 5 T (°C) = 23 ± 2	7, 28, 91, 365	Cilíndricos D = 100 mm h = 200 mm	3 x Idades = 12 12 x Traços = 60
Módulo de elasticidade estático	Em câmara úmida U (%) = 95 ± 5 T (°C) = 23 ± 2	28, 91, 365	Cilíndricos D = 100 mm h = 200 mm	3 x Idades = 9 12 x Traços = 45
Profundidade de carbonatação	28 dias em câmara úmida U (%) = 95 ± 5 ; T (°C) = 23 ± 2 → 15 dias em condição ambiente → 70 dias em câmara de carbonatação U (%) = 60 ± 5 ; T (°C) = 23 ± 2 ; CO ₂ = 3%		Moldagem → 1 CP prismático c/ dimensões em mm 75 x 75 x 285 Após 28 dias de cura → 2 CP's prismáticos c/ dimensões em mm 75 x 75 x 140	
Varição dimensional	(1) Em câmara úmida U (%) = 95 ± 5 T (°C) = 23 ± 2 (2) Em câmara climática Submerso em água T (°C) = 60 ± 5	Ao longo de 365 dias	Prismáticos (mm) 75 x 75 x 285	2 x Condição = 4 4 x Traços = 20
Resistência à penetração de íons cloreto	Em câmara úmida U (%) = 95 ± 5 T (°C) = 23 ± 2	7, 28, 91, 365	Moldagem → 1 CP cilíndrico c/ dimensões em mm D x h = 100 x 200	
Lixiviação e Solubilização	Em câmara úmida U (%) = 95 ± 5 T (°C) = 23 ± 2	28	Concreto britado (resíduos do ensaio de compressão)	~ 5 kg x Traço

Onde: U = umidade relativa do ar; T = temperatura; D = diâmetro; h = altura; CP = corpo de prova.

3.2. ENSAIOS EM CONCRETO

3.2.1. Propriedades mecânicas

O ensaio de resistência à compressão seguiu a metodologia dada pela NBR 5739 (ABNT, 2018), com idades de ensaio de 7, 28, 91 e 365 dias.

A determinação do módulo de elasticidade estático dos concretos, seguiu o método A descrito na NBR 8522 (ABNT, 2017). O ensaio foi executado nas idades de 28 e 91, 365 dias.

Para os ensaios mecânicos, foram produzidos 3 corpos de prova cilíndricos para cada traço, idade e ensaio, com dimensões de 200 mm de altura e 100 mm de diâmetro. Assim, foram produzidos 60 corpos de prova para os ensaios de resistência à compressão e 45 para os de módulo de elasticidade estático.

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 todo p-valor acima dessa tolerância indicará que não existem diferenças estatisticamente significativas.

3.2.2. Propriedades relacionadas à durabilidade

A avaliação das propriedades de durabilidade dos concretos se deu pela realização dos ensaios de profundidade de carbonatação, migração de íons cloreto e variação dimensional.

3.2.2.1. Profundidade de carbonatação

A determinação da resistência à carbonatação foi realizada seguindo as diretrizes da ISO 1920-12:2015 (ISO, 2015) apenas para idade experimental de cura de 28 dias em câmara úmida.

Para cada traço de concreto, foi produzido 1 corpo de prova prismático com dimensões de 75 x 75 x 285 mm, resultando em 5 corpos de prova no total. Após o período de cura inicial de 28 dias, os corpos de prova foram divididos em duas partes, resultando em 2 corpos de prova com dimensões de 140 x 75 x 75 mm.

O procedimento do ensaio inicia-se submetendo-se os corpos de prova à cura em câmara úmida por 28 dias (idade experimental), sendo posteriormente deixados em condições ambiente por 15 dias (para estabilização da umidade), e finalmente enviados para câmara climática. Assim, as amostras inseridas na câmara climática foram expostas a uma atmosfera interna com concentração de 3% de CO₂ e umidade relativa de 60% e temperatura de 23°C, durante 70 dias.

Após o período de exposição ao ataque de CO₂, os corpos de prova foram retirados e posteriormente cortados em sua seção transversal, resultando em duas seções (A e B). No lado interno de cada seção fora aplicado um indicador de pH para que, em seguida, fossem medidas as profundidades de carbonatação. A medida de profundidade reflete à capacidade de resistência à carbonatação do concreto, sendo as menores profundidades encontradas para as amostras mais resistentes.

3.2.2.2. Variação dimensional

O ensaio de variação dimensional foi baseado no método proposto pela NBR 15577-7 (ABNT, 2018), que descreve o processo para determinação da expansão em prismas de concreto pelo método acelerado.

O método foi adaptado para cura dos concretos em solução exclusivamente aquosa, nas temperaturas ambiente (cura em câmara úmida) e a 60°. A variação dimensional dos corpos de prova, em ambas as condições de cura, fora acompanhada durante o período de 365 dias.

O ensaio dos concretos com cura em temperatura de 60°C se fez relevante, pois o processo de expansão da escória tende a ser tornar mais intenso conforme o aumento da temperatura do ambiente, onde há maior energia disponível para as reações químicas. A temperatura foi definida com base em um limite razoável para aplicações convencionais, objetivo dos concretos estudados.

Por fim, para cada traço e condição de cura de concreto estudado, foram produzidos 2 corpos de prova prismáticos, com dimensões de 75 x 75 x 285 mm, somando 10 corpos de prova para cada condição de cura, e 20 corpos de prova no total.

3.2.2.3. Resistência à penetração de íons cloreto

A resistência à penetração de íons cloreto em concreto foi executada com base em diretrizes gerais da ASTM C1202:2012 – *Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*.

Em suma, a metodologia do ensaio se baseia na criação de células eletroquímicas composta por dois polos elétricos produzidos com soluções aquosas ionizadas que são acopladas às faces de uma fatia cilíndrica de concreto. Quando o sistema é conectado à uma fonte de energia, a diferença de potencial criada pelos polos força os íons cloreto a passarem pelo concreto. Assim, a medida de corrente elétrica medida está relacionada à resistividade do concreto, ou seja, indiretamente, à sua resistência à penetração de carga elétrica (íons cloreto), conforme classificação apresentada na Tabela 9.

As fatias cilíndricas de concreto possuem dimensões de 50 mm de altura e 100 mm de diâmetro e obtidas do corte de corpos de prova cilíndricos submetidos à cura em câmara úmida por 7, 28, 91 e 365 dias (idades experimentais).

Para produção dos pólos elétricos, as faces laterais das fatias de concreto foram impermeabilizadas com aplicação de silicone, e então saturadas em água, para serem posteriormente fixadas entre duas células acrílicas, sendo um lado preenchido com uma solução aquosa de NaOH 0,3N e outro com solução aquosa com 3% de NaCl. Os dois polos da célula foram conectados à fonte de tensão de 60V, mantendo-se a diferença de potencial durante seis horas, monitorando-se a temperatura e medindo-se periodicamente a corrente elétrica do sistema.

Conforme a norma, a carga total passante em Coulombs (C) é dada pela equação 5:

$$Q = 0,9 (I_0 + 2 I_{30} + 2 I_{60} + \dots + 2 I_{330} + 2 I_{360}) \quad (5)$$

Onde:

I_0 é corrente inicial, em mA;

I_n corrente após n minutos de ensaio, em mA;

I_{360} corrente final, em A.

Por fim, a classificação dos concretos é realizada em função da aptidão à penetração de íons cloreto, conforme Tabela 9.

Tabela 9 – Classificação do concreto quanto à penetração de íons cloreto

Carga passante, em Coulombs (C)	Classificação do concreto quanto à aptidão à penetração de íons cloreto (ASTM C1202:2012)
>4000	Elevada
2000-4000	Moderada
1000-2000	Baixa
100-1000	Muito baixa
<100	Desprezível

Fonte: ASTM (2012)

3.2.3. Avaliação do potencial de contaminação dos concretos

Por fim, foram realizados ensaios para determinação do potencial de contaminação por lixiviação e solubilização, conforme NBR 10005 (ABNT, 2004) e NBR 10006 (ABNT, 2004). O ensaio de lixiviação de resíduos sólidos mede a capacidade de transferência de compostos orgânicos e inorgânicos presentes no concreto, por meio da dissolução no meio de contato. Complementarmente, o ensaio de solubilização quantifica o potencial de contaminação dos resíduos sólidos quando em contato com a água, por meio da lavagem.

Assim, como a realidade de deposição de resíduos da construção civil ainda acontece em aterros sanitários ou em locais expostos e em contato ao meio ambiente, torna-se importante verificar o potencial de contaminação dos concretos produzidos, a fim de caracterizá-lo quanto a sua adequada disposição e grau de periculosidade.

3.2.4. Análise estatística dos resultados dos ensaios mecânicos

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão axial e módulo de elasticidade estático foram tratados estatisticamente por meio de Análise da Variância (ANOVA) e posteriormente submetidos ao teste de Tukey.

A análise ANOVA verifica a existência de diferenças estatisticamente significativas entre os valores médios das amostras avaliadas, enquanto o teste de Tukey identifica quais médias são diferentes. No estudo, ANOVA e o teste de Tukey foram realizados com o auxílio do software MiniTab 17, com nível de significância $\alpha = 5\%$.

A hipótese inicial da ANOVA é declarar que todas as médias são iguais (H_0) ou uma ou mais amostras diferem (H_1) a um determinado nível de significância (α). Na análise, se $p\text{-valor} < \alpha$, rejeita-se a hipótese de H_0 , assumindo que existem valores de médias significativamente diferentes, sendo realizado o teste de Tukey para identificar quais são os valores médios diferentes (OLVEIRA, 2020).

As barras de erros apresentadas graficamente (Figuras 8 e 10) representam o desvio padrão amostral (obtidos por meio dos resultados individuais de cada corpo de prova). Para diferenciar os valores estatísticos semelhantes ou divergentes nos gráficos foram utilizadas letras do alfabeto em maiúsculo (A, B, C...) em cores diferentes ou iguais. Análises realizadas dentro de um mesmo grupo de dados terão cores iguais. Nenhuma análise estatística foi realizada entre os grupos, ou seja, em relação às idades (letras de cores diferentes).

4. RESULTADOS DOS ENSAIOS EM CONCRETO

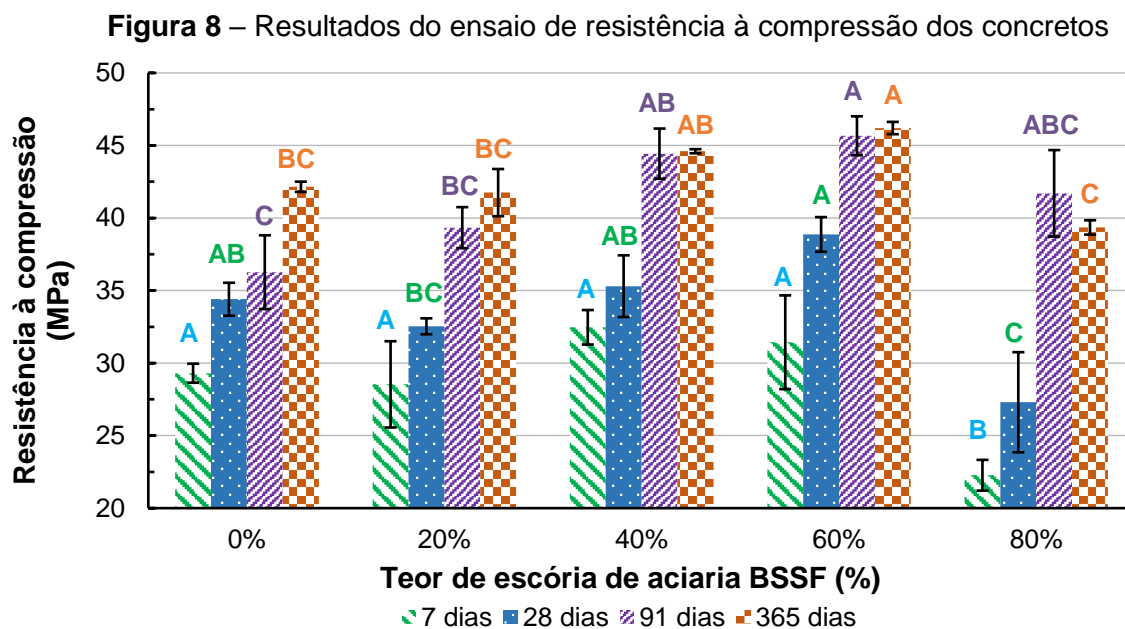
4.1. PROPRIEDADES MECÂNICAS

Ressalta-se que somente os resultados correspondentes à idade de 365 dias são inéditos, sendo os demais resultados já apresentados em Cartaxo *et al.* (2021).

As letras “A, B, C” representam a semelhança estatística entre os valores médios obtidos no grupo (traços), enquanto a diferença entre as cores das letras representa as diferenças entre os grupos (idades). Assim, a análise estatística indica que apesar dos valores médios apresentarem-se diferentes, os resultados de um mesmo grupo (cor) que apresentam letras similares, são qualitativamente iguais (mesmas letras) ou semelhantes (conforme nível de proximidade das letras na ordem alfabética).

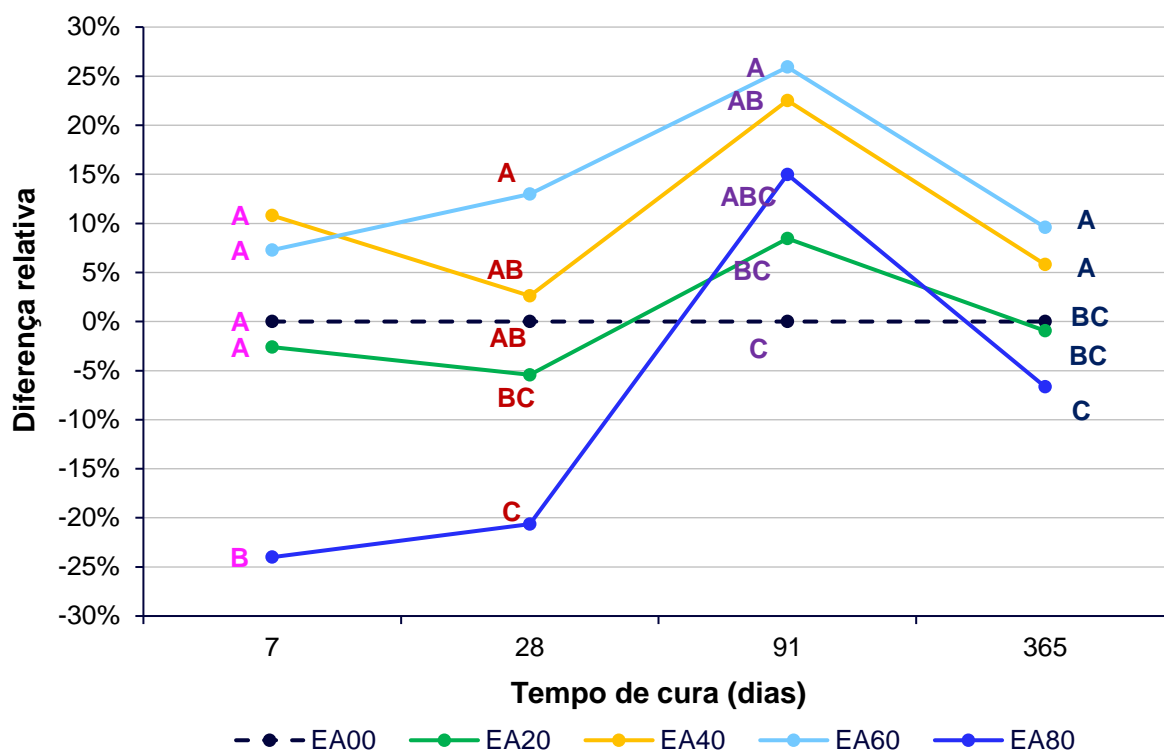
4.1.1. Resistência à compressão axial

Nas Figuras 8 e 9 são apresentados os resultados médios dos ensaios de resistência à compressão dos concretos, em termos absolutos e relativos (diferenças percentuais em relação ao traço de referência), respectivamente.



Em geral, a resistência a compressão dos concretos seguiu a tendência de incremento ao longo do tempo (um ano), indicando que não se desenvolveram processos de degradação, como a expansão do agregado de escória. Ademais, todos os concretos atingiram a resistências superiores aos 25 MPa para idade de 28 dias, atendendo a resistência mínima objetivada para aplicações convencionais.

Figura 9 – Resultados do ensaio de resistência à compressão, em termos relativos



Os traços EA40 e EA60 apresentaram, em todas as idades experimentais, valores médios superiores ao traço de referência, com os maiores ganhos relativos na idade de 91 dias (em relação ao traço de referência) de 23% e 26%, respectivamente. Ademais, o traço EA20 apresentou desempenho estatisticamente similar ao traço de referência.

Contudo, é importante ressaltar a baixa resistência nas idades iniciais (7 e 28 dias) apresentada pelo traço EA80, que nas idades mais avançadas (91 e 365 dias) foram recuperadas, indicando retardamento no processo de hidratação do concreto devido ao alto teor de escória de aciaria BSSF presente.

De toda forma, o traço EA80 apresentou os piores valores de resistência à compressão, indicando que altos teores de escória ($\geq 80\%$) podem reduzir a resistência à compressão dos concretos.

4.1.2. Módulo de elasticidade estático

Nas Figuras 10 e 11 são apresentados os resultados médios dos ensaios de módulo de elasticidade estático dos concretos, em termos absolutos e relativos (valores em relação ao traço de referência), respectivamente.

Os resultados (valores médios) do ensaio de módulo de elasticidade estático, mostram que todos os concretos com incorporação de escória de aciaria BSSF obtiveram incrementos, quando comparados ao traço de referência (EA00), em todas as idades experimentais.

Figura 10 – Resultados do ensaio de módulo de elasticidade estático dos concretos

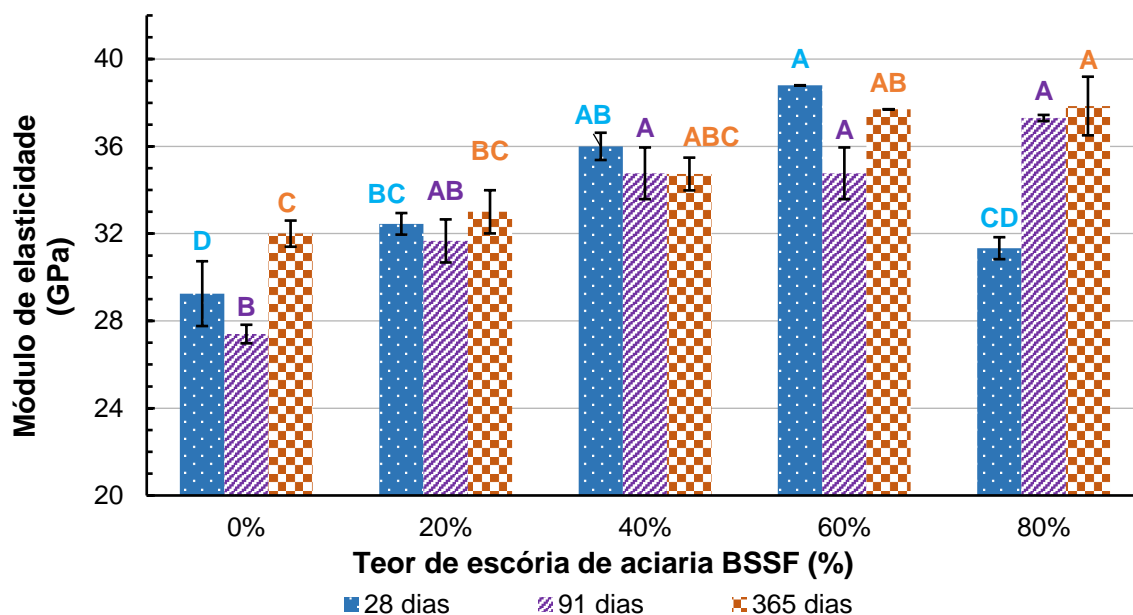
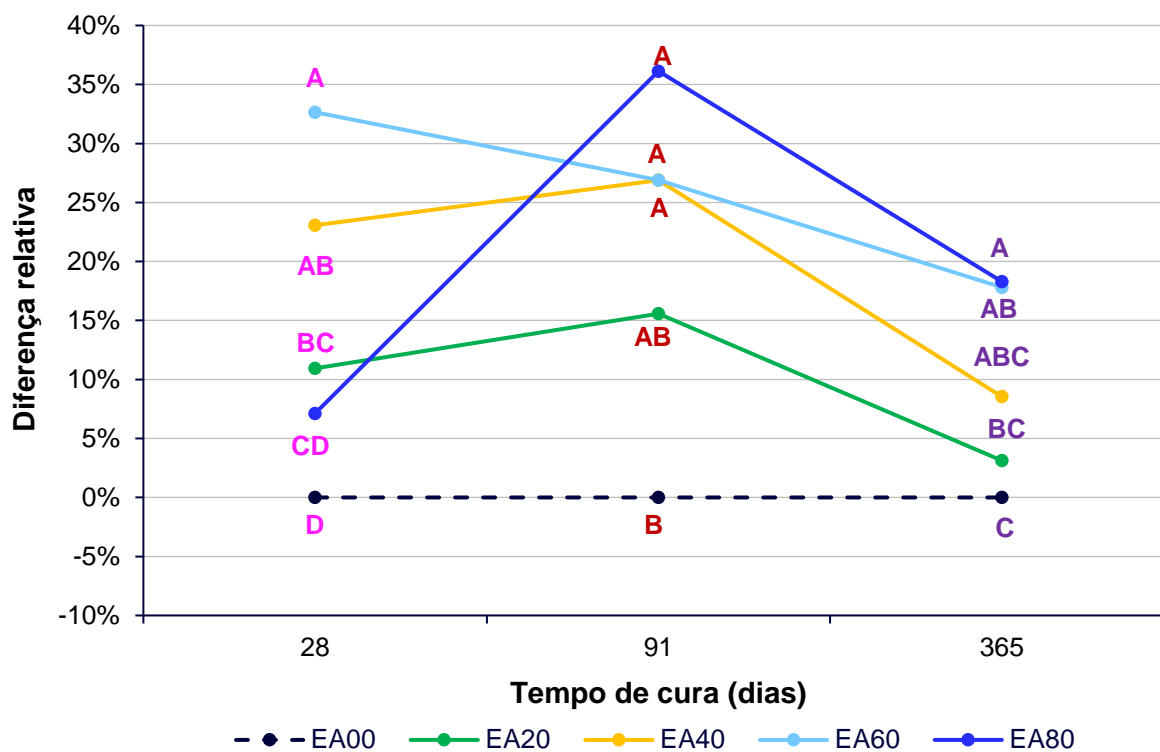


Figura 11 – Resultados do ensaio de módulo de elasticidade, em termos relativos



Ademais, a análise estatística aponta que os traços EA40 e EA60 apresentaram, em todas as idades experimentais, ganhos significativos (superiores à 15%) em relação ao traço de referência, corroborando com a tendência observada no ensaio de compressão axial.

Por outro lado, o traço EA80 apresentou expressiva evolução no tempo, obtendo, nas idades de 91 e 365, os maiores valores de módulo de elasticidade dos concretos estudados, se alinhando com o comportamento observado pelos resultados de resistência à compressão.

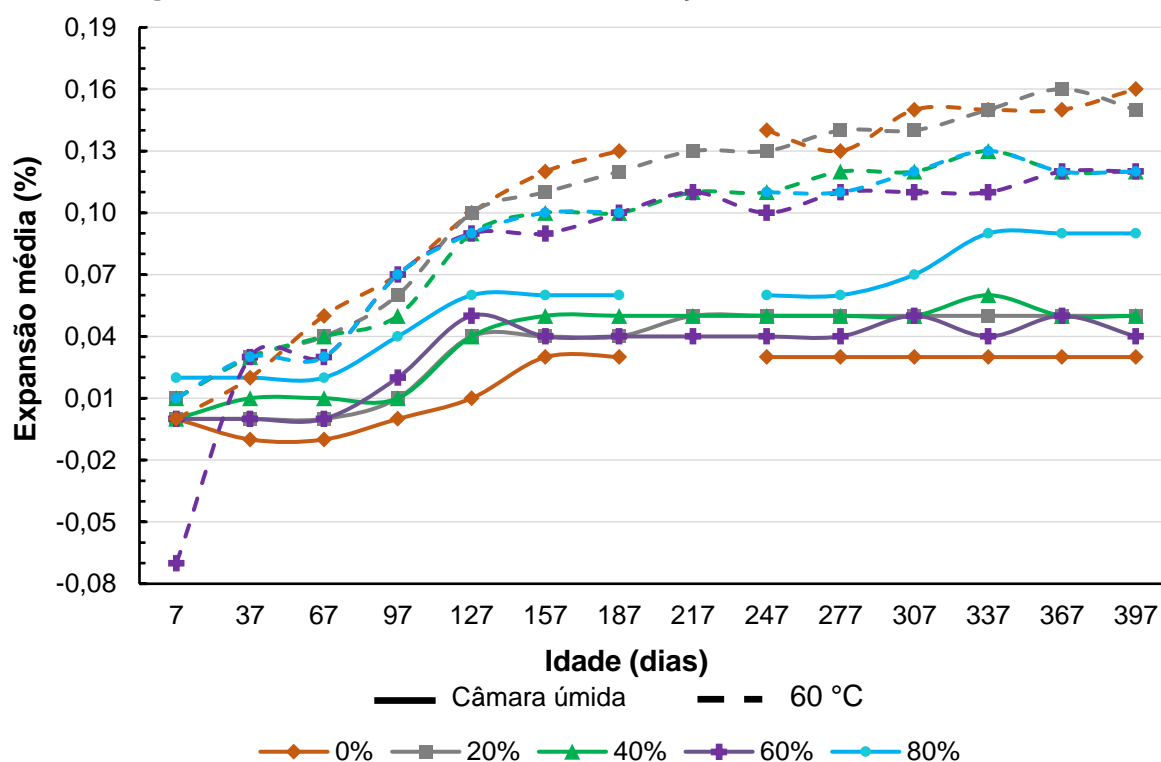
Assim, os resultados do ensaio de módulo de elasticidade indicam que a incorporação de agregados de escória de aciaria BSSF, em quaisquer teores, podem produzir ganhos de módulo de elasticidade. Ademais, nota-se que, há uma possível correlação de proporcionalidade entre o teor de escória de aciaria incorporada e os ganhos de módulo de elasticidade estático, sendo os traços com maiores teores os que obtiveram os maiores ganhos.

4.2. PROPRIEDADES RELACIONADAS À DURABILIDADE

4.2.1. Variação Dimensional

Os resultados dos ensaios de variação dimensional observados ao longo de um ano, nas duas condições de cura (ambiente e em câmara climática) são apresentados nas Figura 12.

Figura 12 – Resultados do ensaio de variação dimensional dos concretos



Em geral, os resultados de variação dimensional não indicam problemas de instabilidade volumétrica, tendo em vista que os traços de concreto com incorporação de escória de aciaria apresentaram expansão média similar ao traço de referência. Ademais, como esperado (devido à maior energia disponível no sistema), os concretos submetidos à cura em temperatura de 60° C exibiram maiores valores de expansão média, mas não se diferenciando do comportamento obtido pelo traço de referência.

Na condição de cura em câmara úmida, o traço EA80 apresentou maior expansibilidade, mas ainda em um patamar controlado. Além disso, a partir da idade de 150 dias de cura em câmara úmida, os concretos produzidos apresentaram tendência de estabilização, sendo a expansão média fixada em um patamar.

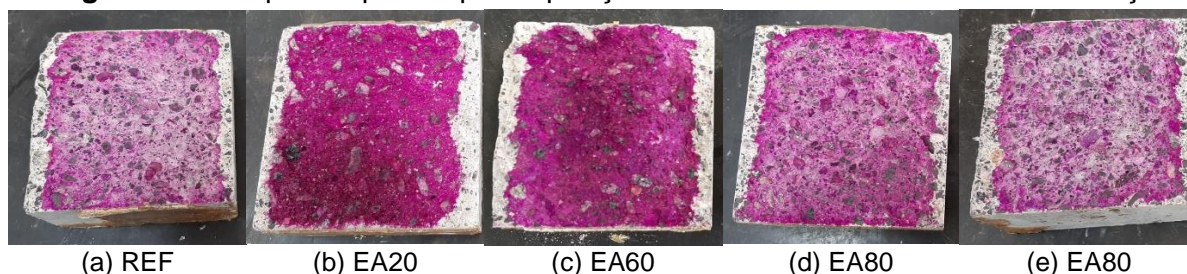
Por outro lado, os concretos submetidos à cura em câmara climática apresentaram expansão média em tendência de crescimento, inclusive o de referência (EA00). Ademais, nota-se que os traços com menor teor de incorporação (EA20 e EA80) indicando que a incorporação da escória de aciaria BSSF não tem correlação no aumento do potencial de expansibilidade dos concretos.

Por fim, como os concretos produzidos com escória de aciaria BSSF apresentam comportamento similar aos traços de referência, conclui-se que não houve processos expansivos do agregado artificial e conseqüentemente, a estabilização pelo processo BSSF mostrou-se efetiva.

4.2.2. Profundidade de Carbonatação

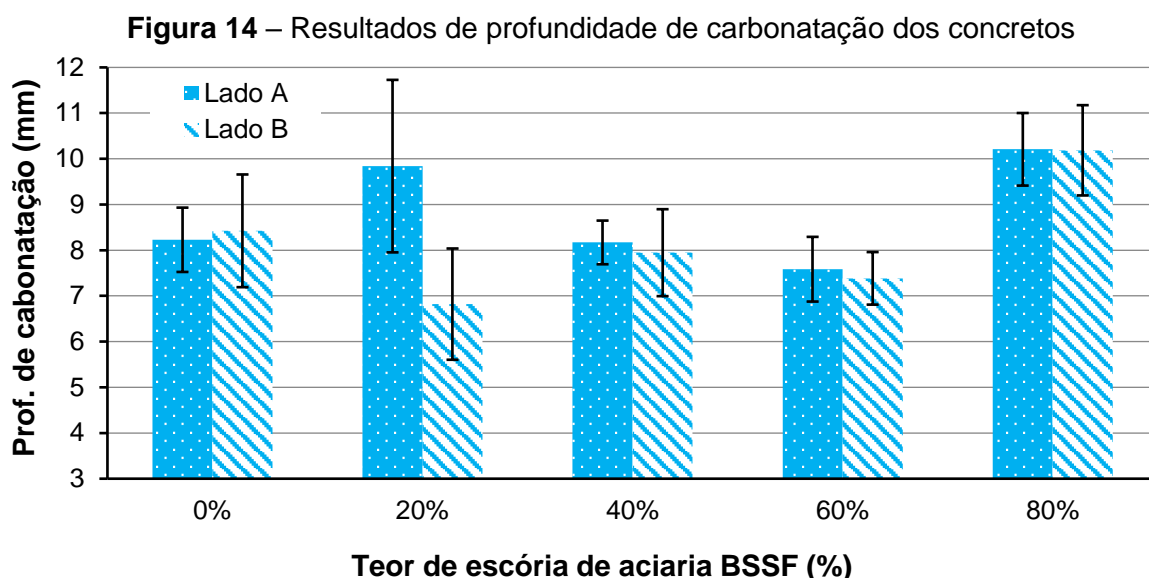
Os resultados (valores médios) de profundidade de carbonatação dos concretos são apresentados nas Figuras 13 e 14.

Figura 13 – Corpos de prova após exposição de 70 dias em câmara de carbonatação



A profundidade de carbonatação é uma medida da capacidade do concreto de proteger a armadura quando submetida a um ambiente com alto teor de carbono, como acontece nas cidades e metrópoles. Conforme a NBR 6118 (ABNT, 2014), o cobrimento mínimo para

estruturas de concreto armado submetidas à classe de agressividade ambiental do tipo II (ambiente urbano) é de 25 mm.



De acordo com os resultados, todos os concretos produzidos apresentaram boa resistência a ataques de CO_2 , sendo a maior profundidade de carbonatação observada igual a 10,2 mm para o concreto com 80% de escória.

Comparativamente, o EA80 apresentou maior profundidade de carbonatação em relação aos demais traços, indicando que possivelmente a incorporação do agregado artificial em altos teores possa diminuir a resistência à carbonatação dos concretos.

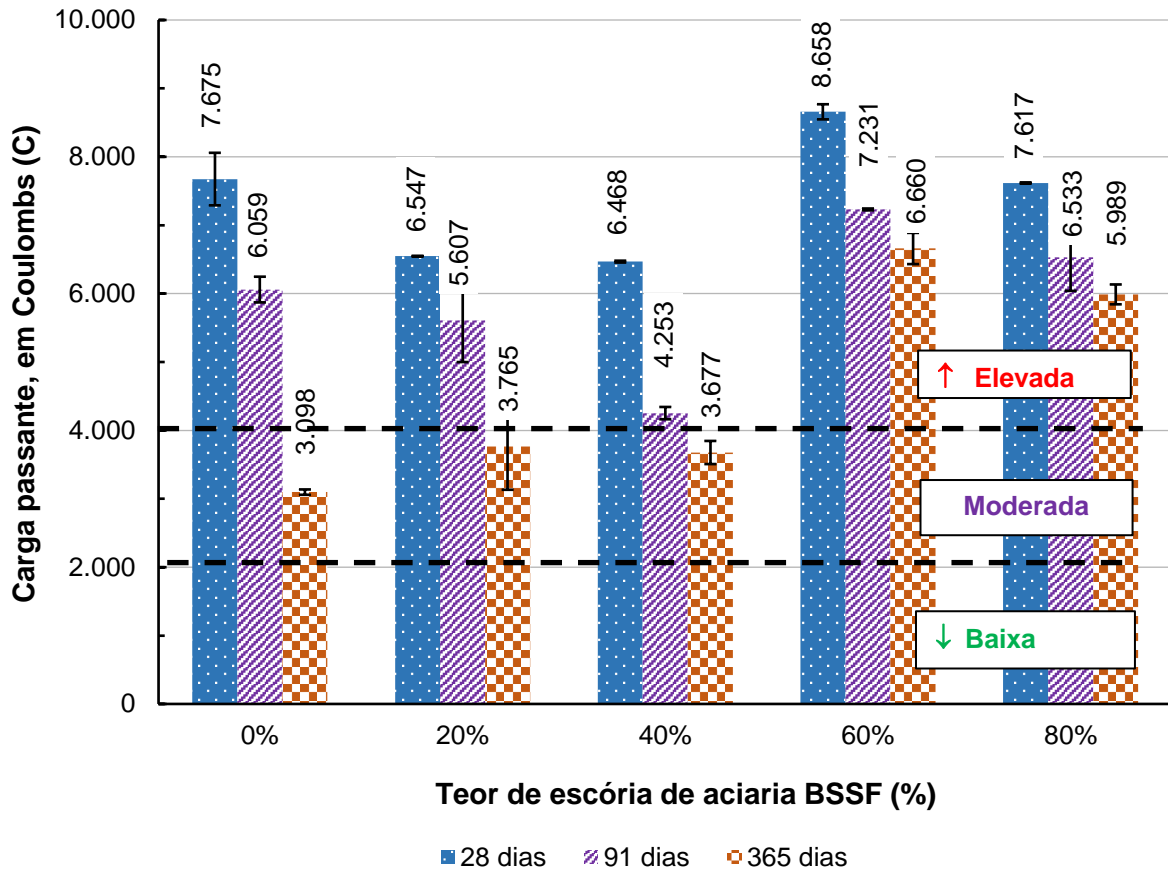
Em geral, os resultados dos concretos produzidos com o agregado de escória de aciaria BSSF foram similares ao obtido pelo traço de referência, indicando que não houve significativa interferência nesta propriedade. Assim, a incorporação da escória em concretos não causa prejuízos significativos em relação à propriedade de resistência a carbonatação, sendo adequada para composição de estruturas em ambientes urbanos.

4.2.3. Penetração de íons cloreto

Os resultados do ensaio de penetração de íons cloreto são apresentados na Figura 15.

Todos os concretos apresentaram alta vulnerabilidade a ataques de íons cloreto, inclusive o traço de referência. Contudo, os concretos com menor teor de incorporação de escória ($\leq 40\%$) apresentaram menores valores de carga passante, alcançando a faixa de penetração moderada na idade 365 dias.

Figura 15 – Penetração de íons cloreto dos concretos



Acredita-se que a suscetibilidade a ataques de íons cloreto observada esteja relacionado à alta porosidade dos concretos produzidos, que por sua vez podem ser consequência das características dos agregados de escória de aciaria BSSF incorporados. Assim, a partir desta lógica, devido a miniaturização dos poros durante o processo natural de cura dos concretos (diminuição da porosidade), explica-se a diminuição observada no potencial de penetração de íons cloreto (carga passante) em função do tempo.

De toda forma, nos traços com maiores teores de incorporação de escória (EA60 e EA80), a carga passante se manteve em patamares elevados, não sendo, portanto, traços indicados para ambientes sujeitos a ataques de íons cloreto (regiões litorâneas). Por fim, os traços EA20 e EA40 apresentaram comportamento similar ao traço de referência, mas apesar de serem menos vulneráveis, também não são indicados para regiões onde as estruturas de concreto são sujeitas a ataques desta natureza.

4.2.4. Potencial de contaminação

Nas Tabelas 10 e 11 são apresentados os resultados dos ensaios do potencial de contaminação por lixiviação e solubilização de resíduos sólidos, respectivamente.

Tabela 10 – Resultados dos ensaios de potencial de contaminação por lixiviação

Constituinte			Traço de concreto					Limite de quantificação	NBR 10004 (mg/L)
			EA00	EA20	EA40	EA60	EA80		
Prata	(Ag)	(mg/L)	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0,025	5,0
Arsênio	(As)	(mg/L)	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0,025	1,0
Bário	(Ba)	(mg/L)	0,198	0,188	0,218	0,214	0,152	0,010	7,0
Cádmio	(Cd)	(mg/L)	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0,003	0,5
Cromo	(Cr)	(mg/L)	0,103	0,03	0,049	0,05	0,03	0,010	5,0
Chumbo	(Cu)	(mg/L)	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0,010	1,0
Selênio	(Se)	(mg/L)	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0,025	1,0
Mercúrio	(Hg)	(mg/L)	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0,0008	0,1
Fluoreto	(F ⁻)	(mg/L)	0,59	0,29	0,193	0,139	0,205	0,60	150
Prata	(Ag)	(mg/L)	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0,025	5,0
pH	-		9,4	9,72	10,41	10,5	9,9	-	-

N.D. = Não detectado

Tabela 11 – Resultados dos ensaios de potencial de contaminação por solubilização

Constituinte			Traço de concreto					Limite de quantificação	NBR 10004 (mg/L)
			EA00	EA20	EA40	EA60	EA80		
Prata	(Ag)	(mg/L)	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0,025	0,05
Alumínio	(Al)	(mg/L)	0,19	0,199	0,176	0,194	0,172	0,010	0,20
Arsênio	(As)	(mg/L)	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0,008	0,01
Bário	(Ba)	(mg/L)	0,719	0,834	0,972	0,874	0,825	0,010	0,7
Cádmio	(Cd)	(mg/L)	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0,003	0,005
Cromo	(Cr)	(mg/L)	0,015	0,034	0,033	0,032	0,03	0,010	0,05
Cobre	(Cu)	(mg/L)	0,013	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0,010	2,0
Ferro	(Fe)	(mg/L)	0,027	N.D.	0,011	0,052	0,046	0,010	0,3
Manganês	(Mn)	(mg/L)	0,047	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0,005	0,1
Chumbo	(Pb)	(mg/L)	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0,007	0,01
Selênio	(Se)	(mg/L)	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0,008	0,01
Zinco	(Zn)	(mg/L)	N.D.	0,003	0,003	0,004	0,004	0,003	5,0
Mercúrio	(Hg)	(mg/L)	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0,0008	0,001
Sódio	(Na)	(mg/L)	41,418	47,53	55,61	45,10	47,568	0,060	200,0
Sulfatos	(SO ₄) ²⁻	(mg/L)	11,11	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	4,0	250,0
Nitratos	(N)	(mg/L)	N.D.	2,13	2,08	N.D.	< LQ	1,5	10,0
Cloretos	(Cl ⁻)	(mg/L)	9,03	3,74	3,27	3,37	2,97	0,50	250,00
Fluoretos	(F ⁻)	(mg/L)	N.D.	< LQ	< LQ	N.D.	< LQ	0,60	1,5
Cianetos	(CN ⁻)	(mg/L)	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0,05	0,07
Fenóis	-	(mg/L)	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0,005	0,01
pH	-		12,9	12,52	12,53	12,48	12,47	-	-

N.D. = Não detectado; LQ = Limite de quantificação.

Em relação aos resultados do potencial de lixiviação dos concretos, observa-se que não foram identificados a lixiviação da maior parte dos elementos analisados, sendo somente os elementos Bário, Cromo e Fluoreto identificados, mas em teores muito abaixo dos limites normativos.

Analogamente, os resultados do potencial de contaminação por solubilização de substância dos concretos, mostram que a maior parte dos elementos analisados não foram identificados ou estão abaixo do limite de quantificação, ou seja, em teores insignificantes.

Por outro lado, observa-se que os concretos produzidos com a incorporação da escória de aciaria BSSF possuem menor potencial de solubilização do elemento Ferro, em comparação ao traço de referência, resultado possivelmente explicado pelo processo de fabricação e estabilização da escória.

Contudo, atenção especial deve ser dada para os teores de Alumínio e Bário solubilizados pelos concretos produzidos, pois apresentaram valores próximos (Alumínio) ou acima (Bário) dos limites normativos. Ademais, os concretos produzidos com incorporação do agregado artificial apresentaram maiores potencial de solubilização do elemento Bário.

Por fim, em geral, os concretos produzidos com a escória de aciaria BSSF não apresentam potencial significativo de contaminação, com a maior parte dos elementos dentro dos limites normativos e, portanto, seguros para contato com meio ambiente.

5. CONCLUSÕES

Neste estudo foram produzidos cinco (5) traços de concreto com incorporação do agregado de escória de aciaria BSSF em substituição aos agregados naturais (em teores de 0%, 20, 40%, 60% e 80%), cujo a finalidade foi de avaliar a viabilidade técnica da aplicação do agregado artificial para composição de concretos convencionais submetidos à ambientes urbanos (classe de agressividade ambiental II). Para tanto, foram estudadas propriedades, dos concretos, relacionadas ao desempenho mecânico, de durabilidade e potencial de contaminação do meio ambiente.

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade indicam que os concretos produzidos com os agregados artificiais possuem bom desempenho mecânico, podendo apresentar resultados consistentemente (ao longo do tempo) superiores (EA40 e EA60) aos obtidos pelo concreto de referência (produzido com agregados naturais). Destacam-se os traços EA40 e EA60, que além de deterem alto teor de escória de aciaria (maior potencial de reciclagem), apresentaram os maiores ganhos (de 7% a 26% em relação ao traço de referência) de resistência.

Em relação as propriedades de durabilidade, os resultados de variação dimensional e de profundidade de carbonatação indicam que todos os concretos produzidos não possuem problemas relacionados à estabilidade volumétrica ou vulnerabilidade à ambientes contendo CO₂ (como os urbanos). Por outro lado, os resultados do ensaio de resistência à penetração de íons cloreto, mostram que os concretos são suscetíveis a ataques de sais, sendo os traços com maiores teores de incorporação de escória de aciaria BSSF (EA60 e EA80), os mais vulneráveis.

Assim, para aplicações convencionais em ambientes urbanos, os concretos produzidos com incorporação do agregado artificial são adequados. Contudo, para aplicações em regiões litorâneas onde o sal presente no mar pode desencadear o processo de corrosão das armaduras em estruturas de concreto armado, a sua aplicação é contraindicada.

Os concretos produzidos com escória de aciaria BSSF não apresentaram potencial significativo de contaminação por solubilização e lixiviação, onde somente a solubilização do elemento bário mostrou-se acima dos limites estabelecidos pela NBR 10004 (ABNT, 2004). De toda forma, conclui-se que os agregados de escória de aciaria e conseqüente concretos, apresentam baixo ou nenhum risco de contaminação do meio ambiente e podem ser descartados como os resíduos inertes comuns da construção civil.

Portanto, com base no quadro geral retratado pelos resultados experimentais, conclui-se que os concretos produzidos com incorporação de escória de aciaria BSSF em substituição aos agregados naturais são tecnicamente viáveis para aplicações em ambientes urbanos, mas contraindicado para aplicações em ambientes litorâneos ou suscetíveis a ataques de íons cloreto.

Por fim, para aplicações convencionais em meio urbano, são recomendadas produção dos concretos com incorporação do agregado de escória de aciaria em teores de 40% (EA40) e 60% (EA60), sendo os traços que apresentaram ganhos, consistentes ao longo do tempo, de propriedades mecânicas, sem significativos prejuízos das propriedades relacionadas à durabilidade.

REFERÊNCIAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739:2018**. Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018, 9p.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118:2014**. Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014, 238p.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522:2017**. Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2017, 20p.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004:2004**. Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2009, 7p.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10005:2004**. Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004, 16p.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10006:2004**. Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004, 3p.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-2:2013 (Confirmada em 2022)**. Edificações habitacionais – Desempenho Parte 2: Requisitos para os sistemas estruturais. Rio de Janeiro: ABNT, 2013, 31p.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15577-7:2018**. Agregados – Reatividade álcali-agregado Parte 7: Determinação da expansão em prismas de concreto pelo método acelerado. Rio de Janeiro: ABNT, 2018, 14p.
- ASTM – AMERICAN STANDARD OF TESTING MATERIALS. **ASTM C1202:2012**. *Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*. West Conshohocken, PA, 2012.
- ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 1920-12:2015**. *Testing of concrete – Part: 12 Determination of the carbonation resistance of concrete – Accelerated carbonation Method*. Ch. De Blandoneet 8 – CP 401: ISO, 2015. 12p.
- 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.
- AMANCIO, F. A. *et al.* Propriedades mecânicas de argamassas com substituição da areia natural por escória de aciaria BSSF (baosteel's slag short flow). **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 25, n. 1, 2020.
- ANGULO, S. C.; ZORDAN, S. E.; JOHN, V. M. Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil. **Anais**. São Paulo: IBRACON, 2001.
- ANDRADE, H. D. **Carbonatação em Concreto de Escória de Aciaria**. 2018, 66 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.
- BALTAZAR, R. P. **Caracterização do fator expansão de uma escória de aciaria em diferentes processos de cura para uso em pavimentação**. 2001. 93 p. Dissertação (mestrado) – Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2001.
- BENITTEZ, L. H. **Utilização de escória de aciaria na fabricação de blocos de concreto**. 103 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2020.

BERTOLINI, L. U. C. A. *et al.* Electrochemical techniques. **Corrosion of Steel in Concrete**, Wiley-VCH, Weinheim, Germany, p. 345-374, 2004.

DYER, Thomas. **Concrete durability**. Crc Press, 2014.

Cartaxo, Fábio de Moraes *et al.* Propriedades mecânicas de concretos sustentáveis com incorporação de escória de aciaria BSSF em substituição aos agregados naturais. **Revista Principia - Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB**, João Pessoa, jul. 2022. ISSN 2447-9187. Disponível em: <<https://periodicos.ifpb.edu.br/index.php/principia/article/view/6647>>. Acesso em: 25 set. 2022. doi:<http://dx.doi.org/10.18265/1517-0306a2021id6647>.

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 p. Dissertação (mestrado) – Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 2007.

GENÇEL, Osman *et al.* Steel slag and its applications in cement and concrete technology: A review. **Construction and Building Materials**, v. 283, p. 122783, 2021.

GEYER, R. M. T. **Estudo sobre a potencialidade do uso de escórias de aciaria como adição ao concreto**. Porto Alegre. 2001. 170 p. Tese (doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2001.

GUO, Y. *et al.* Utilization of unprocessed steel slag as fine aggregate in normal-and high-strength concrete. **Construction and Building Materials**, v. 204, p. 41-49, 2019.

HABERT, Guillaume *et al.* Development of a depletion indicator for natural resources used in concrete. **Resources, conservation and recycling**, v. 54, n. 6, p. 364-376, 2010.

INSTITUTO AÇO BRASIL – IABR. **Relatório de Sustentabilidade**. Rio de Janeiro, 2020. 62 p.

INSTITUTO AÇO BRASIL – IABR. **Folder Aço Brasil Sustentabilidade**. Rio de Janeiro, 2022. 9 p.

JIANG, Y. *et al.* Characteristics of steel slags and their use in cement and concrete—A review. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 136, p. 187-197, 2018.

LIMA, L. **Concreto com escórias de fornos elétricos como agregados: propriedades, durabilidade e comportamento ambiental**. 1999. 243 p. Tese (doutorado) – Engenharia, Universidade Politécnica de Catalunya. Barcelona, Espanha, 1999.

LIU, J.; YU, B.; WANG, Q. Application of steel slag in cement treated aggregate base course. **Journal of Cleaner Production**, p. 121733, 2020.

LIU, Q.; LIU, J.; QI, L. Effects of temperature and carbonation curing on the mechanical properties of steel slag-cement binding materials. **Construction and Building Materials**, 124, 999–1006, 2016.

MARTINS, Ana Carolina Pereira *et al.* Steel slags in cement-based composites: An ultimate review on characterization, applications and performance. **Construction and Building Materials**, v. 291, p. 123265, 2021.

MASUERO, A. B. **Estabilidade das escórias de aciaria elétrica com vistas a sua utilização como substituição ao cimento**. 2001. 264 p. Tese (doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2001.

NAIDU, T. S.; SHERIDAN, C. M.; VAN DYK, L. D. Basic oxygen furnace slag: Review of current and potential uses. **Minerals Engineering**, v. 149, p. 106234, 2020.

- OLIVEIRA JR, A. **Propriedades residuais de compósitos cimentícios de alto desempenho com pó de vidro submetidos a altas temperaturas**. 168 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2020.
- PALANKAR, N.; SHANKAR, A. 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.
- PANG, B. *et al.* ITZ properties of concrete with carbonated steel slag aggregate in salty freeze-thaw environment. **Construction and Building Materials**, v. 114, p. 162-171, 2016.
- PIATAK, N. M.; PARSONS, M. B.; SEAL II, R. R. Characteristics and environmental aspects of slag: A review. **Applied Geochemistry**, v. 57, p. 236-266, 2015.
- QUADER, M. A. *et al.* 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.
- 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.
- SILVA, M. J. **Elementos de concreto para pavimentação produzidos com agregados de escória de aciaria**. 2011. 130p. Dissertação (Mestrado) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do CEFET-MG. Belo Horizonte, 2011.
- SOUZA, T. V. de P. **Caracterização de escória de conversor a oxigênio obtida no processo BSSF antes e após tratamento hidrometalúrgico**. 2016.
- TOSSAVAINEN, M. *et al.* Characteristics of steel slag under different cooling conditions. **Waste management**, v. 27, n. 10, p. 1335-1344, 2007.
- ULSEN, Carina *et al.* Separability studies of construction and demolition waste recycled sand. **Waste Management**, v. 33, n. 3, p. 656-662, 2013.
- UNEP, Sand and sustainability: Finding new solutions for environmental governance of global sand resources. GRID-Geneva, United Nations Environment Programme, Geneva, Switzerland.
- WANG, H.; CHEN, K. A study of the engineering properties of CLSM with a new type of slag. **Construction and Building Materials**, v. 102, p. 422-427, 2016.
- WANG, Q.; WANG, D.; ZHUANG, S. The soundness of steel slag with different free CaO and MgO contents. **Construction and Building Materials**. 151, 138–146, 2017.
- YANIK, K. **Report: global demand for aggregates to rise**. 2016. Disponível em: <<http://www.pitandquarry.com/report-global-demand-for-aggregates-to-rise/>>. Acesso em: 22 outubro de 2020.
- YI, H. *et al.* An overview of utilization of steel slag. **Procedia Environmental Sciences**, v. 16, p. 791-801, 2012.

APÊNDICE A

MATERIAIS CONSTITUINTES

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

As propriedades físico-químicas e mecânicas do CP V-ARI são listadas nas Tabelas A1 e A2. Sua composição granulométrica, determinada por granulometria a laser, é apresentada na Figura A1.

Materiais constituintes dos concretos:

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

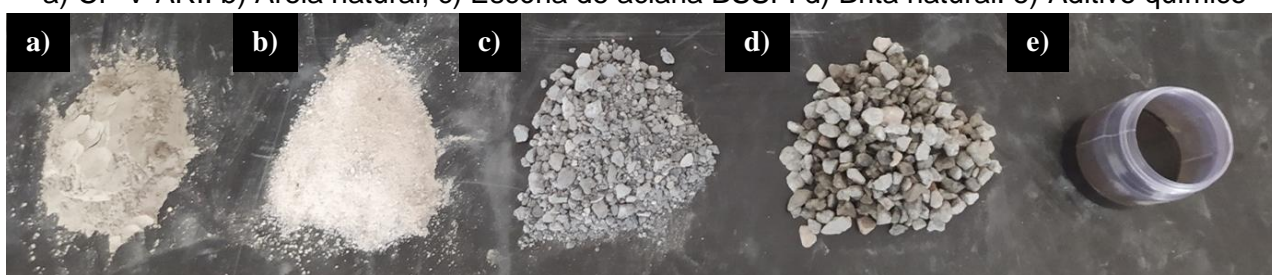


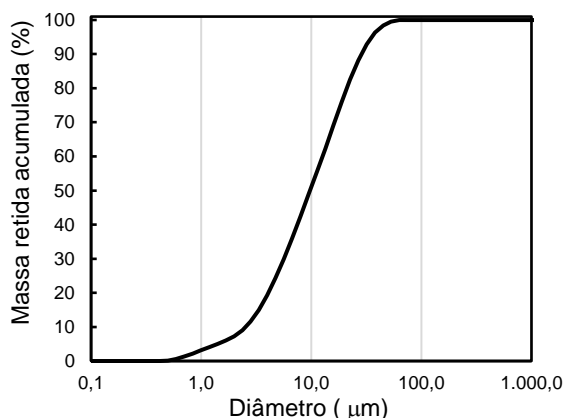
Tabela A1 – Propriedades físico-químicas do CP V-ARI

Propriedade determinada	Norma ABNT	Resultado	Especificações – NBR 16697:2018
Óxido de cálcio livre – f -CaO		1,87%	-
Perda ao fogo	NBR NM 18:2012	3,85%	$\leq 6,5$
Resíduo Insolúvel	NBR NM 15:2012	0,72%	$\leq 5,5$
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 NM 11-2:2012	5,74%	$\leq 6,5$
Anidrido Sulfúrico – SO ₂	NBR NM 16:2012	3,73%	$\leq 4,5$
Óxido de sódio – Na ₂ O		0,13%	$\leq 3,5$
Óxido de potássio – K ₂ O		0,71%	$\leq 5,5$
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 16607:2017	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 A2 – Resistência à compressão do CP V-ARI

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 A1 – Granulometria do CP V-ARI

Foram utilizados areia de origem quartzosa e brita de origem granítica, ambos satisfazendo os requisitos da NBR 7211 (ABNT, 2009). 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 A3 e Figura A2, respectivamente.

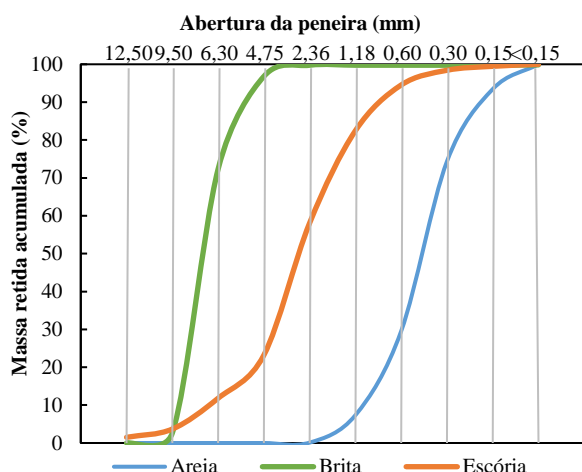
Tabela A3 – Propriedades físicas dos agregados

Propriedades avaliadas		NORMA ABNT	Escória de aciaria BSSF	Areia	Brita
Massa específica (g/cm ³)	Absoluta	NBR NM 52:2009 NBR NM 53:2009 **	3,60	2,66	2,69
	SSS*		3,47	2,65	2,67
	Aparente		3,41	2,64	2,65
Absorção de água (%)		NBR NM 30:2001	1,51	0,27	0,45
Dimensão máxima característica (mm)		NBR NM 248:2003	9,50	2,36	9,50
Módulo de finura			4,60	2,05	5,98
Massa unitária (kg/m ³)	Estado solto	NBR NM 45:2006	2079	-	-
	Estado compactado		2128	-	-
Volume de vazios (%)	Estado solto	NBR NM 45:2006	38,8	-	-
	Estado compactado		37,4	-	-
Material pulverulento (%)		NBR NM 46:2001	1,74	-	-

* SSS = condição do agregado saturado com superfície seca.

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

Figura A2 – Granulometria dos agregados



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, 2001). Adicionalmente, determinou-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 NM 18 (ABNT, 2012), NBR NM 13 (2013), E246-10 (ASTM, 2010), respectivamente. Na Tabela A4 é apresentada a composição química da escória de aciaria BSSF.

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 $K\alpha$ do cobre com 45 kV – 40 mA e varredura de $2^\circ 2\theta/\text{min}$.

Tabela A4 – Composição química (% massa) da escória de aciaria BSSF

f -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:

$$\text{Fe}_2\text{O}_3 = ((\text{Ferro total (Fe)} - (\text{Óxido de ferro II (FeO)} \times 0,78) - \text{Ferro metálico (FeM)})) \times 1,43;$$

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

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, do ICDD (*International Center for Diffraction Data*) e 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 A3 e Tabela A5.

Figura A3 – Difratoograma de raios-X da escória de aciaria BSSF

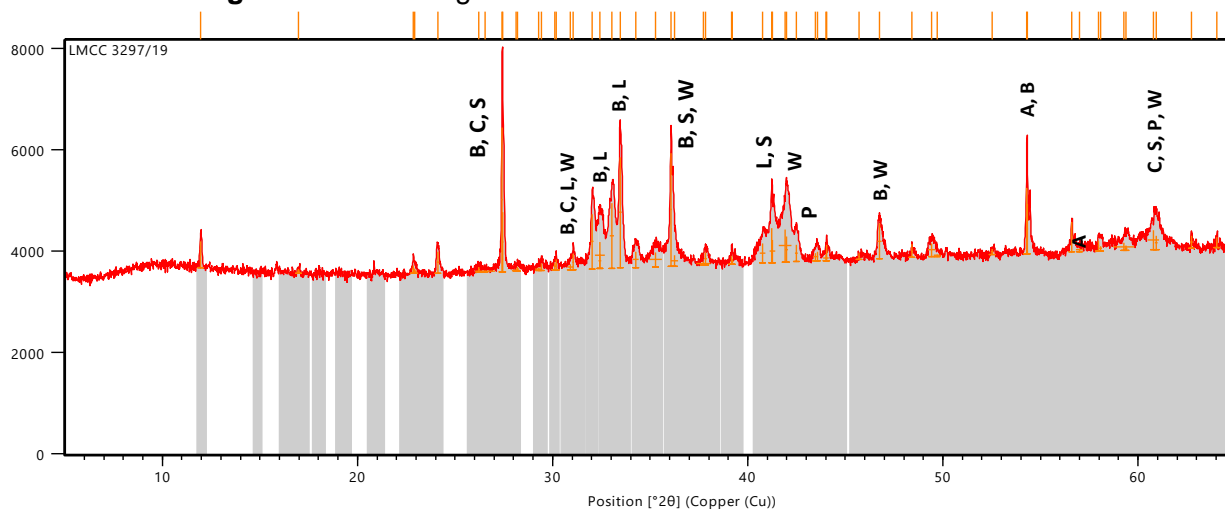


Tabela A5 – Composição mineralógica da escória de aciaria BSSF

Fórmula molecular	Fichas de estruturas (código)	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
$Ca_{23,16}Mn_{0,19}Na_{0,14}Mg_{0,83}Al_{1,79}Ti_{5,62}Fe_{10,30}Si_{21,95}O_{96}$	96-900-5372	Andradita	A
MgO	96-900-0496	Periclásio	P

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/cm³.

DEFINIÇÃO DOS TRAÇOS

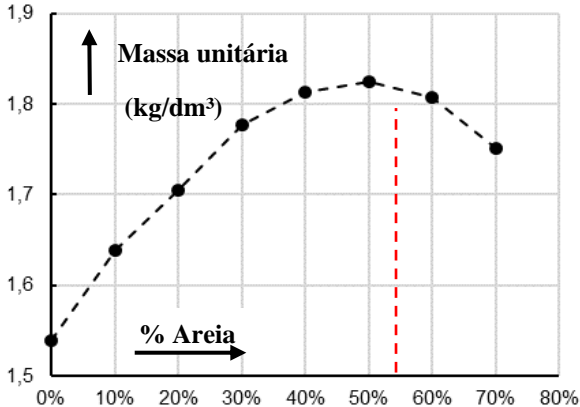
O traço referência de concreto foi projetado de modo a representar uma mistura convencional, com resistência mínima de 25 MPa na idade de 28 dias e relação água/cimento menor que 0,60 (atendendo às especificações da classe de agressividade ambiental II, de acordo com a NBR 12655 (ABNT, 2015)).

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 NM 30 (ABNT, 2001). 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 com a dos agregados naturais.

Na Figura A4 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.

Figura A4 – Empacotamento dos agregados



Entretanto, devido a distribuição granulométrica da escória de aciaria ser predominantemente composta por material miúdo ($\cong 77\%$ 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 1:2,80:1,70 (cimento: areia: brita).

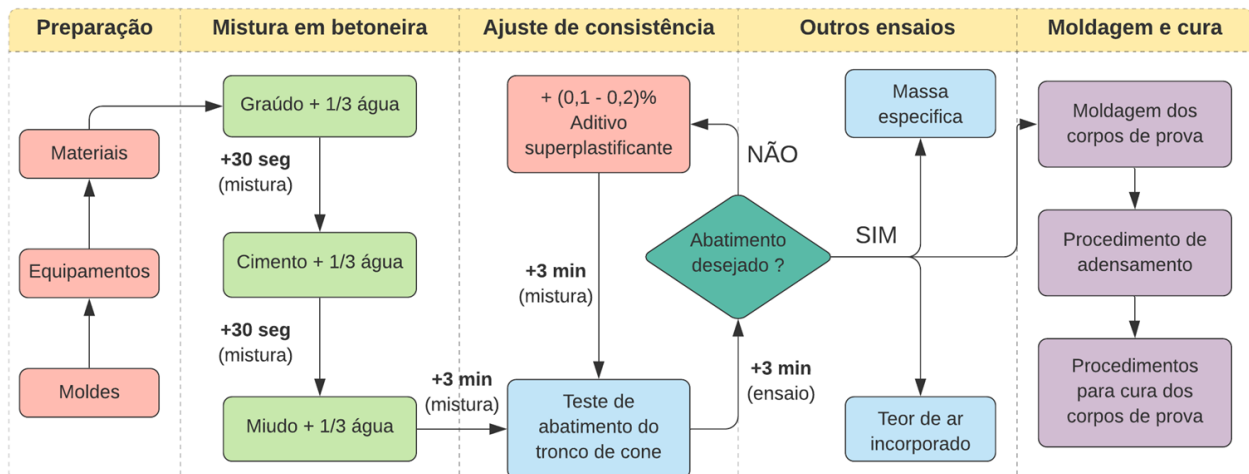
A partir do traço de referência, os outros traços foram determinados, com substituição em volume dos agregados naturais pelo de escória de aciaria BSSF, em teores de 20%, 40%, 60% e 80%. Ressalta-se que o teor de aditivo foi determinado durante o processo de ajuste de consistência, com objetivo de alcançar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

CONFECÇÃO DOS CONCRETOS

O procedimento de confecção dos concretos é esquematizado na Figura A5, 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 até a data de ensaio. O tempo de mistura foi de aproximadamente 10 minutos para cada amostra.

A moldagem e confecção dos corpos de prova seguiu as especificações da NBR 5738 (ABNT, 2016).

Figura A5 – Processo de confecção cura e moldagem das amostras de concreto



ENSAIOS EM ESTADO FRESCO

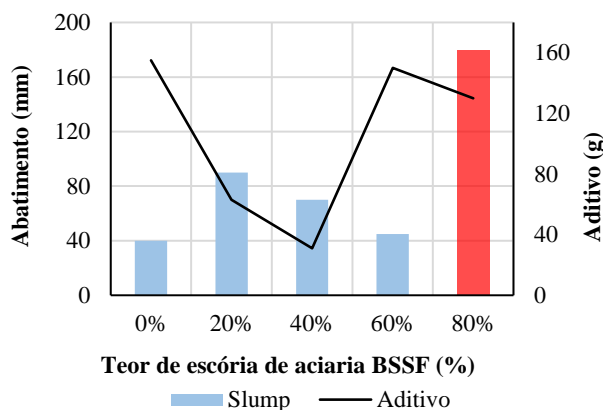
As misturas de concreto fresco foram submetidas aos ensaios de abatimento do tronco de cone, teor de ar incorporado e massa específica, conforme as especificações das NBR 16889 (ABNT, 2020) e NBR 9833 (ABNT, 2009), respectivamente.

De acordo com os resultados do ensaio de índice de consistência (Figura A6), 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. Contudo, os concretos com altos teores de escória apresentaram problemas na consistência e coesão da mistura.

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 desenvolverem estudos para investigar os efeitos da substituição de agregados naturais por agregados de 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 coesão dos concretos, conforme observado nos traços EA60 e EA80.

Figura A6 – Consistência dos concretos



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 A7).

Figura A7 – Desagregação do traço EA80



Fonte: arquivos dos autores

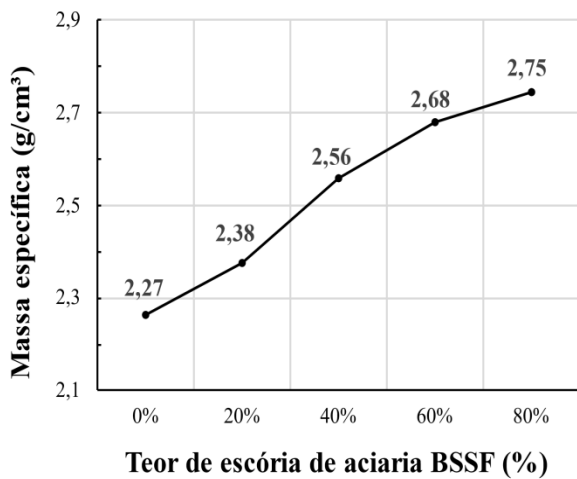
Como o método de substituição considerou apenas a proporção entre os agregados graúdos e miúdos, a melhor graduação do agregado artificial pode ter resultado em um melhor empacotamento de partículas e

consequentemente, em melhor trabalhabilidade da mistura.

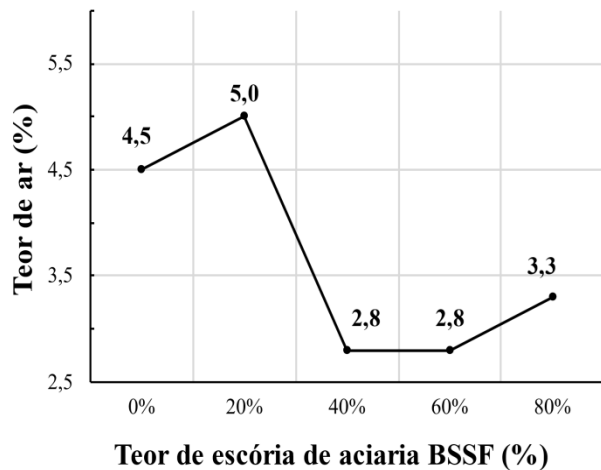
Em relação aos resultados do teor de ar incorporado (Figura A8.b), tem-se que a partir do teor de 40% de incorporação da escória de aciaria BSSF tem-se uma queda substancial do ar incorporado nos concretos (queda > 1,5%), permanecendo em um patamar mínimo de 2,8%.

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 A8.a), sendo consequência direta da maior massa específica do agregado artificial (Tabela A3), que é aproximadamente 27% mais pesado do que os agregados naturais.

Figura 11 – Resultados dos em estado fresco. a) massa específica e b) teor de ar incorporado



(a)



(b)