



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
ENGENHARIA CIVIL

WANNER KELLY DAMASCENO DA SILVA

**CARACTERIZAÇÃO DE ESCÓRIAS DE ACIARIA E AVALIAÇÃO DO SEU USO
NA PRODUÇÃO DE ARGAMASSA DE REVESTIMENTO**

FORTALEZA

2018

WANNER KELLY DAMASCENO DA SILVA

CARACTERIZAÇÃO DE ESCÓRIAS DE ACIARIA E AVALIAÇÃO DO SEU USO NA
PRODUÇÃO DE ARGAMASSA DE REVESTIMENTO

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará (UFC), como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Eduardo Bezerra Cabral.

FORTALEZA

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- S584c Silva, Wanner Kelly Damasceno da.
Caracterização de escórias de aciaria e avaliação do seu uso na produção de argamassa de revestimento /
Wanner Kelly Damasceno da Silva. – 2018.
72 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia,
Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2018.
Orientação: Prof. Dr. Antônio Eduardo Bezerra Cabral.
1. Escória de aciaria;. 2. Siderurgia;. 3. Reaproveitamento de resíduo;. 4. Argamassa.. I. Título.
CDD 620
-

WANNER KELLY DAMASCENO DA SILVA

CARACTERIZAÇÃO DE ESCÓRIAS DE ACIARIA E AVALIAÇÃO DO SEU USO NA
PRODUÇÃO DE ARGAMASSA DE REVESTIMENTO

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará (UFC), como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovada em: 10/12/2018.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Antônio Eduardo Bezerra Cabral (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Lucas Feitosa de Albuquerque Lima Babadopulos
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Marcelo Silva Medeiros Júnior
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus queridos pais, Francisco Ferreira e
Antônia Lúcia de Fátima, por todo amor e
empenho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus e à Nossa Senhora de Fátima pela força e determinação que me proporcionaram para concluir este trabalho, assim como a graduação no Curso de Engenharia Civil na excelente Universidade Federal do Ceará, a qual tanto me orgulho. Aos meus queridos pais Francisco Ferreira da Silva e Antônia Lúcia de Fátima Damasceno da Silva, por todo amor e paciência ao longo desses anos de estudo. Aos meus irmãos, Francisca Kelly Damasceno da Silva Lima e Hudson Damasceno da Silva; cunhado, Gleison Lima, e sobrinhos, João Rafael e Maria de Fátima, por todo apoio e carinho. Ao meu companheiro Bruno Raniery Freire Lima pelos conselhos, correções de texto e sentimentos vividos em toda graduação.

Aos amigos do mestrado no DEECC, Felipe Alves Amancio e Alisson Rodrigues Oliveira Dias, por toda paciência, atenção e ajuda no desenvolvimento técnico e intelectual deste trabalho, sem os dois certamente teria sido mais difícil. Aos técnicos, Helano Wilson e Maurício Barreto, e aos bolsistas e estagiários que em muito me ajudaram no laboratório de materiais e construção civil (LMCC). À mestranda Natália Canuto do DEHA e ao doutorando Antonio Nelcione Carvalho do laboratório de raios-X (LRX).

À querida Prof.a Dr.a Verônica Teixeira Franco Castelo Branco pela intensa motivação lançada aos seus alunos nas cadeiras de Projeto de Graduação I e II, me orgulho de ter sido sua aluna. Aos envolvidos nas cadeiras mencionadas, Iago Filipi, Demostenis Ramos Cassiano e Amanda Pontes Maia Pires Alcântara.

À Companhia Siderúrgica do Pecém pelo fornecimento e transporte das amostras analisadas. À empresa Cimento Apodi pela doação do cimento utilizado. Aos laboratórios e professores responsáveis pelo espaço concedido e análises feitas para realização desta pesquisa, bem como todo o conhecimento adquirido: Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) – Departamento de Engenharia Estrutural e Construção Civil; Laboratório de Raios X (LRX) – Departamento de Física; Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação (LMSP) – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental.

Ao Prof. Dr. Antônio Eduardo Bezerra Cabral, pela excelente orientação e zelo com este trabalho, agradeço imensamente todos os conselhos prestados ao longo do curso.

Aos professores participantes da banca examinadora Prof. Dr. Marcelo Silva Medeiros Júnior e Prof. Dr. Lucas Feitosa de Albuquerque Lima Babadopulos pelo tempo, bem como pelas valiosas colaborações e sugestões dadas a este trabalho.

“A satisfação reside no esforço, não no resultado obtido. O esforço total é a plena vitória” - Mahatma Gandhi

RESUMO

A indústria siderúrgica é importante fornecedora de insumos para a construção civil, tendo sua produção mundial, em 2017, o valor de 1,7 bilhões de toneladas de aço bruto e a nacional de 34,4 milhões. No entanto, o setor siderúrgico produz significativo volume de resíduo, dentre eles a escória de aciaria, representada por 27% do total de coprodutos e resíduos diretos produzidos no Brasil em 2017, ou seja, 5,64 milhões de toneladas. As destinações majoritárias deste resíduo, atualmente, são aplicações em bases e sub-bases de estradas (50%), bem como em nivelamento de terrenos e aterros (42%). Assim, observa-se a incipiência do reaproveitamento de escória de aciaria como agregado em argamassa para construção civil, sendo um setor que necessita de grande quantidade de matéria prima visto que demanda entre 14% e 50% dos recursos naturais do planeta. O presente estudo tem por finalidade caracterizar cinco escórias diversas e avaliar a viabilidade técnica da substituição parcial de agregado miúdo natural (areia) por agregado reciclado oriundo do peneiramento da escória BSSF (*Baosteel Slag Short Flow*) para produção de argamassa. Convém destacar que os resíduos caracterizados são provenientes da Companhia Siderúrgica do Pecém/CE. Para análise química e mineralógica, fizeram-se os ensaios de FRX e DRX, respectivamente; bem como foram executados os ensaios de granulometria, determinação do teor de material que passa na peneira de 75 µm, absorção e massa específica para análise física dos materiais alternativos. Foram produzidas argamassas mistas com o traço usual em obras na proporção de cimento, cal hidratada e areia úmida 1:1:6, em volume; sendo 50kg de cimento, 20 kg de cal hidratada e 6 latas de areia úmida; tipicamente utilizado em Fortaleza para revestimento de fachadas. Foram realizados quatro traços, sendo um de referência (sem agregado reciclado) e mais três traços (10%; 20% e 30% de agregado reciclado BSSF em substituição ao agregado natural). No estado fresco, analisou-se a trabalhabilidade através do índice de consistência, do teor de ar incorporado e da densidade de massa. No estado endurecido, foram produzidos corpos de provas, avaliando-se as propriedades mecânicas da argamassa, através dos ensaios de resistência à compressão axial e resistência à tração na flexão nas idades de 7 e 28 dias. Foram executados painéis, em alvenaria, para análise da resistência de aderência à tração e avaliação da estanqueidade à água pelo método do cachimbo. Os resultados obtidos foram avaliados pela análise de variância, ANOVA, sendo constatados resultados satisfatórios à aplicação de escória BSSF para produção de argamassa de revestimento no teor de 10%.

Palavras-chave: Escória de aciaria; siderurgia; reaproveitamento de resíduo; argamassa.

ABSTRACT

The steel industry is an important supplier of inputs for civil construction, its world production in 2017 worth 1.7 billion tons of crude steel and the national value of 34.4 million tons. However, the steel industry produces a significant amount of waste, including steel slag, represented by 27% of total co-products and direct residues produced in Brazil in 2017, or 5.64 million tons. The majority of this waste is currently used in roads and sub-bases (50%), as well as land and landfill leveling (42%). Thus, the incipience of the reuse of steel slag as an aggregate in mortar for civil construction is observed, being a sector that requires a great quantity of raw material since it demands between 14% and 50% of the natural resources of the planet. The present study aims to characterize five different steel slags and evaluate the technical viability of the partial replacement of natural aggregate (sand) by recycled aggregate from the BSSF slag (Baosteel Slag Short Flow) in production of mortar. It should be noted that the characterized waste comes from Companhia Siderúrgica do Pecém / CE. For chemical and mineralogical analysis, were performed the XRF and XRD tests, respectively; as well as the granulometry tests, determination of the content of material passing through the 75 μm , absorption and specific mass for the physical analysis of the alternative materials. Mixed mortars were produced with the usual mix in the proportion of cement, hydrated lime and wet sand 1: 1: 6 by volume; being 50kg of cement, 20kg of hydrated lime and 6 cans of wet sand; typically used in Fortaleza to facade cladding. Four mixes were performed, one of them being a reference (without recycled aggregate) and three mixes (10%, 20% and 30% of BSSF recycled aggregate replacing the natural aggregate). In the fresh state, the workability was analyzed through the consistency index, the incorporated air content and the mass density. In the hardened state, test specimens were produced, evaluating the mechanical properties of the mortar, through tests of resistance to axial compression and tensile strength in flexion at the ages of 7 and 28 days. Panels were performed, in masonry, for the analysis of the resistance of adhesion to the traction and evaluation of the watertightness by the pipe method. The results were evaluated by analysis of variance, ANOVA, and satisfactory results were obtained for the application of BSSF slag to the production of coating mortar in the 10% content.

Keywords: Steel slag; steel industry; reuse of waste; mortar.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Esquematização do processo de produção das Usinas integradas a coque....	17
Figura 2	– Esquematização do processo de produção das Usinas semi-integradas.....	18
Figura 3	– Esquematização simplificada do processo de produção do aço.....	19
Figura 4	– Esquematização do processo de produção do aço na CSP.....	20
Figura 5	– Representação de coprodutos e resíduos por tipo segundo a produção em 2017.....	22
Figura 6	– Destinação de agregado siderúrgico de aciaria no Brasil em 2017.....	23
Figura 7	– Principais aplicações dos agregados siderúrgicos de aciaria no Brasil.....	25
Figura 8	– Esquema geral do método adotado.....	29
Figura 9	– Amostras de escória de aciaria intituladas como: a) BOF; b) DRY PIT; c) KR; d) PANELA; e) BSSF.....	30
Figura 10	– Equipamento utilizado para execução de argamassas mistas.....	33
Figura 11	– Material para determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado.....	34
Figura 12	– Ensaio de resistência a) à tração na flexão; b) à compressão axial.....	35
Figura 13	– Painéis executados para o ensaio de resistência de aderência à tração.....	36
Figura 14	– Difratoograma do agregado gráúdo reciclado BOF.....	46
Figura 15	– Difratoograma do agregado gráúdo reciclado DRY PIT.....	47
Figura 16	– Difratoograma do agregado gráúdo reciclado KR.....	47
Figura 17	– Difratoograma do agregado gráúdo reciclado PANELA.....	48
Figura 18	– Difratoograma do agregado gráúdo reciclado BSSF.....	48
Figura 19	– Distribuição de testemunhas executados para o ensaio de resistência de aderência à tração aos 28 dias. a) Pannel com traço de referência; b) Pannel 57	

com 10% de escória; c) Painel com 20% de escória; d) Painel com 30% de escória.....

Figura 20 – Formas de ruptura obtidas no ensaio de resistência de aderência à tração para um sistema de revestimento com chapisco. A) Traço de referência; b) Traço com 10% de escória; c) Traço com 20% de escória; d) Traço com 30% de escória..... 57

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Curva granulométrica da escória BOF.....	38
Gráfico 2 – Curva granulométrica da escória DRY PIT.....	38
Gráfico 3 – Curva granulométrica da escória KR.....	39
Gráfico 4 – Curva granulométrica da escória PANELA.....	39
Gráfico 5 – Curva granulométrica da escória BSSF.....	40
Gráfico 6 – Teor de material pulverulento para as escórias analisadas.....	41
Gráfico 7 – Determinação da massa específica das escórias avaliadas.....	42
Gráfico 8 – Determinação de absorção de água das escórias avaliadas.....	43
Gráfico 9 – Porcentagem de expansão de barras de argamassa contendo as escórias em estudo.....	44
Gráfico 10 – Porcentagem de óxidos presentes nos agregados siderúrgicos avaliados.....	45
Gráfico 11 – Resistência à tração na flexão aos 7 dias para cada traço analisado.....	52
Gráfico 12 – Resistência à tração na flexão aos 28 dias para cada traço analisado.....	52
Gráfico 13 – Resistência à compressão axial aos 7 dias para cada traço analisado.....	53
Gráfico 14 – Resistência à compressão axial aos 28 dias para cada traço analisado.....	54
Gráfico 15 – Resistência de aderência à tração aos 28 dias para cada traço analisado.....	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Consumo de materiais por m ³ de argamassa.....	27
Tabela 2 – Características químicas, físicas e mecânicas do cimento CP V comparadas segundo boletim técnico e as propriedades do aglomerante.....	28
Tabela 3 – Ensaio realizados para caracterização das cinco escórias.....	32
Tabela 4 – Ensaio executados segundo normas padrões.....	33
Tabela 5 – Composição química obtida através da Fluorescência de Raios-X para óxidos.....	45
Tabela 6 – Caracterização física da areia e da escória BSSF para aplicação em argamassa mista.....	49
Tabela 7 – Consumo de materiais, incluso água, referente à 1m ³ de argamassa.....	50
Tabela 8 – Valores obtidos para o teor de ar incorporado e densidade de massa no estado fresco.....	50
Tabela 9 – Valores obtidos para a resistência à tração na flexão aos 7 e 28 dias.....	51
Tabela 10 – Valores médios obtidos para a resistência à compressão axial aos 7 e 28 dias.....	53
Tabela 11 – Valores médios obtidos para a resistência de aderência à tração aos 28 dias.....	55
Tabela 12 – Valores obtidos para o teor de umidade em porcentagem de massa para cada painel com revestimento aos 28 dias.....	58
Tabela 13 – Valores amostrais obtidos para a permeabilidade do revestimento através do Método do cachimbo aos 28 dias.....	59
Tabela 14 – Resultados para a permeabilidade do revestimento, por traço, através do Método do cachimbo aos 28 dias.....	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BSSF	Baosteel's Slag Short Flow
CSP	Companhia Siderúrgica do Pecém
DRX	Difração de Raios X
EAF	Eletric Arc Furnace
FRX	Fluorescência de Raios X
LD	Processo de Linz-Donawitz
NBR	Norma Brasileira Regulamentar

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	Justificativa.....	14
1.2	Objetivos	15
1.2.1	Objetivo geral.....	15
1.2.2	Objetivos específicos	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	Produção de aço e geração de escória de aciaria	16
2.1.1	Processo BSSF	21
2.2	Formação de coprodutos e resíduos	21
2.3	Características da escória de aciaria.....	23
2.4	Aplicação da escória de aciaria na construção civil.....	24
3	MATERIAIS E MÉTODOS DE PESQUISA.....	27
3.1	Materiais	27
3.1.1	Cimento.....	27
3.1.2	Cal hidratada.....	28
3.1.3	Areia natural	28
3.1.4	Escória BSSF	29
3.2	Plano experimental	29
3.2.1	Primeira etapa – Preparação das amostras.....	30
3.2.2	Segunda etapa – Caracterização das amostras	31
3.2.3	Terceira etapa – Aplicação da escória BSSF em substituição parcial (blend) ao agregado miúdo natural em argamassa mista	32
3.2.3.1	<i>Índice de consistência</i>	33
3.2.3.2	<i>Densidade de massa e teor de ar incorporado</i>	34
3.2.3.3	<i>Resistência à tração na flexão e resistência à compressão axial</i>	34
3.2.3.4	<i>Resistência de aderência à tração</i>	35
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	37
4.1	Caracterização das amostras	37
4.1.1	Caracterização física.....	37
4.1.2	Caracterização química.....	44
4.1.3	Caracterização mineralógica	46
4.2	Aplicação da escória BSSF como substituta parcial ao agregado miúdo natural em argamassa mista	48
4.2.1	Estado fresco	49

4.2.1.1	<i>Índice de consistência</i>	49
4.2.1.2	<i>Teor de ar incorporado e Densidade de massa</i>	50
4.2.2	Estado endurecido	51
4.2.2.1	Resistência à tração na flexão	51
4.2.2.2	Resistência à compressão axial	53
4.2.2.3	Resistência de aderência à tração	54
5	CONCLUSÃO	60
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	62
	REFERÊNCIAS	63
	APÊNDICE	67

1 INTRODUÇÃO

1.1 Justificativa

No Brasil, a geração de resíduos e coprodutos diretos, sendo estes as escórias, as lamas, os pós, as carepas, etc., representou 20,88 milhões de toneladas em 2017. A produção de agregados siderúrgicos foi da ordem de 607 kg/t de aço bruto nacional. Dentro de tais valores, foram produzidos 42% de escória de alto-forno, 27% do volume total referiram-se à escória de aciaria e o restante representado por finos, pós, lamas, dentre outros coprodutos. Também, no referido ano e segundo o Instituto Aço Brasil (2018), 92% do agregado siderúrgico de alto forno foram vendidos ao mercado, principalmente para a produção de cimento, enquanto apenas 36% da escória de aciaria foi vendida e 23% do volume produzido deste coproduto foi utilizado internamente, tendo como principal aplicação a execução de base para pavimentação de estradas e vias.

O setor da construção civil representa importante papel na economia brasileira, onde, em 2016, o setor representava 6,4% do PIB nacional. Em consequência, a indústria da construção civil demanda elevada quantidade de matéria prima, sendo propícia a utilização de materiais alternativos. Dentre tais materiais tem-se a escória de aciaria, um coproduto gerado a partir da produção do aço e com propriedades que indicam sua adequada utilização como agregado reciclado em argamassa para construção civil.

Um desafio significativo para o setor da construção civil é a redução da exploração de recursos naturais e, por vezes, não renováveis, tendo em vista os impactos ambientais causados pela produção em larga escala, elevando o consumo de materiais e mão de obra, consequentemente aumentando os gastos financeiros. Segundo Sjöström (1996, apud JOHN, 2000), a construção civil demanda entre 14% e 50% dos recursos naturais do planeta, desde a etapa inicial da obra à demolição da mesma, sendo um dos setores mais consumidores de recursos naturais e, consequentemente, produtores de resíduos.

Em paralelo à construção civil, tem-se, ainda, a indústria siderúrgica, responsável mundialmente pela geração de 1,7 bilhões de toneladas de aço bruto em 2017, de acordo com dados estatísticos da *World Steel Association* (2018). No âmbito nacional, a produção representava 34,4 milhões de toneladas no mesmo ano (IABr, 2018).

Assim como o setor da construção civil, a esfera siderúrgica produz significativo volume de resíduo, dentre eles a escória de aciaria, sendo o estudo de viabilidade da aplicação de escória de aciaria na construção civil de fundamental importância, tendo em vista a larga

produção de resíduo siderúrgico, bem como a necessidade do reaproveitamento desse resíduo como solução sustentável para minorar a exploração de recursos naturais.

Segundo o estudo de John (2000), para conferir-se a aplicação de resíduo como tecnologia alternativa deve-se identificar e quantificar os resíduos disponíveis; selecionar os rejeitos a serem investigados; detalhar os dados estatísticos dos subprodutos; verificar os custos inerentes à aplicação dos resíduos; avaliar o processo de geração, tratamento e gestão destes; caracterizar os resíduos em suas propriedades química, microestrutural e ambiental; elencar as aplicações tecnicamente viáveis ao mercado e à pesquisa; desenvolver e avaliar o produto final; analisar o desempenho ambiental do mesmo e sua viabilidade econômica, e transferir a tecnologia desenvolvida.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral do presente trabalho é caracterizar cinco tipos de escórias provenientes da Companhia Siderúrgica do Pecém/CE e avaliar o uso do agregado reciclado da escória BSSF (*Baosteel Slag Short Flow*) em argamassa de revestimento.

1.2.2 Objetivos específicos

A. Caracterizar cinco amostras de escória de aciaria, sendo elas intituladas como BOF, DRY PIT, KR, PANELA e BSSF;

B. Analisar as características físicas e mecânicas de quatro traços de argamassas mistas produzidas com substituição parcial da escória de aciaria BSSF, comparando-as com a argamassa convencional;

C. Determinar o teor ótimo de substituição de agregado miúdo pela escória de aciaria.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Produção de aço e geração de escória de aciaria

O aço é um liga metálica composta fundamentalmente por ferro e carbono, bem como elementos secundários tais como silício, manganês, fósforo e enxofre, em proporções variáveis a depender do processo de fabricação (CASTELO BRANCO, 2004; PEDROSA, 2010; SOUZA, 2016, IABr, 2018).

De acordo com o relatório do *World Steel Association* (2018), o Brasil encontra-se entre os dez maiores produtores de aço bruto (9º lugar com produção de 34,4 milhões de toneladas em 2017), sendo a China a maior produtora mundial, contabilizando 831,7 milhões de toneladas no referido ano.

A produção do aço segue, predominantemente, duas rotas tecnológicas, explicadas a seguir (CGEE, 2010; PEDROSA, 2010; CALDAS, 2011; IABr, 2018). A primeira é por meio das usinas integradas a coque; onde se inicia o processo de transformação do minério de ferro e do carbono em ferro-gusa para posterior geração de aço, através de uma única unidade industrial. São realizados três passos:

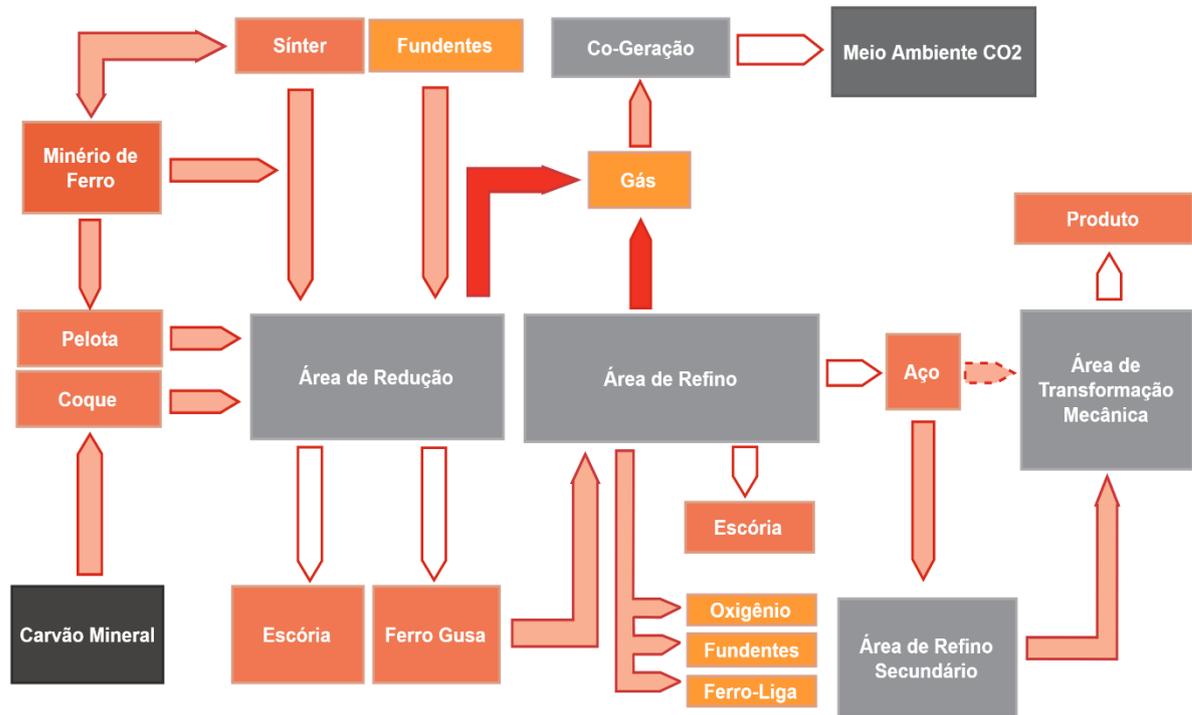
1. Redução, onde o minério é transformado em ferro-gusa, através do carregamento das matérias-primas em alto forno, neste o oxigênio é aquecido em temperatura de aproximadamente 1000°C e o calor gerado pelo carvão em contato com o oxigênio reduz o minério de ferro em metal líquido;

2. Refino, sendo a etapa onde se realiza a transformação do ferro gusa líquido ou sólido e a sucata de ferro em aço líquido nas aciarias do tipo *LD* ou *EAF*, havendo a remoção de impurezas e a geração de escórias;

3. Transformação mecânica, onde são gerados os produtos finais, tais como barras, fio-máquina, tarugo, placas, entre outros.

A Figura 1, a seguir, esquematiza o processo de produção do aço em usinas integradas a coque, havendo 13 usinas integradas no Brasil (CGEE, 2010).

Figura 1 – Esquemática do processo de produção das usinas integradas a coque.

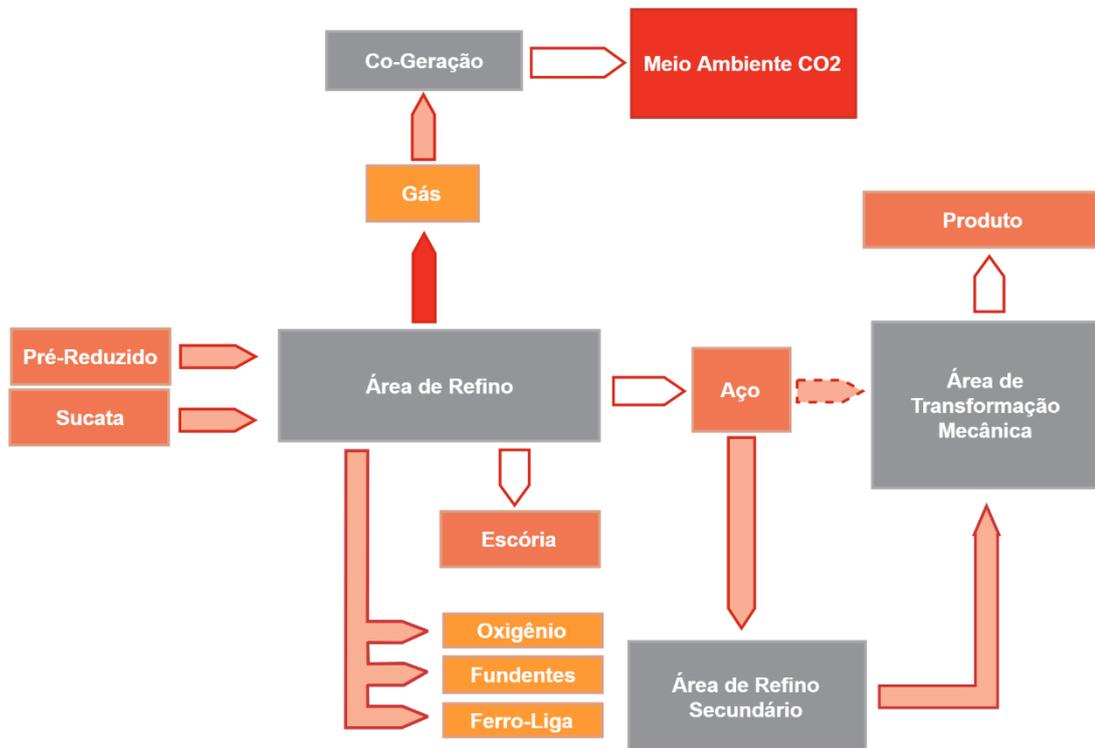


Fonte: CGEE, 2010.

A segunda rota tecnológica é através das usinas semi-integradas (*minimills*), que diferentemente das usinas integradas, não apresentam a etapa de Redução, iniciando-se primeiramente com o Refino nas aciarias, onde a sucata ferrosa trata-se do principal insumo, e posterior Transformação mecânica.

A Figura 2 abaixo esquematiza o processo de produção do aço em usinas semi-integradas, havendo 15 usinas com esta rota tecnológica no Brasil (CGEE, 2010).

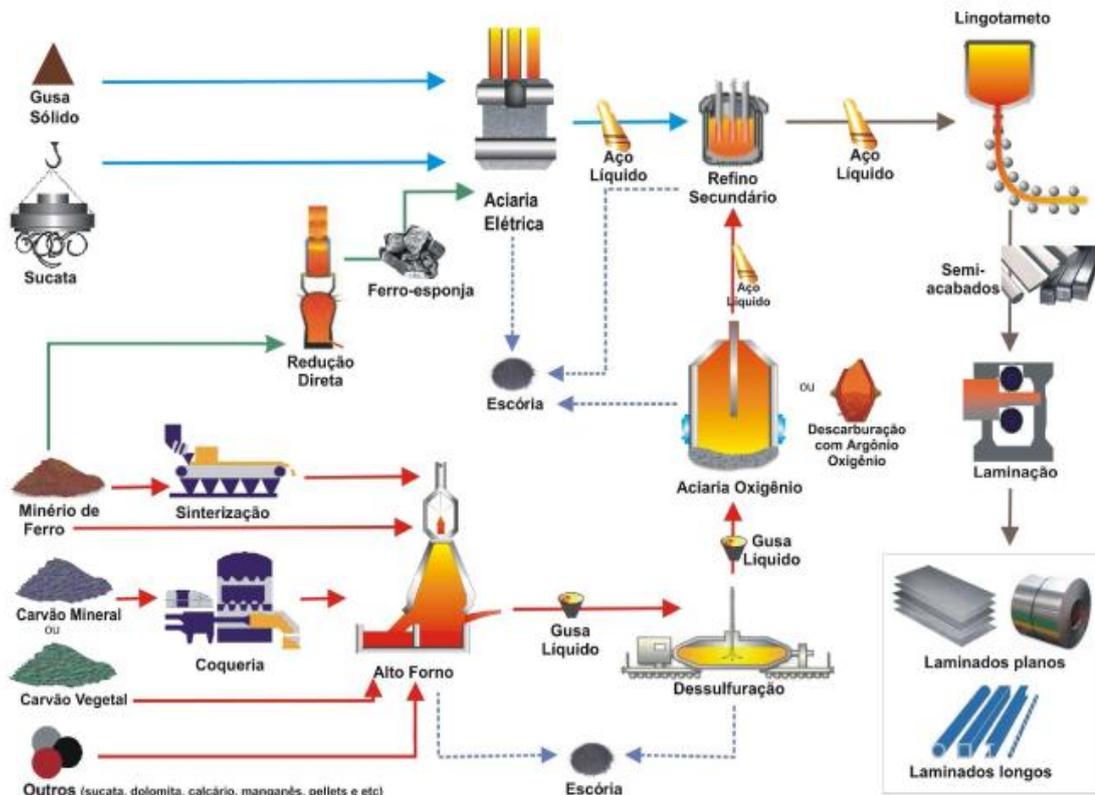
Figura 2 – Esquemática do processo de produção das Usinas semi-integradas.



Fonte: CGEE, 2010.

Existem, predominantemente, dois equipamentos que diferenciam o processo de refino para a produção do aço, sendo eles: o conversor a oxigênio, cujo método é intitulado como *LD* (Linz-Donawitz), nome ligado à primeira planta que operou com este tipo de equipamento em 1952, a Linz e Donawitz, na Áustria (CALDAS, 2011); e o forno de arco elétrico ou *EAF* (*Electric Arc Furnace*), onde a conversão de aço líquido é realizada através de energia elétrica. As etapas do processo de produção do aço podem ser vistas de forma simplificada na Figura 3.

Figura 3 – Esquemática simplificada do processo de produção do aço.



Fonte: CASELATO, 2010

No Brasil e no mundo, o processo mais utilizado na etapa de refino do aço é o Conversor a oxigênio, onde são geradas grandes quantidade de produtos planos, tais como chapas para indústria automobilística (FERNANDES, 2010, apud SOUZA, 2016). Este processo é a via que produz maior volume de aço, sendo equivalente a 70% da produção mundial (MADIAS, 2015). A produção do aço, através de conversor à oxigênio, inicia-se no carregamento de carga sólida, onde ocorre a adição de sucata ao processo, tendo em vista que o teor de ferro da mesma é superior ao do ferro-gusa. Posteriormente, tem-se o carregamento de ferro-gusa líquido e o sopro, onde é injetado oxigênio puro no conversor em alta pressão e velocidade supersônica por meio de uma lança refrigerada à água (GONÇALVES, 2005). Por fim, ocorre o vazamento de aço para a panela, sendo este direcionado para o processo de lingotamento contínuo ou convencional; e o vazamento de escória em recipiente adequado.

A Figura 3 resume o fluxo de produção do aço em uma aciaria LD, iniciando-se pelo reator químico de alto forno, havendo, ainda, o pré-tratamento do ferro gusa a partir da dessulfuração em carro torpedo e em panela, a fim de diminuir a contaminação do material. Posteriormente, ocorre o carregamento de sucata para em seguida receber a carga de 70% a 85% de ferro gusa líquido. Na etapa consecutiva, realiza-se o sopro combinado de oxigênio e

adições, tais como cal e fundentes, no início do processo, e minério de ferro ao final do mesmo. Salienta-se que, segundo Souza (2016), os fundentes têm por objetivo o fechamento do balanço térmico e a formação de escória. Assim, em seguida, ocorre o vazamento do conversor para a panela de aço e, após o conversor ser rotacionado, esvazia-se a escória gerada no processo, sendo a mesma direcionada ao processo de resfriamento. Por fim, realizam-se os passos sequenciais para lingotamento, gerando produtos semi-acabados como placas, blocos e tarugos; e para laminação do aço, produzindo chapas, barras entre outros.

Apresenta-se, na Figura 4, a esquematização para a produção de aço da Companhia Siderúrgica de Pecém (CSP), local onde foram coletadas as amostras para o estudo em questão. Este complexo é um exemplo de usina integrada a coque que utiliza o conversor a oxigênio para refino do aço, sendo a primeira usina integrada da região Nordeste do país (ADECE, 2016).

Figura 4 – Esquematização do processo de produção do aço na CSP.



Fonte: DIAS, 2018.

Assim, inicialmente, realiza-se a preparação da carga no pátio de matérias primas, onde fração do minério de ferro, que se encontra em pó, é aquecida a elevadas temperaturas, preenchendo os vazios entre os grãos, havendo o processo de sinterização e, conseqüentemente, originando sínter e/ou pelotas, os quais se associam ao minério de ferro no alto forno. Paralelamente, utiliza-se carvão para descontaminação através da retirada de compostos voláteis indesejáveis nas coquearias, gerando coque, o qual adicionado à carga metálica produz o ferro gusa, ainda contendo impurezas. No alto forno ocorre a etapa de redução do aço e, por fim, na aciaria realiza-se a fase de refino.

Segundo os procedimentos adotados pela Companhia Siderúrgica, a escória que não foi granulada é despejada em uma baía de denominação DRY PIT, sendo esta

umidificada, ocorrendo choque térmico em altas temperaturas, e fragmentada. O ferro gusa produzido é transportado do alto forno ao conversor através de carro torpedo, sendo este depositado em uma panela para o procedimento de dessulfuração, onde são adicionados óxido de cálcio (CaO) e carbonato de cálcio (CaCO₃) para retirada de enxofre, sendo gerada a escória KR. Posteriormente, o ferro gusa é transformado em aço e, em refino primário, este é purificado e produz-se a escória BOF, sendo esta, em sua maioria, granulada e destinada à indústria de cimento. Por fim, o aço é direcionado para lingotamento contínuo e o material residual que permanece no recipiente é classificado como escória de PANELA. As escórias obtidas passam por processo de remoção da sucata e são divididas em faixas granulométricas.

2.1.1 Processo BSSF

O sistema intitulado como *Baosteel Slag Short Flow* é pioneiro, não somente no Brasil, mas em todo Ocidente, sendo uma tecnologia desenvolvida pelas indústrias siderúrgicas sul-coreanas e chinesas (IABr, 2018). Através desse processo foi possível resfriar a escória mais rapidamente e reciclá-la, assim, a mesma é fundida a altas temperaturas em um recipiente rotativo. O resíduo é solidificado e, posteriormente, triturado em pequenas partículas. A escória líquida gerada é transferida para um tambor de granulação, onde é realizada a injeção de água com um tempo de permanência entre três e cinco minutos, e posterior separação magnética (SOUZA, 2016).

No Brasil, o processo é realizado pela Companhia Siderúrgica do Pecém, no qual trabalham 42 profissionais, entre a operação e a manutenção, sendo gerada uma escória de qualidade superior à convencional. Ainda que Souza (2016) afirme ser impossível a utilização de escória de conversor LD como matéria prima para produção de cimento, devido à sua característica expansiva, o Relatório de Sustentabilidade desenvolvido pelo Instituto Aço Brasil (2018) alega que, devido à tecnologia desenvolvida pelo processo BSSF, torna-se possível destinar o resíduo às indústrias cimenteiras, indicando o controle de tal característica expansiva e ampliando a utilização da escória de aciaria na construção civil.

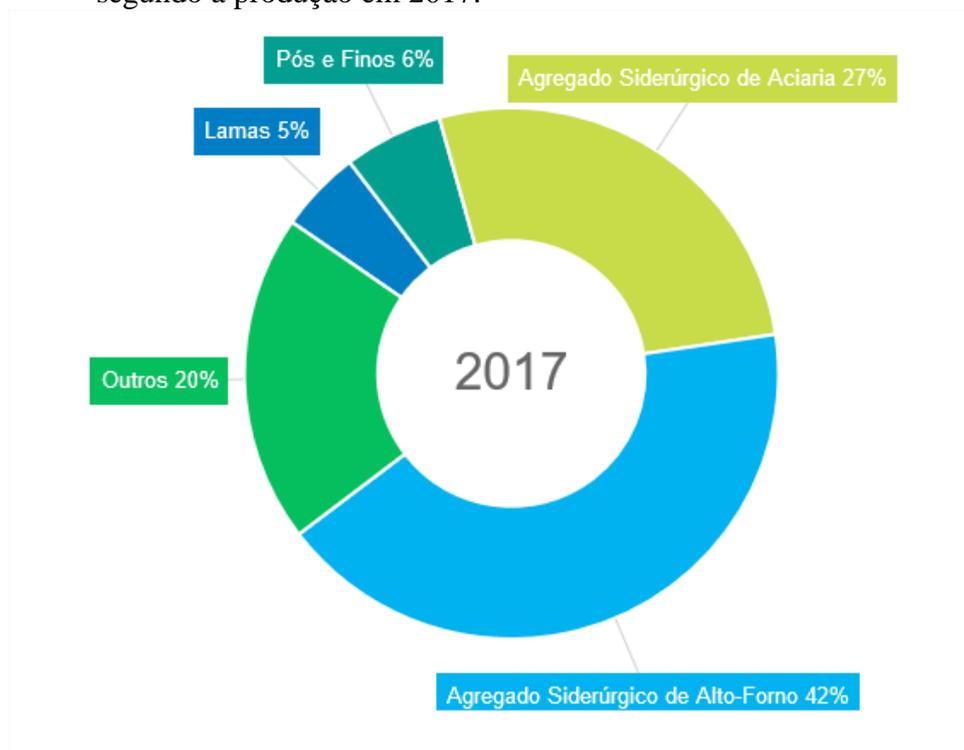
2.2 Formação de coprodutos e resíduos

A geração específica de resíduos e coprodutos diretos, ou seja, os rejeitos relacionados diretamente ao processo produtivo siderúrgico, tais como pós, lamas, escórias, carepas, dentre outros; representou 607 kg a cada tonelada de aço bruto produzido em 2017

no Brasil, indicando um acréscimo de 2,14% e 3,62% em comparação aos anos de 2015 e 2016, respectivamente.

Desse total, foram produzidos 42% de escória de alto-forno e 27% referiu-se ao agregado siderúrgico de aciaria; sendo o restante representado por lamas, pós e finos, dentre outros coprodutos, conforme a Figura 5.

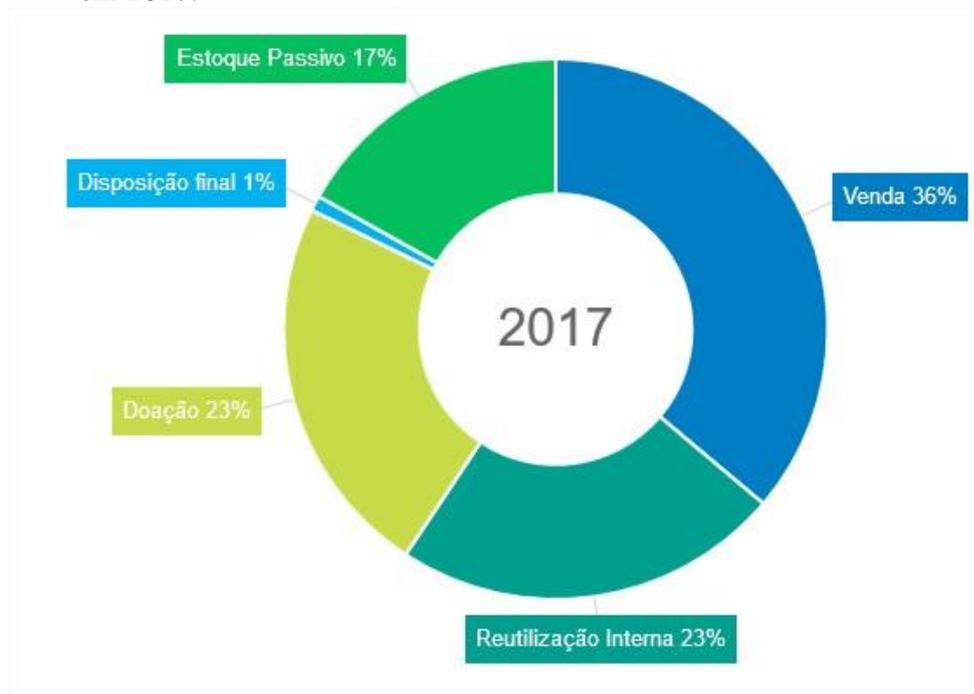
Figura 5 – Representação de coprodutos e resíduos por tipo segundo a produção em 2017.



Fonte: IABr, 2018.

A destinação majoritária de coprodutos e resíduos siderúrgicos é o reaproveitamento, referindo-se ao percentual de 86% em 2017, seguido de estocagem (9%) e disposição final (5%). Para as escórias produzidas, tem-se que 92% do agregado siderúrgico de alto forno foram vendidos ao mercado, sendo 98% deste rejeito aplicado à indústria cimenteira; enquanto apenas 36% da escória de aciaria foi vendida e 23% do volume produzido deste coproduto foi utilizado internamente, de acordo com a Figura 6, a qual apresenta a destinação da escória de aciaria em 2017.

Figura 6 – Destinação de agregado siderúrgico de aciaria no Brasil em 2017.



Fonte: IABr, 2018.

2.3 Características da escória de aciaria

A produção e a composição de escória de aciaria dependem de diversos fatores, tais como o processo ou tipo de forno utilizado no beneficiamento do aço, o resfriamento do rejeito, o tipo de matéria-prima utilizada e a especificação do aço produzido (CASTELO BRANCO, 2004). O resfriamento é importante variável para a produção da escória, sendo o principal responsável pela estrutura morfológica do agregado artificial. Devido ao choque térmico gerado pelo resfriamento, a escória é fragmentada e posteriormente britada, para em seguida, através de correias rolantes, o rejeito ser classificado em diferentes granulometrias. A fração não metálica é reciclada no alto-forno e na aciaria, apresentando variadas aplicações para a escória separada em granulometrias diversas (GEYER, 2001).

Segundo Geyer (2001), dentre os diferentes métodos de resfriamento da escória têm-se o resfriamento rápido, onde se aplica quantidade controlada de água, ar ou vapor, havendo a expansão prévia da escória; resfriamento brusco, em que o resíduo siderúrgico é inicialmente fragmentado e posteriormente resfriado, ocorrendo a granulação do material sendo esta semelhante à granulometria da areia de rio; granulação por água, comum ao

resfriamento de escória de alto forno, é fragmentada por jatos d'água e imediatamente imersa em água; e resfriamento lento ao ar, onde os óxidos presentes nos compostos se cristalizam e perdem suas características hidráulicas, tornando-se inertes. Este método é usualmente realizado no Brasil para o resfriamento de escórias de aciaria.

A composição química da escória de aciaria é formada por diversos óxidos, dentre eles tem-se CaO (óxido de cálcio), MgO (óxido de magnésio), SiO₂ (sílica), Fe₂O₃ (hematita) e MnO₂ (dióxido de manganês), sendo as concentrações e as quantidades dependentes da matéria prima utilizada no processo de produção do aço (PRADO et al., 2001). As características mineralógicas da escória de aciaria apresentam estrutura cristalina em sua maioria, e dependem da produção e da taxa de resfriamento (SOUZA, 2007). A identificação de fases e a composição mineralógica desses agregados reciclados são identificadas por meio da difratometria de raios-X.

Outra característica da escória de aciaria é a expansibilidade volumétrica quando na presença de umidade, devido à tardia hidratação da cal livre presente neste subproduto. O potencial expansivo da escória ocasionado pelo processo de hidratação, devido a concentração dos óxidos de CaO e MgO, pode chegar até 10% do volume inicial (PARENTE et al., 2003), sendo esta uma importante variável a ser analisada quando objetiva-se a aplicação de escória de aciaria em argamassas e concretos. Uma forma de minimizar os efeitos danosos causados pela cal é utilizá-la com o menor tamanho de grão possível para que a mesma sofra completa dissolução (CASTELO, 2004).

Outros compostos que contribuem efetivamente para a expansibilidade da escória de aciaria são os óxidos de ferro e o ferro metálico. Segundo Barbosa (2013), o procedimento mais utilizado, devido ao baixo custo e simplicidade, para reduzir ao mínimo a expansibilidade é a cura ao tempo, proporcionando o envelhecimento do material no pátio, através de molhagem constante com água natural ou água quente para hidratação dos elementos instáveis. No entanto, o método anterior apresenta eficiência variável devido à heterogeneidade do mesmo.

2.4 Aplicação da escória de aciaria na construção civil

Castelo (2004) evidencia os diversos usos de escória de aciaria como material para a construção civil, tais como matéria prima para produção de cimento, devido à composição química do resíduo siderúrgico se semelhar ao clínquer gerado na produção do cimento Portland; agregado para concreto, onde se indicou o aumento da resistência à compressão e durabilidade à abrasão; componentes de base e sub-base de pavimentos;

agregado para misturas asfálticas; construção de lastro de leitos de ferrovias; aterros e contenções; dentre outras aplicações.

Na construção civil, o agregado siderúrgico substitui parcialmente a areia e/ou a brita, a depender da competitividade regional com os agregados naturais, sendo a utilização comum em pavimentação, concreto e confecção de tijolos e blocos. Para o concreto, os agregados reciclados são utilizados como adições e/ou agregados tendo em vista a necessidade de a escória ser reajustada quimicamente e ser submetida a períodos de cura, visando minimizar o efeito expansivo que as mesmas apresentam (GEYER, 2001).

De acordo com Brun & Yuan (1994, apud GEYER, 2001) existem diversas vantagens que justificam a substituição no uso de brita por agregado graúdo siderúrgico, sendo indicado menor custo, visto que a dispêndio de energia com explosivos para desmonte; maior resistência à abrasão; maior peso próprio, auxiliando na estabilidade de estruturas de contenção; dentre outros benefícios.

A principal aplicação de escória de aciaria produzida no país é como base para pavimentação de vias e estradas (50%), sendo apenas 2% do volume total utilizado como agregado de concreto e 1% para produção de cimento, conforme Figura 7 (IABr, 2018).

Figura 7 – Principais aplicações dos agregados siderúrgicos de aciaria no Brasil.



Fonte: IABr, 2018.

Assim, observa-se a incipiência na aplicação de escória de aciaria na construção civil brasileira, ainda que a mesma apresente boas propriedades físicas que justifiquem sua utilização, conforme estudos de Abu-Eishah (2012), o qual analisa a aplicação de escória em concreto, e Yan et al. (2014), onde os últimos indicam que não se pode negligenciar a contribuição química da escória para a resistência da argamassa. Franco (2015) afirma que a escória de aciaria apresenta características físicas, químicas e mecânicas capazes de atender as normatizações empregadas à substituição de agregado natural, quando o coproduto é corretamente estabilizado. A escória de aciaria é classificada como econômica e ambientalmente viável, condizente com os princípios de sustentabilidade (GONÇALVES, 2016, apud AZEREDO, 2018).

Estudos que avaliam a aplicação de escória de aciaria em argamassa de revestimento também são escassos, no entanto França et al. (2013) analisaram os parâmetros de resistência à compressão axial, resistência à tração na flexão e resistência de aderência à tração para argamassas com aplicação de escória de aciaria elétrica, averiguando que as amostras com agregado siderúrgico possuem resistências mecânicas e de aderência à tração superiores à argamassa produzida com agregado miúdo natural, além de resultados equivalentes para trabalhabilidade.

3 MATERIAIS E MÉTODOS DE PESQUISA

3.1 Materiais

Foram produzidas argamassas mistas com o traço usual, misto, em obras na proporção de cimento, cal hidratada e areia úmida 1:1:6, recomendado para fachadas externas, tendo em vista a agressividade inerente a exposição do revestimento ao meio. Salienta-se que o traço equivale a um saco de cimento, um saco de cal hidratada e seis padiolas de areia úmida, com capacidade de 40L cada. Assim, foram realizados quatro traços com teores de 0%, ou seja, o valor referência; 10%; 20% e 30% de escória com substituição, em volume, do agregado miúdo natural. A Tabela 1 explana o consumo de materiais por m³ de argamassa, considerando inicialmente a relação água/cimento igual a 1.

Tabela 1 – Consumo de materiais por m³ de argamassa.

Traço	Percentual de substituição (%)	Cimento (kg)	Cal (kg)	Areia (kg)	Escória (kg)
T1	0	300,6	120,3	1433,0	0,0
T2	10	300,7	120,3	1289,7	211,3
T3	20	300,7	120,3	1146,5	422,7
T4	30	300,7	120,3	1003,2	634,1

Fonte: Autor, 2018.

3.1.1 Cimento

Foi utilizado o cimento CP V ARI de fabricação da empresa Apodi, tendo em vista que o mesmo apresenta baixo teor de adições, reduzindo as variáveis que por ventura venham a interferir nas propriedades analisadas. A Tabela 2 a seguir compara as exigências químicas, físicas e mecânicas do aglomerante estudado de acordo com o boletim técnico do fabricante e as propriedades do cimento utilizado.

Tabela 2 – Características químicas, físicas e mecânicas do cimento CP V comparadas segundo boletim técnico e as propriedades do aglomerante.

EXIGÊNCIAS QUÍMICAS									
	Resíduos insolúveis (%)	Perda ao fogo (%)	Óxidos de magnésio (%)	Tri-óxido sulfúrico (%)	Dióxido de carbono (%)				
V.N.	≤ 3,5	≤ 6,5	≤ 6,5	≤ 4,5	≤ 5,5				
V.O.	0,72	4,28	5,49	3,37	2,42				
EXIGÊNCIAS FÍSICAS E MECÂNICAS									
	Finura		Tempo de pega		Expansibilidade	Resistência à compressão			
	R. P. #200 (%)	Área esp. (cm ² /g)	Início (h)	Fim (h)	A quente (mm)	1 dia (MPa)	3 dias (MPa)	7 dias (MPa)	28 dias (MPa)
V.N.	≤ 6,0	≥ 3000	≥ 1,0	≤ 10,0	≤ 5,0	≥ 14,0	≥ 24,0	≥ 34,0	-
V.O.	0,1	4398	2,75	3,75	0,0	30,8	40,7	47	53,2

Legenda: V.N.: Valor normatizado; V. O.: Valor obtido em boletim técnico; R.P.: Resíduos na peneira 0,075mm. Fonte: Boletim técnico – Apodi (2017).

3.1.2 Cal hidratada

A cal hidratada utilizada no presente trabalho foi a CH I, cujo fabricante chama-se *White Fort*, tendo em vista o melhor desempenho desta categoria de cal segundo suas características químicas e físicas observadas na norma NBR 7175 (ABNT, 2003). Salienta-se que as classes de cal hidratada mais comercializadas no mercado cearense são as cales CH I e CH III, no entanto a última é menos nobre, com maior limite para o teor de material carbonático (CO₂), residual do processo de fabricação e que pode ocasionar redução da capacidade ligante do material, portanto apresentando mais impurezas.

3.1.3 Areia natural

A areia utilizada para produção da argamassa em estudo foi proveniente do rio Curu, localizado na bacia de São Luís do Curu. Foram executados os ensaios para caracterização da mesma segundo normas da ABNT. Tais ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC), sendo estes a determinação de massa específica (NBR NM 52:2009), massa unitária (NBR NM 45:2006), absorção (NBR NM 30:2001), granulometria (NBR NM 248:2003) e teor de material pulverulento (NM 46:2003).

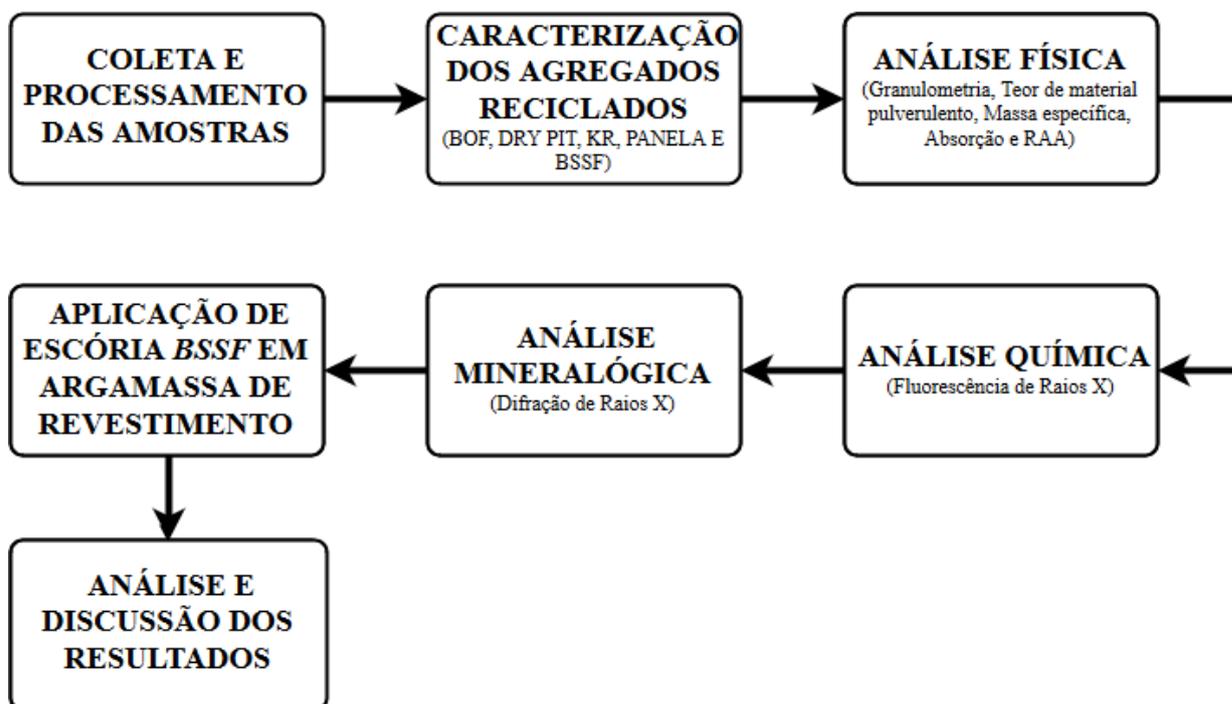
3.1.4 Escória BSSF

Dentre as cinco escórias analisadas neste estudo, a BSSF foi escolhida para averiguação do seu desempenho na produção de argamassa de revestimento. Tal agregado siderúrgico foi selecionado para utilização como agregado miúdo, tendo em vista a pequena fração de material graúdo existente. O material original foi selecionado a partir da peneira de 4,75mm, restando apenas a fração miúda.

3.2 Plano experimental

Primeiramente, ressalta-se que os métodos utilizados para o presente estudo foram separados em três macroetapas, sendo inicialmente realizada a preparação das amostras em etapa preliminar, a primeira fase destinada à caracterização das cinco escórias provenientes da Companhia Siderúrgica de Pecém e o segundo estágio voltado para a aplicação da escória BSSF como substituta parcial do agregado miúdo natural na composição de argamassa mista. A Figura 8 esquematiza o método desenvolvido.

Figura 8 – Esquema geral do método adotado.



Fonte: Autor, 2018.

3.2.1 Primeira etapa – Preparação das amostras

Foram fornecidas para o presente estudo, pela Companhia Siderúrgica do Pecém (CSP) no Ceará, amostras aproximadas de 50kg para cada grupo de escória de aciaria, intitulados como BOF, KR, PANELA, DRY PIT e BSSF. As referidas amostras foram transportadas de Pecém à Fortaleza em transporte fechado, acondicionadas em sacos de rafia e, posteriormente, foram armazenadas em baldes plásticos no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) da Universidade Federal do Ceará. A Figura 9 abaixo apresenta uma parcela das amostras provenientes da CSP em granulometria original.

Figura 9 – Amostras de escória de aciaria intituladas como: a) BOF; b) DRY PIT; c) KR; d) PANELA; e) BSSF.





Fonte: Autor, 2018.

As amostras foram quarteadas e, posteriormente, identificadas, para em seguida realizar-se o processo de secagem em estufa, até constância de massa, em temperatura de 105 °C (± 5), para caracterização dos agregados reciclados.

3.2.2 Segunda etapa – Caracterização das amostras

As escórias intituladas como BOF, DRY PIT, KR e PANELA foram caracterizadas de acordo com as suas dimensões originais, ou seja, conforme coletadas, apresentando dimensão máxima característica igual a 50 mm. Já a escória BSSF foi caracterizada como agregado miúdo, com DMC de 1,18 mm, tendo em vista a representatividade desta fração, em detrimento da pequena quantidade de material graúdo.

Foram realizados os ensaios listados na Tabela 3 visando caracterizar as amostras em suas propriedades físicas, químicas e mineralógicas.

Tabela 3 – Ensaio realizados para caracterização das cinco escórias.

ENSAIOS REALIZADOS	NORMAS	LOCAL DO ENSAIO
Caracterização física		
Granulometria	ABNT NBR NM 248:2003	LMCC
Material pulverulento	ABNT NBR NM 46:2003	LMCC
Massa específica	ABNT NBR NM 52:2009 (miúdo)	LMCC
	ABNT NBR NM 53:2009 (graúdo)	
Absorção	ABNT NBR NM 30:2001 (miúdo)	LMCC
	ABNT NBR NM 53:2009 (graúdo)	
Reatividade Álcali-Agregado	ABNT NBR 15.577:2018	LMCC
Caracterização química		
Fluorescência de Raios X	-	LRX
Caracterização mineralógica		
Difração de Raios X	-	LRX

Legenda: LMCC: Laboratório de Materiais de Construção Civil; LRX: Laboratório de Raios-X.

Fonte: Autor, 2018.

3.2.3 Terceira etapa – Aplicação da escória BSSF em substituição parcial (blend) ao agregado miúdo natural em argamassa mista

Foram produzidas argamassas mistas no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC), sendo as mesmas misturadas de forma mecânica através da argamassadeira apresentada na Figura 10, evitando assim a formação de bolhas de ar.

Figura 10 – Equipamento utilizado para execução de argamassas mistas.



Fonte: Autor, 2018.

Visando a verificação da viabilidade técnica da escória de aciaria BSSF como agregado miúdo em argamassa mista para revestimento foram executados os ensaios apresentados na Tabela 4, sendo os resultados obtidos comparados estatisticamente através da análise de variância (ANOVA) apresentando 95% de confiabilidade.

Tabela 4 – Ensaios executados segundo normas padrões.

ENSAIOS NO ESTADO FRESCO	
Índice de consistência	ABNT NBR 13276:2016
Densidade de massa	ABNT NBR 13278:2005
Teor de ar incorporado	ABNT NBR 13278:2005
ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO	
Resistência à compressão axial	ABNT NBR 13279:2005
Resistência à tração na flexão	ABNT NBR 13279:2005
Resistência de aderência à tração	ABNT NBR 13528:2010

Fonte: Autor, 2018.

3.2.3.1 Índice de consistência

Foram averiguadas as características de trabalhabilidade da argamassa mista em estudo através da determinação do índice de consistência segundo a NBR 13276 (ABNT, 2016), onde foram obtidos os fatores água/cimento para cada traço de substituição avaliado. A

preparação de cada argamassa fresca utilizada neste ensaio se deu conforme NBR 16541 (ABNT, 2016).

3.2.3.2 Densidade de massa e teor de ar incorporado

Essas propriedades foram obtidas segundo a NBR 13278 (ABNT, 2005), a qual, para determinação do teor de ar incorporado, faz-se necessário o valor da densidade de massa teórica, obtido através da relação entre a massa seca e a densidade de massa de cada componente de acordo com a NBR 16605 (ABNT, 2017). A Figura 11 apresenta o material utilizado neste ensaio.

Figura 11 – Material para determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado.

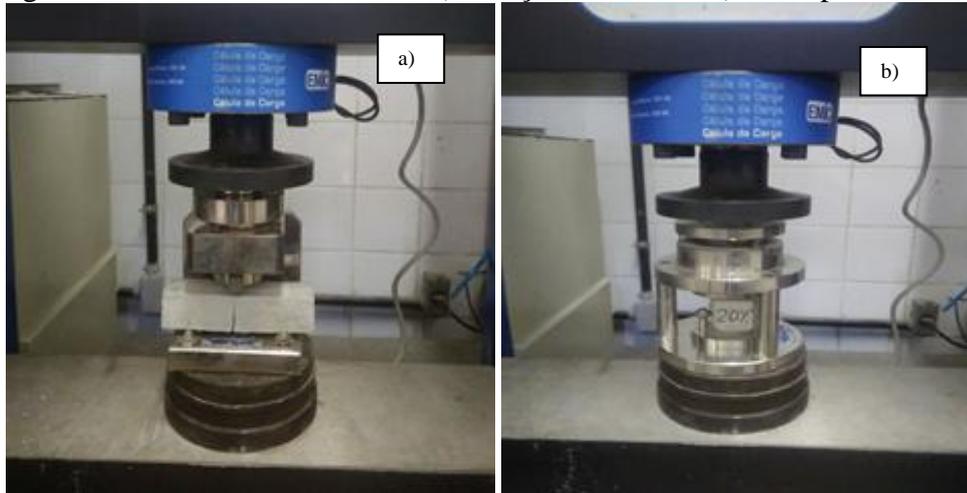


Fonte: Autor, 2018.

3.2.3.3 Resistência à tração na flexão e resistência à compressão axial

Foram adotados os critérios indicados na NBR 13279 (ABNT, 2005) para a determinação das resistências à tração na flexão e à compressão axial, a qual a Figura 12 apresenta a execução dos referidos ensaios.

Figura 12 – Ensaio de resistência a) à tração na flexão; b) à compressão axial.



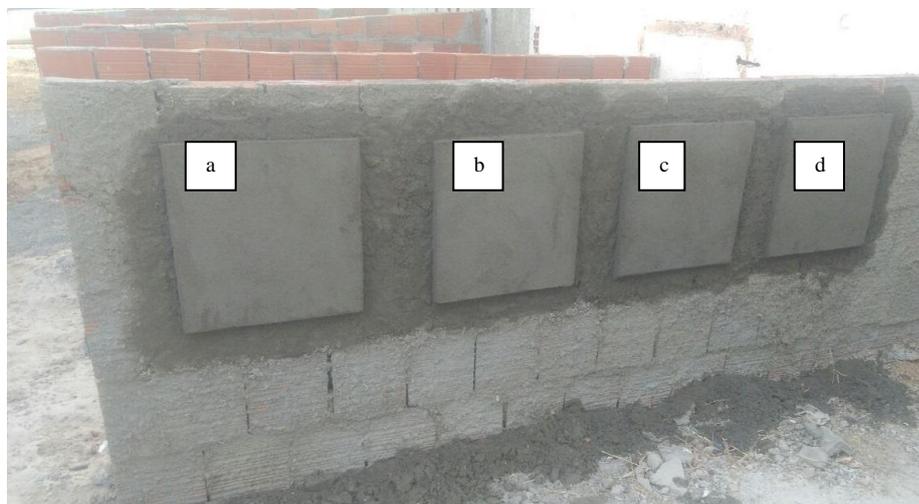
Fonte: Autor, 2018.

3.2.3.4 Resistência de aderência à tração

A argamassa em estudo foi realizada como revestimento de camada única, composto por emboço e tendo o acabamento de superfície chapiscado, de acordo com as especificações atribuídas na norma NBR 13749 (ABNT, 2013). Utilizou-se espessura de 20 mm, atendendo aos limites estabelecidos para execução de revestimento em paredes internas (espessura de 5 a 20 mm) e externas (espessura de 20 a 30 mm) segundo a referida norma.

A determinação da resistência de aderência à tração foi obtida através do seguimento às especificações apresentadas na norma NBR 13528 (ABNT, 2010), onde foram executados quatro painéis nas dimensões 50x50x2cm sobre alvenaria de vedação como substrato à aplicação da argamassa analisada. Salienta-se que foram ensaiados 12 corpos de prova por traço em estudo, por tanto totalizando 48 amostras, distribuídas de forma aleatória e com espaçamento mínimo de 50 mm das extremidades. A Figura 13 a seguir apresenta a distribuição dos painéis executados em parede de alvenaria situada na Universidade Federal do Ceará.

Figura 13 – Painéis executados para o ensaio de resistência de aderência à tração: a) Traço de referência; b) Traço com 10% de escória; c) Traço com 20% de escória; d) Traço com 30% de escória.



Fonte: Autor, 2018.

Com o objetivo de simular a aplicação como revestimento externo, os painéis ensaiados foram dispostos ao ambiente, sujeitos às intempéries naturais, tais como sol intenso, ventos e chuva. Aos 28 dias, foi mensurado o teor de umidade, através da norma NBR 13528 (ABNT, 2010), e a permeabilidade em cada painel, conforme o Método do Cachimbo, desenvolvido pelo *Centre Scientifique et Technique de la Construction (CSTC)*.

Para este, foram executadas duas amostras por painel sobre o revestimento de argamassa, onde o cachimbo de vidro foi vedado e fixado no painel avaliado, posteriormente encheu-se o mesmo com água potável até a referência de nível zero, onde foram efetuadas leituras ao nível da água, em cm^3 , a cada 5 minutos durante o intervalo total de 15 minutos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção é dividida em duas macro etapas, sendo primeiramente apresentados e discutidos os resultados obtidos pela caracterização física, química e mineralógica das escórias BOF, DRY PIT, KR, PANELA E BSSF, para posteriormente serem explanados os resultados da aplicação da escória BSSF em argamassas mistas, avaliando-se a trabalhabilidade e a resistência das mesmas, comparando as argamassas com teores de substituição à argamassa de referência.

4.1 Caracterização das amostras

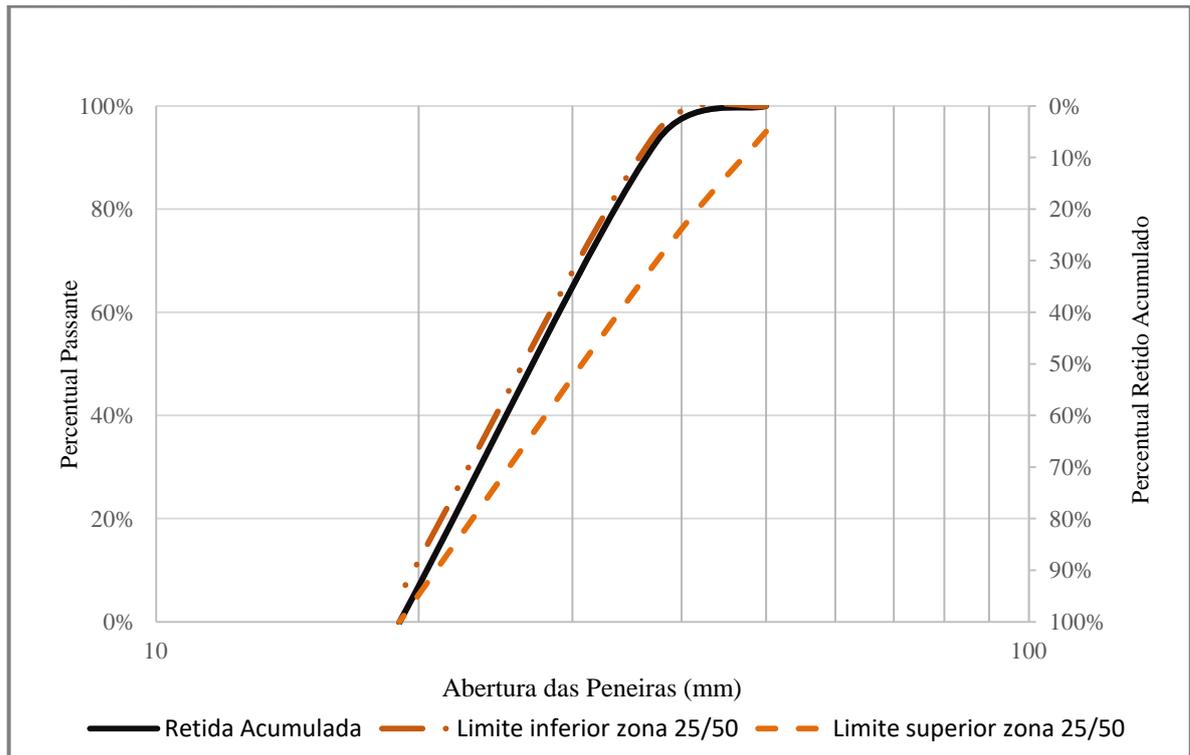
4.1.1 Caracterização física

Para a caracterização das propriedades físicas das cinco escórias em estudo foram realizados os ensaios de Granulometria, Teor de material pulverulento, Massa específica, Abrasão e Reatividade Álcali-agregado, conforme explanado abaixo.

4.1.1.1 Análise granulométrica

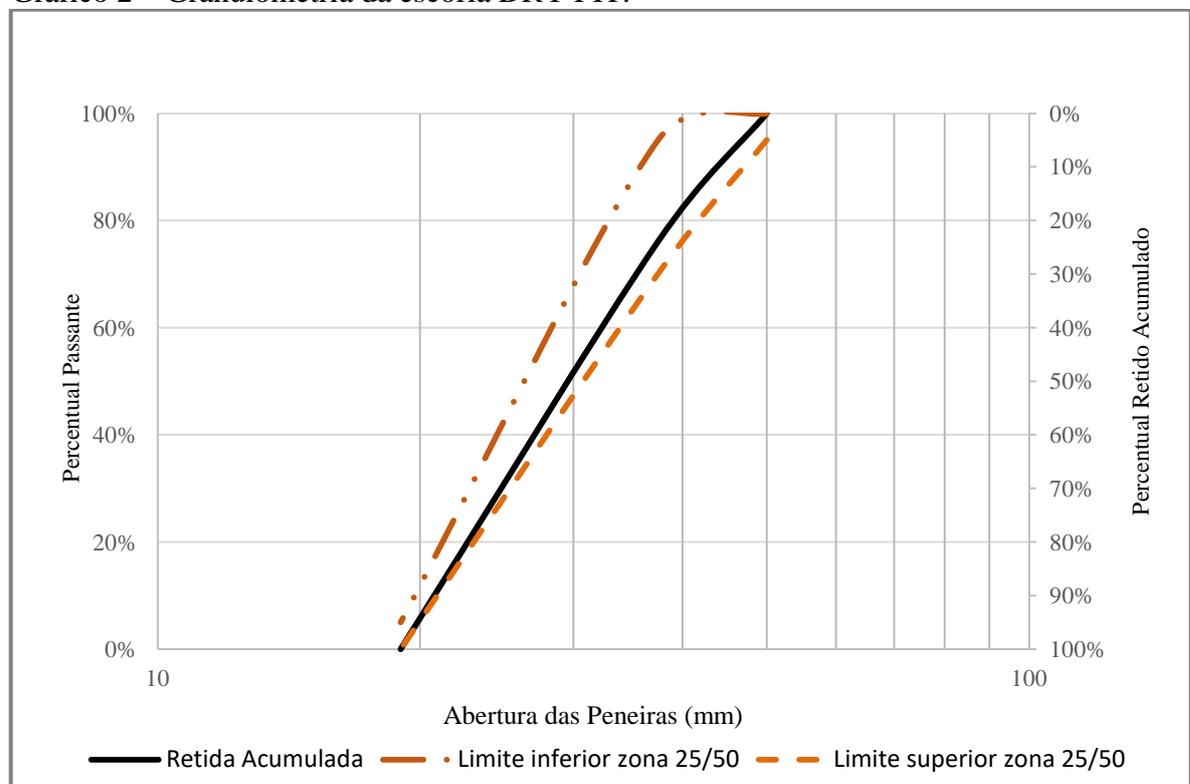
Através do ensaio de granulometria dos agregados siderúrgicos foram obtidos os Gráficos 1 a 5, os quais apresentam a curva granulométrica das escórias BOF, DRY PIT, KR, PANELA e BSSF, respectivamente, salientando-se que as quatro primeiras apresentam dimensões equivalentes a agregado graúdo, enquanto a escória BSSF apresenta dimensão correspondente a agregado miúdo.

Gráfico 1 – Granulometria da escória BOF.



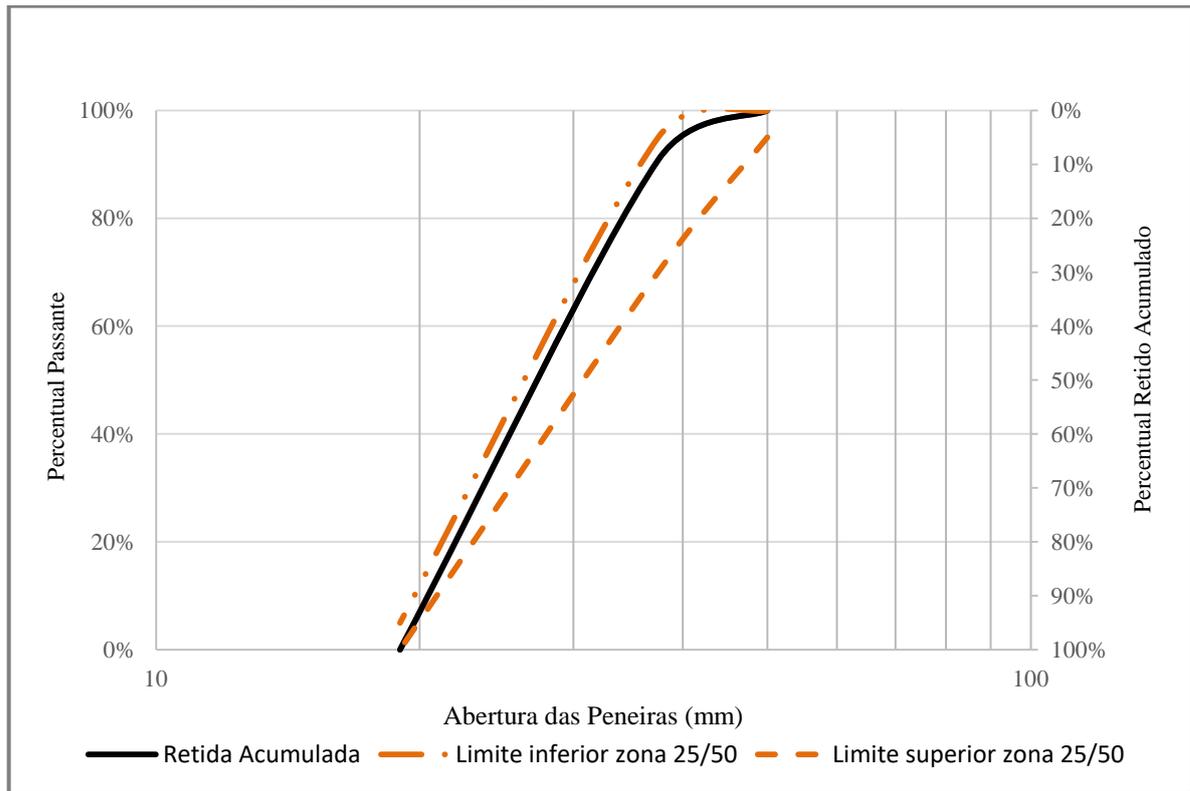
Fonte: Autor, 2018.

Gráfico 2 – Granulometria da escória DRY PIT.



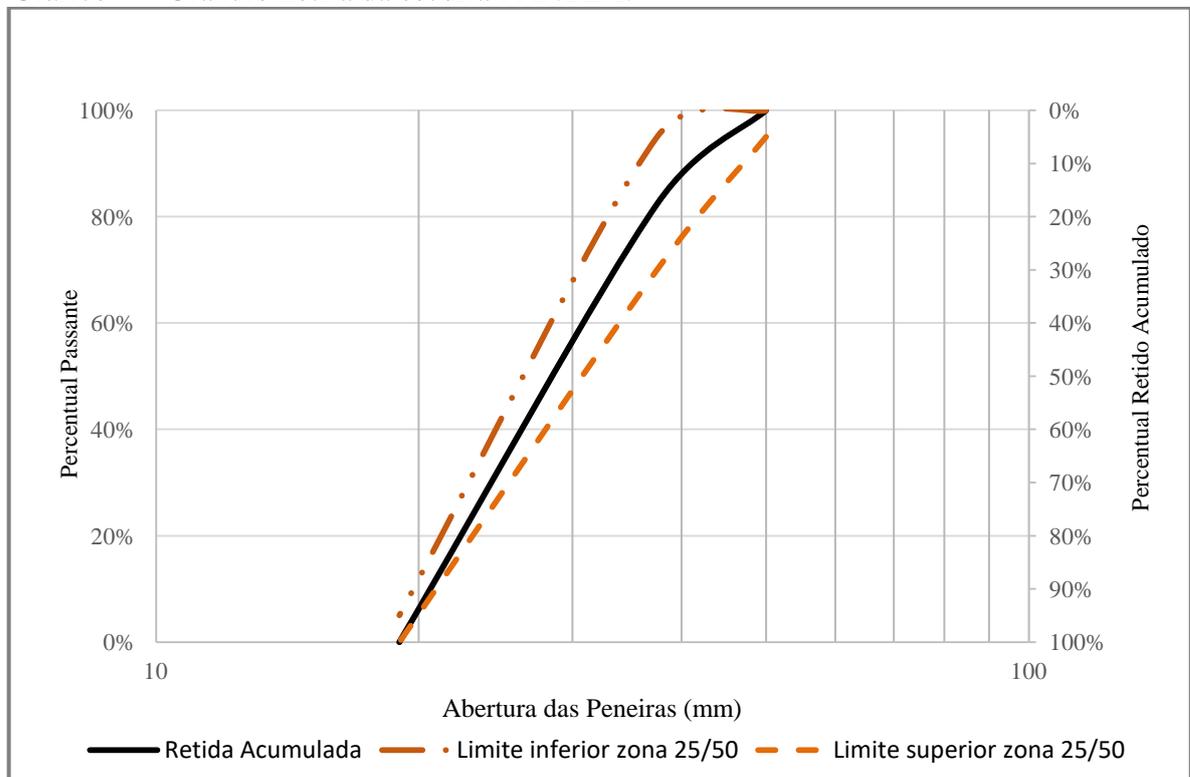
Fonte: Autor, 2018.

Gráfico 3 – Granulometria da escória KR.



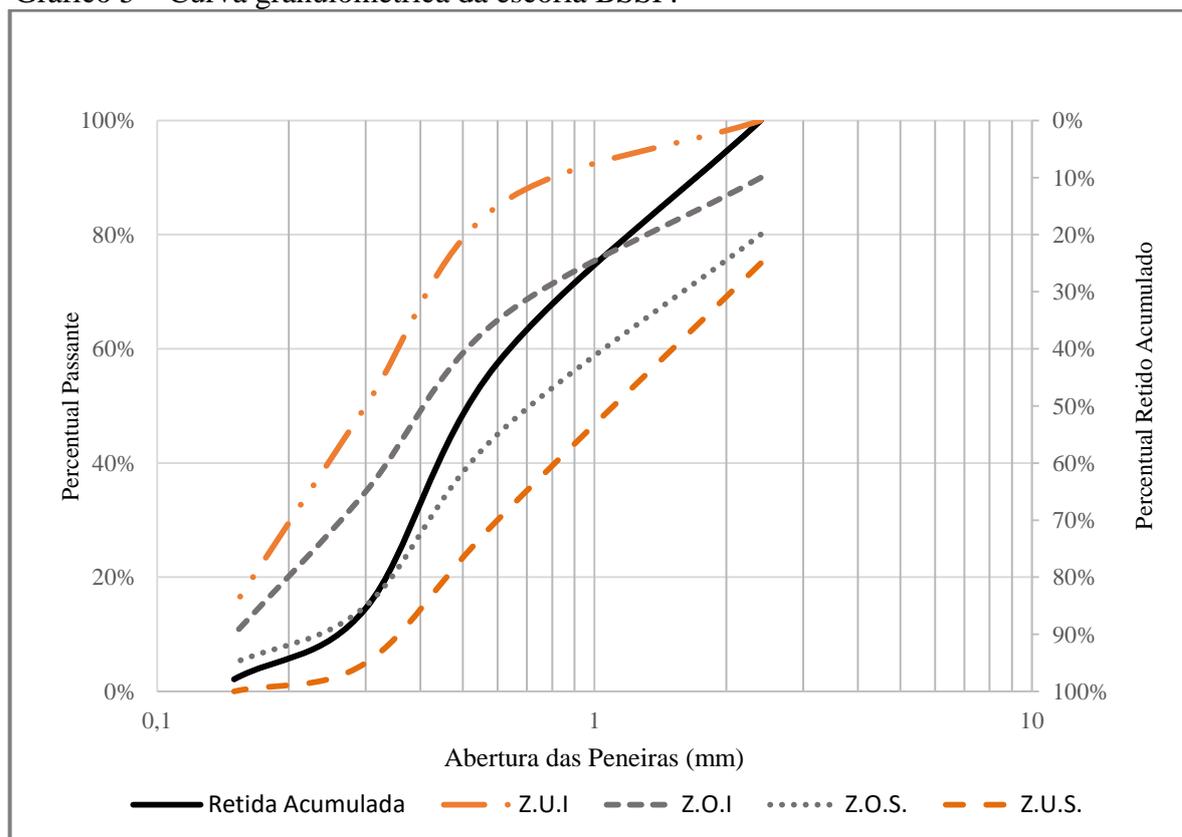
Fonte: Autor, 2018.

Gráfico 4 – Granulometria da escória PANELA.



Fonte: Autor, 2018.

Gráfico 5 – Curva granulométrica da escória BSSF.



Legenda: Z.U.I: Zona Útil Inferior; Z.O.I: Zona Ótima Inferior; ; Z.U.S: Zona Útil Superior; Z.O.S: Zona Ótima Superior;
 Fonte: Autor, 2018.

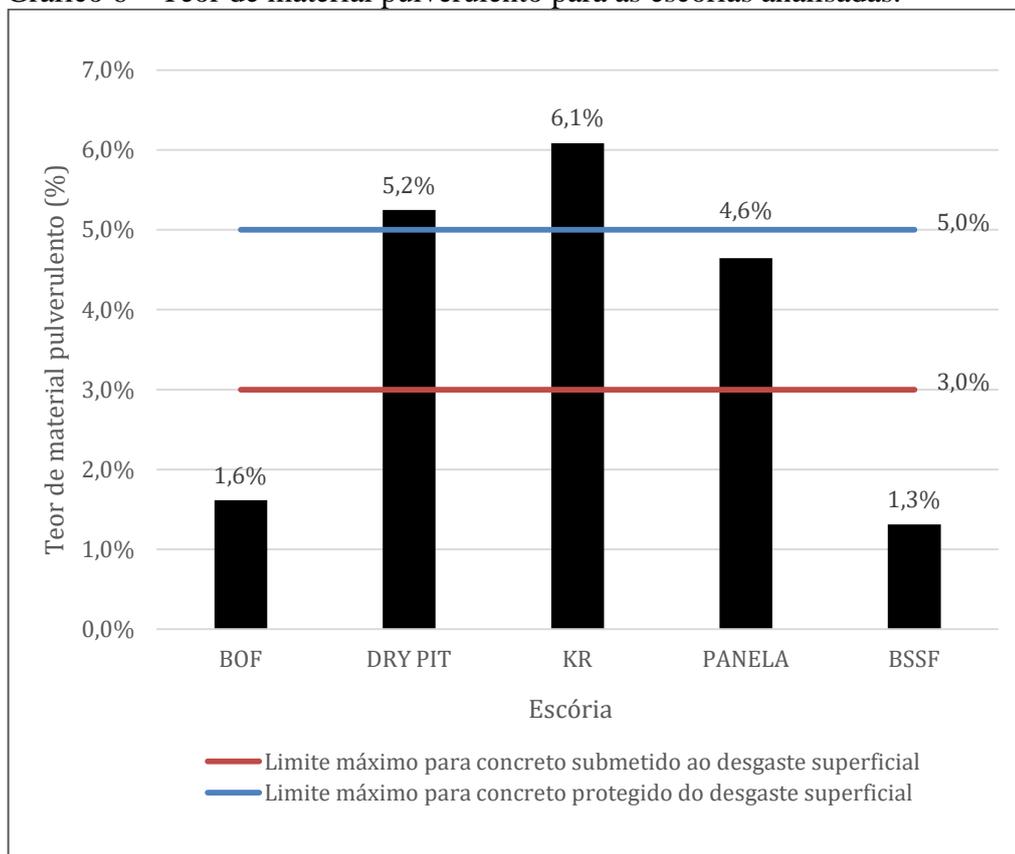
Nos gráficos apresentados observa-se que as curvas granulométricas das escórias BOF, DRY PIT, KR e PANELA encontram-se no intervalo estabelecido pela norma NBR 7211 (ABNT, 2009), a qual define os limites inferiores e superiores para a composição granulométrica do agregado graúdo segundo a zona específica do material, sendo para tais escórias de aciaria indicada a zona 25/50, tendo em vista a máxima dimensão dos agregados. Assim, através da análise granulométrica, foi verificado que a dimensão máxima característica (DMC) dos agregados equivale a 50 mm e o módulo de finura varia entre as escórias, sendo obtidos valores de 10,70 (BOF); 12,40 (DRY PIT); 10,92 (KR) e 11,76 (PANELA). Também, a escória BSSF encontra-se entre os limites da norma supracitada para agregado miúdo, onde são definidas as zonas: utilizável inferior, ótima inferior, ótima superior e utilizável superior. Observa-se que a curva granulométrica da escória BSSF encontra-se, em sua maioria, entre os limites da zona ótima, indicando módulo de finura entre 2,20 e 2,90; equivalente ao obtido, sendo este módulo de finura igual a 2,30, e a dimensão máxima característica dessa escória equivalente a 1,18 mm. Salienta-se que a curva granulométrica referente à escória BSSF foi ajustada para a curva do agregado natural, viabilizando a

substituição em argamassa.

4.1.1.2 Teor de material pulverulento

Segundo estabelecido pela norma NBR NM 46 (ABNT, 2003), determinou-se a quantidade de material passante na malha da peneira de 75 mm através de lavagem dos agregados, sendo obtido o Gráfico 6. Neste foram estabelecidos os limites máximos designados pela NBR 7211 (ABNT, 2009) para a porcentagem de material pulverulento em concretos submetidos ao desgaste superficial (3%) e em concretos protegidos do desgaste superficial (5%). No entanto, é válido ressaltar que, por ausência de norma técnica que avalie os limites de material pulverulento para agregado miúdo em argamassa, foi utilizada como base a norma NBR 7211 (ABNT, 2009).

Gráfico 6 – Teor de material pulverulento para as escórias analisadas.



Fonte: Autor, 2018.

Observa-se que as escórias DRY PIT, KR e PANELA apresentam valores de material pulverulento acima do limite estabelecido para concreto submetido ao desgaste superficial, também as escórias DRY PIT e KR superaram o limite para concreto protegido do desgaste.

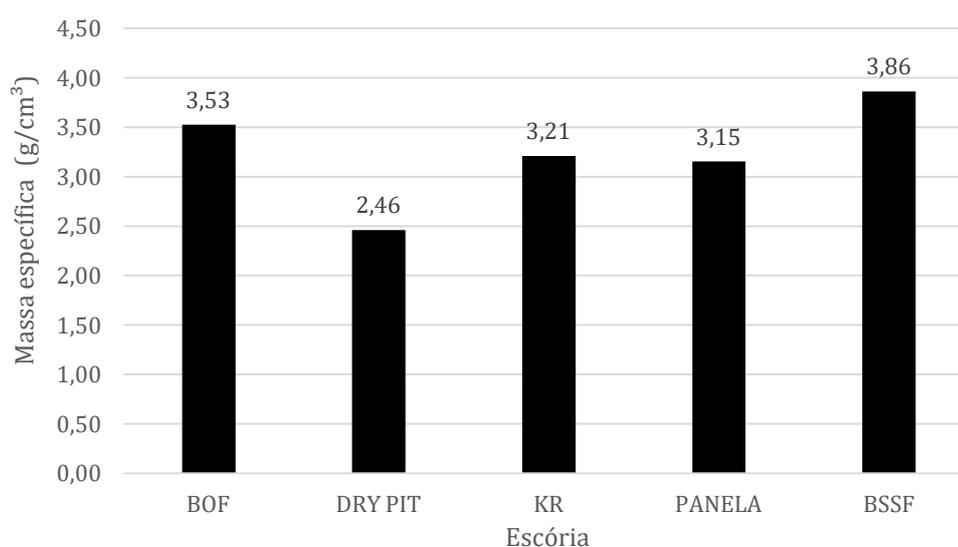
Ainda, salienta-se que o teor de material pulverulento deve ser o menor possível, tendo em vista que sua presença aumenta significativamente a superfície específica dos grãos, requerendo, assim, maior quantidade de água no traço, o que ocasiona correções no consumo de cimento, para não mudar a relação água/cimento, ou resistências menores devido à maior porosidade da argamassa. Portanto, as escórias indicadas para aplicação na construção civil, segundo esta propriedade, são a BOF e a BSSF em razão das mesmas apresentarem porcentagens de material pulverulento abaixo do limite estabelecido.

4.1.1.3 Massa específica e Absorção

Faz-se essencial a determinação da massa específica das escórias, visto que através desta propriedade pode-se calcular o consumo de agregado reciclado na produção de misturas, tais como argamassa e concreto; bem como é fundamental a análise da absorção de água destes agregados identificando a estrutura porosa de seus grãos.

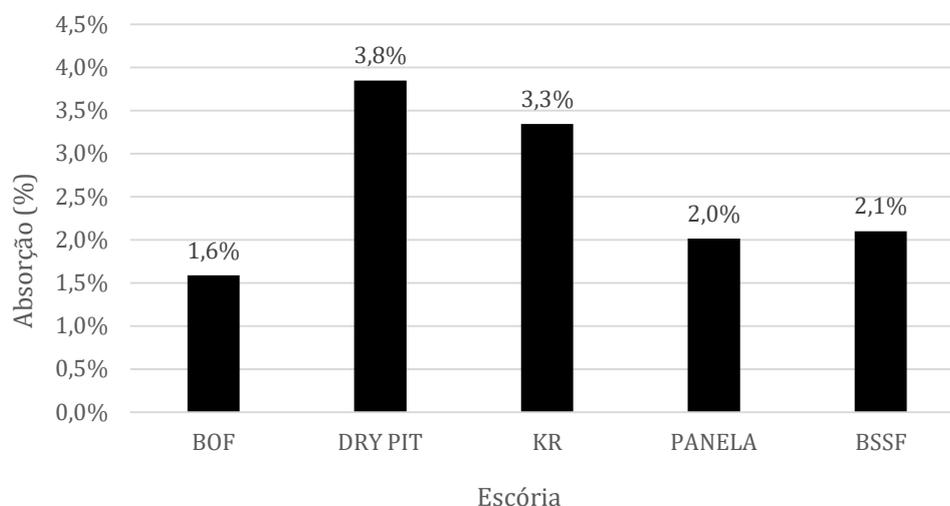
A partir das normas NBR NM 53 (ABNT, 2009), para agregado graúdo, e NBR NM 52 (ABNT, 2009), para agregado miúdo, foram obtidos os Gráficos 7 e 8, onde verificam-se os valores de massa específica e absorção, respectivamente, para cada escória avaliada.

Gráfico 7 – Determinação da massa específica das escórias avaliadas.



Fonte: Autor, 2018.

Gráfico 8 – Determinação de absorção de água das escórias avaliadas.



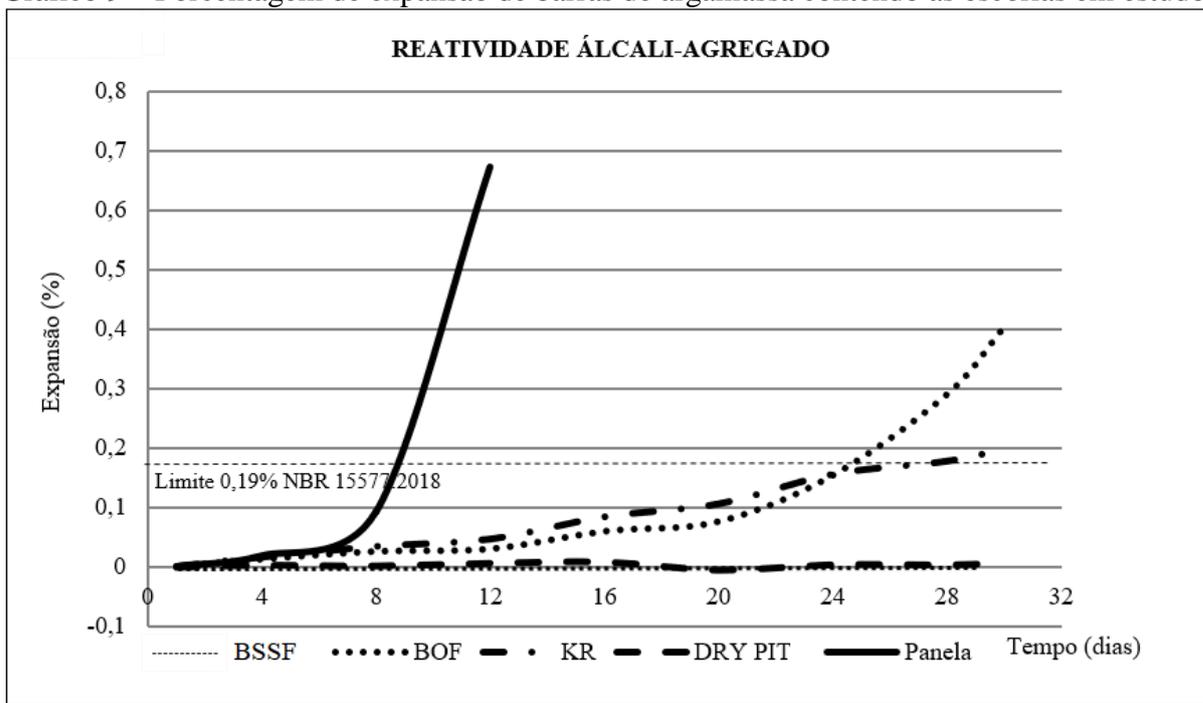
Fonte: Autor, 2018.

Observa-se que, dentre as escórias avaliadas, aquela que apresenta maior massa específica é a BSSF, estando entre as escórias com menor teor de absorção (2,1%). Conforme Carrijo (2005), a propriedade de absorção de água é inversamente proporcional à massa específica do agregado, assim à medida que esta reduz, a absorção aumenta devido à maior quantidade de pasta aderida, sendo esta assertiva verificada, também, para a escória DRY PIT.

4.1.1.4 Reação Álcali Agregado (RAA)

Obteve-se o Gráfico 9 através da norma NBR 15.577-4 (ABNT, 2018), o qual apresenta a porcentagem de expansão de barras de argamassa contendo os agregados reciclados avaliados em 30 dias, portanto pelo método acelerado. Salienta-se que, após o 12º dia de análise, a escória PANELA apresentou expansibilidade maior que o limite de leitura do equipamento.

Gráfico 9 – Porcentagem de expansão de barras de argamassa contendo as escórias em estudo.



Fonte: Autor, 2018.

Verificou-se que as escórias KR, BOF e PANELA, em ordem crescente, apresentaram valores elevados de expansão, acima do limite estabelecido em norma, a qual preconiza a porcentagem máxima de 0,19% aos 30 dias. Segundo a norma NBR 15.577-1 (ABNT, 2018), os agregados reciclados DRY PIT e BSSF são classificados como potencialmente inócuos grau R0, apresentando reatividade desprezível para os elementos estruturais; as escórias BOF e KR são potencialmente reativas grau R1, havendo a possibilidade de serem adotadas medidas de mitigação que evitem os riscos associados a reatividade dos agregados; e, por fim, tem-se que a PANELA é um material potencialmente reativo grau R3, o mais alto grau de reatividade, indicando risco emitente de danos ambientais, econômicos e de segurança, devendo ser evitada sua utilização em argamassas e concretos.

4.1.2 Caracterização química

Os resultados da Fluorescência de Raios-X (FRX) estão apresentados na Tabela 5, a qual indica a composição química em porcentagem de massa de óxidos, salientando-se que os espaços não preenchidos indicam inexistência do composto para o agregado reciclado em questão. O Gráfico 10 sintetiza tais dados, indicando os compostos mais representativos em quantidade para cada escória.

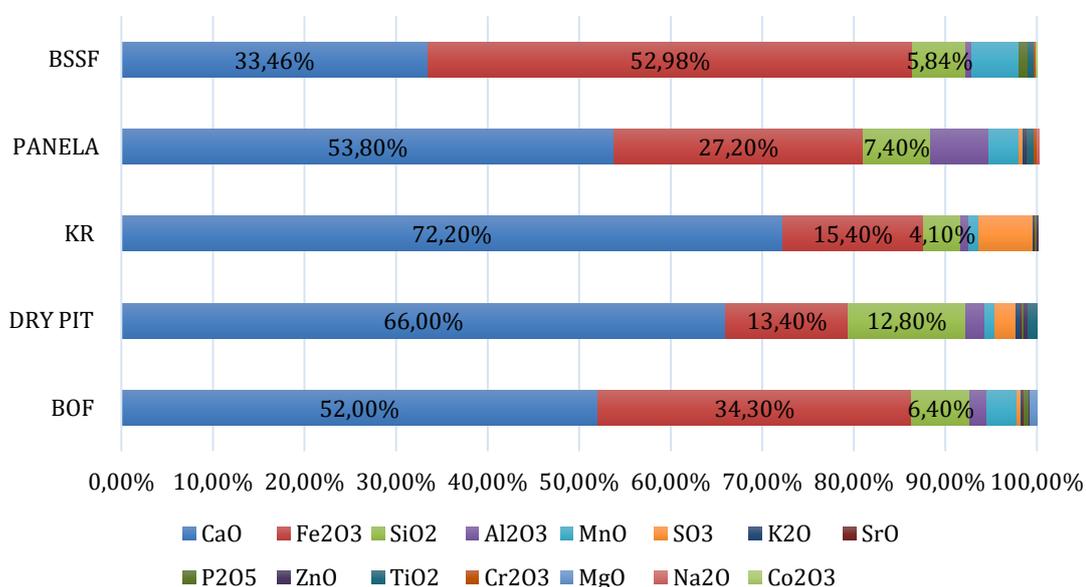
Tabela 5 – Composição química obtida através da Fluorescência de Raios-X para óxidos.

Composto	BOF	DRY PIT	KR	PANELA	BSSF
CaO	52,00%	66,00%	72,20%	53,80%	33,46%
Fe ₂ O ₃	34,30%	13,40%	15,40%	27,20%	52,98%
SiO ₂	6,40%	12,80%	4,10%	7,40%	5,84%
Al ₂ O ₃	1,80%	2,10%	0,90%	6,40%	0,63%
MnO	3,30%	1,10%	1,10%	3,20%	5,09%
SO ₃	0,50%	2,30%	5,90%	0,50%	
K ₂ O	0,20%	0,60%	0,10%	0,30%	0,04%
SrO	0,10%	0,10%	0,10%	0,10%	
P ₂ O ₅	0,50%	0,20%	0,20%		1,01%
ZnO	0,20%	0,40%	0,10%		
TiO ₂		1,00%		0,80%	0,63%
Cr ₂ O ₃				0,30%	0,21%
MgO	0,70%				
Na ₂ O				0,20%	
Co ₂ O ₃					0,12%

Fonte: Autor, 2018.

Gráfico 10 – Porcentagem de óxidos presentes nos agregados siderúrgicos avaliados.

Composição química das escórias



Fonte: Autor, 2018.

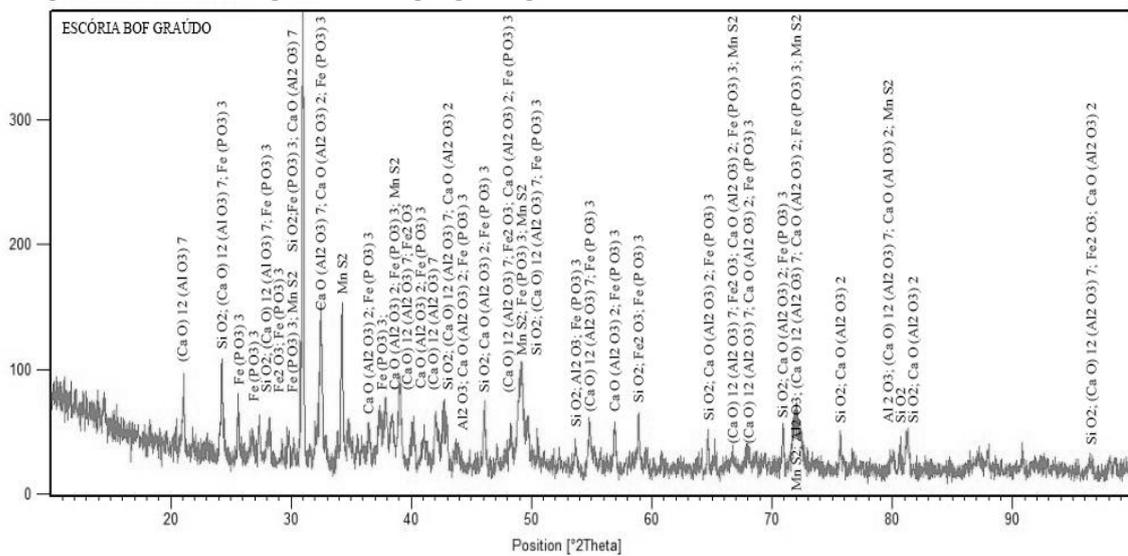
Observa-se que as composições das escórias BOF, DRY PIT, KR e PANELA são, predominantemente, constituídas pelo óxido de cálcio (CaO), fator justificado devido à incorporação de cal e fundentes no processo de sopro combinado de oxigênio e adições para produção do aço em uma aciaria LD. Foi obtida a hematita (Fe₂O₃) como representante

majoritária na composição química da escória BSSF, apresentando quantidade secundária para os demais agregados reciclados. Tem-se, ainda, o quartzo (SiO_2) com porcentagens variando entre 4,10% a 12,80%; apresentando menor valor para a escória KR e maior quantidade para DRY PIT. Devido às porcentagens dos demais compostos serem incipientes, as mesmas não foram indicadas no Gráfico 10.

4.1.3 Caracterização mineralógica

Durante a análise mineralógica, é primordial a identificação dos componentes dos agregados em estudo, assim, foi realizado o ensaio de Difração de Raios-X (DRX) pelo método de refinamento de Rietveld, sendo identificadas fases cristalinas e fases amorfas. Os resultados obtidos foram tratados através do software Xpert Highscore Plus e as Figuras 14 a 18 apresentam os difratogramas identificados para cada escória em estudo.

Figura 14 – Difratograma do agregado graúdo reciclado BOF.



Fonte: Autor, 2018.

materiais pulverulentos conforme as normas técnicas brasileiras. Os resultados obtidos da caracterização da areia e do agregado siderúrgico estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Caracterização física da areia e da escória BSSF para aplicação em argamassa mista.

PROPRIEDADES	AREIA	ESCÓRIA BSSF
Massa específica (g/cm ³)	2,62	3,86
Massa unitária (g/cm ³)	1,61	2,08
Absorção (%)	0,4	2,1
Módulo de finura	2,26	2,26
Dimensão máxima característica (mm)	1,18	1,18
Teor de material pulverulento (%)	0,5	1,3

Fonte: Autor, 2018.

Sequencialmente, têm-se os resultados referentes às propriedades mecânicas e de trabalhabilidade das argamassas mistas analisadas, sendo os valores de referência àqueles atribuídos à substituição de 0%.

4.2.1 *Estado fresco*

Algumas características que indicam a qualidade final da argamassa podem ser averiguadas antes do seu processo de endurecimento, portanto durante o estado fresco, tais como o índice de consistência, o teor de ar incorporado e a densidade de massa. Nesse estado busca-se adequada trabalhabilidade da argamassa, onde a mesma deve ser aplicada com facilidade, preenchendo as reentrâncias do substrato e mantendo-se plástica durante todo o período de aplicação. Essas características para o estado fresco devem ser analisadas, pois os resultados isolados de resistência à compressão axial e à tração na flexão não são suficientes para garantir um bom desempenho da argamassa, devendo ser verificados os fatores em conjunto.

4.2.1.1 *Índice de consistência*

Por tentativa e erro, foi encontrado o fator água/cimento para cada porcentagem de substituição de escoria, portanto para cada traço avaliado, onde o parâmetro limitante trata-se do espalhamento médio de 260±5 mm conforme a norma NBR 13276 (ABNT, 2016). A Tabela 7 a seguir mostra o consumo de cada material seco para 1 m³ de argamassa, bem como o consumo de água.

Tabela 7 – Consumo de materiais, incluso água, referente à 1m³ de argamassa.

Teor de escória	Cimento (kg/m³)	Cal (kg/m³)	Areia (kg/m³)	Escória (kg/m³)	Água (l/m³)	Fator a/c
0%	292,90	117,16	1396,10	0,00	325,12	1,11
10%	292,05	116,82	1252,82	205,29	327,09	1,12
20%	285,38	114,15	1088,19	401,20	342,46	1,20
30%	283,76	113,50	946,77	598,39	346,19	1,22

Fonte: Autor, 2018.

Assim, foram obtidos os fatores água/cimento para cada traço, onde se identifica que quanto maior a substituição de agregado miúdo natural por escória BSSF, maior o consumo de água, tendo em vista a elevada absorção do agregado siderúrgico em comparação à areia.

4.2.1.2 Teor de ar incorporado e Densidade de massa

Os resultados obtidos no ensaio de teor de ar incorporado e densidade de massa no estado fresco podem ser averiguados na Tabela 8 adiante. Salienta-se que o volume do recipiente cilíndrico utilizado foi de 450 cm³ e a massa do recipiente vazio equivalente a 618 g.

Tabela 8 – Valores obtidos para o teor de ar incorporado e densidade de massa no estado fresco.

TEOR DE ESCÓRIA (%)	MASSA CILINDRO + ARGAMASSA (g)	DENSIDADE DE MASSA (Kg/m³)	DENSIDADE TEÓRICA (g/cm³)	TEOR DE AR INCORPORADO (%)
0%	1530,87	2029	2,131	5%
10%	1560,49	2094	2,194	5%
20%	1582,48	2143	2,231	4%
30%	1605,36	2194	2,288	4%

Fonte: Autor, 2018.

Assim, observa-se que quanto maior o teor de substituição de escória na argamassa mista, maior a densidade de massa, fator este justificável, tendo em vista que a massa específica da escória avaliada é 47% maior que a massa específica do agregado miúdo natural. Já em relação ao teor de ar incorporado, verificou-se que os teores de 20% e 30% apresentaram menor índice para essa propriedade em comparação aos valores obtidos para a argamassa de referência, bem como para argamassa com 10% de escória.

Foi realizada a análise estatística através do Software Statistica 7.0, sendo constatado que não há diferença significativa entre os grupos analisados, tendo como variável dependente o teor de ar incorporado e como variável preditora tem-se o teor de substituição de

escória BSSF. Salienta-se, ainda, que foi realizado o teste de Fisher para comparação múltipla das médias, confirmando que para os quatro traços analisados não ocorrem diferenças para esta propriedade.

4.2.2 Estado endurecido

As propriedades mecânicas da argamassa no estado endurecido necessitam ser averiguadas a fim de garantir um bom desempenho ao longo da vida útil das mesmas, verificando-se a resistência à compressão axial, à tração na flexão e à aderência ao substrato.

4.2.2.1 Resistência à tração na flexão

Foram avaliados três corpos de provas prismáticos em cada idade, aos 7 e 28 dias, para execução deste ensaio, conforme preconiza a NBR 13279 (ABNT, 2005), onde os valores obtidos para cada teor de escória BSSF encontram-se na Tabela 9.

Tabela 9 – Valores obtidos para a resistência à tração na flexão aos 7 e 28 dias.

TEOR DE ESCÓRIA	IDADE DE CURA (DIAS)	RESISTÊNCIA MÉDIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO (MPa)	DESVIO PADRÃO AMOSTRAL
0%	7	3,7	0,8
	28	4,1	1,1
10%	7	4,7	0,3
	28	3,9	0,8
20%	7	3,6	1,2
	28	3,5	0,8
30%	7	3,1	0,5
	28	4,4	1,1

Fonte: Autor, 2018.

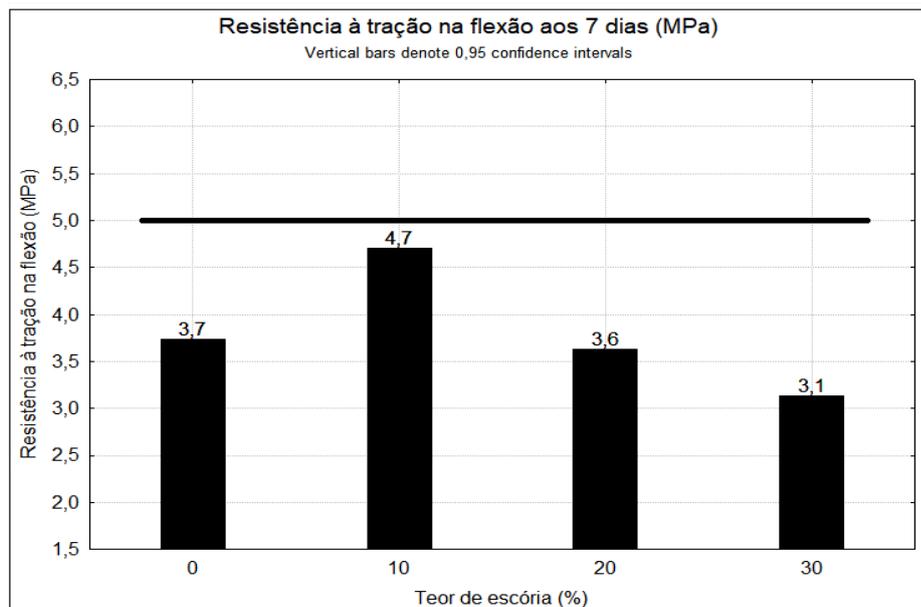
Ainda que se observem valores de resistência à tração na flexão aos 7 dias maiores que os resultados obtidos em 28 dias para os teores de escória de 10% e 20%, salienta-se que a idade das argamassas não influencia a propriedade avaliada, tendo em vista que foi realizada ANOVA entre as idades estudadas e a resistência à tração na flexão para ambas as idades e conferiu-se que a diferença entre os grupos não é significativa segundo os testes de comparação múltipla de médias de Fisher e Tukey.

Novamente, através da análise estatística, averiguou-se que para a idade de 7 e 28 dias, o teor de escória de aciaria BSSF não influencia a propriedade de resistência à tração na flexão, sendo a diferença entre os grupos não significativa segundo o teste de Tukey, conforme indicam os Gráfico 11 e 12, fator este inferido pela barra horizontal acima dos

diferentes grupos. Assim, quando a diferença obtida não é significativa, associam-se os grupos em uma mesma barra horizontal.

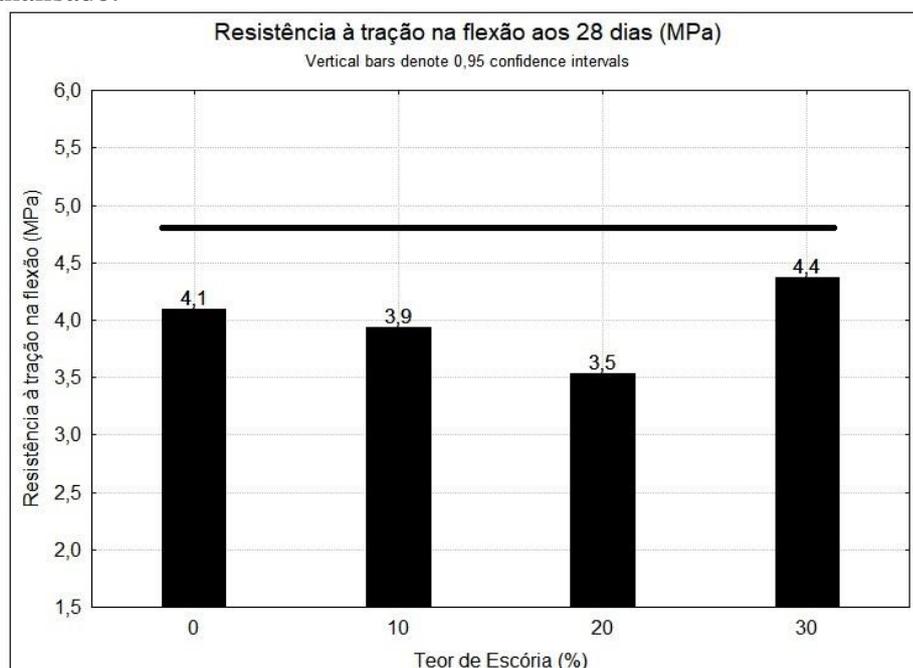
Portanto, para a propriedade avaliada, observa-se que as argamassas mistas com substituição de agregado miúdo natural por escória de aciaria BSSF com porcentagens de 10%, 20% e 30% apresentam comportamento equivalente à argamassa convencional.

Gráfico 11 – Resistência à tração na flexão aos 7 dias para cada traço analisado.



Fonte: Autor, 2018.

Gráfico 12 – Resistência à tração na flexão aos 28 dias para cada traço analisado.



Fonte: Autor, 2018.

4.2.2.2 Resistência à compressão axial

Novamente de acordo com a NBR 13279 (ABNT, 2005), foram analisados seis corpos de provas prismáticos em cada idade, aos 7 e 28 dias, para a verificação da resistência à compressão axial, onde os valores obtidos para cada teor de escória de aciaria encontram-se na Tabela 10.

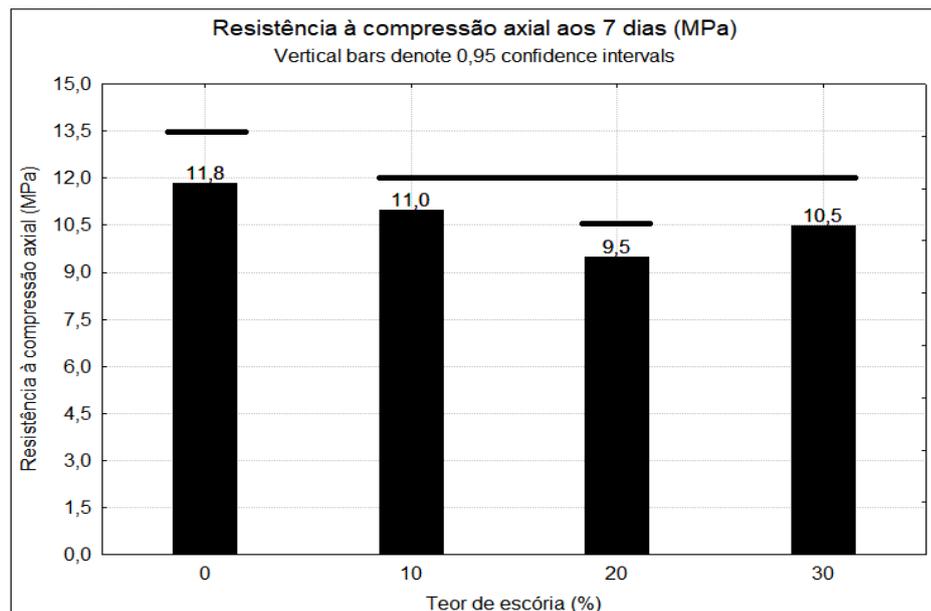
Tabela 10 – Valores médios obtidos para a resistência à compressão axial aos 7 e 28 dias.

TEOR DE ESCÓRIA	IDADE DE CURA (DIAS)	RESISTÊNCIA MÉDIA À COMPRESSÃO AXIAL (MPa)	DESVIO PADRÃO AMOSTRAL
0%	7	11,8	0,5
	28	14,6	0,9
10%	7	11	0,6
	28	13,4	0,5
20%	7	9,5	0,5
	28	12,2	1,2
30%	7	10,5	0,6
	28	12,9	1,2

Fonte: Autor, 2018.

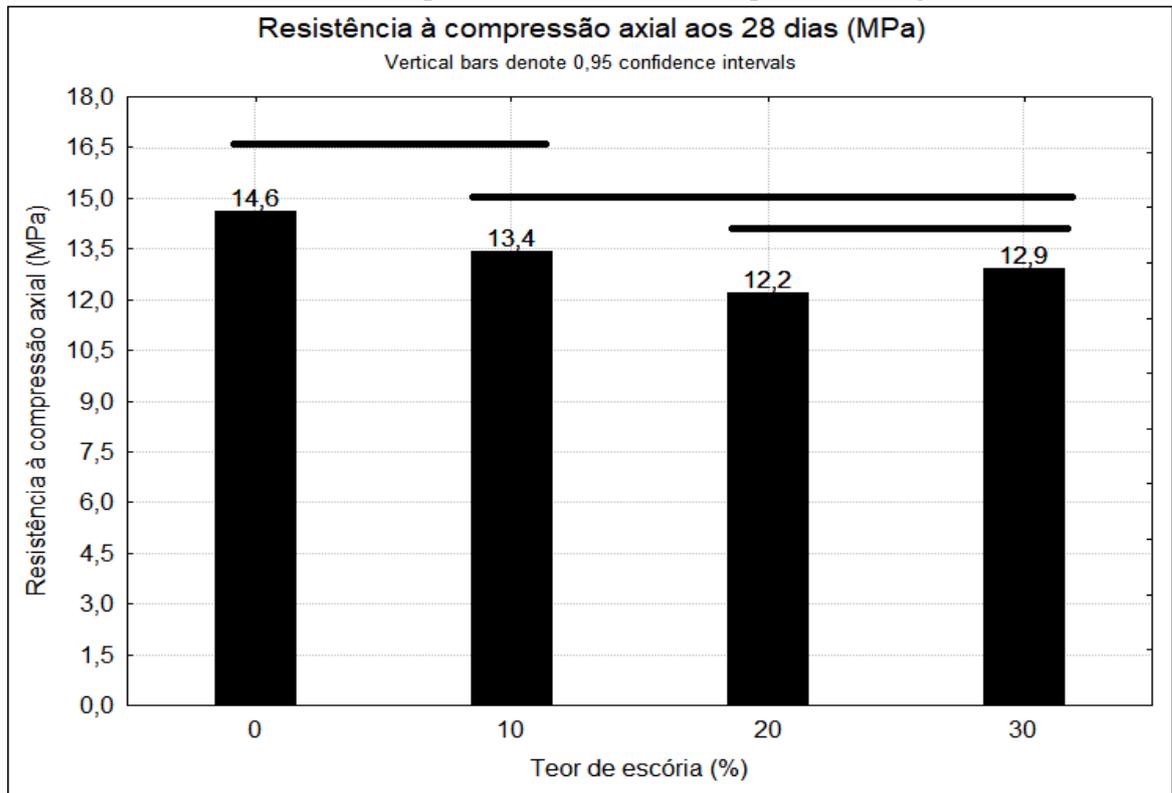
Assim, foi realizada a análise de variância, onde se comparou o teor de escória, como variável explicativa, à resistência à compressão axial, sendo esta a variável resposta. Foi constatada influência quanto ao teor de escória na argamassa para revestimento em ambas as idades avaliadas, havendo ainda diferença significativa entre os grupos conforme apresentado nos Gráficos 13 e 14 abaixo.

Gráfico 13 – Resistência à compressão axial aos 7 dias para cada traço analisado.



Fonte: Autor, 2018.

Gráfico 14 – Resistência à compressão axial aos 28 dias para cada traço analisado.



Fonte: Autor, 2018.

Portanto, conforme resultados apresentados tem-se que as argamassas mistas com 10% e 30% de escória BSSF indicaram diferença não significativa entre si, no entanto para os demais grupos houve diferença significativa na idade de 7 dias. Aos 28 dias, observou-se novamente diferença não significativa entre os grupos de 10% e 30%, bem como entre 0% e 10%; 20% e 30%.

Tem-se, assim, que a argamassa para revestimento com 10% de escória BSSF apresenta equivalência à argamassa mista convencional, ou seja, à argamassa com 0% de agregado siderúrgico, quanto à resistência à compressão axial aos 28 dias de cura ao ar. O traço com teor de escória de 20% não apresentou o mesmo desempenho e sua resistência foi a menor dos grupos avaliados nas duas idades.

4.2.2.3 Resistência de aderência à tração

Os resultados de cada amostra obtidos para o ensaio de resistência de aderência à tração na idade de 28 dias encontram-se no apêndice A, sendo as resistências médias para cada traço com o respectivo desvio padrão apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11 – Valores médios obtidos para a resistência de aderência à tração aos 28 dias.

TEOR DE ESCÓRIA	TENSÃO MÉDIA (MPa)	DESVIO PADRÃO AMOSTRAL (MPa)
0%	0,28	0,10
10%	0,28	0,11
20%	0,27	0,12
30%	0,22	0,08

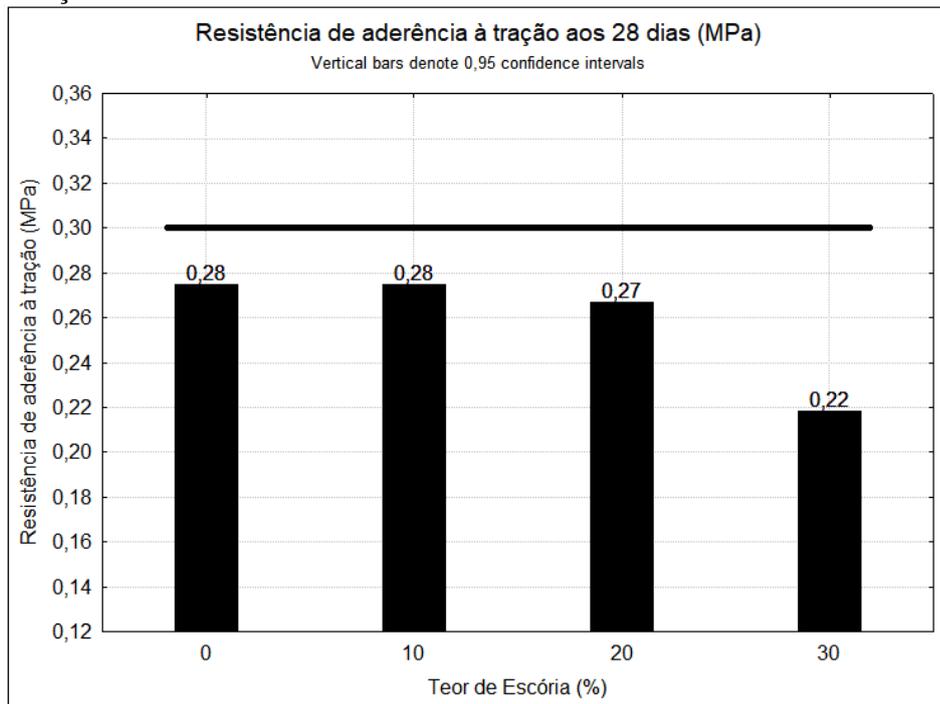
Fonte: Autor, 2018.

Conforme preconiza a NBR 13749 (ABNT, 2013), o revestimento deve ser aceito se de cada doze amostras analisadas, pelo menos oito destas apresentarem valores iguais ou superiores aos indicados, onde a resistência de aderência à tração em emboço ou camada única deve ser maior ou igual a 0,2 MPa para paredes internas com acabamento em pintura e, no mínimo, apresentar valor de resistência equivalente a 0,30 MPa para paredes internas com acabamento cerâmico e paredes externas.

Nos resultados obtidos observou-se que todas as argamassas mistas foram aprovadas, visto que foram obtidas mais de oito amostras com valores acima do estabelecido para o limite de resistência de aderência à tração para paredes internas com acabamento em pintura, ou seja, resistência média superior a 0,20 MPa para todos os traços.

A partir da análise de variância, verificou-se que o aumento do teor do agregado siderúrgico até 30% não leva a uma diminuição significativa nas médias conforme explana o Gráfico 15. Portanto foi identificado que não há influência do teor de escória sobre a propriedade avaliada.

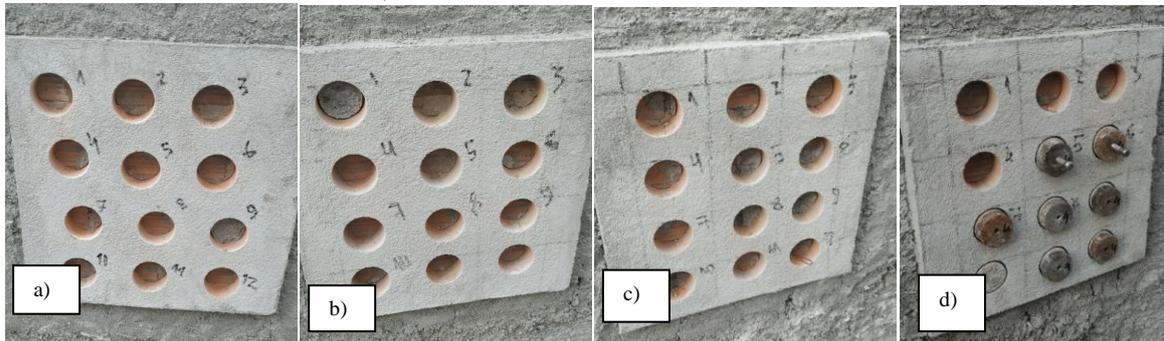
Gráfico 15 – Resistência de aderência à tração aos 28 dias para cada traço analisado.



Fonte: Autor, 2018.

Ainda, para os testes estatísticos de Fisher e Tukey, foi identificada que a diferença entre os valores obtidos não é significativa. Assim, para a resistência de aderência à tração, observou-se que a utilização de escória de aciaria BSSF em argamassa apresenta desempenho similar à argamassa composta por agregado natural. Na Figura 19 constam os painéis, com o revestimento segundo as substituições de 0%, 10%, 20% e 30% de escória BSSF, após o ensaio de aderência à tração aos 28 dias. Ainda, na Figura 20, têm-se as testemunhas obtidas do ensaio, sendo averiguadas as formas de rupturas. Assim, foi constatado em 41 amostras o rompimento na interface chapisco/substrato e em 6 testemunhas, ruptura na argamassa. O apêndice A evidencia as demais informações obtidas neste ensaio.

Figura 19 – Distribuição de testemunhas executados para o ensaio de resistência de aderência à tração aos 28 dias. a) Painel com traço de referência; b) Painel com 10% de escória; c) Painel com 20% de escória; d) Painel com 30% de escória.



Fonte: Autor, 2018.

Figura 20 – Formas de ruptura obtidas no ensaio de resistência de aderência à tração para um sistema de revestimento com chapisco. a) Traço de referência; b) Traço com 10% de escória; c) Traço com 20% de escória; d) Traço com 30% de escória.



Fonte: Autor, 2018.

Também, através da norma NBR 13528 (ABNT, 2010), foi mensurado o teor de umidade dos painéis aos 28 dias de cura, onde foram analisadas duas amostras de cada traço conforme pode ser observado na Tabela 12.

Tabela 12 – Valores obtidos para o teor de umidade em porcentagem de massa para cada painel com revestimento aos 28 dias.

TEOR DE ESCÓRIA	AMOSTRA	MASSA ÚMIDA DO CORPO DE PROVA (g)	MASSA SECA DO CORPO DE PROVA (g)	UMIDADE DO REVEST. (%)	UMIDADE MÉDIA DO REVEST.(%)
0%	1	315,3	314,2	0,3%	0,3%
	2	320,7	319,7	0,3%	
10%	1	317,9	316,6	0,4%	0,4%
	2	324,1	322,7	0,4%	
20%	1	339,3	338,0	0,4%	0,4%
	2	336,2	334,9	0,4%	
30%	1	340,8	339,6	0,3%	0,3%
	2	330,7	329,7	0,3%	

Fonte: Autor, 2018.

Foi realizada, ainda, a ANOVA com os resultados obtidos, onde se constatou que não há influência do percentual de escória sobre a propriedade teor de umidade, assim a diferença existente entre os grupos avaliados não é significativa. Portanto, todos os traços apresentam similaridade quanto ao teor de umidade dos revestimentos, onde se observa que a umidade média é inferior a 1%, garantindo a estanqueidade e durabilidade das alvenarias e de seus revestimentos devido à minimização de ocorrência de manifestações patológicas ocasionadas pela umidade.

Para a análise da permeabilidade do revestimento através do Método do cachimbo na idade de 28 dias, foram avaliados dois pontos em cada painel, totalizando 8 verificações, sendo os mesmos pontos distribuídos de forma aleatória. Assim, foram obtidas a Tabela 13, que apresenta dados amostrais e valores médios para cada ponto ensaiado, e a Tabela 14, a qual explana os resultados de permeabilidade referentes a cada traço avaliado.

Tabela 13 – Valores amostrais obtidos para a permeabilidade do revestimento através do Método do cachimbo aos 28 dias.

TEOR DE ESCÓRIA	AMOSTRA	PERMEABILIDADE			PERMEABILIDADE MÉDIA POR AMOSTRA (cm ³)	DESVIO PADRÃO POR AMOSTRA (cm ³)
		t=5min	t=10min	t=15min		
0%	1	1,1	1,8	2,4	1,8	0,7
	2	0,9	1,4	2,0	1,4	0,6
10%	1	0,7	1,2	1,6	1,2	0,5
	2	0,8	1,3	1,7	1,3	0,5
20%	1	0,5	1,0	1,5	1,0	0,5
	2	0,6	1,0	1,4	1,0	0,4
30%	1	1,2	2,0	2,7	2,0	0,8
	2	1,1	1,9	2,5	1,8	0,7

Fonte: Autor, 2018.

Tabela 14 – Resultados para a permeabilidade do revestimento, por traço, através do Método do cachimbo aos 28 dias.

TEOR DE ESCÓRIA	PERMEABILIDADE MÉDIA POR TRAÇO (cm ³)	DESVIO PADRÃO AMOSTRAL POR TRAÇO (cm ³)
0%	1,6	0,6
10%	1,2	0,4
20%	1,0	0,4
30%	1,9	0,7

Fonte: Autor, 2018.

Os valores obtidos para o ensaio de permeabilidade dos revestimentos estudados foram, ainda, avaliados através do teste estatístico ANOVA, onde foi possível verificar que o teor de escória influencia a permeabilidade à água para os traços de argamassa mista analisados, sendo a diferença, entre os grupos com substituição de 20% e 30%, significativa, segundo teste de Tukey. Este fator é condizente, tendo em vista que foram obtidos os maiores valores de permeabilidade para o traço com substituição de 30%, apresentando-se mais poroso, e os menores valores para a argamassa com 20% de escória BSSF, portanto com menor taxa de absorção. Ainda, verifica-se que, para os teores de 10% e 20%, houve diminuição crescente da permeabilidade à água em comparação ao traço de referência, ou seja, com 0% de escória, indicando melhor desempenho aos primeiros.

5 CONCLUSÃO

Na etapa inicial do presente trabalho, realizou-se a caracterização de cinco agregados reciclados distintos, avaliando suas propriedades físicas, químicas e mineralógicas, onde foi constatado que as escórias DRY PIT, KR e PANELA possuem teor de material pulverulento acima do limite estabelecido em norma, sendo o agregado siderúrgico BSSF aquele que apresentou menor porcentagem de material pulverulento, indicando um desempenho satisfatório para esta propriedade.

Para avaliação da massa específica e da absorção dos resíduos em estudo, obteve-se que a escória DRY PIT apresenta menor massa específica e maior absorção dentre o grupo analisado, indicando maior porosidade; sendo a BSSF aquela com maior massa específica e absorção entre as menores obtidas.

Foi identificado que os agregados reciclados BOF, KR e PANELA são potencialmente reativos em grau R1, para os primeiros, e R3, para o último. As escórias DRY PIT e BSSF foram classificadas em potencialmente inócuas de grau R0.

Verificou-se a composição das escórias através de análise química, evidenciando a presença predominante de óxido de cálcio (CaO), hematita (Fe₂O₃) e quartzo (SiO₂) em proporções variadas. Na análise mineralógica, observou-se a presença majoritária de compostos cristalinos, havendo apenas para a escória KR a indicação de fase amorfa, característica de materiais pozolânicos.

Tendo em vista os valores satisfatórios encontrados na caracterização do agregado siderúrgico BSSF, este foi aplicado em argamassa mista para revestimento em substituição parcial ao agregado natural, onde foi realizado ajuste da curva granulométrica à da areia, propiciando uma efetiva substituição. No estado fresco, foram obtidos os fatores água/cimento para cada traço, identificando a relação diretamente proporcional entre o teor de escória BSSF e o consumo de água. Também, foi observada proporcionalidade direta entre a porcentagem de substituição de escória e a densidade de massa, tendo em vista a elevada massa específica do agregado reciclado. O teor de ar incorporado variou entre 4% e 5%, não apresentando diferença significativa entre os traços.

No estado endurecido, observou-se que o teor de escória não influencia na resistência à tração na flexão, sendo a diferença entre os grupos não significativa, indicando que as argamassas mistas com substituição de areia natural por escória BSSF com teores de 10%, 20% e 30% apresentam comportamento equivalente à argamassa convencional. Para a resistência à compressão axial, foi obtida diferença significativa entre os grupos avaliados,

apresentando maior resistência para o traço de referência nas idades de 7 e 28 dias, onde nesta última verificou-se similaridade entre os valores obtidos para o traço com 10% de escória e aquele de referência.

Na avaliação da resistência de aderência à tração foi constatado que as argamassas mistas desenvolvidas no presente estudo são adequadas para revestimento em paredes internas com acabamento em pintura, onde o teor de substituição para as escórias analisadas não leva a uma diminuição significativa nas médias obtidas para a propriedade avaliada. Assim, a utilização de escória de aciaria BSSF em argamassa apresenta desempenho similar à argamassa convencional para a propriedade analisada.

A umidade média obtida para os painéis executados foi inferior a 1%, assegurando a estanqueidade e a maior durabilidade das alvenarias e dos revestimentos. Para a verificação da permeabilidade do revestimento pelo Método do cachimbo, na idade de 28 dias, foram obtidos os maiores valores de permeabilidade para o traço com substituição de 30% e os menores valores para a argamassa com 20% de escória BSSF. Para os teores de 10% e 20%, houve diminuição acentuada da permeabilidade à água em comparação ao traço de referência, indicando menor porosidade e absorção aos primeiros.

A partir das análises expostas, pode-se concluir que a escória de aciaria BSSF tem viabilidade técnica para ser utilizada como agregado miúdo em substituição ao agregado natural na execução de revestimentos argamassados, atendendo às exigências físicas, químicas, mineralógicas e mecânicas estabelecidas nas normas técnicas apresentadas neste trabalho. Para garantia de uma resistência à tração na flexão, compressão axial e de aderência à tração similares à argamassa de referência, recomenda-se a substituição de até 10% de areia por escória BSSF, sendo este o teor ótimo indicado, pois, a partir dessa porcentagem, observou-se um maior decréscimo na resistência à compressão axial aos 7 e 28 dias.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se a investigação da resistência à tração na flexão em idades superiores aos 28 dias, tendo em vista a análise do comportamento das argamassas mistas, com teores de substituição em 10% e 20%, indicar redução nesta propriedade aos 28 dias. Recomenda-se a averiguação da interação entre o cimento CP V e os agregados utilizados, averiguando a influência da resistência inicial do aglomerante.

É indicada melhoria à norma NBR 15.577 (ABNT, 2018), sendo sugerida a avaliação de limites de reatividade para argamassas de revestimento, não apenas para estruturas de concreto.

Também, sugere-se a ampliação dos teores de substituição, visando confirmar o comportamento decrescente das propriedades mecânicas de argamassa de revestimento com maiores teores de escória de aciaria BSSF em comparação à argamassa convencional.

REFERÊNCIAS

ABU-EISHAH, S. EL-DIEB, A. BEDIR M. Performance of concrete mixtures made with electric arc furnace steel slag aggregate produced in the Arabian Gulf region. **Construction & Building Materials**. Volume 34, 2012, p. 249-256.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7175**: Cal hidratada para argamassas – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2003. 4 p.

_____. **NBR 7211**: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2009. 9 p.

_____. **NBR. 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2016. 2 p.

_____. **NBR. 13278**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro: ABNT, 2005. 4 p.

_____. **NBR. 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2005. 9 p.

_____. **NBR. 13528**: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Determinação da resistência de aderência à tração. Rio de Janeiro: ABNT, 2010. 11 p.

_____. **NBR. 13749**: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2013. 8 p.

_____. **NBR. 15577-1**: Agregados - Reatividade álcali-agregado. Parte 1: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concretos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018. 15 p.

_____. **NBR. 15577-4**: Agregados - Reatividade álcali-agregado. Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassas pelo método acelerado. Rio de Janeiro: ABNT, 2018. 11 p.

_____. **NBR. 16541**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura para a realização de ensaios. Rio de Janeiro: ABNT, 2016. 2 p.

_____. **NBR. 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2017. 4 p.

_____. **NBR. 16697**: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018. 12 p.

_____. **NBR NM 30**: Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2001. 3 p.

_____. **NBR NM 45**: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2006. 8 p.

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

_____. **NBR NM 52**: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2009. 6 p.

_____. **NBR NM 53**: Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2009. 8 p.

_____. **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003. 6 p.

BARBOSA, Marina Renó. **Caracterização geoambiental das escórias de aciaria de cinco estados brasileiros**. 2013. 139 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2013.

CALDAS, José Augusto de Castro. **Análise de duas rotas tecnológicas na siderurgia brasileira com foco na eficiência energética**. 2011. 47 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Produção). Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2011.

CASELATO, L. **Panorama de escória de aciaria no Brasil**. Instituto Aço Brasil. 2010. Palestra apresentada no Seminário Internacional de Aplicação de Escória de Aciaria, Belo Horizonte, nov. 2010. Disponível em: <http://www.feam.br/images/stories/arquivos/arquivos_smrr/escoria/lucila_caselato.pdf>. Acesso em: 02 dez. 2018.

CASTELO BRANCO, Verônica Teixeira Franco. **Caracterização de misturas asfálticas com o uso de escória de aciaria como agregado**. 2004. 135 f. Dissertação de M. Sc, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Engenharia Civil, Rio de Janeiro.

CARRIJO, Priscila Meireles. **Análise da influência da massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005. doi:10.11606/D.3.2005.tde-11052006-143829. Acesso em: 01 dez. 2018.

CEARÁ. ADECE - AGÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO DO ESTADO DO CEARÁ. **Companhia Siderúrgica do Pecém (CSP)**. 2016. Disponível em: <<http://www.adece.ce.gov.br/index.php/siderurgica>>. Acesso em: 02 dez. 2018.

Centro de Gestão de Estudos Estratégicos (CGEE). Siderurgia no Brasil 2010 – 2025: Subsídios para a tomada de decisão. Brasília, 2010. 112 p.

DIAS, Alisson Rodrigues de Oliveira. **Avaliação técnica do aproveitamento da escória de aciaria como agregado na produção de concreto**. 2018. 30 f. Qualificação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

FRANCO, Luiza Carvalho. **Concretos e argamassas sustentáveis aplicados à habitação de interesse social**. 2015. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2015.

FRANÇA, M. B. B. F.; SANTOS, D. H.; PEREIRA, P. P.; SOUZA, B. P.; FONTES, W. C.; PEIXOTO, R. A. F. **Argamassas de escória de aciaria elétrica para assentamento de alvenarias e revestimentos**. X Simpósio brasileiro de tecnologia das argamassas. Fortaleza, 2013.

GEYER, Rejane Maria Tubino. **Estudo sobre a potencialidade de uso das escórias de aciaria como adição ao concreto**. 2001. 170p. Tese de D.Sc., UFRGS, Porto Alegre, RS.

INSTITUTO AÇO BRASIL. Aço Brasil: 2018. **Relatório de sustentabilidade**. Disponível em: <<http://acobrasil.org.br/sustentabilidade/>>. Acesso em: 02 dez. 2018.

GONÇALVES, Wanderlei Miguel. **Adequação do processo de fabricação de aço LD, utilizando ferro-gusa líquido com baixo teor de silício**. 2005. 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Área de concentração: Metalurgia extrativa, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.

JOHN, Vanderlei M. **Reciclagem de resíduos na construção civil – contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. São Paulo, 2000. 102p. Tese (livre docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

MADIAS, Jorge. **Reciclado de escorias de acería**. 2015. *Acero Latinoamericano*. 549. 40-48.

PARENTE, Everton Bezerra; BOAVISTA, Álvaro Holanda; SOARES, Jorge Barbosa. **Estudo do Comportamento Mecânico de Misturas de Solo e Escória de Aciaria para aplicação na Construção Rodoviária na Região Metropolitana De Fortaleza**. XVII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET. 2003.

PRADO, Renato de Mello; FERNANDES, Francisco Maximino; NATALE, William. **Uso agrícola da escória de siderurgia no Brasil: estudo na cultura da cana-de-açúcar**. Jaboticabal, Funep, 2001. 67p.

PEDROSA, Rogério Antônio Alves. **Estudo da viabilidade técnica e econômica do uso de agregados de escória de aciaria em concreto betuminoso usinado a quente**. 2010. 113p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

SOUZA, Eduardo Bezerra de Oliveira. **Escórias de aciaria e resíduos de concretos refratários em componentes de pavimentação**. Universidade Federal de Minas Gerais. Dissertação (Mestrado em saneamento, meio ambiente e recursos hídricos). 128p. Belo Horizonte, 2007.

SOUZA, Ticiane Vieira de Paula. **Caracterização de escória de conversor a oxigênio obtida no processo BSSF antes e após tratamento hidrometalúrgico**. 2016. 62 f. Dissertação (Mestrado em Ciência de Materiais) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

WORLDSTEEL ASSOCIATION. **World Steel in Figures 2018**. Disponível em: <<https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:f9359dff-9546-4d6b-bed0996201185b12/World%20Steel%20in%20Figures%202018.pdf>>. Acesso em 02 dez. 2018.

YAN, P.Y. MI, G.D. WANG, Q. A comparison of early hydration properties of cement-steel slag binder and cement-limestone powder binder. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**. Volume 115, 2014, p. 193-200.

APÊNDICE

Tabela A - Planilhas resultantes do ensaio de resistência de aderência à tração para um sistema de revestimento com chapisco, conforme NBR 13528 (ABNT, 2010).

Data: 14/11/2018 Temperatura: 27 °C Umidade relativa: 83%

1. Informações do sistema de revestimento:

Substrato: (X) Bloco cerâmico () Bloco de concreto () Estrutura de concreto

Chapisco: (X) Sim () Não

Argamassa: () Cimento (X) Mista

Tipo de aplicação da argamassa: (X) Manual () Mecânica

Idade do revestimento: 28 dias

2. Informações da metodologia de ensaio:

Equipamento de corte -

Marca: Bosch

Modelo: GSB 20-2 RE

Cola: Sikadur epóxi

Dinamômetro de tração -

Marca: Dinateste

Modelo: N. 813 AA

3. Coleta de dados:

- a) Resultados obtidos para painel com revestimento em argamassa com 0% de escória BSSF.

CORPO DE PROVA			LOCAL DO ENSAIO		CARGA DE RUPTURA (N)	TENSÃO Ra (MPa)	FORMA DE RUPTURA (%)			
nº	dm (mm)	Área (mm ²)	Bloco	Junta			Sub	Sub./Chap	Chap.	Arg.
1	50,0	1963,5		X	352	0,2	15	85	-	-
2	50,0	1963,5		X	844	0,4	10	90	-	-
3	50,0	1963,5		X	644	0,3	50	50	-	-
4	50,0	1963,5	X		733	0,4	-	80	-	20
5	50,0	1963,5	X		719	0,4	-	75	-	25
6	50,0	1963,5		X	411	0,2	10	90	-	-
7	50,0	1963,5		X	251	0,1	10	85	-	5
8	50,0	1963,5	X		621	0,3	-	95	-	5
9	50,0	1963,5	X		765	0,4	-	-	-	100
10	50,0	1963,5	X		449	0,2	-	10	5	85
11	50,0	1963,5		X	413	0,2	5	95	-	-
12	50,0	1963,5	X		390	0,2	-	95	5	-

Fonte: Autor, 2018.

b) Resultados obtidos para painel com revestimento em argamassa com 10% de escória BSSF.

CORPO DE PROVA			LOCAL DO ENSAIO		CARGA DE RUPTURA (N)	TENSÃO, Ra (MPa)	FORMA DE RUPTURA (%)		
nº	dm (mm)	Área (mm ²)	Bloco	Junta			Sub.	Sub./Chap.	Arg.
1	50,0	1963,5	X		255	0,1	-	-	100
2	50,0	1963,5		X	786	0,4	40	40	20
3	50,0	1963,5		X	914	0,5	50	50	-
4	50,0	1963,5	X		240	0,1	-	100	-
5	50,0	1963,5	X		309	0,2	-	95	5
6	50,0	1963,5	X		612	0,3	-	85	15
7	50,0	1963,5	X		646	0,3	-	100	-
8	50,0	1963,5	X		523	0,3	-	100	-
9	50,0	1963,5	X		555	0,3	-	95	5
10	50,0	1963,5	X		435	0,2	-	75	25
11	50,0	1963,5	X		673	0,3	-	90	10
12	50,0	1963,5	X		495	0,3	-	95	5

Fonte: Autor, 2018.

c) Resultados obtidos para painel com revestimento em argamassa com 20% de escória BSSF.

CORPO DE PROVA			LOCAL DO ENSAIO		CARGA DE RUPTURA (N)	TENSÃO, Ra(MPa)	FORMA DE RUPTURA (%)		
nº	dm (mm)	Área (mm ²)	Bloco	Junta			Sub.	Sub./Chap.	Arg.
1	50,0	1963,5		X	221	0,1	30	70	-
2	50,0	1963,5	X		500	0,3	-	90	10
3	50,0	1963,5		X	406	0,2	30	50	20
4	50,0	1963,5	X		379	0,2	-	50	50
5	50,0	1963,5	X		634	0,3	-	30	70
6	50,0	1963,5		X	233	0,1	20	-	80
7	50,0	1963,5	X		687	0,4	-	75	25
8	50,0	1963,5	X		781	0,4	-	15	85
9	50,0	1963,5	X		956	0,5	-	20	80
10	50,0	1963,5	X		672	0,3	-	70	30
11	50,0	1963,5	X		636	0,3	-	85	15
12	50,0	1963,5	X		262	0,1	-	75	25

Fonte: Autor, 2018.

d) Resultados obtidos para painel com revestimento em argamassa com 30% de escória BSSF.

CORPO DE PROVA			LOCAL DO ENSAIO		CARGA DE RUPTURA (N)	TENSÃO, Ra (MPa)	FORMA DE RUPTURA (%)		
nº	dm (mm)	Área (mm ²)	Bloco	Junta			Sub.	Chap./Arg.	Arg.
1	50,0	1963,5		X	440	0,2	10	50	40
2	50,0	1963,5		X	431	0,2	10	60	30
3	50,0	1963,5	X		416	0,2	-	85	15
4	50,0	1963,5	X		318	0,2	-	90	10
5	50,0	1963,5	X		249	0,1	-	65	35
6	50,0	1963,5	X		798	0,4	-	55	45
7	50,0	1963,5	X		386	0,2	-	100	-
8	50,0	1963,5	X		320	0,2	-	100	-
9	50,0	1963,5		X	338	0,2	20	80	-
10	50,0	1963,5	X		552	0,3	-	100	-
11	50,0	1963,5	X		480	0,2	-	95	5

Fonte: Autor, 2018.