



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ESTRUTURAL E CONSTRUÇÃO CIVIL**  
**PROGRAMA DE PÓS - GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL: ESTRUTURAS E**  
**CONSTRUÇÃO CIVIL**

**FELIPE ALVES AMANCIO**

**ESTUDO DE PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO DE ARGAMASSAS DE**  
**REVESTIMENTO COM ESCÓRIA DE ACIARIA BSSF**

**FORTALEZA**  
**2019**

FELIPE ALVES AMANCIO

ESTUDO DE PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO DE ARGAMASSAS DE  
REVESTIMENTO COM ESCÓRIA DE ACIARIA BSSF

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Eduardo Bezerra Cabral.

Coorientador: Prof. Dr. Esequiel Fernandes Teixeira Mesquita.

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)

---

- A499e Amancio, Felipe Alves.  
Estudo de propriedades no estado fresco de argamassas de revestimento com escória de aciaria BSSF /  
Felipe Alves Amancio. – 2019.  
85 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de  
PósGraduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil, Fortaleza, 2019.  
Orientação: Prof. Dr. Antônio Eduardo Bezerra Cabral.  
Coorientação: Prof. Dr. Esequiel Fernandes Teixeira Mesquita.
1. Escória de aciaria BSSF. 2. Aproveitamento de resíduos. 3. Argamassa de revestimento. 4.  
Trabalhabilidade. 5. Squeeze-flow. I. Título.

CDD 624.1

---

FELIPE ALVES AMANCIO

ESTUDO DE PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO DE ARGAMASSAS DE  
REVESTIMENTO COM ESCÓRIA DE ACIARIA BSSF

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Construção Civil.

Aprovada em: 09/04/2019.

BANCA EXAMINADORA

---

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

---

Prof. Dr. Esequiel Fernandes Teixeira Mesquita (Coorientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

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

---

Profª. Dra. Angela Borges Masuero  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus, em primeiro lugar, pela sabedoria e dom da vida.

Aos meus pais, Francisco Amancio Neto e Lúcia de Fátima Alves Amancio por todo o incentivo e apoio financeiro, os quais foram primordiais para a concretização desta Pós-graduação. Muito obrigado por acreditarem em meu potencial e por fazer de tudo para que eu conquistasse todos os meus sonhos.

Aos professores permanentes, colaboradores e visitantes do PEC por todos os ensinamentos compartilhados. Em especial aos meus orientadores Prof. Dr. Antônio Eduardo Bezerra Cabral e Prof. Dr. Esequiel Fernandes Teixeira Mesquita pela amizade, direcionamento, disponibilidade de tempo necessário para a concretização do presente trabalho.

Aos professores participantes da banca examinadora Lucas Feitosa de Albuquerque Lima Babadopulos e Angela Borges Masuero pelas excelentes contribuições e sugestões de melhorias.

Aos amigos do mestrado pela experiência incrível que me proporcionaram durante esse tempo. O meu muito obrigado por todo acolhimento a cada um de vocês, em especial ao Alisson Rodrigues pelo apoio e amizade desde os primeiros trabalhos em grupo nas disciplinas até os momentos finais da dissertação.

Aos técnicos do LMCC, Helano, Manuel e Maurício, aos bolsistas do laboratório, bem como a mestranda Natália Canuto pela amizade e disponibilidade em ajudar na realização desta pesquisa. Em especial ao bolsista Douglas Lima, pela paciência, disponibilidade e ajuda incessante no laboratório na realização do programa experimental durante os meses de realização dos ensaios.

À Família Martins, em nome de Maria Meire Martins, pelo acolhimento em Fortaleza durante o período do mestrado. Agradeço pelo apoio e todo carinho.

Enfim, sou grato por esta conquista a todos que acreditaram e torceram por mim. Muito obrigado.

À Deus.

Aos meus pais, Francisco e Lúcia

## RESUMO

A geração de resíduos tem se tornado uma questão preponderante para a indústria siderúrgica em virtude da grande quantidade de resíduos gerados, que demandam maior planejamento na destinação desses subprodutos. Aliado a isto, a escassez de insumos de boa qualidade próximos aos centros consumidores tem aumentado o interesse por produtos que causem menor impacto ambiental e de custos mais reduzidos. Todavia, a utilização de materiais alternativos na construção civil deve ser analisada minuciosamente, a fim de garantir o desempenho satisfatório, bem como a durabilidade adequada do produto final. Neste sentido, o objetivo deste trabalho é avaliar a influência da escória de aciaria *Baosteel Slag Short Flow* (BSSF) como agregado miúdo nas propriedades do estado fresco de argamassas de revestimento. O trabalho experimental contou com ensaios de caracterização físico-química da escória produzidas na Companhia Siderúrgica do Pecém, bem como caracterização das propriedades das argamassas produzidas no estado plástico (índice de consistência, relação a/c, Squeeze-flow, massa específica, teor de ar incorporado e retenção de água). Foram avaliados três traços de argamassas simples (cimento) e 3 três traços de argamassas mistas (cimento e cal) substituindo a areia natural por escória de aciaria BSSF. Foram realizadas 3 repetições para cada ensaio e os resultados analisados estatisticamente por meio da análise de variância (ANOVA). Pode-se constatar que as argamassas com maiores teores de escória demandaram uma maior quantidade de água para obter o espalhamento na mesa de consistência, o qual foi fixado em  $260 \pm 5$ mm. A substituição de parte da areia natural pela escória ocasiona um aumento significativo na massa específica no estado fresco, enquanto que no teor de ar incorporado, apesar de haver uma pequena redução, não há influência significativa nesta propriedade. Quanto à retenção de água, enquanto que nas argamassas de cimento, o teor de substituição de areia por escória influencia significativamente na redução da retenção de água, nas argamassas mistas tal fato não foi constatado. Em relação ao comportamento reológico pelo squeeze-flow, constatou-se que apesar de as argamassas com escória de aciaria BSSF apresentarem maior relação a/c, estas obtiveram menores valores de deslocamentos para um carregamento máximo de 1kN. A partir dos resultados, pode-se concluir que o teor de 20% de substituição apresenta propriedades similares de retenção de água em argamassas simples. Quanto ao comportamento reológico das argamassas pelo squeeze-flow, constatou-se que a substituição da areia por escória de aciaria influencia negativamente nas propriedades reológicas, o que deve afetar as propriedades do estado endurecido.

**Palavras-chave:** Escória de aciaria BSSF. Aproveitamento de resíduos. Argamassa de revestimento. Trabalhabilidade. Squeeze-flow.

## ABSTRACT

The generation of waste has become a preponderant issue for the steel industry due to the large amount of waste generated, which requires greater planning in the destination of these by-products. Allied to this, the shortage of good quality inputs near the consumer centers has increased the interest for products that cause less environmental impact and lower costs. However, the use of alternative materials in civil construction should be thoroughly examined in order to ensure satisfactory performance as well as adequate durability of the final product. In this sense, the objective of this work is to evaluate the influence of the Baosteel Slag Short Flow (BSSF) steel slag as a small aggregate in the fresh state properties of coating mortars. The experimental work involved physical-chemical characterization of the slag produced at Companhia Siderúrgica do Pecém, as well as characterization of the properties of mortars produced in the plastic state (consistency index, w/c ratio, Squeeze-flow, specific mass, built-in air and water retention). Three traces of simple mortars (cement) and three traces of mixed mortars (cement and lime) were substituted for natural sand by BSSF steel slag. Three replicates were performed for each assay and the results were analyzed statistically by analysis of variance (ANOVA). It can be verified that mortars with higher slag contents required a greater amount of water to obtain the spread on the table of consistency, which was fixed at  $260 \pm 5$  mm. The substitution of part of the natural sand for the slag causes a significant increase in the specific mass in the fresh state, while in the incorporated air content, although there is a small reduction, there is no significant influence in this property. As for water retention, while in cement mortars, the substitution content of sand for slag significantly influences the reduction of water retention in mixed mortars. This fact was not observed. In relation to the rheological behavior of squeeze-flow, it was found that although the mortars with BSSF steel slag presented higher ratio a / c, they obtained lower values of displacements for a maximum load of 1 kN. From the results, it can be concluded that the 20% substitution content presents similar properties of water retention in simple mortars. As for the rheological behavior of mortars by squeeze-flow, it was found that the substitution of sand by steel slag influences negatively.

**Keywords:** BSSF Steel slag. Waste management. Rendering mortar. Workability. Squeeze-flow



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Produção de aço mundial ao longo dos anos	13
Figura 2	– Processo de produção do aço	17
Figura 3	– Porcentagem dos coprodutos gerados na produção do aço.	18
Figura 4	– Aplicações da escória de aciaria conforme área do conhecimento.	22
Figura 5	– Perfil típico de carga vs. deslocamento de um ensaio de squeeze-flow	29
Figura 6	– Fluxograma do programa experimental	31
Figura 7	– Local de produção da escória de aciaria BSSF	32
Figura 8	– Amostra da areia natural (a) e da escória de aciaria BSSF (b)	33
Figura 9	– Curva granulométrica dos agregados	33
Figura 10	– Equipamento do AIMS	34
Figura 11	– Ensaio de determinação do índice de consistência das argamassas	38
Figura 12	– Ensaio de massa específica e teor de ar incorporado (método gravimétrico)	39
Figura 13	– Ensaio de retenção de água: a) amostra antes da sucção;b) amostra após sucção; c) equipamento de retenção de água	39
Figura 14	– Aparelhagem do ensaio do squeeze-flow	40
Figura 15	– Amonsta do ensaio do squeeze-flow: a)antes e b) após o ensaio	40
Figura 16	– Correlação entre a relação a/c e o teor de escória: a) traços sem cal; b) traço com cal	43
Figura 17	– Correlação entre a relação a/c e o consumo de cimento das argamassas	44
Figura 18	– Correlação entre a relação a/aglom e o consumo de aglomerantes	44
Figura 19	– Resíduos padronizados para os dados de massa específica dos traços investigados	45
Figura 20	– Influência do traço na massa específica das argamassas.	46
Figura 21	– Influência do teor de substituição na massa específica das argamassas	46
Figura 22	– Interação entre o traço e o teor de substituição na massa específica das argamassas	46
Figura 23	– Correlação entre a massa específica e o teor de substituição de escória para as argamassas simples e mistas	47
Figura 24	– Resíduos padronizados para os dados de teor de ar incorporado dos traços investigados	48
Figura 25	– Influência do traço no teor de ar das argamassas	49
Figura 26	– Interação entre o traço e o teor de substituição no teor de ar das argamassas	49

Figura 27 – Correlação entre o teor de ar e o consumo de aglomerante	50
Figura 28 – Resíduos padronizados para os dados de retenção de água das argamassas simples	51
Figura 29 – Resíduos padronizados para os dados de retenção de água das argamassas mistas	51
Figura 30 – Influência do teor de substituição na retenção de água das argamassas simples.	52
Figura 31 – Influência do traço na retenção de água das argamassas simples.	52
Figura 32 – Influência do traço na retenção de água das argamassas mistas.	52
Figura 33 – Valores de retenção de água conforme o traço e o teor de substituição	53
Figura 34 – Correlação entre a retenção de água e o teor de substituição	54
Figura 35 – Comportamento reológico do traço 1:3 (grupo A) e seus respectivos teores de substituição por meio do squeeze-flow para a velocidade de: a) 3mm/s; e :b) 0,1mm/s	55
Figura 36 – Comportamento reológico do traço 1:5 (grupo B) e seus respectivos teores de substituição por meio do squeeze-flow para a velocidade de: a) 3mm/s; e :b) 0,1mm/s	55
Figura 37 – Comportamento reológico do traço 1:7 (grupo C) e seus respectivos teores de substituição por meio do squeeze-flow para a velocidade de: a) 3mm/s; e :b) 0,1mm/s	56
Figura 38 – Comportamento reológico do traço 1:1:4 (grupo D) e seus respectivos teores de substituição por meio do squeeze-flow para a velocidade de: a) 3mm/s; e :b) 0,1mm/s	56
Figura 39 – Comportamento reológico do traço 1:1:6 (grupo E) e seus respectivos teores de substituição por meio do squeeze-flow para a velocidade de: a) 3mm/s; e :b) 0,1mm/s	56
Figura 40 – Comportamento reológico do traço 1:1:8 (grupo F) e seus respectivos teores de substituição por meio do squeeze-flow para a velocidade de: a) 3mm/s; e :b) 0,1mm/s	57
Figura 41 – Resíduos padronizados para os dados de deslocamento máximo pelo squeeze flow	59
Figura 42 – Influência do traço no deslocamento máximo do squeeze-flow	60
Figura 43 – Influência do teor de substituição no deslocamento máximo do squeeze-flow	60
Figura 44 – Deslocamentos máximos para os traços investigados	61
Figura 45 – Correlação entre o deslocamento máximo e o consumo de aglomerante	62

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química da escória de aciaria de BOF .....	19
Tabela 2 – Composição química da escória de aciaria de EAF.....	20
Tabela 3 – Subdivisões das áreas de aplicação das escórias de aciaria.....	22
Tabela 4 – Classificação das argamassas quanto a consistência.....	27
Tabela 5 – Classificação das argamassas quanto a massa específica no estado fresco.....	27
Tabela 6 – Características físicas e químicas do cimento utilizado .....	32
Tabela 7 – Resistência à compressão em MPa do cimento utilizado .....	32
Tabela 8 – Características físicas dos agregados.....	33
Tabela 9 – Classificação dos agregados pelo AIMS .....	34
Tabela 10 – Resumo da classificação dos agregados pelo AIMS .....	35
Tabela 11 – Forma 2D dos agregados conforme o AIMS.....	35
Tabela 12 – Angularidade dos agregados conforme o AIMS .....	35
Tabela 13 – Composição química da escória de aciaria BSSF.....	36
Tabela 14 – Resultado do ensaio de expansibilidade a quente de Le Chatelier da escória de aciaria BSSF.....	36
Tabela 15 – Proporção dos traços de argamassa ensaiados.....	37
Tabela 16 – Caracterização das argamassas no estado fresco .....	41
Tabela 17 – Tratamento estatístico (ANOVA) para a massa específica no estado fresco .....	45
Tabela 18 – Tratamento estatístico (ANOVA) para o teor de ar das argamassas.....	48
Tabela 19 – Análise de variância para a retenção de água das argamassas simples .....	51
Tabela 20 – Análise de variância para a retenção de água das argamassas mistas .....	51
Tabela 21 – Classificação das argamassas conforme a ABNT NBR 13281:2005 .....	54
Tabela 22 – Deslocamentos máximos para 1 kN para deslocamento 3 mm/s obtidos pelo squeeze-flow.....	59
Tabela 23 – Tratamento estatístico (ANOVA) para o deslocamento máximo (3mm/s) por meio do squeeze-flow das argamassas.....	60

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	12
<b>1.1</b>	<b>Justificativa</b> .....	12
<b>1.2</b>	<b>Objetivos</b> .....	14
<b>1.2.1</b>	<i>Objetivo Geral</i> .....	14
<b>1.2.2</b>	<i>Objetivos Específicos</i> .....	14
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	16
<b>2.1</b>	<b>Processo de produção de aço e geração da escória de aciaria</b> .....	16
<b>2.2</b>	<b>Propriedades das escórias de aciarias</b> .....	19
<b>2.3</b>	<b>Aplicações da escória de aciaria</b> .....	21
<b>2.4</b>	<b>Argamassa de revestimento</b> .....	25
<b>2.4.1</b>	<i>Propriedades das argamassas no estado fresco</i> .....	26
<b>2.5</b>	<b>Uso da escória de aciaria em argamassas</b> .....	29
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	31
<b>3.1</b>	<b>Materiais</b> .....	31
<b>3.2</b>	<b>Método de pesquisa</b> .....	36
<b>4</b>	<b>ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b> .....	41
<b>4.1</b>	<b>Relação a/c das argamassas</b> .....	41
<b>4.2</b>	<b>Massa específica no estado fresco</b> .....	44
<b>4.3</b>	<b>Teor de ar incorporado</b> .....	48
<b>4.4</b>	<b>Retenção de água das argamassas</b> .....	50
<b>4.5</b>	<b>Comportamento reológico (Squeeze-flow)</b> .....	54
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	63
<b>5.1</b>	<b>Sugestões para trabalhos futuros</b> .....	64
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	65
	<b>APÊNDICE A – DISTRIBUIÇÃO DOS AGREGADOS DE ACORDO COM CADA PENEIRA</b> .....	80
	<b>APÊNDICE B – IMAGEM DAS PARTÍCULAS POR ABERTURA DE PENEIRA</b> .....	82
	<b>APÊNDICE C – SQUEEZE-FLOW DAS AMOSTRAS DE ARGAMASSAS</b> .....	83

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Justificativa

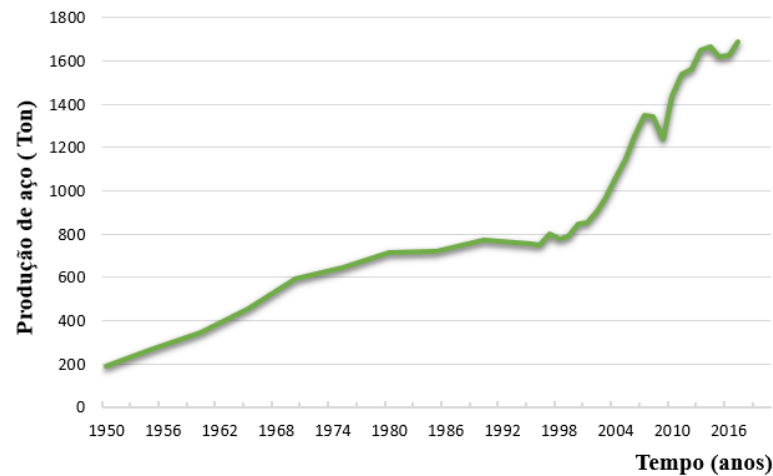
O consumo dos recursos naturais tem aumentado ao passo em que se tem o crescimento populacional e o desenvolvimento dos setores econômicos, acarretando grandes impactos ao meio ambiente. Neste cenário, a indústria da construção civil tem papel de destaque, tendo em vista que é uma das maiores consumidoras de recursos naturais não renováveis. Acompanhando o setor da construção civil, o consumo de agregados naturais, registrou um montante de 519 milhões de toneladas em 2015, conforme a Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção (ANEPAC, 2016).

Como um dos principais insumos para a construção, a exploração de agregados naturais, que são empregados na produção de argamassas e concretos, causa inúmeros impactos ao meio ambiente, quer em virtude de uma extração desordenada (e muitas vezes ilegal), quer pelo fato de que de 90% da produção nacional de areia natural é obtida a partir da extração em leito de rios e os 10% restantes, de outras fontes, como várzeas, depósitos lacustres e outros (ALMEIDA; SILVA, 2005). Assim, os danos ao meio ambiente vão desde o desmatamento e a remoção do solo, o que torna necessária a busca de soluções sustentáveis para esta problemática (MENOSSI, 2004; CHAVES; SANTOS, 2007).

Com o processo de urbanização e o aumento das demandas por insumo da construção civil, a disponibilidade de areia natural vem diminuindo gradativamente e tornando-se cada vez mais escassa em diversas regiões do mundo (MENADI et al., 2009; SHI-CONG; CHI-SUN, 2009; PARK, 2012). Na região Metropolitana de Fortaleza (RMF), grande parte da areia consumida pela construção civil é extraída a distâncias superiores a 100 km do mercado consumidor, o que encarece o produto e onera o consumidor, inclusive o poder público, um dos principais consumidores de agregados, destinados às suas obras de infraestrutura (CAVALCANTI; PARAHYBA, 2011).

Em paralelo, tem-se o papel de destaque da indústria siderúrgica na economia e no meio ambiente do Brasil e do mundo. A produção de aço, em 2017 alcançou novo recorde, ao totalizar 1,689 bilhões de toneladas (WORDSTEEL ASSOCIATION, 2018).

Figura 1 – Produção de aço mundial ao longo dos anos



Fonte: Worldsteel Association (2018).

O Brasil ocupou, neste ano, a 9ª posição, com cerca de 2,1% da produção mundial, destacando-se como o maior produtor da América Latina, responsável por 52,2% do aço produzido nesta região (BRASIL, 2016). Entretanto, a indústria siderúrgica gera grandes quantidades de escória como resíduo (QASRAWI,2014), estimando-se que para cada três toneladas de aço produzidas, uma tonelada de escória é gerada (SHEN et al., 2004; DAS et al., 2007). Portanto, à medida que a produção de aço aumenta, a quantidade de resíduos gerados se torna um problema ambiental com grau de urgência de tratamento, sendo imperativo para as gerações futuras que estes materiais sejam considerados recursos para serem reutilizados (ETXEBERRIA, 2010; WANG, 2010).

Com isto, tem-se a necessidade de se encontrar um destino adequado a estas escórias reinserindo-as a novos processos produtivos. Há que se considerar que o simples descarte deste resíduo gera custos de transporte, armazenamento e de disposição final (AKINMUSURU, 1991; QASRAWI,2014; CHEN et al., 2014).

O setor da construção civil é uma das indústrias mais interessadas no aproveitamento desse tipo de resíduo, e tem buscado incorporá-los aos materiais de construção, com vista à melhoria das propriedades dos seus produtos, a redução do custo de produção e dos impactos ambientais. Logo, o consumo dos resíduos das siderúrgicas como insumos na construção civil pode ser aumentado se forem utilizados as escórias de aciarias BSSF como agregados em argamassas e concretos.

O uso dos subprodutos industriais pela indústria da construção pode contribuir para resolver problemas de falta de agregados em vários locais e reduzir problemas ambientais relacionados à mineração (OUDA; ABDEL-GAWWAD, 2017). O emprego das escórias no setor na construção civil se torna ainda mais atraente ao se analisar o ponto de vista econômico,

tendo em vista que seu preço de aquisição pode ser até 4 vezes menor que do agregado natural (PARENTE; BOAVISTA; SOARES, 2003). Ademais, a demanda pelo uso de materiais alternativos aumentou significativamente com a crescente conscientização sobre a importância das questões ambientais e a busca por novas soluções que alcacem a sustentabilidade (LOHANI et al., 2012; PEDRO et al., 2013)

O aproveitamento de resíduos inertes como agregados em compósitos cimentícios deve ser investigado com cautela, pois os agregados podem representar de 60% a 80% do consumo dos materiais da argamassa pronta, em massa, resultando em significativa influência no seu comportamento no estado fresco, bem como para o desempenho do revestimento no estado endurecido (CARASEK, 2010).

Pelo exposto, esta pesquisa se justifica pelos altos potenciais impactos econômicos e ambientais caso seja viável o reaproveitamento dos resíduos da indústria siderúrgica na produção de argamassas. Tal aplicação se mostra atrativa pela possibilidade de utilização de um material que é gerado em grande quantidade (escória de aciaria) em substituição a outro que é largamente consumido na produção de argamassas (areia), podendo-se assim, reduzir os custos de produção das mesmas, além de minimizar os danos ambientais ocasionados pelo consumo exarcebado de areia natural.

## **1.2 Objetivos**

### *1.2.1 Objetivo Geral*

Avaliar o comportamento no estado fresco de propriedades de argamassas de revestimento no estado fresco com a utilização da escória de aciaria BSSF como agregado miúdo.

### *1.2.2 Objetivos Específicos*

- ✓ Caracterizar o comportamento no estado fresco das argamassas formuladas com incorporação de escória de aciaria;
- ✓ Analisar a influência da escória de aciaria nas propriedades reológicas das argamassas;
- ✓ Determinar o teor ótimo de escória de aciaria nas argamassas de revestimento.

## **1.3 Estrutura da dissertação**

O presente trabalho está dividido em cinco capítulos. O capítulo 1 é dedicado à introdução do trabalho, onde se discorre sobre a contextualização e justificativa, juntamente

com os objetivos (geral e específicos). O capítulo 2 apresenta uma revisão de literatura, abordando o processo de produção do aço e, conseqüentemente, a geração das escórias de aciaria, bem como aplicações deste resíduo em argamassas de revestimento.

No capítulo 3 são descritos os materiais utilizados e suas propriedades, bem como a metodologia da pesquisa. No capítulo 4, os resultados são apresentados, analisados e discutidos. Já o capítulo 5 dedica-se as considerações finais da pesquisa, bem como sugestões para trabalhos futuros. Por fim, são apresentadas as referências bibliográficas citadas.



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Processo de produção de aço e geração da escória de aciaria

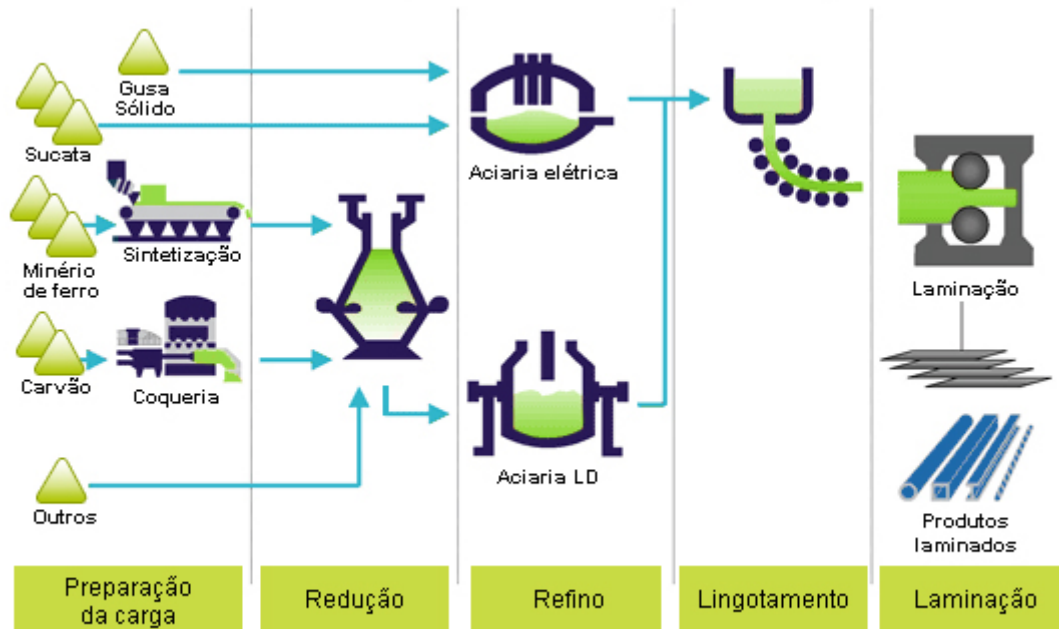
O aço é um dos principais materiais utilizados na fabricação de uma gama de produtos, tais como celulares, componentes estruturais de edifícios, tubulações, componentes de aviões, dentre outros; além de ser considerado um dos principais elementos que possibilitam a sociedade desfrutar da modernidade e comodidade oferecidas pelos bens de consumo (JANUZZI, 2014).

Existem basicamente duas rotas tecnológicas para produção de aço, com algumas possíveis variações e combinações: produção de aço à base de gusa líquido com uma pequena proporção de sucata metálica (usinas integradas); e produção de aço à base da sucata (usinas semi-integradas) e uma pequena quantidade de gusa sólido. Quanto às usinas integradas, estas podem utilizar dois tipos de agentes redutores: carvão mineral (usinas integradas à coque) e carvão vegetal (usinas integradas à carvão vegetal). As usinas integradas operam as três fases básicas de produção, a saber, redução, refino e laminação (IABr,2014). O processo consiste nas seguintes etapas, conforme ilustrado na Figura 2 e descrita abaixo:

- ✓ preparação da carga: a parte do minério de ferro que se encontra sob a forma de pó passa por um processo de aglomeração, dando origem ao sinter e/ou pelotas que se juntam ao minério de ferro de maior granulometria na carga do alto-forno. Para retirar compostos voláteis indesejáveis, o carvão (mineral ou vegetal) é aquecido em fornos (coquearias) e convertido em coque;
- ✓ redução do minério de ferro: remoção, em altos-fornos, do oxigênio contido nos óxidos do minério. O produto resultante é uma liga de ferro e carbono denominada ferro-gusa, que ainda contém impurezas como fósforo, enxofre e sílica, além da geração das escórias de alto forno;
- ✓ refino: redução do teor de carbono e das impurezas do ferro-gusa até os valores desejados para os diferentes tipos de aço. A transformação do ferro-gusa em aço pode ser realizada em conversores a oxigênio (*BOF – Basic Oxygen Furnace*) ou o arco elétrico (Fornos Elétricos a Arco – *FEA*);
- ✓ lingotamento: o aço produzido nas aciarias vaza em lingoteiras, solidificando-se na forma de lingotes ou em máquinas de lingotamento contínuo, onde é cortado já na forma de produtos semi-acabados (placas, blocos ou tarugos);

- ✓ laminação: por meio da laminação, forjamento e outros processos mecânicos, são produzidas bobinas, barras, chapas, vergalhões, fio-máquinas, perfis e folhas metálicas, entre outros.

Figura 2– Processo de produção do aço



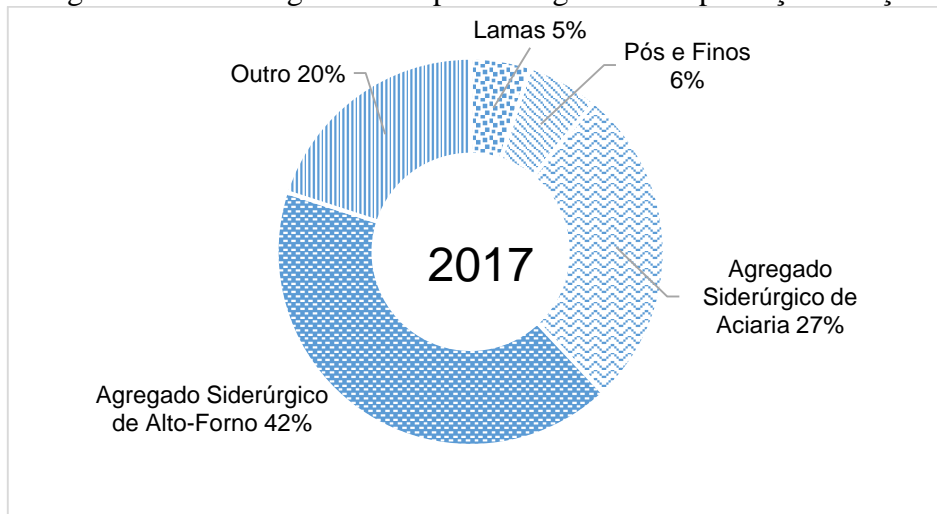
Fonte: IABr (2014).

O processo de produção de aço pode ser realizado por meio de oxigênio básico em um forno de fabricação de aço (BOF) ou por um processo de fornalha de arco elétrico (EAF) (GUMIERI, 2002; PELLEGRINO et al., 2013). O processo BOF (*Basic Oxygen Furnace*) é ainda denominada de LD, pois a sigla LD deve-se ao fato do aço produzido no conversor de oxigênio tipo LD (*Linz-Donawitz*) (TAVARES, 2012).

Os fornos elétricos a arco são utilizados, essencialmente, para fabricação de produtos longos, como por exemplo, vergalhões, barras e perfis para as indústrias da construção civil e mecânica. Já os conversores a oxigênio vêm sendo tipicamente empregados para produção de elevadas quantidades de aço, com destaque para a produção de produtos planos, como por exemplo, chapas para a indústria automobilística (FERNANDES, 2010).

Com o processo de produção do aço, são gerados inúmeros resíduos, comumente denominados de coprodutos da indústria siderúrgica, como a escória de alto-forno e as escórias de aciaria. Em 2017, a geração de resíduos e coprodutos pelas empresas associadas chegou a 607 kg para cada tonelada de aço produzida. Dentre os principais coprodutos das siderúrgicas, destacam-se a escória de alto-forno e as escórias de aciaria, chegando a quase 70% dos coprodutos produzidos no ano de 2017, conforme apresentado na Figura 3 (IAB, 2018).

Figura 3 - Porcentagem dos coprodutos gerados na produção do aço.



Fonte: IABr (2018)

A escória de alto-forno, devido às suas propriedades aglutinantes, são reutilizadas como adições ativas na fabricação de cimento Portland (ROJAS; ROJAS, 2004), e conseqüentemente mais de 90% da escória de alto-forno produzida nas siderúrgicas foram vendidas para cimenteiras em 2017 (IABr, 2018). Diferentemente, as escórias de aciaria, contêm baixa porcentagem de sílica amorfa e alto teor de óxidos de ferros e, conseqüentemente, apresentam baixa ou nenhuma atividade pozolânica, não sendo adequada para produção de cimentos (METWALLY; FARIED; TAWFIK, 2017). Com isto, em 2017, da pequena parte da escória de aciaria que foi vendida (36% do total produzida), 92% foi destinada à bases e sub-base de estradas e nivelamento de terrenos/aterros (IABr, 2018).

Em específico, no processo de produção da Companhia Siderúrgica do Pecém (CSP), além da geração da escória de alto-forno, tem-se a geração de outras escórias, a saber: *dry pit*, *KR*, *BOF* e *Baosteel Slag Short Flow* (BSSF) e panela. Primeiramente, no alto-forno, é produzido o ferro-gusa e por conseqüência a escória de alto forno, que é granulada. Porém, quando por algum motivo não é possível granular essa escória, esta é despejada em uma baía denominada de “dry pit”, gerando a escória denominada pela CSP de “dry pit”.

Já na aciaria, o ferro gusa passa por um pré-tratamento denominado de dessulfurização, para retirar impurezas, como o alto teor de enxofre do ferro gusa, e com isso tem-se a geração da escória KR. Em seguida, vem o refino primário que acontece no conversor a oxigênio, onde o gusa se transforma em aço, ou seja, tem-se início a purificação do aço, ficando livre de elementos indesejáveis e gerando assim a escória do BOF. Conforme informações disponibilizadas pela CSP, aproximadamente 80% dessa escória é granulada, gerando a escoria BSSF. Por fim, o aço passa por refino secundário e gera um resíduo que se

acumula no fundo do recipiente e que tem semelhanças com uma panela, recebendo o nome de escória panela.

No processo BSSF, a escória é fundida a altas temperaturas em um recipiente rotativo. Através da ação combinada da força mecânica e resfriamento, a escória é solidificada e em seguida é triturada em pequenas partículas. Devido aos diferentes pontos de solidificação, a escória fica separada do metal residual, impedindo que o metal seja misturado com a escória quando são descarregados (SOUZA, 2016).

No processo de granulação da BSSF, a escória líquida produzida é transferida para um tambor de granulação, onde ela é tratada com água injetada com um tempo de permanência entre três e cinco minutos, o que reduz significativamente a quantidade de cal livre que não reagiu (SOUZA, 2016).

Com a realização do tratamento da escória de aciaria BSSF, se produz um material de característica vítrea, granulado e com baixas quantidades de cal livre (LI; GUO, 2014; SOUZA, 2016). Esse tratamento da escória de aciaria BSSF, dá a ela a característica de ser livre de expansão (LI; GUO, 2014; LIU; WANG, 2011),

## 2.2 Propriedades das escórias de aciarias

A composição química da escória de aciaria varia de acordo com as matérias primas utilizadas, como o minério de ferro e o calcário. As Tabelas 1 e 2 apresentam a caracterização química das escórias de aciaria BOF e EAF, por meio da Fluorescência de Raio-X (FRX), realizada por diversos autores.

Tabela 1 – Composição química da escória de aciaria de BOF

FONTE	Composição química (FRX)												
	CaO	SiO <sub>2</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>
XUE et al (2006)	45,41	13,71	6,25	3,8	21,85	3,24	3,27	0	0	1,42	0,06	0,1	0
TOSSAVAINEN et al(2007)	45	11,1	9,6	1,9	10,7	10,9	3,1	0	0	0	0	0	0
DAS et al (2009)	47,88	12,16	0,82	1,22	26,3	0	0,28	0	0	3,33	0,07	0,036	0
MAHIEUX et al (2009)	47,5	11,8	6,3	2	0	22,6	1,9	0	0,5	2,7	0,1	0,2	0,2
CALMON et al (2013)	39,38	8,87	5,64	2,09	0	14,6	0	0	0	0	0,17	0,36	0,24
PALANKAR et al (2015)	41,52	15,04	6,17	4,12	0	22,54	2,6	2,92	0,16	0,02	0,05	0,14	0,08
CARVALHO et al (2017)	45,11	11,33	6,13	1,01	0	29,55	4,39	0	0,45	1,49	0	0,23	0,14
CAMPOS et al (2018)	32,71	6,61	0	0,68	0	53,15	4,26	0,35	0,88	0,99	0,06	0	0,06
LU et al (2018)	38,5	18,1	7,2	2,4	0	28,7	0	0	0	0	0	0	0

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Tabela 2 – Composição química da escória de aciaria de EAF

FONTE	Composição química (FRX)												
	CaO	SiO <sub>2</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>
SHEN, et al (2004)	46,9	33,5	6,22	2,3	1,07	0,36	2,6	2,92	0,16	0,02	0,11	0,17	0
ETXEBERRIA et al (2010)	21,77	18,28	6,14	8,32	0	37,6	4,43	1,83	0,64	0,21	0,11	0,43	0,23
NETINGER et al (2011)	24,98	17,08	10,58	5,4	0	24,45	8,91	0	0	0	0,13	0,12	0
NETINGER et al (2011)	31,52	14,24	7,42	7,6	0	25,74	3,8	0	0	0	0,08	0,13	0
ANASTASIOU et al (2014)	20,6	22,8	3,63	8,46	0	32,6	0	0	0	0	0,09	0,7	0
QASAWI (2014)	29,7	15,5	6,6	4,7	0	37	2,9	0	0	0	0	0	0
PALANKAR ET AL (2015)	41,52	15,04	6,17	4,12	0	22,54	0	0	0	0	0,05	0,14	0
OZTURK et al (2018)	34,88	18,73	6,7	11,57	15,02	16,67	2,64	0,9	0,38	0,34	0,02	0,11	0,74
SAXENA et al (2018)	51,43	15,62	3,89	18,89	0	3,75	0,45	0,35	0,52	1,42	0,16	0,16	3,12

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Conforme apresentando nas Tabelas 1 e 2, a composição química da escória, seja ela BOF ou EAF é predominantemente de CaO, MgO, SiO<sub>2</sub> e FeO<sub>total</sub>. Neste sentido, Wang; Wang; Gao (2010) relatam que a escória de aciaria pode ser simplesmente representada por um sistema quaternário de CaO-MgO-SiO<sub>2</sub>-FeO. Todavia, as proporções desses óxidos e as concentrações de outros componentes variam de lote para lote, dependendo de matérias-primas, tipo de aço, condições do forno, e outros.

No que tange às propriedades físicas das escórias de aciaria, seja EAF ou BOF, os parâmetros de massa específica e massa unitária apresentam valores maiores do que os dos agregados naturais (MOTZ, H.; GEISELER, 2001; EISHAH; DIEB; BEDIR, 2012; GONZÁLEZ-ORTEGA et al 2014; PELLEGRINO et al, 2013; GAO et al, 2017; CAMPOS; RAFAEL; CABRAL, 2018), sendo encontrado valores próximos de 1,7 kg/m<sup>3</sup> para massa unitária e 3,68 kg/m<sup>3</sup> para massa específica (EISHAH; DIEB; BEDIR, 2012).

Com relação ao desgastes por abrasão Los Angeles das escórias de aciaria, foram encontrados valores entre 9 a 18% (GEISELER, 1996; XUE et al, 2006; GAO et al, 2017; QASRAWI, 2014). Quanto à absorção de água da escórias de aciarias, estudos realizados por Motz; Geiseler (2001); Eishah; Dieb; Bedir (2012); Qasrawi (2014) e Faleschini et al (2015) encontraram valores entre 0,7% e 1,0% de absorção de água, ao passo que Fontana et al (2013); Gonzáles-Ortega et al (2014) e Campos; Rafael; Cabral(2018) encontraram valores entre 2,0% a 2,5%.

Tossavainen (2007) realizou ensaios de lixiviação em escórias de aciaria. Os resultados mostraram que a solubilidade de elementos como o cromo, o molibdênio e o vanádio para as diferentes escórias de aciaria investigadas apresentaram, na maioria dos casos, uma

concentração muito baixa, inferior ao estabelecido por norma. Ao realizarem o teste de lixiviação com a escória de aciaria, Pellegrino et al. (2013) verificaram que os compostos tóxicos em potencial estavam abaixo dos valores-limite permitido pela norma italiana DM 186:2006 (*Decreto Ministeriale N. 186. Test di cessione, 2006*).

Acerca da expansibilidade das escórias, em contraste com a escória de alto-forno, que é volumetricamente estável, a escória de aciaria contém óxidos hidratáveis (CaO livre e/ou MgO livre) que podem resultar em instabilidade volumétrica, no caso, provocando expansão (KANDHAL; HOFFMAN, 1997; WANG, 2010; WANG; WANG; GAO, 2010; TAVARES, 2012; BRAND; ROESLER, 2015). Essa expansão de volume, que pode chegar até 10% é atribuída à hidratação a curto e longo prazos do teor de óxidos de cálcio e magnésio (MIKHAIL; TURCOTTE, 1995). A hidratação dos óxidos de magnésio está associada a um aumento de volume, sendo essa uma das principais causas do problema de expansão das escórias. O óxido de magnésio, por suas reações mais lentas, é o responsável pela expansão a longo prazo (MASUERO; VILELA; DAL MOLIN, 2004).

As escórias de aciaria, devido à sua expansibilidade ou instabilidade volumétrica, já tiveram seu emprego bastante limitado como material alternativo de construção civil (TARAZONA BUITRAGO, 2016). Esse problema de expansão deve ser tratado por meio do envelhecimento adequado da escória de aço e controle de qualidade, especialmente testes apropriados para garantir seu uso adequado (PELLEGRINO; GADDO, 2009; WANG, 2010). Ademais, deve-se ter especial cuidado em evitar o potencial de comportamento expansível da escória de aço em aplicações confinadas, tais como concretos e argamassas. (WANG, 2010).

Tavares (2012) explica que os efeitos provocados durante a expansão da escória geram tensões internas que podem provocar trincas e rompimento do material. Para a escória ser utilizada como agregado na construção civil é necessário, portanto, seu tratamento prévio de modo a se reduzir a expansão à níveis aceitáveis ou à deixá-la inerte.

### **2.3 Aplicações da escória de aciaria.**

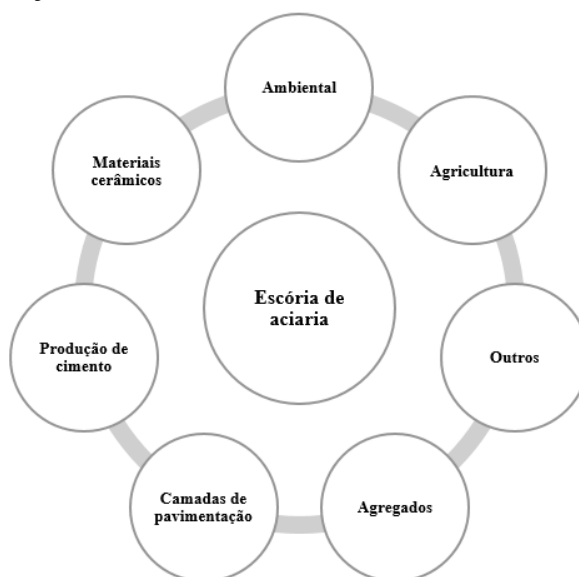
Na China, a taxa de utilização das escórias de aciaria é de 29,5%, muito inferior a dos países desenvolvidos, como no Japão (98,4%), na Europa em geral (87,0%) e nos Estados Unidos (84,4%) (GUO; BAO, WANG, 2018). Quanto à aplicação das escórias, nos Estados Unidos, é destinada para concreto asfáltico (10,9%), material de enchimento (10,8%), bases e subases de pavimentação (60,3%) e produção de clínquer (5,0%) (Ilyushechkin et al., 2012).

Na China, limita-se a basicamente o uso na construção de estradas e na agricultura como fertilizantes ou correção do solo ( GUO; BAO, WANG, 2018).

O Brasil também apresenta uma baixa aplicabilidade das escórias de aciaria, tendo a sua destinação basicamente para bases e sub-base de pavimentação (50,0%), nivelamento de terrenos e aterros (42,0%), agregados para concreto (2,0%), produção de cimento (1,0%) e outras aplicações (5,0%). (IABr, 2018)

A Figura 4 apresenta um mapeamento das principais áreas de aplicação da escória de aciaria encontradas na literatura, que vão desde aplicações mais nobres como produção de cimento a utilizações inferiores como lastro ferroviário e base de pavimentação.

Figura 4 - Aplicações da escória de aciaria conforme área do conhecimento.



A seguir, são descritos com maiores detalhes algumas das aplicações da escória de aciaria, sendo um resumo apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 - Subdivisões das áreas de aplicação das escórias de aciaria.

Área de aplicação	Aplicação	Fonte
Produção de cimento	Produção de cimento	Muhmood et al (2009); Montgomery; wang (1991); Tsakiridis et al (2008);
	Alcali-ativação	Salman ( 2014)
	Geopolímeros	Bai et al (2018)
Materiais cerâmicos	Materiais cerâmicos	Teo et al (2014); Badlee et al (2013); BAI et al (2010); HE et al (2012) Teo et al (2016)
	Blocos cerâmicos	Shih et al (2004)
Geotecnia e pavimentação	Asfalto	Ahmedzade;Sengoz (2009); Xue et al (2006); Tao et al (2019)
	Lastro Ferroviario	Pacheco (2006)
	camadas de pavimentação	Rohde (2012); Resende (2010)
	Pisos industriais e não industriais	Souza (2007)
	Pavers	Penteado et al (2019); Cardoso; Dias (2014)

	Estabilização de leitos de rios	Motz; Geiseler (2001)
Agregados em Materiais cimentícios	Concreto	Qiang et al (2013); Qasrawi (2014); Rondi et al (2016); Monosi et al (2016); Adegoloye et al (2016)
	Argamassa	Fontana (2015)
	Concreto refratário	Ducman; Mladenovic (2011)
	Concreto de alto desempenho	Guo et al (2019)
	Concreto com capacidade de blindagem	Baalamurugan et al (2019)
	Concreto armado	Stief (2009)
	Blocos pre moldados estruturais	Januzzi (2012)
	Blocos aerados	Chang (2019)
	Recifes artificiais	Li et al (2012)
	Projeto de diques quebramar	Xu (2010) apud YI et al (2012)
Tijolo solo-cimento	Geyer et al (2002)	
Agricultura	Fertilizantes	Wang et al (2015); Gao et al (2015)
	Correção de solos	He et al (2017)
Ambiental	Tratamento de águas residuais	Barca et al (2014) Mallet et al (2011)
	Remoção de metais pesados	Xue et al (2013); Borrayo et al (2018)
	Sequestro de CO <sub>2</sub>	Zhang et al (2017); Pan et al (2016); Yadav, S.; Mehra (2017)
	Drenagem ácida de rochas em minerações	Salviano; leite(2014)
	Acelerador de digestão anaeróbica	Han et al (2019)
Outros	Produção lâ mineral	Alves (2008)
	Produção de biodiesel	Kashiwaya et al (2007)
	Recuperação de ferro	Lan et al (2017)

- *Aglomerante*

A escória de aciaria em sua composição conta com a presença de silicato de cálcio, silicato tricálcico, ferroaluminato tricálcico e outros componentes minerais que podem conferir à escória de aciaria propriedades cimentícias (TSAKIRIDIS et al, 2008). Entretanto, o teor de C<sub>3</sub>S na escória de aço é muito inferior ao do cimento Portland, o que a torna um material hidráulico de baixa resistência (KOUROUNIS et al, 2007).

Tsakiridis et al. (2019) investigaram a utilização da escória de aciaria para a produção de clínquer. Os resultados químicos, mineralógicos e microscópicos demonstraram que o uso da escória não afetou as características mineralógicas do clínquer de cimento Portland assim produzido. Em adição, os testes físicos e mecânicos como a capacidade de moagem, tempo de pega, resistência mecânica e solidez não foram afetados negativamente com a adição



de escória de aciaria, mantendo-se assim a qualidade do cimento produzido (TSAKIRIDIS et al, 2019).

- *Materiais cerâmicos*

Montedo et al. (2003) investigaram a influência da adição de pó de escória de aciaria, em massa, no processo produtivo de cerâmica vermelha. Foi constatado que é possível adicionar até 3% em peso de pó de escória de aciaria, sem alterar as características e propriedades do produto final.

- *Camadas de pavimentação.*

O uso da escória de aciaria em camada de revestimento de pavimentação foi investigado por diversos autores, como o trabalho realizado por Resende (2010). O autor constatou que a base a qual foi incorporada a escória de aciaria apresentou comportamento superior quando comparados com os resultados obtidos pela base produzida em cascalho.

A viabilidade de aplicação da escória de aciaria em blocos de concreto para a pavimentação de vias de tráfego intenso foi verificada por Cardoso; Dias (2014). Os autores constataram que os corpos de prova com o emprego da escória, com tempo de cura de 7 dias apresentaram ganho de resistência de até 25%.

- *Materiais cimentícios*

Monosi; Ruello; Sani (2016) investigaram a substituição dos agregados naturais por escória de aciaria de arco elétrico. Os autores constataram que os concretos com escória obtiveram um aumento significativo na resistência à compressão, entretando não afetou a resistência à flexão. A durabilidade do concreto foi abordada por meio de uma análise química e de uma investigação microestrutural dos concretos, o qual constatou-se que a tendência a deteriorar-se parece insignificante devido a uma baixa presença de compostos amorfos e expansivos, que levariam a um aumento no volume.

Li et al (2012) analisaram a viabilidade de utilização da escória de aciaria em recifes artificiais. Os autores utilizaram além da escória, cimento e cinzas de dessulfuração de gases de combustão (FGD) para preparar um concreto para a construção de recifes artificiais de alta resistência. Os resultados demonstraram a viabilidade de tal aplicação, ao produzir blocos de concreto com resistência superior a 50 MPa.

Jannuzi (2014) verificou a viabilidade da utilização da escória de aciaria na produção de blocos de concreto. Foi constatado que as propriedades físicas dos blocos com a incorporação da escória de aciaria mostraram melhores resultados que os blocos convencionais.

Os blocos com escória de aciaria atenderam aos requisitos para uso como alvenaria estrutural. Chang et al. (2019) realizaram estudos com a utilização da escória de aciaria para produção de blocos aerados. Dentre as vantagens, os autores destacam a economia de energia, a preservação ambiental, o aproveitamento de resíduos e a alta resistência ao fogo dos blocos.

- *Agricultura*

Gao et al. (2015) investigaram a utilização da escória de aciaria como fertilizantes em plantações de arroz degradadas pela ação de um terremoto que atingiu o leste do Japão. O objetivo era a remoção de sódio e fornecimento de nutrientes para a recuperação dos campos de arroz danificados. Devido às suas propriedades químicas, a escória se mostrou benéfica, pois foram constatadas melhorias na dessalinização, no pH e no fornecimento de nutrientes como o silício foram encontrados.

Em adição, Wang et al. (2015) constataram o potencial da utilização da escória de aço no solo para melhorar o rendimento das culturas e reduzir as emissões de gases de efeito estufa nos arrozais subtropicais na China, sem causar impactos adversos de curto prazo nas concentrações de metais pesados no solo ou nos grãos de arroz.

- *Ambiental*

Borrayo et al. (2018) investigaram a viabilidade de utilizar a escória de aciaria de arco elétrico no tratamento de água visando a remoção de íons Cd, Cr e Pb. Os autores constataram que a utilização da escória demonstraram resultados promissores em termos de viabilidade econômica e em promessas claras em termos de economia e aplicação em escala. No mesmo sentido, Barca et al. (2014) verificaram a viabilidade de utilizar escória de aciaria como substrato filtrante para remoção de fósforo em águas residuais, o qual constatou-se que as escórias com maior teor de CaO e menores tamanhos foram as que apresentaram os melhores resultados.

Zhang et al. (2017) investigaram a potencial da escória de aciaria BOF para o sequestro de CO<sub>2</sub> aquoso. Tal viabilidade se deve à grande quantidade de óxidos básicos presentes na escória. No mesmo sentido, Yadav; Mehra (2017) também constaram a viabilidade sem o uso de qualquer aditivo químico.

## **2.4 Argamassa de revestimento**

Argamassa é uma mistura homogênea de agregados miúdos, aglomerantes inorgânicos e água, contendo ou não aditivos químicos, com propriedades de aderência e endurecimento, podendo ser dosada em obra ou em fábrica NBR 13281 (ABNT,2005). As principais funções das argamassas de revestimento são: a) proteger a alvenaria e a estrutura

contra a ação de intempéries, no caso de revestimentos externos; b) integrar o sistema de vedação dos edifícios, contribuindo com diversas funções, tais como: isolamento térmico ( $\pm 30\%$ ), isolamento acústico ( $\pm 50\%$ ), estanqueidade à água ( $\pm 70$  a  $100\%$ ), resistência ao fogo e resistência ao desgaste e abalos superficiais; c) regularizar a superfície dos elementos de vedação e servir como base para acabamentos decorativos, contribuindo para a estética da edificação (CARASEK, 2010).

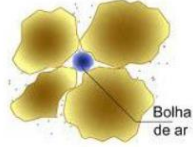
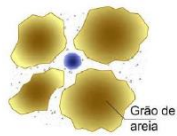
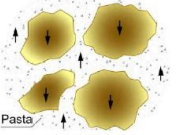
A NBR 13529 (ABNT, 2013) apresenta uma classificação das camadas de revestimento, a saber: I) chapisco: camada de preparo do substrato, aplicada de forma contínua ou descontínua, com a finalidade de uniformizar a superfície quanto à absorção e melhorar a aderência do revestimento; II) Emboço: camada de revestimento executada para cobrir e regularizar a superfície da base ou chapisco, propiciando uma superfície que permita receber outra camada, de reboco ou de revestimento decorativo, ou que se constitua no acabamento final; III) Reboco: camada de revestimento utilizada para cobrimento do emboço, propiciando uma superfície que permita receber o revestimento decorativo ou que se constitua no acabamento final; e IV) Acabamento decorativo: material para acabamento decorativo aplicado sobre o revestimento de argamassa, como pintura, materiais cerâmicos, pedras naturais, placas laminadas, têxteis e papel.

#### *2.4.1 Propriedades das argamassas no estado fresco*

Em relação às propriedades das argamassas, a trabalhabilidade é propriedade das argamassas no estado fresco que determina a facilidade com que elas podem ser misturadas, transportadas, aplicadas, consolidadas e finalizadas, em uma condição homogênea (CARASEK, 2010). A argamassa é dita trabalhável quando: permite penetrar facilmente a colher de pedreiro, sem ser fluida; se mantém coesa ao ser transportada, mas não ocorre aderência à colher ao ser lançada; distribui-se facilmente e preenche toda a base e; não ocorre o endurecimento rapidamente após aplicada (SABBATINI; BAIA, 2008).

A consistência está relacionada com a maior ou menor facilidade de a argamassa se deformar sob ação de cargas, enquanto que a plasticidade consiste na propriedade que confere a argamassa a capacidade de conservar-se deformada após a retirada das tensões de deformação (CARASEK, 2010). A Tabela 4 apresenta a classificação das argamassas quanto à consistência.

Tabela 4 - Classificação das argamassas quanto a consistência.

Classificação da argamassa	Explicação da consistência da argamassa	Ilustração
Seca	A pasta aglomerante preenche somente os vazios entre as partículas dos agregados, deixando-os em contato, resultando em atrito e uma argamassa áspera.	
Plástica	Uma fina camada de pasta envolve a superfície dos agregados, conferindo uma boa adesão entre os grãos.	
Fluida	As partículas de agregados estão imersas na pasta, sem coesão interna e com tendência a se depositar por gravidade (Fenômeno da segregação)	

Fonte: Carasek (2010).

A massa específica consiste na relação entre a massa de argamassa e o volume que a mesma ocupa. Carasek (2010) salienta, quanto à massa específica no estado fresco, que as argamassas podem ser classificadas em leves, normais e pesadas. A Tabela 5 apresenta esta classificação.

Tabela 5 - Classificação das argamassas quanto a massa específica no estado fresco.

Argamassa	Massa específica (M) (g/cm <sup>3</sup> )	Agregados	Usos
Leve	< 1,40	Vermiculita, argila expandida, etc	Isolamento acústico e térmico
Normal	$2,30 \leq M \leq 1,40$	Areia de rio (quartzo) e calcário	Aplicações convencionais
Pesada	>2,30	Barita	Blindagem de radiação

Fonte: Carasek (2007)

O teor de ar incorporado é a quantidade de ar aprisionado na argamassa fresca e influencia diretamente a massa específica relativa da argamassa nos estados fresco e endurecido (NAKAKURA; CINCOTTO, 2004). O teor de ar incorporado chega no máximo a 3 ou 4%, podendo ser aumentado com o emprego de aditivo incorporador de ar (NAKAKURA;

CINCOTTO, 2004). Entretanto, o uso de aditivos incorporadores de ar prejudica a resistência mecânica das argamassas (ALVES, 2002).

A retenção de água corresponde à capacidade da argamassa de não alterar sua trabalhabilidade, mantendo-se aplicável por um período adequado de tempo quando sujeita a solicitações que provoquem perda de água, como a evaporação, sucção do substrato ou reações de hidratação (ALVES; DO Ó, 2005; CARASEK, 2007).

Esta propriedade permite ainda que as reações de endurecimento da argamassa se tornem mais gradativos, promovendo a adequada hidratação do cimento e conseqüentemente, o aumento de resistência. Nos revestimentos, a perda de água de forma rápida prejudica a aderência, a capacidade de absorver deformações, a resistência mecânica, a durabilidade e a estanqueidade do revestimento (SABBATINI; BAÍA, 2008).

Em relação ao comportamento reológico, tem-se o ensaio do squeeze-flow, o qual consiste na compressão de uma amostra cilíndrica de argamassa entre duas placas paralelas, e é capaz de uma avaliação mais precisa e completa do comportamento do material sob fluxo (CARDOSO; PILLEGI; JOHN, 2005).

Entender o comportamento do fluxo de argamassas é essencial para projetar seu comportamento de assentamento, revestimento ou reparo em edifícios. Uma fluidez adequada pode aumentar a área de contato da argamassa com o substrato onde é aplicada, podendo tornar os sistemas mais estáveis e duráveis (STOLZ; MASUERO, 2018)

Cardoso; Pileggi John (2005) explicam que o resultado do squeeze-flow é uma curva carga *versus* deslocamento, dividido em 3 estágios, conforme Figura 5.

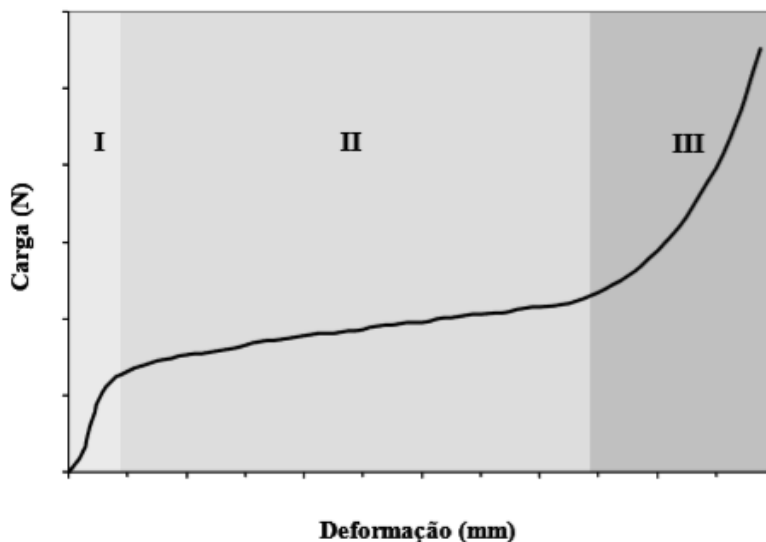
No estágio I (pequenas deformações) o material comporta-se como um sólido, apresentando deformação elástica linear. Uma argamassa que apresente comportamento com uma parcela significativa nesse estágio, possivelmente apresentará problemas de fissuração ainda no estado fresco devido à recuperação elástica após a retirada do esforço (após a passagem da desempenadeira).

No estágio II (deslocamentos intermediários) à compressão resulta em deformações radial elongacional e de cisalhamento. O material flui por deformação plástica e/ou viscosa dependendo das suas características constitutivas. Nesta etapa, o material é capaz de sofrer grandes deformações sem aumento significativo da força necessária para o deslocamento, o que aparenta ser um comportamento apropriado para aplicação e espalhamento de argamassas.

Por fim, no estágio III, o material é submetido a grandes deformações. Pode ocorrer um aumento exponencial da carga necessária para o deslocamento da argamassa. Devido à aproximação das partículas dos materiais constituintes, as deformações geram forças restritivas

ao fluxo. Este estágio relaciona-se com os procedimentos de aplicação e acabamento da argamassa devem ser dificultados, devido às altas cargas necessárias para deformá-lo, possivelmente levando a um acabamento defeituoso.

Figura 5 – Perfil típico de carga vs. deslocamento de um ensaio de squeeze-flow



Fonte: CARDOSO; PILEGGI; JOHN (2005)

## 2.5 Uso da escória de aciaria em argamassas

Diversos estudos demonstraram que a escória de aciaria é um material inerte, o que restringe seu uso como adições ativas na produção de cimento ou adições em concreto e argamassas (LUXÁN et al, 2000; ROJAS, ROJAS, 2004). Porém, esse material possui boas características físicas, como a alta resistência e durabilidade, o que demonstra um potencial para ser utilizada como agregados na indústria da construção civil (TOSSAVAINEN et al, 2007; WANG, 2010; ABU-EISHAH; EL-DIEB; BEDIR, 2012).

Estudo realizado por LE; SHEEN; BUI (2017) constataram que o aumento do teor de substituição do agregado natural por escória ocasiona uma menor fluidez das argamassas no estado plástico. Os autores alegam que esse fato é causado pela textura da superfície áspera e pela forma angular da escória de aciaria, se comparada com a forma mais cúbica do agregado natural.

Silva (2018) ao investigar o traço 1:1:6 com a substituição da areia natural por escória de aciaria BSSF, constatou um aumento da relação a/c com o aumento do teor de substituição. A autora justificou pelo fato de a absorção de água da escória ser superior ao da areia natural. Em contrapartida, Campos; Rafael; Cabral (2018), investigaram argamassas no traço 1:5 em volume de cimento e areia e substituíram o agregado miúdo nas proporções de 10, 20 e 30% por escória de aciaria. A argamassa com maior teor de escória apresentou a menor relação a/c para uma consistência fixa de  $260 \pm 5$ mm.

Santamaría-Vicario et al. (2015) concluíram que as argamassas produzidas com escória de aciaria apresentaram maior exsudação, se comparada com as argamassas com areia natural, o que provavelmente se deve à tensão superficial que a presença de finos de escória de aço gera, impedindo assim, a aderência da água à sua superfície. Os autores complementaram que se torna necessário o uso de aditivos que melhorem a trabalhabilidade da argamassa, reduzindo a tensão superficial entre seus componentes.

Quanto à propriedade de retenção de água, os valores para as argamassas com areia natural e para argamassas com escória de aciaria, independentemente do teor de substituição de areia por escória, são próximos a 66-67% de retenção de água (SANTAMARÍA-VICARIO et al 2015). Isto demonstra que a escória de aciaria parece não influenciar na retenção de água das argamassas.

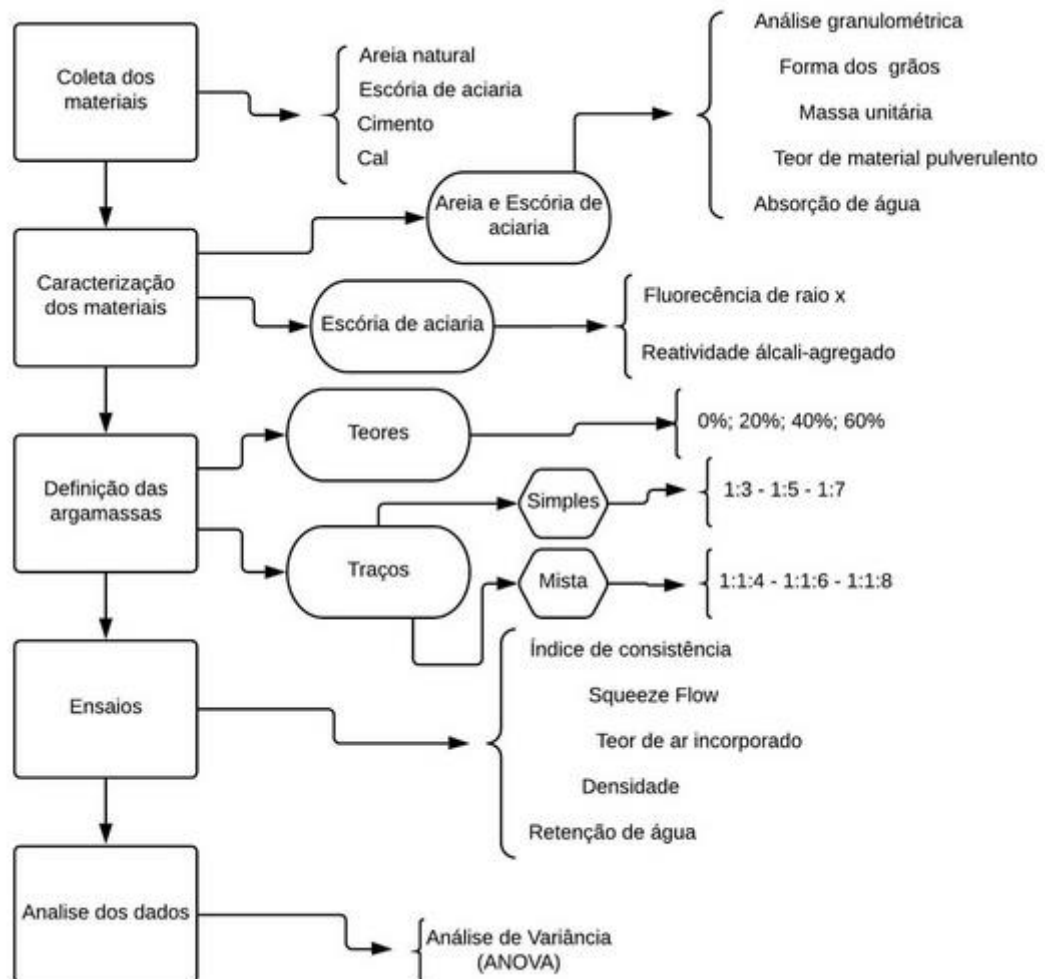
Em relação à massa específica das argamassas, quanto maior à porcentagem de substituição de escória pela areia, maior a massa específica obtida. Isso se deve ao fato da massa específica da escória ser maior que a da areia (CAMPOS; RAFAEL; CABRAL, 2018; SANTAMARÍA-VICARIO et al., 2015; SANTAMARÍA-VICARIO et al., 2016).

No tocante ao teor de ar aprisionado, Campos; Rafael & Cabral (2018) constataram que para as argamassas à base de cimento Portland com areia natural e as argamassas com os escórias de aciaria (em substituição a areia natural), o teor de ar aprisionado das argamassas variam entre 5 a 7 %. Silva (2018) ao investigar argamassas mistas, encontrou valores entre 4% e 5% de teor de ar.

### 3 MATERIAIS E MÉTODO

A Figura 6 apresenta o fluxograma do programa experimental adotado para a realização da pesquisa.

Figura 6 – Fluxograma do programa experimental



São apresentados, a seguir, os materiais adotados no presente trabalho.

#### 3.1 Materiais

Nesta pesquisa foi utilizado cimento Portland CP V – ARI, devido o mesmo ser o cimento com baixo teor de adições, disponível na região. As Tabelas 6 e 7 apresentam as características físicas e químicas do cimento fornecidas pelo fabricante.



Tabela 6 - Características físicas e químicas do cimento utilizado

Ensaio	Norma	Resultado	Especificação – Norma NBR 16697/2018
Perda ao fogo	NM 18/12	4,39 %	≤ 6,5
Óxido de Magnésio – MgO	NM 11-2/12	4,17 %	≤ 6,5
Anidrido Sulfúrico – SO <sub>3</sub>	NM 16/12	3,24 %	≤ 4,5
Resíduo Insolúvel	NM 15/12	0,69 %	≤ 3,5
Anidrido Carbônico – CO <sub>2</sub>	11578/91	2,97 %	≤ 5,5
Massa específica	NM 23/01	3,06 g/cm <sup>3</sup>	Não aplicável
Finura (#200)	11579/12	0,2 %	≤ 6,0
Finura (#325)	12826/14	4,8 %	Não aplicável
Início de pega	NM 65/03	2:15 h:min	≤ 10:00 h:min
Fim de pega	NM 65/03	3:45 h:min	≤ 5:00 h:min
Expansibilidade a quente	11582/16	0,00 mm	≤ 6,5

Boletim APODI (2018)

Tabela 7 - Resistência à compressão em MPa do cimento utilizado

Idade (dias)	Média (MPa)	Especificação - Norma NBR 16697/2018
1	25,9	≥ 14,0 Mpa
3	36,6	≥ 24,0 Mpa
7	44,3	≥ 34,0 Mpa
28	53,2	-

Boletim APODI (2018)

A água utilizada foi proveniente do sistema de abastecimento de água de Fortaleza. A cal utilizada foi a cal hidratada tipo CH-I, com massa específica de 2,56 g/cm<sup>3</sup>. A areia utilizada foi natural, proveniente da Região Metropolitana de Fortaleza, enquanto a escória de aciaria utilizada foi a *Baosteel's Slag Short Flow (BSSF)*, proveniente e disponibilizada pela Companhia Siderúrgica do Pecém (CSP), localizada em São Gonçalo do Amarante, Ceará. A Figura 7 apresenta a planta da CSP, bem como o local onde é gerada a escória de aciaria BSSF.

Figura 7 - Local de produção da escória de aciaria BSSF



A escória foi seca em estufa ( $105 \pm 5^\circ\text{C}$ ) até a constância de massa. Após seca, foi realizado o peneiramento, conforme estabelece a NBR NM 248 (ABNT, 2003). A Figura 8 apresenta uma ilustração da escória de aciaria BSSF e da areia natural.

Figura 8 - Amostra da areia natural (a) e da escória de aciaria BSSF (b)



Em seguida, foi realizado o ajuste da distribuição granulométrica da escória para se igualar ao da areia natural, no intuito de evitar a influência do tamanho dos grãos na trabalhabilidade e demais propriedades das argamassas. Destaca-se que para os agregados miúdos ( areia natural e escória de aciaria) foi utilizado o material passante na peneira de abertura de 2,36 mm.

A curva granulométrica dos agregados miúdos é apresentada na Figura 9, demonstrando que se classificam na zona utilizável e um pequeno trecho na Zona ótima, conforme NBR 7211 (ABNT, 2009). As características dos agregados estão apresentadas na Tabela 8.

Figura 9 – Curva granulométrica dos agregados

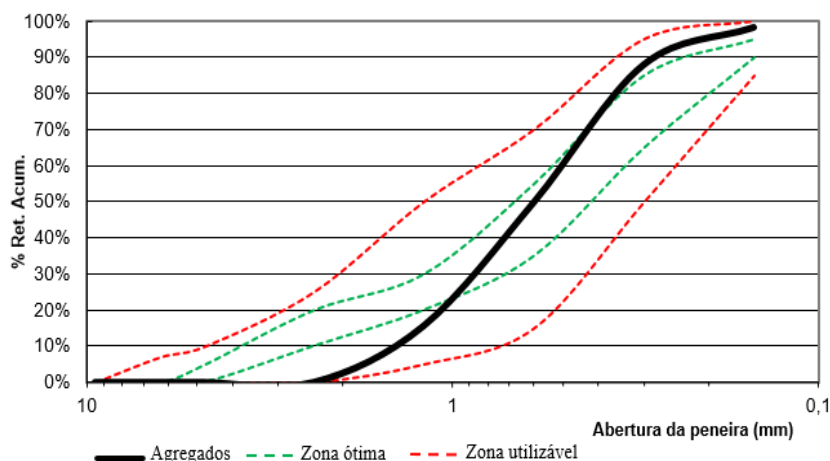


Tabela 8 – Características físicas dos agregados

Ensaio	Norma	Unid	Areia	Escória
DMC	NM 248 (ABNT, 2003)	Mm	2,36	2,36
Módulo de finura	NM 248 (ABNT, 2003)	Adim	2,52	2,52

Massa unitária	NBR NM 45 (ABNT, 2006)	g/cm <sup>3</sup>	1,41	2,08
Absorção de água	NBR NM 52 (ABNT, 2009)	%	0,9	2,1
Massa específica	NBR NM 52 (ABNT, 2009)	g/cm <sup>3</sup>	2,59	3,86
Teor de material pulverulento	NBR NM 46 (ABNT, 2003)	%	1,0	1,3
Inchamento	NBR 6467 (ABNT, 2006)	Adim	1,44	NR
RAA	NBR 15577-4 (ABNT, 2018)	%	NR	0,00

NR – não realizado

Foi investigada a forma dos grãos dos agregados por meio do *Aggregate Image Measurement System (AIMS)*. Este ensaio realiza a classificação da forma dos agregados, por meio de parâmetros de forma 2D e angularidade para agregados miúdos (material passante na peneira de abertura 4,75mm) e angularidade, textura superficial, lamelaridade e esfericidade para agregados graúdos (material retido na peneira 4,75 para cima).

Em se tratando se agregados miúdos, objeto de estudo deste trabalho, a forma 2D quantifica a forma relativa de imagens bidimensionais das partículas de agregado, tendo o valor variando em uma escala de 0 a 20, sendo que quanto mais próximo de zero, mais a partícula do agregado terá a forma de um círculo perfeito. Já a angularidade quantifica as mudanças ao longo das bordas das partículas e varia em uma escala de 0 a 10.000. De acordo com esse parâmetro, um círculo perfeito tem angularidade muito baixo, tendendo a zero (BESSA, 2012). A Figura 10 apresenta uma ilustração do equipamento utilizado.

Figura 10 – Equipamento do AIMS



Fonte: BESSA (2012)

Ressalta-se que, para o ensaio do AIMS, foi utilizado os agregados passante na peneira 6,3 mm, utilizando os agregados retido nas peneiras 4,75 mm, 2,36 mm, 1,18 mm, 0,6 mm, 0,3 mm, 0,15 mm e 0,075 mm. A classificação utilizada foi a proposta por Al Rousan (2004) que analisou diversos agregados no AIMS e propôs as faixas apresentada na Tabela 9.

Tabela 9 – Classificação dos agregados pelo AIMS

Parâmetro	Limites / Classificação				
Forma 2D	< 6,5	6,5 - 8,0	8,0 - 10,5	>10,5	-
(≤ 2,36mm)	Circular	Semicircular	Semialongado	Alongado	-

Angularidade ( $\leq 2,36\text{mm}$ )	< 2100	2100 – 4000	4000 - 5400	> 5400	-
	Arredondado	Subarredondado	Subangular	Angular	-
Textura superficial ( $\geq 4,75\text{mm}$ )	< 165	165 – 275	275 - 350	350 – 460	>460
	Polido	Macio	Baixa rugosidade	Rugosidade moderada	Alta rugosidade
Esfericidade ( $\geq 4,75\text{mm}$ )	< 0,6	0,6 – 0,7	0,7 – 0,8	> 0,8	-
	Achatado/ alongada	Baixa esfericidade	Esfericidade moderada	Alta esfericidade	-

Fonte: Al Rousan (2004)

A Tabela 10 apresenta a classificação da areia e da escória de aciaria, enquanto que as Tabelas 11 e 12 apresentam a concentração de partículas em cada classe.

Tabela 10 – Resumo da classificação dos agregados pelo AIMS

Parâmetro	Tipo de agregado	Tratamento estatístico			Classificação
		Média	nº de partículas	Desvio padrão	
Forma 2D	Areia natural	7,69	909	1,96	Semicircular
	Escória	7,95	895	2,35	Semicircular
Angularidade	Areia natural	3490,8	961	1216,9	Subarredondada
	Escória	3650,3	948	1486,7	Subarredondada
Textura	Areia natural	135,9	50	53,4	Polido
	Escória	297,6	50	117,7	Baixa rugosidade
Esfericidade	Areia natural	0,74	50	0,082	Esfericidade moderada
	Escória	0,757	50	0,082	Esfericidade moderada

Tabela 11 – Forma 2D dos agregados conforme o AIMS

Agregado	Concentração das partículas (%)				Classificação
	Circular	Semicircular	Semialongado	Alongado	
Areia natural	29,8	32,6	30,9	6,7	Semicircular
Escória BSSF	23,6	29,6	36,9	9,9	Semicircular

Tabela 12 – Angularidade dos agregados conforme o AIMS

Agregado	Concentração das partículas (%)				Classificação
	Arredondado	Subarredondado	Subangular	Angular	
Areia natural	12,3	56,2	23,8	7,7	Subarredondada
Escória BSSF	15,6	42,8	28,8	13	Subarredondada

Ressalta-se que tanto a areia natural como a escória de aciaria BSSF foram classificadas como semicircular em relação a forma 2D e subarredondadas quanto à angularidade. Entretanto, conforme apresentados nas Tabelas 11 e 12 nota-se que a escória de aciaria apresenta uma maior concentração de partículas semialongadas e alongadas (Forma 2D) e subangular e angular (Angularidade).

Em relação a caracterização química da escória de aciaria, foi realizado a Fluorescência de raio X (FRX) no laboratório de Raio – X, do departamento de Física da UFC. Foi utilizado

um espectrômetro de raios-X Rigaku ZSX mini II apresentada na Tabela 13. Os resultados obtidos mostraram que a escória é constituída basicamente de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$  e  $\text{SiO}_2$  ( $\pm 92\%$ ). Valores próximos aos encontrados neste trabalho foram obtidos por Campos et al. (2018) utilizando a mesma escória proveniente da CSP.

Tabela 13 – Composição química da escória de aciaria BSSF

Óxidos	Quantidade relativa (%)
$\text{Al}_2\text{O}_3$	0,63
$\text{SiO}_2$	5,84
$\text{P}_2\text{O}_5$	1,01
$\text{K}_2\text{O}$	0,04
$\text{CaO}$	33,46
$\text{TiO}_2$	0,63
$\text{Cr}_2\text{O}_3$	0,21
$\text{MnO}$	5,09
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	52,98
$\text{Co}_2\text{O}_3$	0,12

A escória de aciaria não apresentou fenômeno de expansibilidade a frio. Quanto a expansibilidade, a quente, todos os resultados obtidos encontraram-se dentro do limite máximo especificado de 5 mm pela ABNT NBR 16697 (2018), como pode ser visto na Tabela 14. O ensaio foi realizado com base no ensaio de determinação da expansibilidade do cimento pelo método de *Le Chatelier* (ABNT NBR 11582:2016).

Para a realização deste ensaio, foi definido o teor de substituição de cimento por escória de aciaria BSSF de 50%, em volume. Para Mehta e Monteiro (2014), esse teor é suficiente para que o fenômeno ocorra, caso o material possua características expansivas.

Tabela 14 - Resultado do ensaio de expansibilidade a quente de *Le Chatelier* da escória de aciaria BSSF.

<i>N° da agulha</i>	<i>Leitura inicial</i>	<i>Leitura final</i>	<i>Varição da abertura</i>
1	0 mm	1,35 mm	1,35 mm
2	0 mm	1,18 mm	1,18 mm
3	0 mm	0,94 mm	0,94 mm
Abertura final média			1,16 mm

### 3.2 Método de pesquisa

Utilizou-se nesta pesquisa argamassas simples (cujo aglomerante foi o cimento) e argamassas mistas (cimento e cal). Os traços de referência utilizados foram 1:3, 1:5, 1:7, 1:1:4, 1:1:6 e 1:1:8. Destaca-se que a definição partiu das proporções 1:5 e 1:1:6, por ser empregado nas construtoras da cidade de Fortaleza, utilizando a partir dessas duas variações, um mais rico e outro mais pobre, obtendo os traços descritos anteriormente. Estes traços são apresentados em

massa combinado com volume. Por exemplo, o traço 1:1:6 constituído de 1 saco de cimento (50 kg de cimento), 1 de cal ( 20 kg de cal) e 6 padiolas de 40L de areia úmida. Já para o traço de argamassa simples, como por exemplo o traço 1:5 é constituído de 1 saco de cimento (50 kg de cimento) e 5 padiolas de 40L cada. A Tabela 15 apresenta os consumos dos materiais em kg/m<sup>3</sup> dos traços investigados.

Tabela 15 – Proporção dos traços de argamassa ensaiados

Traço	Ident.	Consumo de material (kg/m <sup>3</sup> )					Traço unitário em Massa				
		Cim.	Cal	Areia	Escória	Água	Cim	Cal	Areia	Escória	Água
1:3	REFA	570,1	0,0	1339,7	0,0	296,4	1	0	2,35	0,00	0,52
	A20	563,7	0,0	1059,7	394,6	304,4	1	0	1,88	0,70	0,54
	A40	557,4	0,0	786,0	780,4	312,2	1	0	1,41	1,40	0,56
	A60	560,6	0,0	527,0	1177,3	308,3	1	0	0,94	2,10	0,55
1:5	REFB	374,5	0,0	1468,0	0,0	310,8	1	0	3,92	0,00	0,83
	B20	372,0	0,0	1164,3	435,2	316,2	1	0	3,13	1,17	0,85
	B40	368,0	0,0	864,7	857,3	323,8	1	0	2,35	2,33	0,88
	B60	365,0	0,0	573,1	1277,5	328,5	1	0	1,57	3,50	0,9
1:7	REFC	275,3	0,0	1508,5	0,0	327,6	1	0	5,48	0,00	1,19
	C20	271,4	0,0	1191,6	442,4	336,6	1	0	4,39	1,63	1,24
	C40	265,0	0,0	871,7	866,4	352,4	1	0	3,29	3,27	1,33
	C60	265,8	0,0	582,2	1302,6	350,9	1	0	2,19	4,90	1,32
1:1:4	REFD	403,0	161,2	1261,3	0,0	318,4	1	0,4	3,13	0,00	0,79
	D20	401,1	160,4	1006,8	373,0	320,9	1	0,4	2,51	0,93	0,8
	D40	399,5	159,8	751,0	747,0	323,6	1	0,4	1,88	1,87	0,81
	D60	401,4	160,6	501,8	1124,0	321,1	1	0,4	1,25	2,80	0,8
1:1:6	REFE	296,9	118,8	1395,6	0,0	317,7	1	0,4	4,70	0,00	1,07
	E20	296,1	118,4	1113,3	414,5	319,8	1	0,4	3,76	1,40	1,08
	E40	294,4	117,7	830,1	824,2	323,8	1	0,4	2,82	2,80	1,1
	E60	295,2	118,1	555,1	1240,0	321,8	1	0,4	1,88	4,20	1,09
1:1:8	REFF	233,4	93,4	1463,6	0,0	322,1	1	0,4	6,27	0,00	1,38
	F20	231,9	92,8	1161,9	433,7	327,0	1	0,4	5,01	1,87	1,41
	F40	229,7	91,9	863,6	859,0	333,1	1	0,4	3,76	3,74	1,45
	F60	224,1	89,6	562,4	1254,8	349,5	1	0,4	2,51	5,60	1,56

Fixou-se o índice de consistência medido por meio da mesa de abatimento em 260 ± 5 mm. A partir deste índice, determinou-se para cada traço a quantidade de água para alcançá-la. Em seguida, estes traços foram transformados em massa por meio da massa unitária, no intuito de melhorar a realização dos ensaios no laboratório. Destaca-se ainda, que foi utilizado o inchamento da areia (definida em laboratório) para a conversão do traço de obra utilizado em volume para massa, o qual foi utilizado no laboratório.

A substituição da areia natural por escória de aciaria ocorreu em volume. Os teores de substituição de areia natural por escória de aciaria BSSF foram de 20%, 40% e 60%. Analisou-se ainda um traço de referencia, sem a utilização de escória de aciaria. Os teores foram definidos após ensaios preliminares, pelos quais constatou-se que para os teores de 100% e 80% de substituição, as argamassas apresentavam exsudação e baixa trabalhabilidade. A Tabela 15 apresenta as proporções dos traços produzidos, sendo o consumo de água definido conforme a NBR 13276:2016.

Após a determinação dos traços, deu-se início à preparação das argamassas, seguindo os procedimentos preconizados pela NBR 16541 (ABNT, 2016). Após a preparação, realizou-se a caracterização das argamassas no estado fresco. Primeiramente determinou-se a quantidade de água necessária para se obter o espalhamento na mesa de consistência em  $260 \pm 5$  mm, conforme 13276 (ABNT, 2016) (Figura 11).

Figura 11 – Ensaio de determinação do índice de consistência das argamassas

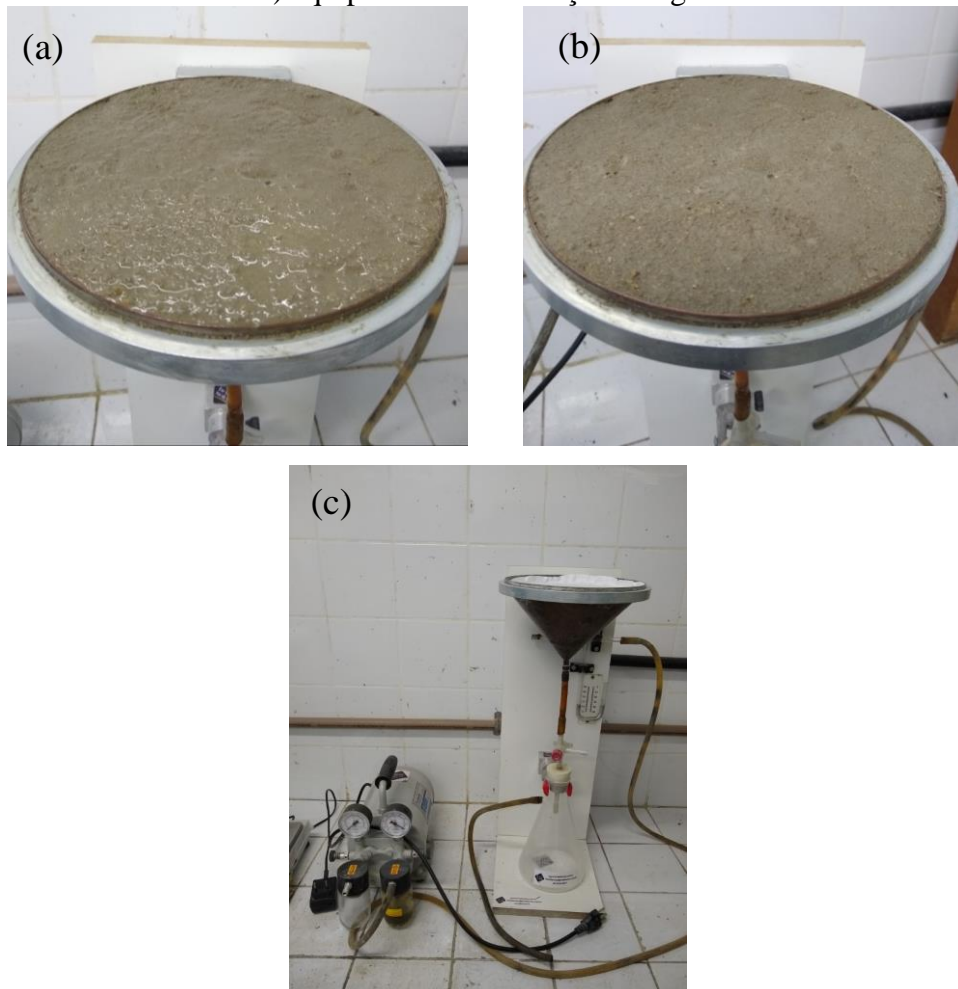


Para a determinação da massa específica e do teor de ar incorporado, foi utilizado o método gravimétrico (NBR 13278: 2005), conforme Figura 12. O ensaio de retenção de água foi realizado segundo a NBR 13277 (ABNT, 2005), aplicou-se na argamassa uma sucção de 51mm de mercúrio durante 15 minutos. A Figura 13 apresenta uma amostra antes e depois da sucção.

Figura 12 – Ensaio de massa específica e teor de ar incorporado (método gravimétrico)



Figura 13 – Ensaio de retenção de água: a) amostra antes da sucção; b) amostra após sucção; c) equipamento de retenção de água



Por fim, para se investigar o comportamento reológico das argamassas, foi realizado o ensaio de squeeze-flow, estabelecido pela NBR 15839:2010, em que foi utilizada uma célula de carga de 2 kN, do tipo S. A Figura 14 apresenta a aparelhagem para a realização do ensaio do squeeze-flow.

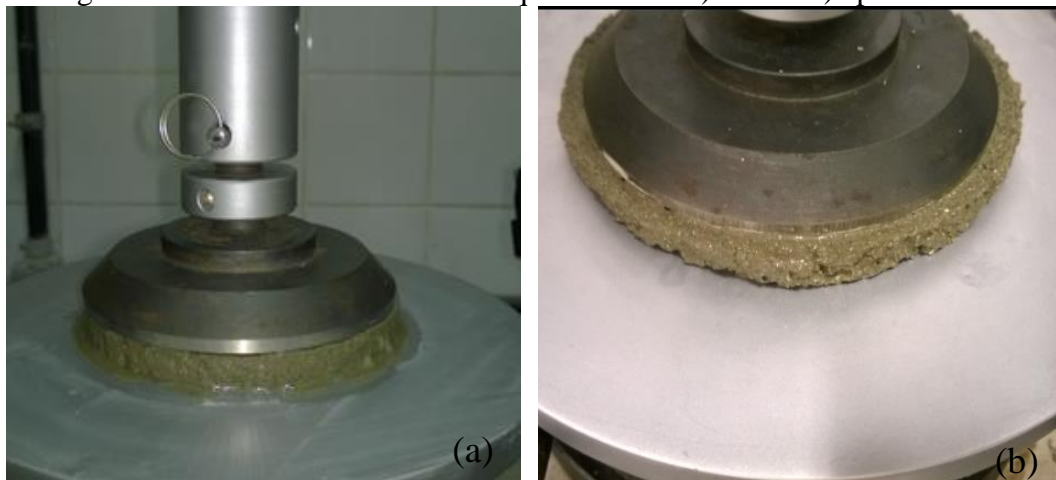


Figura 14 – Aparelhagem do ensaio do squeeze-flow



O ensaio foi realizado no intervalo de tempo de 10 min e 15 min após a mistura, a uma velocidade de 3,0 mm/s e 0,1mm/s respectivamente, sendo o ensaio finalizado quando a amostra apresentar um deslocamento máximo de 9 mm ou carga máxima de 1 kN, o que ocorresse primeiro. A Figura 15 apresenta a amostra de argamassa antes e após o ensaio do squeeze-flow.

Figura 15 – Amonsta do ensaio do squeeze-flow: a)antes e b) após o ensaio



Por fim, o tratamento e análise dos dados foi realizada por meio de uma análise estatística de Análise de Variância (ANOVA). Para esta análise, foi utilizado o software Statistica<sup>®</sup> 7.0. Primeiramente, obtem-se os resíduos padronizados para os ensaios realizados, no intuito de eliminar os dados espúrios. Valores são considerados outliers quando os resíduos padronizados excedem um valor de referência de 1,96 para mais ou para menos (valor crítico para um nível de confiança de 0,05). Após a identificação e descarte dos dados discrepantes, é realizada uma nova rodada de análise até que todos os pontos fiquem compreendidos no intervalo considerado como aceitável. Por fim, é identificado a Significância (S) ou não significancia (NS) dos parâmetros analisados.

#### 4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A Tabela 16 apresenta um resumo dos resultados obtidos nos ensaios de caracterização das argamassas no estado fresco.

Tabela 16 – Caracterização das argamassas no estado fresco

Traço	Ident.	a/aglo	a/c	Flow table (mm)	Massa esp. (kg/m <sup>3</sup> )			Teor de ar (%)			Retenção de água (%)		
					1	2	3	1	2	3	1	2	3
1:3	REFA	0,52	0,52	258	2165	2160	2162	3	3	4	88	89	90
	A20	0,54	0,54	263	2294	2306	2290	1	1	2	87	84	84
	A40	0,56	0,56	258	2392	2400	2393	2	1	2	85	84	83
	A60	0,55	0,55	260	2533	2517	2523	2	2	2	88	85	87
1:5	REFB	0,83	0,83	259	2062	2072	2067	4	4	4	86	87	87
	B20	0,85	0,85	258	2207	2205	2206	3	4	3	89	85	86
	B40	0,88	0,88	263	2315	2316	2317	4	4	4	88	82	84
	B60	0,90	0,90	260	2463	2454	2457	3	4	3	84	82	82
1:7	REFC	1,19	1,19	262	2035	2027	2031	4	4	4	85	81	83
	C20	1,24	1,24	259	2118	2141	2123	6	5	5	86	82	83
	C40	1,33	1,33	256	2273	2272	2274	4	4	4	81	83	80
	C60	1,32	1,32	261	2399	2424	2418	4	3	3	84	80	81
1:1:4	REFD	0,56	0,79	261	2096	2105	2099	2	2	2	92	90	90
	D20	0,57	0,80	260	2230	2232	2228	2	1	2	92	88	89
	D40	0,58	0,81	262	2325	2328	2326	2	2	2	90	87	87
	D60	0,57	0,80	264	2412	2432	2427	4	3	3	87	87	88
1:1:6	REFE	0,76	1,07	257	2045	2063	2051	4	3	4	91	89	87
	E20	0,77	1,08	264	2202	2194	2181	3	3	4	85	84	90
	E40	0,79	1,10	258	2316	2339	2312	3	2	3	84	82	86
	E60	0,78	1,09	262	2445	2442	2442	3	4	4	88	82	83
1:1:8	REFF	0,99	1,38	258	2012	2031	2018	5	4	4	83	85	89
	F20	1,01	1,41	263	2151	2143	2133	4	5	5	90	84	87
	F40	1,04	1,45	258	2262	2273	2263	5	4	5	89	86	85
	F60	1,11	1,56	263	2374	2393	2387	4	4	4	88	86	84

##### 4.1 – Relação a/c das argamassas

O primeiro parâmetro analisado foi a relação a/c das argamassas, o qual foi determinado por meio do ensaio Flow table, para uma consistência fixa de  $260 \pm 5$  mm. Constatou-se que as argamassas com maiores teores de escória apresentaram uma maior relação a/c. Isto pode ser justificado pela maior absorção de água da escória, se comparada com a areia, bem como pela forma, angularidade e textura das partículas dos agregados. Apesar de ambos os agregados serem classificados como subarredondado e semicircular em relação a angularidade e forma, respectivamente, a areia apresenta uma maior quantidade de partículas

na faixa de circular e semicircular e arredondada e subarredondada, conforme Tabelas 11 e 12. Partículas mais arredondadas tentem a facilitar a rolagem dos grãos, reduzindo assim a quantidade de água.

O mesmo fato foi constatado por Silva (2018) e LE; SHEEN; BUI (2017), os quais verificaram que o aumento do teor de substituição do agregado natural por escória ocasiona uma menor fluidez nas argamassas no estado plástico. Os autores alegam que esse fato é causado pela textura da superfície áspera e pela forma angular da escória de aciaria, se comparada com a forma mais arredondada do agregado natural.

Destaca-se ainda que para os traços 1:3, 1:7, 1:1:4 e 1:1:6, a relação a/c para o teor de 60% de substituição foi menor que o encontrado no teor de 40%, apesar de serem valores praticamente equivalentes. Isto pode ser justificado devido ao aumento da massa específica, pois conforme Carasek et al. (2016) explica, com as quedas da mesa de consistência, a argamassa mais pesada (densa) tende a se espalhar mais. Tendo em vista que a massa específica da escória (3,86 kg/m<sup>3</sup>) é superior ao da areia natural (2,59 kg/m<sup>3</sup>), explica-se, portanto, que a massa específica das argamassas com escória favorece o espalhamento na Flow table.

Ainda, foi possível apresentar a correlação entre a relação a/c das argamassas (A) e o teor de substituição (Ts) da areia natural por escória de aciaria (Figura 16). As equações de 1 a 6 apresentam a correção para respectivamente para os traços 1:3, 1:5, 1:7, 1:1:4, 1:1:6 e 1:1:8.

$$A_{1:3} = 0,0006 Ts + 0,526 \quad (R^2 = 0,69) \quad \text{Eq (1)}$$

$$A_{1:5} = 0,0012 Ts + 0,829 \quad (R^2 = 0,99) \quad \text{Eq (2)}$$

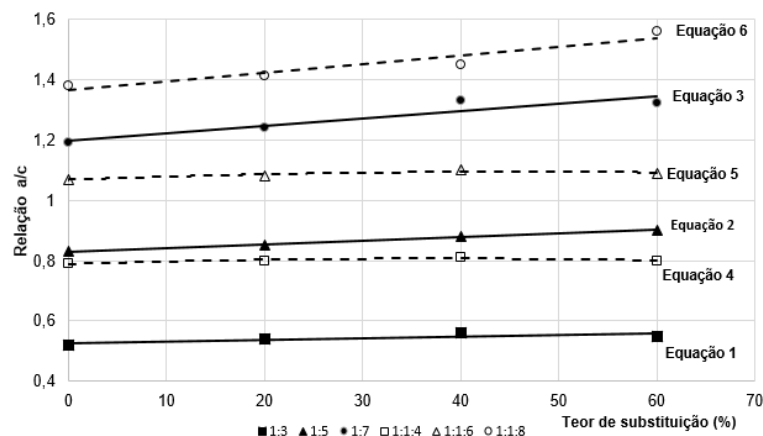
$$A_{1:7} = 0,0024 Ts + 1,198 \quad (R^2 = 0,86) \quad \text{Eq (3)}$$

$$A_{1:1:4} = 1E^{-05}Ts^2 + 0,0009x + 0,789 \quad (R^2 = 0,90) \quad \text{Eq (4)}$$

$$A_{1:1:6} = 1E^{-05}Ts^2 + 0,0011x + 1,068 \quad (R^2 = 0,84) \quad \text{Eq (5)}$$

$$A_{1:1:8} = 0,0029 Ts + 1,363 \quad (R^2 = 0,90) \quad \text{Eq (6)}$$

Figura 16 – Correlação entre a relação a/c e o teor de escória: a) traços sem cal; b) traços com cal



Percebe-se que as argamassas mistas apresentam uma maior relação a/c que as argamassas simples, isto devido a área superficial da cal ser superior a do cimento. Silva et al (2005) explicam que a quantidade de água está relacionada com a quantidade de área superficial requerida para ser molhada. A cal possui grãos muito finos, de área superficial maior do que a areia e o cimento, por isso, argamassa produzida com cal requer mais água na sua dosagem. No mesmo sentido, Quarcioni et al. (2009), complementam explicando que a cal, ao ser incorporada nas argamassas, exige um aumento na demanda de água de amassamento para manter uma mesma consistência. Essa água adicional, que não é consumida na hidratação do cimento, permanecerá livre no sistema e, ao evaporar, implicará numa maior porosidade da argamassa endurecida.

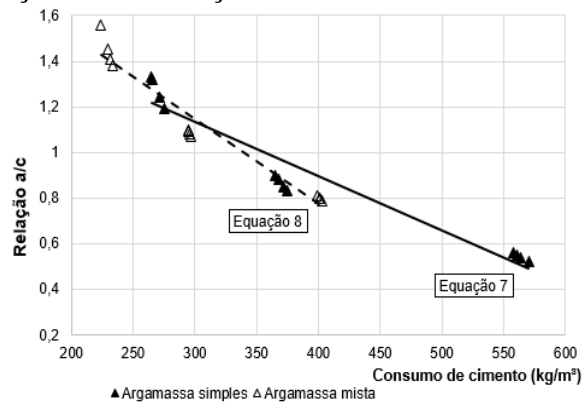
Adicionalmente, os traços com maiores teores de aglomerantes demandam menor relação a/aglo para uma consistência fixa de  $260 \pm 5$  mm (Figura 17). Fato também constatado por Mattos, Dal Molin; Carneiro (2001) que explicam que o aumento do teor de cimento ocasiona um aumento da trabalhabilidade, devido ao aumento da quantidade de pasta no sistema e conseqüentemente envolvimento dos agregados por pasta. Isto influencia positivamente o espalhamento das argamassas, que conforme Silva et al. (2005) explicam, a facilidade com que a argamassa é espalhada, está fundamentalmente relacionada com os fenômenos de movimentação e de lubrificação existentes entre suas partículas internas.

Foi possível estabelecer a correlação entre a relação a/c das argamassas ( $R_{a/c}$ ) e o consumo de cimento ( $Cc$ ) para as argamassas simples e mistas (Figura 17). A correlação é apresentada nas equações 7 e 8, respectivamente para os traços de argamassa simples e mistas, com os valores de  $R^2$  na ordem de 0,93 e 0,95.

$$R_{a/c} = -0,0024 Cc + 1,845 \quad (R^2 = 0,93) \quad \text{Eq (7)}$$

$$R_{a/c} = -0,0037 Cc + 2,255 \quad (R^2 = 0,95) \quad \text{Eq (8)}$$

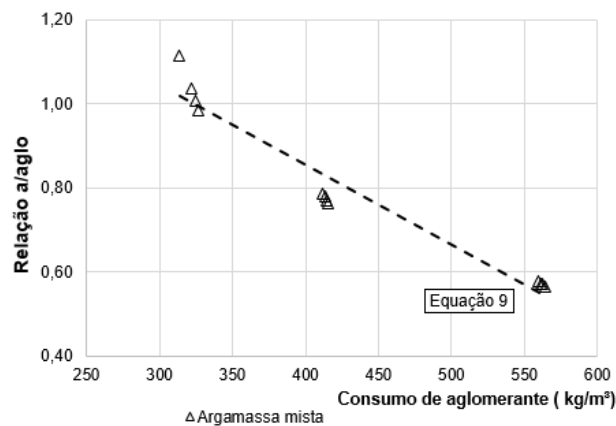
Figura 17 - Correlação entre a relação a/c e o consumo de cimento das argamassas



Quanto ao consumo de aglomerante ( $Ca$ ), realizou-se a correlação entre a relação água/aglomerante ( $R_{a/aglom}$ ) e o consumo de aglomerante para as argamassas mistas (Figura 18). A correlação é apresentada na equação 9, com o valor de  $R^2$  de 0,95.

$$R_{a/aglom} = -0,0019 Ca + 1,611 \quad (R^2 = 0,95) \quad \text{Eq (9)}$$

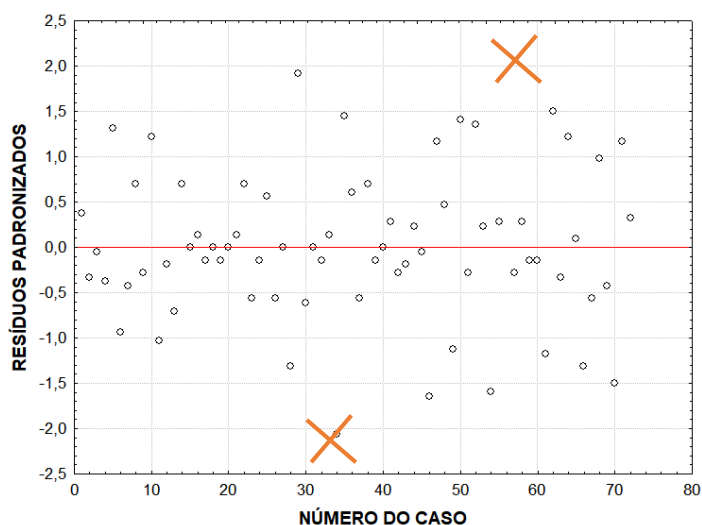
Figura 18 – Correlação entre a relação a/aglom e o consumo de aglomerantes



#### 4.2 – Massa específica no estado fresco

Os valores brutos de massa específica das argamassas são apresentados na Tabela 16. Realizou-se o tratamento dos resíduos padronizados para detectar e descartar os dados espúrios, conforme descrito no método de pesquisa. A Figura 19 apresenta os resíduos padronizados para os valores de massa específica.

Figura 19 – Resíduos padronizados para os dados de massa específica dos traços investigados



Após o tratamento dos dados, foi realizado a análise de variância (ANOVA) para a análise dos dados de ensaio de massa específica. Os resultados são apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 – Tratamento estatístico (ANOVA) para a massa específica no estado fresco

Análise de variância						
Efeito	SQ	GDL	MQ	F crítico	Valor p	Significância
<b>Traço</b>	149144	5	29829	757	0,000000	S
<b>Teor de substituição</b>	1298497	3	432832	10989	0,000000	S
<b>Traço x teor de substituição</b>	10187	15	679	17	0,000000	S
<b>Erro</b>	1773	45	39			

SQ – Soma quadrada; GDL- Grau de liberdade; MQ- média quadrada; S – Significativo; NS- Não significativo.

Constatou-se que o traço, o teor de substituição e a interação traço x teor de substituição apresentam influência significativa na massa específica das argamassas. As Figuras 20 a 22 apresentam a influência do traço, do teor de substituição e s interação entre traço e teor de substituição. Em relação a massa específica das argamassas no estado fresco, constatou-se um aumento significativo da massa específica com o aumento da quantidade de escória de aciaria como agregado para todos os traços investigados. Isto se deve a maior massa específica da escória de aciaria ( $3,86 \text{ g/cm}^3$ ) se comparada com a da areia natural ( $2,59 \text{ g/cm}^3$ ), sendo o mesmo fato constatado por CAMPOS; RAFAEL; CABRAL, 2018; SANTAMARÍA-VICARIO et al., 2015; e SANTAMARÍA-VICARIO et al., 2016). Quanto à diferença de massa específica entre os traços, os traços com maior consumo de aglomerante apresentaram massa específica superiores, tendo em vista que a massa específica do cimento é superior a da areia natural.

Figura 20 – Influência do traço na massa específica das argamassas.

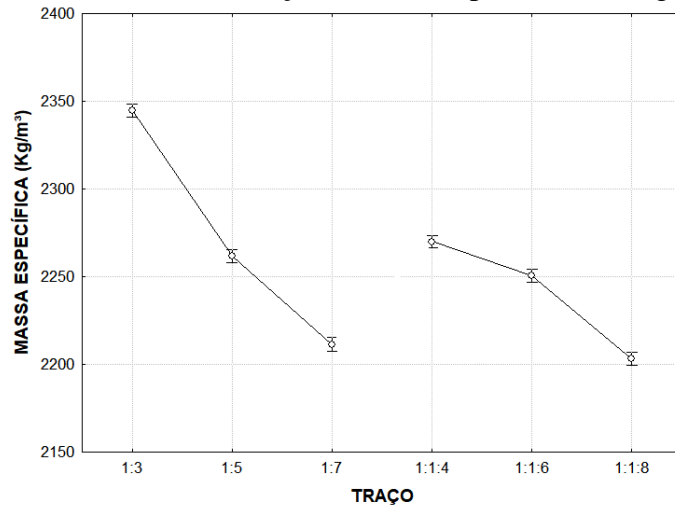


Figura 21 – Influência do teor de substituição na massa específica das argamassas

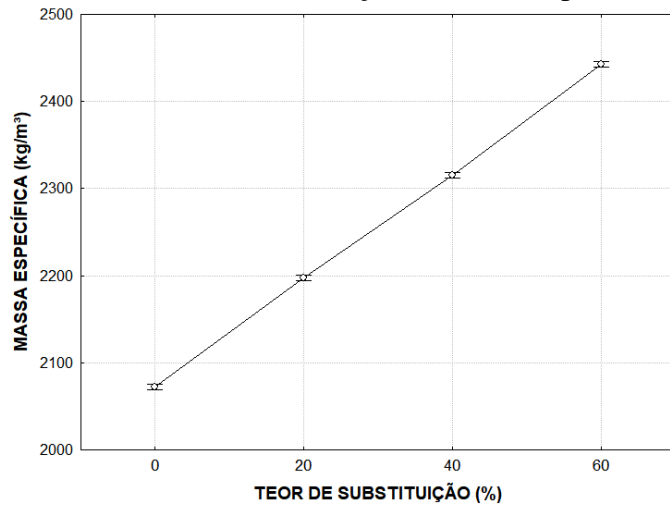
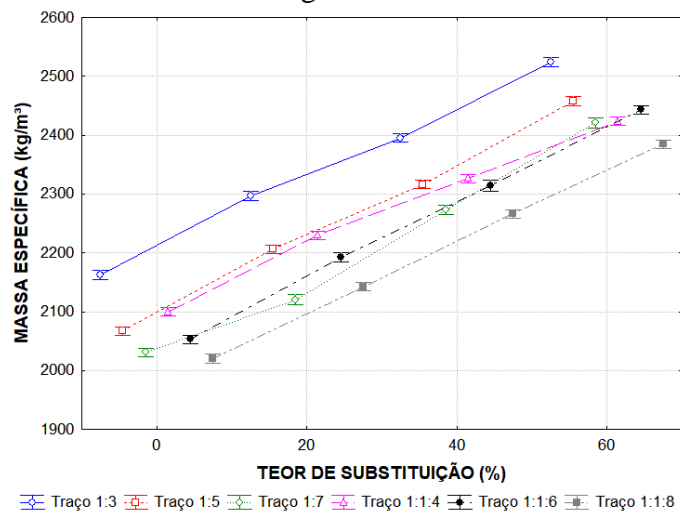


Figura 22 – Interação entre o traço e o teor de substituição na massa específica das argamassas



A massa específica das argamassas está diretamente relacionada a sua trabalhabilidade. Isto possibilita reduzir o esforço durante a sua aplicação resultando em maior produtividade (CINTRA; PAIVA; BALDO, 2014). Sendo assim, argamassas com escória de aciaria tendem a afetar negativamente a produtividade do operário. Entretanto, o uso de aditivos, como os incorporadores de ar, tendem a reduzir a massa específica e a melhorar a trabalhabilidade das argamassas, favorecendo a sua aplicação.

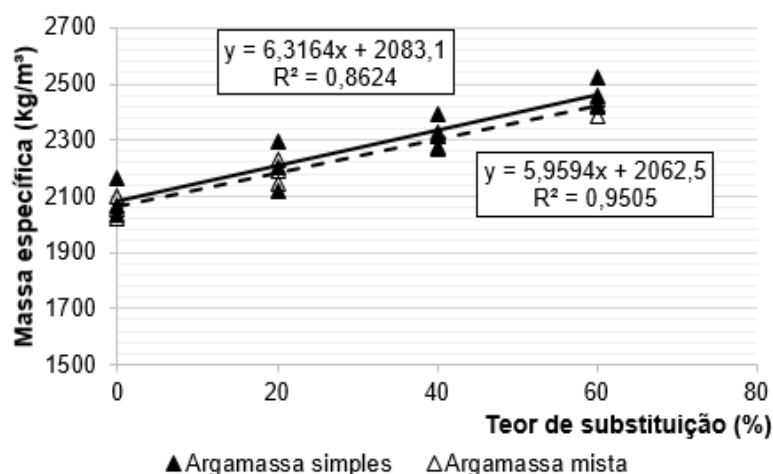
Conforme a ABNT NBR 13281:2005, todas as argamassas investigadas são classificadas como D6 (massa específica > 2000 kg/m<sup>3</sup>). Entretanto, a classificação das argamassas quanto à massa específica proposta por Carasek (2010), estabelece que massa específicas compreendidas entre 1,40 g/cm<sup>3</sup> a 2,30 g/cm<sup>3</sup> são classificadas como normais, enquanto que as superiores a 2,30 g/cm<sup>3</sup> são classificadas como pesadas. Com isto, no caso da escória de aciaria BSSF estudada, tem-se que as argamassas com o teor de 60% de substituição da areia natural por escória de aciaria BSSF são classificadas como argamassas pesadas.

Quanto ao teste de comparação de médias, o teste de TUKEY constatou que não existem diferenças significativas na massa específica entre os traços 1:7 e 1:1:8. No seguimento, foi possível apresentar a correlação para as argamassas simples e para as argamassas mistas entre a massa específica das argamassas no estado fresco ( $De$ ) e o teor de substituição da areia natural por escória de aciaria,  $Ts$ , (Figura 23). As equações de 9 e 10 apresentam a correlação para as argamassas de cimento e as argamassas mistas respectivamente. Os valores do coeficiente de determinação das equações ( $R^2$ ) foram respectivamente de 0,86 e 0,95.

$$De_{cimento} = 6,3164 Ts + 2083,1 \quad \text{Eq (9)}$$

$$De_{mista} = 5,9594 Ts + 2062,5 \quad \text{Eq (10)}$$

Figura 23 – Correlação entre a massa específica e o teor de substituição de escória para as argamassas simples e mistas

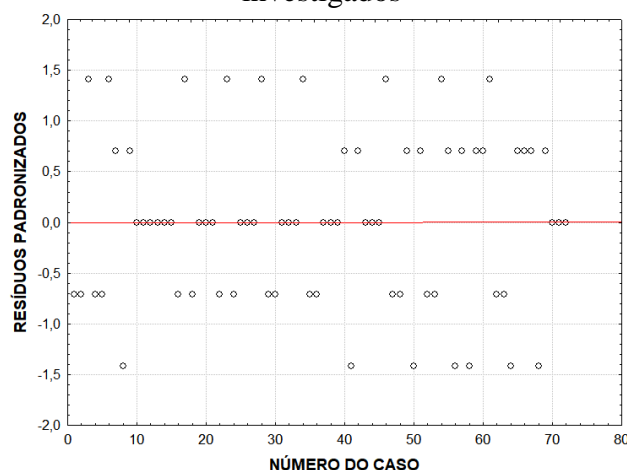




### 4.3 – Teor de ar incorporado

Os valores de teor de ar incorporado (%) das argamassas são apresentados na Tabela 16. Realizou-se o tratamento dos resíduos padronizados para detectar e descartar os dados espúrios, conforme descrito no método de pesquisa. A Figura 24 apresenta os resíduos padronizados para os valores de teor de ar incorporado. Pode-se constatar que nenhum valor foi considerado outlier.

Figura 24 - Resíduos padronizados para os dados de teor de ar incorporado dos traços investigados



Após o tratamento dos dados, foi realizado a análise de variância (ANOVA) para a análise dos dados. Os resultados são apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 – Tratamento estatístico (ANOVA) para o teor de ar das argamassas.

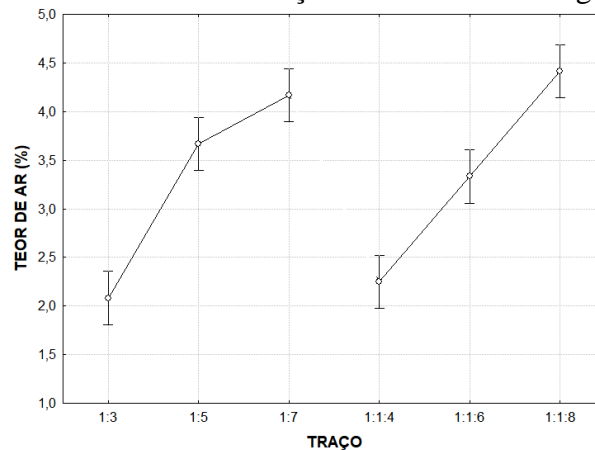
Análise de variância						
Efeito	SQ	GDL	MQ	F crítico	Valor p	Significância
<b>Traço</b>	56,5694	5	11,3139	50,913	0,000000	S
<b>Teor de substituição</b>	1,4861	3	0,4953	2,229	0,096835	NS
<b>Traço x teor de substituição</b>	20,9306	15	1,3954	6,279	0,000000	S
<b>Erro</b>	10,6667	48	0,2222	-	-	-

SQ – Soma quadrada; GDL- Grau de liberdade; MQ- média quadrada; S – Significativo; NS- Não significativo.

A ANOVA mostrou que o traço e a interação traço x teor de substituição apresentam influência significativa no teor de ar das argamassas, sendo o teor de substituição não significativo (Tabela 18).

As Figuras 25 apresentam o comportamento da influência do traço no teor de ar incorporado.

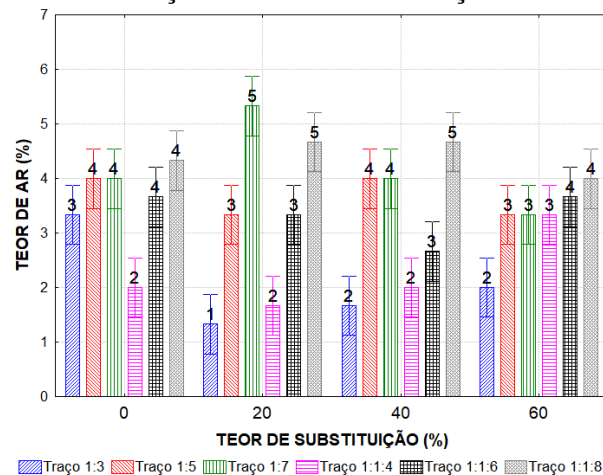
Figura 25 – Influência do traço no teor de ar das argamassas



Na Figura 25, evidencia-se que os traços mais pobres apresentam maiores valores de teor de ar incorporado. Isso pode ser justificado pelo aumento da relação a/c, bem como aumento do teor de agregado, ocasionando aumento do teor de ar. Por outro lado, o aumento do teor de cimento provoca uma redução do teor de ar incorporado em materiais cimentícios (ROMANO, 2013). Este aumento ocasiona um melhor empacotamento das argamassas, e conseqüentemente haverá menos espaço para livre para as bolhas de se formarem (ALVES,2002).

A Figura 26 mostra os valores do teor de ar incorporado para os traços e os teores investigados. Os valores dos teores são baixos devido à não utilização de aditivos. Para argamassas de revestimento produzidas sem aditivos, sejam argamassas simples ou mistas, o teor de ar geralmente encontra-se em torno de 2 a 5 % do volume total (DO Ó, 2004). O referido autor complementa ainda explicando que este valor corresponde ao ar aprisionado, cujas bolhas de ar são irregulares e não estáveis, resultante do aprisionamento durante a mistura, enquanto que o ar incorporado é composto por bolhas de ar estáveis com aspecto de esferas microscópicas, resultante do uso de aditivos.

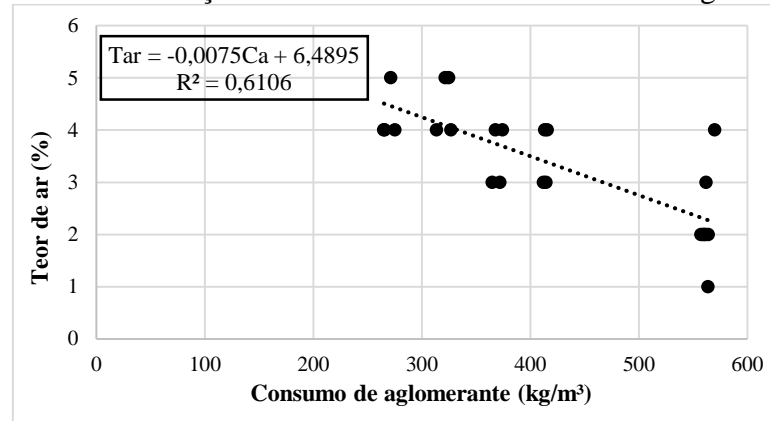
Figura 26 – Interação entre o traço e o teor de substituição no teor de ar das argamassas



Não foi possível estabelecer uma correlação entre o teor de ar aprisionado com o teor de substituição, bem como com a massa específica no estado fresco. Ademais, apesar de haver uma tendência entre o consumo de aglomerante (Ca) com o teor de ar das argamassas (Tar), a correlação (Figura 27) apresentada na Equação 11, o coeficiente de determinação da equação ( $R^2$ ) foi na ordem de 0,61.

$$T_{ar} = -0,0075Ca + 6,4895 \quad \text{Eq (11)}$$

Figura 27 – Correlação entre o teor de ar e o consumo de aglomerante



Powers (1968) apud MANSUR et al. (2007) explicam que o teor de ar incorporado de uma argamassa plástica depende de uma série de fatores, quais sejam, tipo de misturador, tempo de mistura, relação a/c, granulometria do agregado, viscosidade, velocidade de mistura, tamanho do recipiente de mistura em relação ao misturador, presença de aditivo incorporador de ar, dentre outros. Na situação em que nenhum agente é incorporado, os valores obtidos são geralmente muito baixos e praticamente independentes destes fatores, devido à instabilidade das bolhas observadas

#### 4.4 – Retenção de água das argamassas

Para a análise dos resultados de retenção de água, foram realizadas as análises separadamente para os traços simples e os traços mistos, em virtude da influência da cal na retenção de água das argamassas. Realizou-se o tratamento dos resíduos padronizados para detectar e descartar os dados espúrios. Destaca-se que os dados utilizados encontram-se na Tabela 16. As Figuras 28 e 29 apresentam os resíduos padronizados para a retenção de água dos traços simples e mistos respectivamente.

Figura 28 - Resíduos padronizados para os dados de retenção de água das argamassas simples

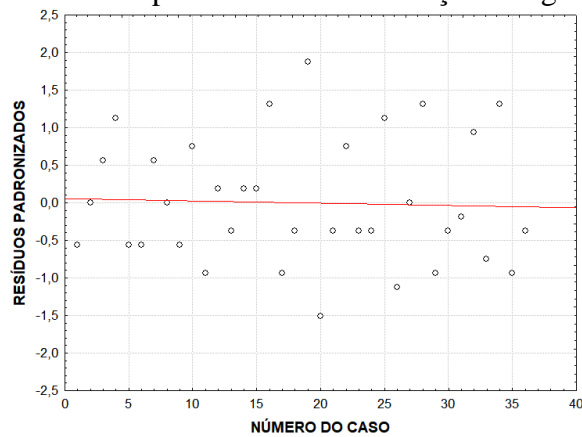
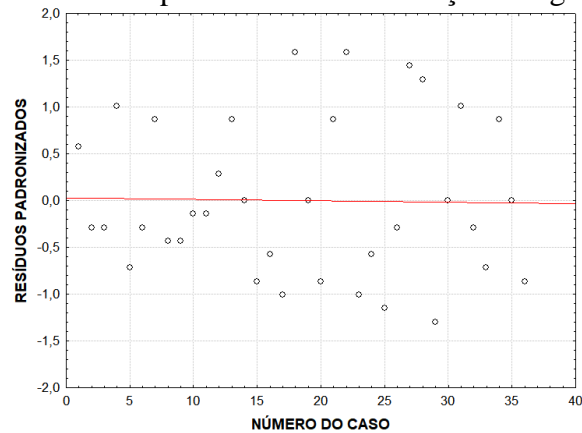


Figura 29 - Resíduos padronizados para os dados de retenção de água das argamassas mistas



Após o tratamento dos dados, foi realizada a análise de variância (ANOVA) para a análise dos dados. Os resultados são apresentados nas Tabelas 19 e 20.

Tabela 19 – Análise de variância para a retenção de água das argamassas simples

Análise de variância						
Efeito	SQ	GDL	MQ	F crítico	Valor p	Significância
<b>Traço</b>	90,5	2	45,2	14,42	0,000077	S
<b>Teor de substituição</b>	48,3	3	16,1	5,13	0,006970	S
<b>Traço x teor de substituição</b>	38,6	6	6,4	2,05	0,097805	NS
<b>Erro</b>	75,3	24	3,1	-	-	-

SQ – Soma quadrada; GDL- Grau de liberdade; MQ- média quadrada; S – Significativo; NS- Não significativo.

Tabela 20 – Análise de variância para a retenção de água das argamassas mistas

Análise de variância						
Efeito	SQ	GDL	MQ	F crítico	Valor p	Significância
<b>Traço</b>	63,4	2	31,7	5,91	0,008175	S
<b>Teor de substituição</b>	39,2	3	13,1	2,44	0,089124	NS
<b>Traço x teor de substituição</b>	32,6	6	5,4	1,01	0,439814	NS
<b>*Erro</b>	128,7	24	5,4	-	-	-

SQ – Soma quadrada; GDL- Grau de liberdade; MQ- média quadrada; S – Significativo; NS- Não significativo.

Para os traços sem cal, observou-se que o traço e o teor de substituição influenciam significativamente na retenção de água, enquanto que para as argamassas mistas, apenas o traço exerce influência significativa. As Figuras 30 e 31 apresentam o comportamento da influência do traço e do teor de substituição na retenção de água das argamassas simples, enquanto que as Figuras 32 apresenta o comportamento dos traços na retenção de água das argamassas mistas.

Figura 30– Influência do teor de substituição na retenção de água das argamassas simples.

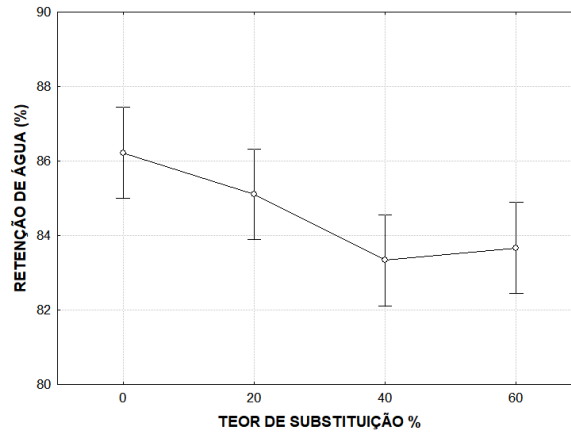


Figura 31 – Influência do traço na retenção de água das argamassas simples.

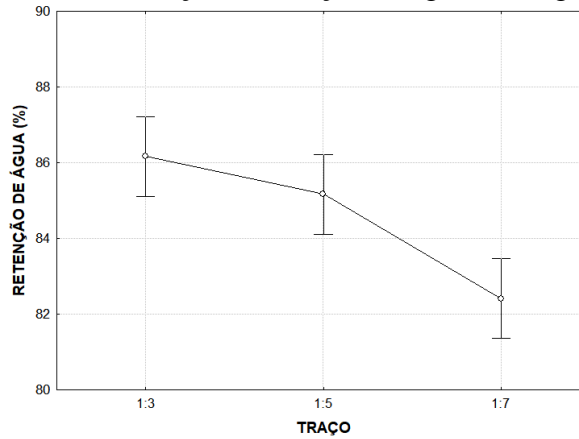
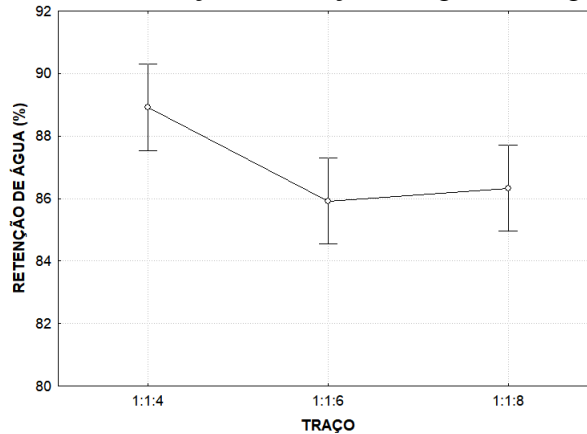


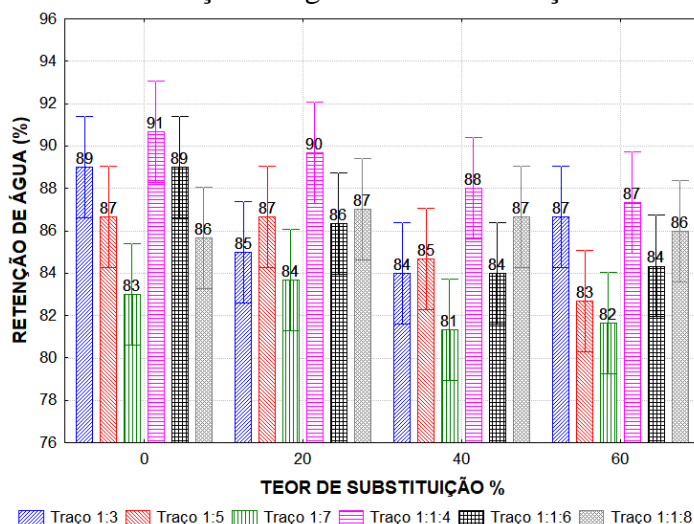
Figura 32 – Influência do traço na retenção de água das argamassas mistas.



Em relação a influência da escória nas argamassas simples, destaca-se que apesar de pouca diferença entre os valores de referência e 60% de substituição, a análise de variância constatou que houve redução significativa na retenção de água (Figura 30). Isto se deve possivelmente pela maior relação a/c das argamassas com escória, pois a argamassa se torna menos retentora de água quando a proporção de água:aglomerante é aumentada (INCE et al, 2011). Filomeno (1993) e Santos (2003) complementa explicando que a água em excesso é facilmente cedida por efeito da sucção da base onde é assentada. Para os traços de argamassas mistas, o teor de substituição não influenciou a retenção de água das argamassas, possivelmente devido a presença da cal e sua alta capacidade de retenção de água.

A Figura 33 apresenta os valores de retenção de água para todos os traços investigados, conforme o teor de substituição.

Figura 33 – Valores de retenção de água conforme o traço e o teor de substituição



Conforme a Figura 33, destaca-se que os valores obtidos da retenção de água ficaram compreendidos entre 80% e 90% para os traços investigados. Esta propriedade é favorável para evitar a sucção rápida por parte do suporte e a evaporação, que dessecam a argamassa e impedem a hidratação completa do cimento, caso em que parte do cimento passa a funcionar apenas como filler (SILVA; BRITO; VEIGA, 2007). Em adição, tem-se que a rápida perda de água da argamassa causa um comprometimento na sua aderência, resistência mecânica, capacidade de absorver deformações e consequentemente provoca perda da durabilidade e estanqueidade (BAÍA, SABBATINI, 2008)

Ainda conforme a Figura 33, percebem-se os elevados valores de retenção de água para o traço 1:3, valores estes semelhantes aos obtidos para os traços com cal, possivelmente pela elevada área específica do cimento se comparada com a da areia. Green et al (1999) constatou que as argamassas no traço 1:3 têm a mesma capacidade de retenção de água que os

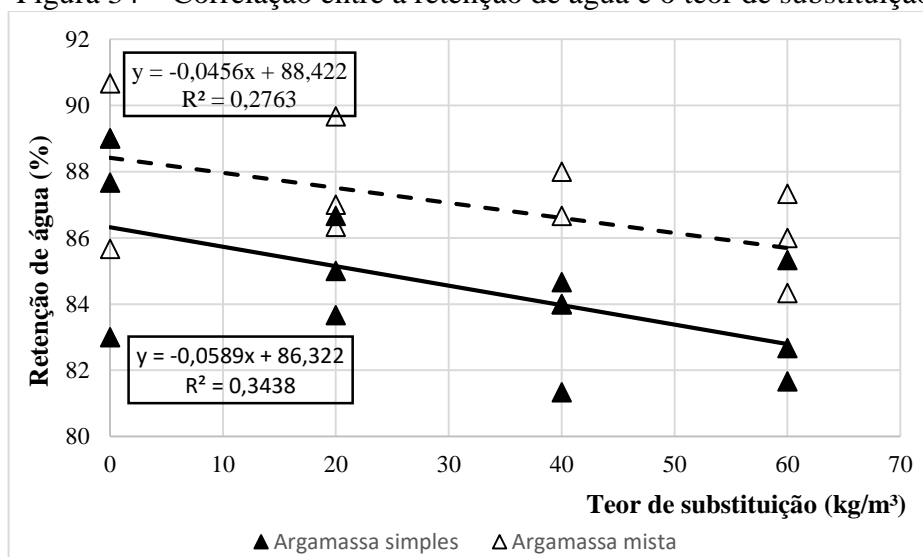
traços com cal, como 1:1:6 e 1:2:9. A Tabela 21 apresenta a classificação das argamassas quanto à retenção de água, conforme a NBR 13281:2005. Percebe-se que com exceção do traço 1:1:4, os demais ficaram compreendidos entre U4 e U5.

Tabela 21 – Classificação das argamassas conforme a ABNT NBR 13281:2005

Traço	Classificação			
	Teor de substituição (%)			
	0	20	40	60
1:3	U4	U3	U3	U4
1:5	U4	U4	U3	U3
1:7	U3	U3	U3	U3
1:1:4	U5	U4	U4	U4
1:1:6	U4	U4	U3	U3
1:1:8	U4	U4	U4	U4

Apesar de haver uma pequena tendência de redução da retenção de água com o aumento do teor de substituição da areia natural por escória de aciaria BSSF, não foi possível estabelecer uma correlação entre tais parâmetros (Figura 34). Quanto à correlação entre o consumo de cimento e à retenção de água, bem como ao consumo de cal e à retenção de água, também não foi possível estabelecer uma correlação com um valor de  $R^2$  baixo.

Figura 34 – Correlação entre a retenção de água e o teor de substituição



#### 4.5 – Comportamento reológico (Squeeze-flow)

O Squeeze-flow foi realizado 6 vezes para cada traço, sendo 3 ensaios para a velocidade de carregamento de 3 mm/s para o instante 10 min após a preparação das argamassas; e os demais para a taxa de carregamento de 0,1 mm/s no tempo de 15 min, conforme preconiza a ABNT NBR 15839:2010. Os resultados do ensaio do squeeze-flow para

as velocidades de 3mm/s e 0,1 mm/s são apresentados nas Figuras 35 a 40. Destaca-se que os demais resultados são apresentados no Apendice C.

Figura 35 – Comportamento reológico do traço 1:3 (grupo A) e seus respectivos teores de substituição por meio do squeeze-flow para a velocidade de: a) 3mm/s: e b) 0,1mm/s

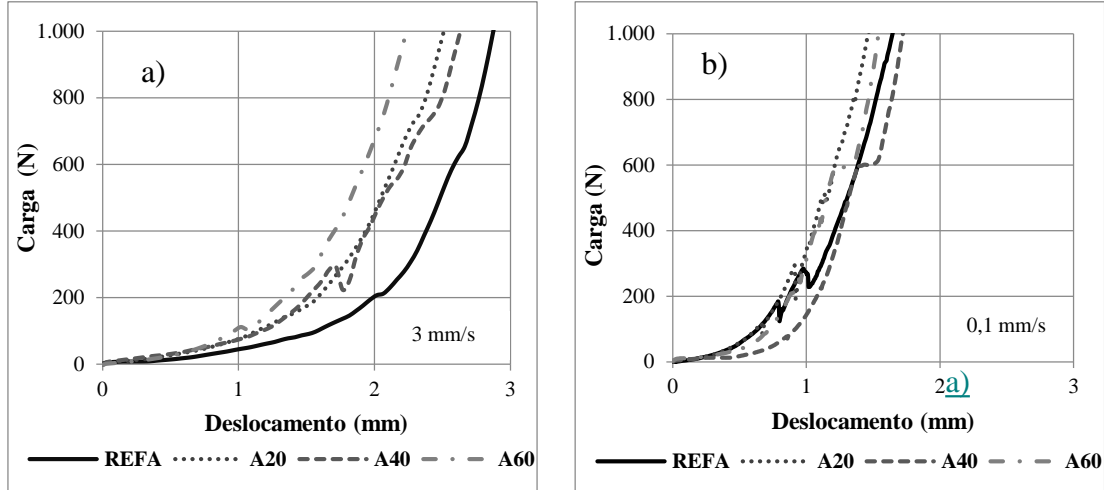


Figura 36 – Comportamento reológico do traço 1:5 (grupo B) e seus respectivos teores de substituição por meio do squeeze-flow para a velocidade de: a) 3mm/s: e b) 0,1mm/s

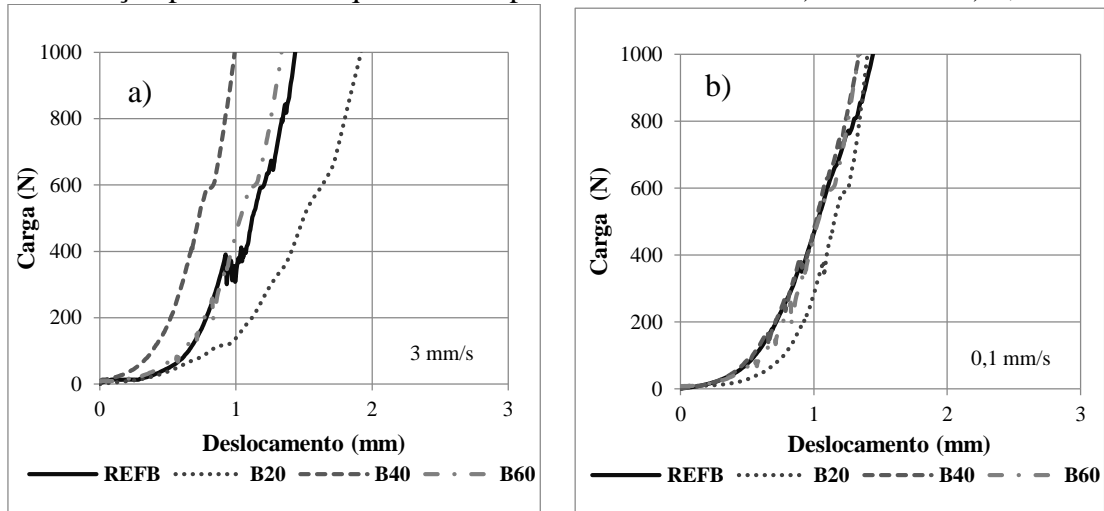




Figura 37 – Comportamento reológico do traço 1:7 (grupo C) e seus respectivos teores de substituição por meio do squeeze-flow para a velocidade de: a) 3mm/s: e :b) 0,1mm/s

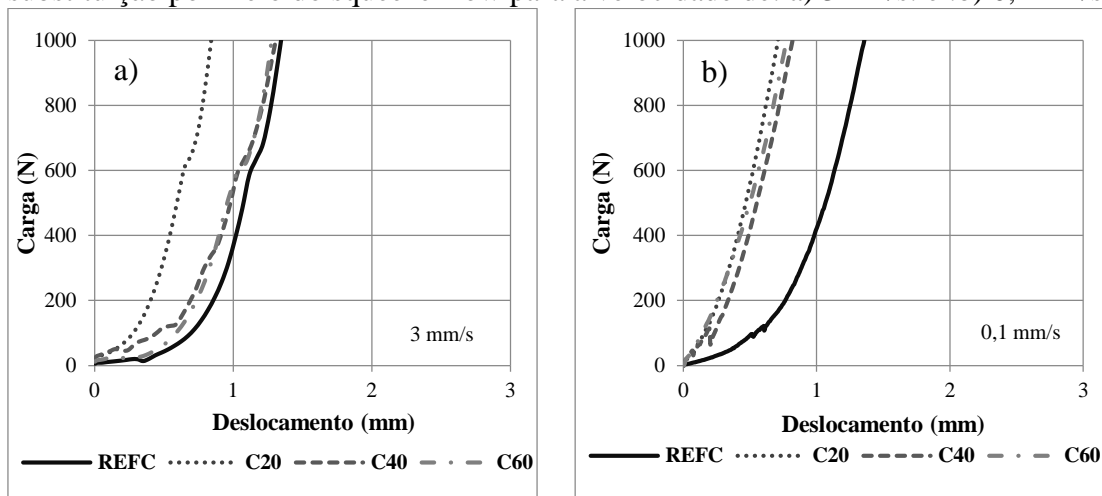


Figura 38 – Comportamento reológico do traço 1:1:4 (grupo D) e seus respectivos teores de substituição por meio do squeeze-flow para a velocidade de: a) 3mm/s: e :b) 0,1mm/s

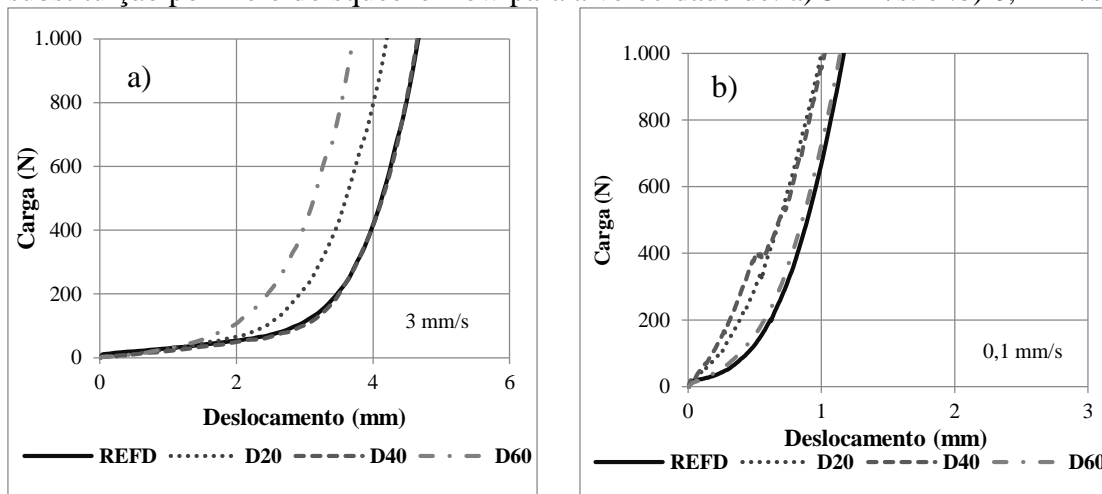


Figura 39 – Comportamento reológico do traço 1:1:6 (grupo E) e seus respectivos teores de substituição por meio do squeeze-flow para a velocidade de: a) 3mm/s: e :b) 0,1mm/s

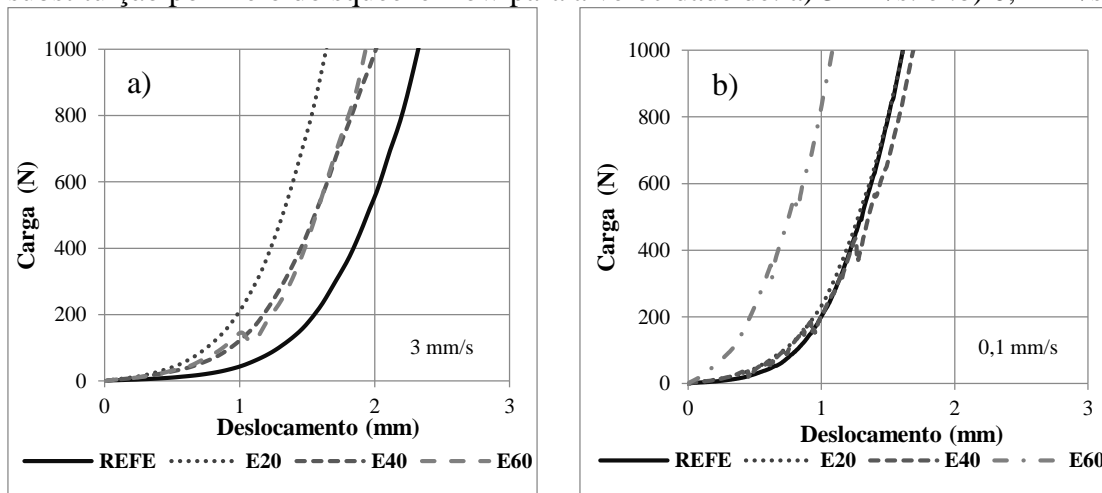
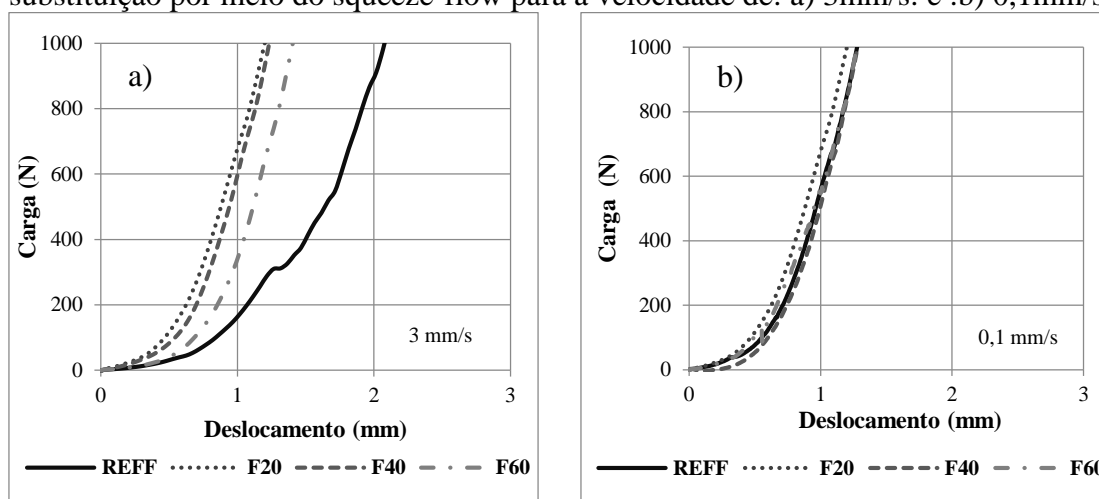


Figura 40 – Comportamento reológico do traço 1:1:8 (grupo F) e seus respectivos teores de substituição por meio do squeeze-flow para a velocidade de: a) 3mm/s: e b) 0,1mm/s



As curvas mostram uma mudança de um estágio elástico diretamente para o strain hardening, fase III, o qual a carga aumenta consideravelmente, com pequeno acréscimo de deformação. O segundo estágio, relacionado à deformação plástica do material, está ausente, com exceção do traço 1:1:4, que apresenta um início de deformação plástica ou fluxo viscoso, entretanto este comportamento é pouco expressivo. Neste segundo estágio, a argamassa é capaz de sofrer deformações sem aumento expressivo da força, o que torna um comportamento apropriado para aplicação e espalhamento da argamassa (CARDOSO; PILEGGI; JOHN, 2005)

Observa-se que para o teor de água definido conforme o índice de consistência fixado em  $260 \pm 5$ mm, conforme a NBR 13276:2016, para a carga máxima do ensaio de 1kN, o deslocamento foi abaixo de 3mm para as argamassas (com exceção do traço 1:1:4 devido a grande quantidade de aglomerante). Isto demonstra a alta consistência das argamassas, pouco adequadas para aplicação. A utilização de uma maior quantidade de água ou ainda o uso de aditivos auxiliaria na lubrificação, e conseqüentemente reduzindo as cargas de compressão.

O crescimento exponencial das cargas caracteriza o enrijecimento por deformação, causado por altos níveis de atrito entre os agregados. Devido aos baixos teores de ar na argamassa, os agregados ficam muito próximos dificultando o fluxo do material. Por outro lado, o aumentando do teor de ar nas argamassas ocasiona um aumento no teor de pasta, mantendo os agregados distantes e lubrificados. (CARDOSO et al, 2007). Com isto, as argamassas com elevado teor de ar apresentam comportamento predominantemente plástico, para os níveis de deformação impostos. As bolhas de ar aumentam o volume ocupado pela pasta e reduzem sua resistência, promovendo facilidade do fluxo, bem como do escorregamento dos grãos (CARDOSO;PILLEGI;JOHN,2005)

Os baixos deslocamentos encontrados no ensaio do squeeze flow podem estar relacionados com a etapa de mistura, tendo em conta que França; Cardoso; Pileggi (2013) investigaram diversos procedimentos de misturas incluindo o preconizado pela NBR 13276:2016 e sua influência no ensaio do Squeeze-flow. Os autores constataram que o procedimento de mistura da norma, o mesmo adotado nesta pesquisa, atingiu menores valores de deslocamento, se comparados com os demais procedimentos, o que demonstra que esse procedimento não foi capaz de dispersar as partículas aglomeradas com eficiência, resultando em unidades móveis (aglomerados) maiores, o que dificulta o fluxo da argamassa (FRANÇA; CARDOSO; PILEGGI, 2013). Fato similar também constatado por Cardoso et al. (2011) que analisando métodos de misturas, constatou ainda que o método da NBR 13276 apresentou baixa repetibilidade. Outro motivo seria ainda a dimensão máxima dos agregados (2,36 mm), em razão da qual Cardoso et al. (2014) constataram que quanto menor o tamanho das partículas, maior o deslocamento máximo obtido no squeeze-flow.

Apesar das argamassas terem sido caracterizadas como na mesma faixa de espalhamento no Flow table, as misturas têm comportamento reológico pelo squeeze flow completamente diferentes, conforme ilustrado nas Figuras de 35 a 40. Isto reforça que as medidas de índice de consistência por si só, não são suficientes para determinar o comportamento do material (CARDOSO; JOHN; PILEGGI, 2009).

Os resultados do squeeze-flow para a velocidade de 0,1 mm/s apresentaram maior resistência ao fluxo, ou seja, menor deslocamento, que na velocidade de 3 mm/s, mesmo fato constatado por Stolz & Masuero (2018). Neste sentido, Cardoso; John; Pileggi (2009) explicam que há menor suscetibilidade das argamassas em segregar quando submetidas à maiores velocidades de deslocamento, o que significa que elas fluem mais facilmente.

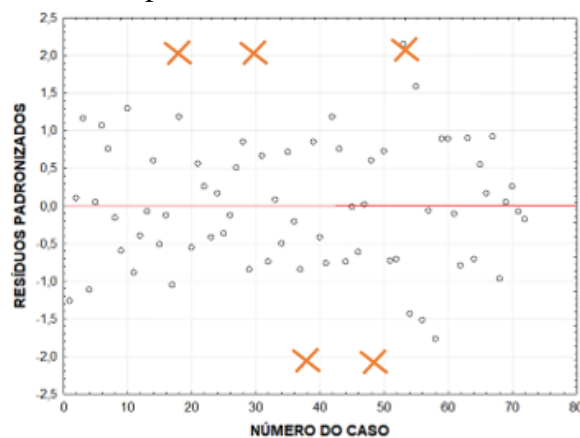
Ainda em relação ao squeeze-flow, seguindo a metodologia adotada Stolz & Masuero (2018), no intuito de se analisar os resultados obtidos neste ensaio, obtiveram-se os deslocamentos máximos atingidos por cada argamassa na carga limite de 1 kN, para cada uma das 3 amostras de cada traço na velocidade de 3 mm/s. A Tabela 22 apresenta os valores de deslocamentos máximos obtidos no ensaio do squeeze-flow.

Tabela 22 - Deslocamentos máximos para 1 kN para deslocamento 3 mm/s obtidos pelo squeeze-flow

Traços		Deslocamentos máximos(mm)			
Simples	1:3	REFA	2,36	2,64	2,86
		A20	2,07	2,31	2,52
		A40	2,9	2,71	2,62
		A60	2,56	2,11	2,21
	1:5	REFB	1,51	1,65	1,42
		B20	1,64	1,45	1,91
		B40	1,73	0,75	0,98
		B60	1,35	1,21	1,33
	1:7	REFC	1,31	1,36	1,49
		C20	1,19	0,84	1,84
		C40	1,61	1,32	1,49
		C60	1,04	1,29	1,1
Mistas	1:1:4	REFD	4,66	4,1	5,01
		D20	4,17	4,1	4,5
		D40	4,66	4,35	4,5
		D60	3,67	3,8	3,92
	1:1:6	REFE	1,75	2,61	2,31
		E20	1,81	2,4	1,66
		E40	2,35	1,71	2,01
		E60	1,41	1,96	1,96
	1:1:8	REFF	2,06	1,92	2,27
		F20	1,21	1,47	1,39
		F40	1,22	0,83	1,04
		F60	1,41	1,34	1,32

Com os valores brutos de deslocamentos máximos (mm), realizou-se o tratamento dos resíduos padronizados para detectar e descartar os dados espúrios, conforme descrito no método de pesquisa. A Figura 41 apresenta os resíduos padronizados

Figura 41 - Resíduos padronizados para os dados de deslocamento máximo pelo squeeze-flow



Foi verificado que o traço, teor de substituição, bem como a interação traço x teor de substituição apresentam influência significativa no deslocamento máximo das argamassas no ensaio do squeeze-flow.

Após o tratamento dos dados, foi realizado a ANOVA para a análise dos dados. Os resultados são apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 – Tratamento estatístico (ANOVA) para o deslocamento máximo (3mm/s) por meio do squeeze-flow das argamassas.

Análise de variância						
Efeito	SQ	GDL	MQ	F crítico	Valor p	Significância
Traço	74,4665	5	14,8933	405,512	0,000000	S
Teor de substituição	2,6618	3	0,8873	24,158	0,000000	S
Traço x teor de substituição	3,1794	15	0,2120	5,771	0,000003	S
Erro	1,53793	43	0,0367	-	-	-

SQ – Soma quadrada; GDL- Grau de liberdade; MQ- média quadrada; S – Significativo; NS- Não significativo.

As Figuras 42 e 43 apresentam o comportamento da influência do traço e do teor de substituição no deslocamento máximo obtido no Squeeze-flow. Em relação a influência do traço, destaca-se que os traços de cal apresentaram os maiores deslocamentos, devido ao aumento da plasticidade proporcionado pela cal, o qual influencia na capacidade de espalhamento das argamassas (TRISTÃO, 1995).

Figura 42 – Influência do traço no deslocamento máximo do squeeze-flow

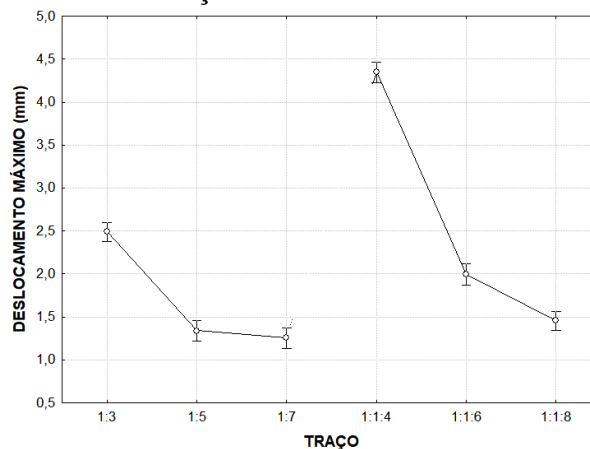
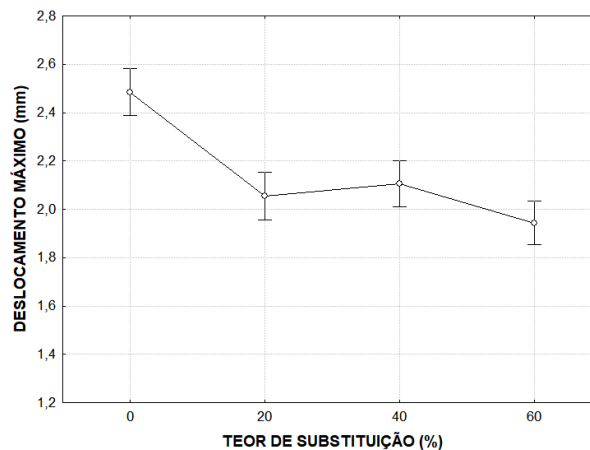
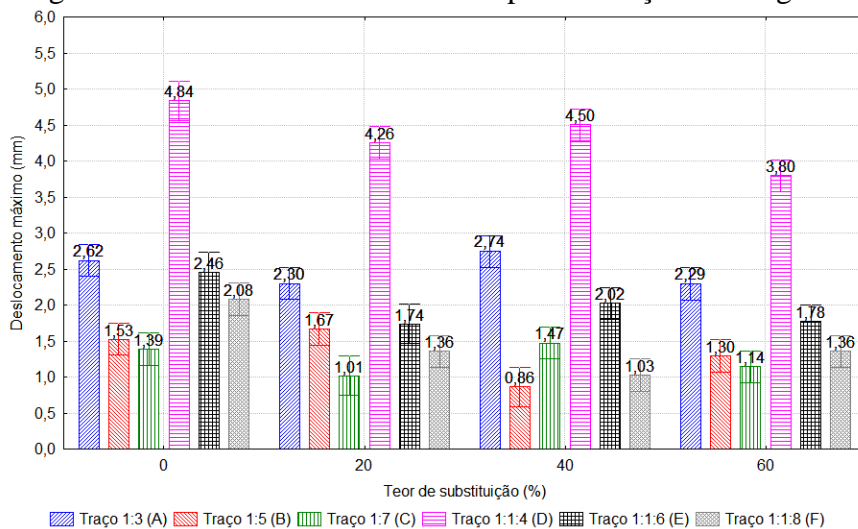


Figura 43 – Influência do teor de substituição no deslocamento máximo do squeeze-flow



A Figura 44 apresenta os deslocamentos máximos obtidos em cada traço investigado. Quanto às argamassas com escória de aciaria, de uma forma geral, apesar da maior relação a/c, apresentaram menores valores dos deslocamentos máximos. Isto pode ser justificado pela forma do grão da escória (menos esféricos que a areia) e textura, bem como pela absorção de água mais elevada da escória, deixando menos água disponível para a mistura, e conseqüentemente, uma menor quantidade de pasta disponível para lubrificar os grãos, elevando assim o atrito do sistema (CARDOSO; PILEGGI; JOHN, 2010). Tal fato demonstra que a substituição da areia natural por escória afeta negativamente as propriedades reológicas das argamassas, o que irá influenciar nas propriedades do estado endurecido.

Figura 44 – Deslocamentos máximos para os traços investigados



Como as argamassas com escória atingiram a carga máxima do ensaio (1 KN) apresentando baixos deslocamentos, isto pode influenciar negativamente na resistência potencial de aderência da argamassas. Silva et al. (2005) explica que as argamassas trabalham em função da sua capacidade de fluir e de se deformar, quando submetida a uma determinada tensão de cisalhamento, apresentando um contato mais extenso com o substrato, otimizando o mecanismo de aderência.

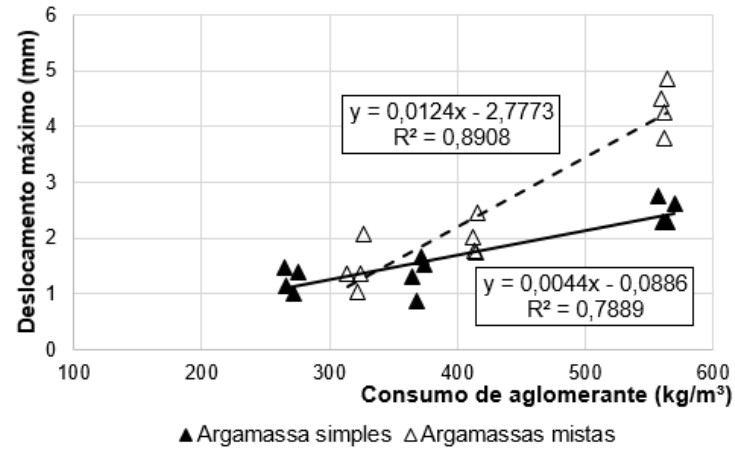
Apesar de haver uma tendência da redução do deslocamento máximo com o aumento do teor de substituição da areia natural por escória, não foi possível estabelecer uma correlação com um valor representativo do coeficiente de determinação ( $R^2$ ). Entretanto, observa-se que os traços com maiores teores de aglomerantes apresentam os maiores deslocamentos devido a lubrificação dos grãos com pasta, e conseqüentemente, a redução do atrito. Foi possível estabelecer uma correlação entre o deslocamento máximo ( $D_{max}$ ) e consumo de aglomerante ( $C_{ag}$ , kg/m<sup>3</sup>), para as argamassas simples (Figura 45). As equações 12 e 13

apresentam a correlação para os traços de argamassa simples e argamassa mista respectivamente,

$$D_{m\acute{a}x} = 0,0044C_{ag} - 0,0886 \quad (R^2 = 0,79) \quad \text{Eq (12)}$$

$$D_{m\acute{a}x} = 0,0124 C_{ag} - 2,7773 \quad (R^2 = 0,89) \quad \text{Eq(13)}$$

Figura 45 – Correlação entre o deslocamento máximo e o consumo de aglomerante



## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 5.1 Conclusão

No que compete as propriedades das argamassas no estado fresco, pode se afirmar que a substituição da areia natural por escória de aciaria BSSF ocasiona mudanças significativas. As argamassas com escória demandam uma maior quantidade de água para obter uma mesma consistência. Este aumento na quantidade de água se deve principalmente à maior absorção de água e textura do grãos.

Em relação à massa específica, constatou-se que com o aumento da substituição de areia por escória de aciaria, ocorre um aumento gradativo, chegando a 19% para o teor de substituição de 60%. Com isso, as argamassas produzidas com escória de aciaria tornam-se mais densas, podendo influenciar negativamente tanto a qualidade do revestimento quanto a produtividade do operário.

Quanto ao teor de ar incorporado, apesar de haver uma tendência de diminuição do teor de ar incorporado com o aumento do teor de substituição de areia por escória de aciaria, a análise de variância constatou que não há diferença significativa entre as argamassas com areia e com escória de aciaria. Entretanto, destaca-se que o traço exerce influência significativa no teor de ar incorporado. Os traços mais ricos apresentaram os menores valores de ar incorporado. Isso se deve ao menor tamanho das partículas, se comparado com o da areia, o que favorece o preenchimento dos vazios, e conseqüentemente a redução do teor de ar.

Em se tratando da propriedade de retenção de água, a influência da substituição da areia por escória de aciaria foi divergente entre as argamassas simples e as argamassas mistas. Enquanto que nas argamassas simples o teor de substituição influencia significativamente na retenção de água, reduzindo os valores para as argamassas com escória, devido a maior relação a/c. Para as argamassas mistas, a análise de variância identificou que o teor de substituição não exerce influência na retenção, possivelmente pela presença da cal e sua alta capacidade de retenção de água. Ressalta-se ainda que os traços com maiores teores de aglomerantes apresentaram maiores valores de retenção de água, entretanto não foi possível obter uma correlação com um valor de  $R^2$  elevado.

Em se tratando do Squeeze-flow, as argamassas ensaiadas apresentaram baixo desempenho nas propriedades reológicas, sendo o estágio de deslocamento plástico presente apenas nas argamassas do traço 1:1:4. Analisando os deslocamentos máximos dos traços obtidos pelas argamassas com o carregamento de 1kN, a análise de variância constatou que o teor de substituição e o traço tem influenciam significativamente no deslocamento máximo pelo



squeeze-flow. Destaca-se que os traços mais ricos, bem como os traços com areia natural (0% de substituição) apresentaram os maiores valores de deslocamento.

Com o exposto, tem-se que a substituição da areia natural por escória de aciaria BSSF em argamassas de revestimento, tende a afetar negativamente na retenção de água das argamassas de cimento Portland. Em adição, as argamassas de cimento Portland e as argamassas mistas tem o comportamento reológico pelo squeeze-flow influenciadas negativamente com o uso da escória de aciaria BSSF. A redução da retenção de água, bem como o menor desempenho das propriedades reológicas podem afetar negativamente as propriedades das argamassas no estado endurecido, como aderência e durabilidade.

Por fim, destaca-se que para o uso de escória de aciaria em argamassas, deve-se investigar o comportamento destas argamassas com o uso de aditivos incorporadores de ar, no intuito de melhorar o comportamento reológico dessas argamassas, tornando-as aptas para aplicação.

## **5.2 Sugestões para trabalhos futuros**

- Realizar a caracterização das argamassas pelo método do dropping ball, cone e da reometria, afim de obter uma caracterização mais ampla das argamassas;
- Investigar o comportamento das argamassas com escória de aciaria com a adição de aditivo incorporador de ar no intuito de melhorar suas propriedades;
- Caracterizar as propriedades no estado endurecido das argamassas com escória de aciaria;
- Estudar a capacidade de aderência das argamassas com escória de aciaria. Em virtude do baixo desempenho obtido pelas argamassas com escória pelo método do squeeze-flow, a resistência potencial de aderência destas argamassas pode ser afetada;
- Analisar a durabilidade das argamassas com a substituição da areia natural por escória, em relação a parametros de absorção de água, fissurabilidade e resistência ao fogo;
- Estudar a produtividade na execução do revestimento de argamassas com escória de aciaria, tendo em vista a elevada massa específica e o baixo deslocamento no Squeeze-flow;
- Investigar a capacidade de blindagem à radiação das argamassas com escória de aciaria, tendo em vista as elevadas massas específicas destas argamassas.

## REFERÊNCIAS

- ABU-EISHAH S. I.; EL-DIEB A. S.; BEDIR M. S. Performance of concrete mixtures made with electric arc furnace (EAF) steel slag aggregate produced in the Arabian Gulf region. **Construction and Building Materials** v.34. p.249–256, 2012
- ADEGOLOYE, G.; BEAUCOUR, A. L.; ORTOLA, S.; NOUMOWE, A. Mineralogical composition of EAF slag and stabilised AOD slag aggregates and dimensional stability of slag aggregate concretes. **Construction and Building Materials**. v.115, p. 171-178, 2016.
- AGOPYAN, V.; JOHN, V. M. **O desafio da sustentabilidade na construção civil**. In: GODEMBERG, J. (Coord.). *Sustentabilidade*. 5 v. São Paulo: Blücher, 2011
- AHMEDZADE, P.; SENGOZ, B. Evaluation of steel slag coarse aggregate in hot mix asphalt concrete. **Journal of Hazardous Materials**. v.165, p. 300-305 2009.
- AKINMUSURU, J. O. Potential beneficial uses of steel slag wastes for civil engineering purposes. **Resources, Conservation and Recycling** v. 5, n.1. p.73–80, 1991
- AL ROUSAN, T. M. **Characterization of Aggregate Shape Properties Using a Computer Automated System**. 2004. 211 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Office of Graduate Studies, Texas A&M University, Texas, 2004.
- ALMEIDA, S. L. M.; SILVA, V. S. Areia artificial: uma alternativa econômica e ambiental para o mercado nacional de agregados. *In: SUFFIB – SEMINÁRIO: O USO DA FRAÇÃO FINA DA BRITAGEM*, 2005. **Anais...** São Paulo: EPUSP, 2005.
- ALVES, J. O. **Processo de reciclagem da escória de aciaria e do resíduo de corte de granito visando a produção de lâ mineral**. 2008, 100 p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da REDEMAT - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2008.
- ALVES, N. J. D. **Avaliação dos aditivos incorporadores de ar em argamassas de revestimento**. 2002. 175p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil - Estruturas e construção civil). Faculdade de Tecnologia. Universidade de Brasília. Brasília 2002.
- ALVES, N. J. D.; DO Ó, S. W. **Aditivos incorporadores de ar e retentores de água**. In: BAUER, E. *Revestimentos de argamassa: Características e peculiaridades*. Brasília: LEM-Unb. Sinduscon, 2005, p. 30-37.
- ANASTASIOU, E.; FILIKAS, K. G.; STEFANIDOU, M. Utilization of fine recycled aggregates in concrete with fly ash and steel slag. **Construction and Building Materials** v. 50 p. 154-161, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios**. Rio de Janeiro, 2006

\_\_\_\_\_ **NBR NM 46:** Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_ **NBR NM 52:** Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_ **NBR NM 248:** Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_ **NBR 6467.** Agregados - Determinação do inchamento de agregado miúdo - Método de ensaio, Rio de Janeiro, 2006 (Versão corrigida: 2009).

\_\_\_\_\_ **NBR 7211.** Agregados para concreto – Especificação, Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_ **NBR 13529:** Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Terminologia. Rio de Janeiro, 2013.

\_\_\_\_\_ **NBR 13276:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.

\_\_\_\_\_ **NBR 13277:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da retenção de água. Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_ **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, 2005.

\_\_\_\_\_ **NBR 13281:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_ **NBR 15577-4:** Reatividade álcali-agregado – Parte 1: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto. Rio de Janeiro, 2008.

\_\_\_\_\_ **NBR 15839:** Argamassa de assentamento e revestimento de paredes e tetos – Caracterização reológica pelo método squeeze-flow. Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_ **NBR 16541:** Argamassa de assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura para a realização de ensaios. Rio de Janeiro, 2016

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE ENTIDADES DE PRODUTORAS DE AGREGADOS PARA CONSTRUÇÃO CIVIL – ANEPAC. Revista Areia e Brita. v.19, p. 1-44, 2016. ISSN **1518-4641**. Disponível em <http://www.anepac.org.br/publicacoes/revista-areia-e-brita/item/355-edicao-69-2016-out-nov-dez>. Acesso em 10 de novembro de 2018

BAALAMURUGAN, J.; KUMAR, V. G.; CHANDRASEKARAN, S.; BALASUNDAR, S.; VENKATRAMAN, B.; PADMAPRIYA, R.; RAJA, V. K. B. Utilization of induction furnace

steel slag in concrete as coarse aggregate for gamma radiation shielding. **Journal of Hazardous Materials**. v. 369, p. 561-568, 2019.

BADLEE, H.; MAGHSOUDIPOUR, A.; DEHKORDI, B. R. Use of Iranian steel slag for production of ceramic floor tiles. **Advances in Applied Ceramics**. v. 107, n.2, p. 111-115, 2013.

BAI, H.; LIU, P.; AI, X.; ZHAO, L.; TANG, Q.; Zheng, S. **Analysis on the microstructure characteristic of steel-slag based ceramics**. *Advanced Materials Research*. v.150 p. 133-138, 2010.

BAI, T.; SONG, Z.G.; WU, Y. G.; HU, X. D.; BAI, H. Influence of steel slag on the mechanical properties and curing time of metakaolin geopolymer. **Ceramics International**, v. 44, p. 15706-15713, 2018.

BAÍA, L. L. M.; SABBATINI, F. H. **Projeto e execução de revestimento de argamassa**. 4. ed. São Paulo, SP. O Nome da Rosa 2008, 88p.

BARCA, C.; DANIEL, M.; LIIRA, M.; DRISSEN, P.; COMEAU, Y.; ANDRÈS, Y.; CHAZARENC, F. Steel slag filters to upgrade phosphorus removal in small wastewater treatment plants: removal mechanisms and performance. **Ecological Engineering**. v. 68, p. 214-222, 2014.

BAUER, E. **Revestimento de argamassa: características e peculiaridades**, Brasília: LEM-Unb. Sinduscon, 2005, 92 p.

BESSA, I. S. **Avaliação do processamento digital de imagens como ferramenta para caracterização de agregados e misturas asfálticas**. 2012. 154p. Dissertação (mestrado em Engenharia de transportes). Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.

BORRAYO, B. M. M.; CONTRERAS, R.; SANCHEZ, A.; FONT, X.; SCHOUWENAARS, R.; ZAMORA, R. M. R. Optimisation of the removal conditions for heavy metals from water: A comparison between steel furnace slag and CeO<sub>2</sub> nanoparticles. **Arabian Journal of Chemistry (2018)**

BRAND, A. S.; ROESLER, J.R. Steel furnace slag aggregate expansion and hardened concrete properties. **Cement and Concrete Composites** v. 60 p. 1-9, 2015.

BRASIL. **Departamento Nacional de produção mineral - Sumário Mineral**. Brasília: DNPM, 2016.135 p. ISSN 0101 2053 Disponível em:  
<http://www.dnpm.gov.br/dnpm/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/sumario-mineral/sumario-mineral-brasileiro-2015>

CALMON, J. L.; TRISTÃO, F. A.; GIACOMETTI, M.; MENEGUELLI, M.; MORATTI, M.; TEIXEIRA, J. E. S. L. Effects of BOF steel slag and other cementitious materials on the

rheological properties of self-compacting cement pastes. **Construction and Building Materials** v. 40 p. 1046-1053, 2013.

CAMPOS, S. A.; RAFAEL, M. F. C.; CABRAL, A. E. B. Evaluation of steel slag of Companhia Siderúrgica do Pecém replacing fine aggregate on mortars. **Procedia Structural Integrity**. v. 11, p.145-152, 2018.

CARASEK, H. Argamassas. In: Isaia, G.C. (ed.). *Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais*, São Paulo, IBRACON, pp. 892-944, 2010

CARASEK, H.; ARAÚJO, R. C.; CASCUDO, O.; ANGELIM, R. Parâmetros da areia que influenciam a consistência e a densidade de massa das argamassas de revestimento. **Revista Matéria**, v.21, n.3, p. 714 –732, 2016.

CARDOSO, A. V. M.; DIAS, F. M. A utilização de escória de aciaria para manufatura de blocos de pavimentação. In: CBECIMAT, 21, 2014, Cuiabá. **Anais...** Cuiabá, 2014, p. 3673-3679.

CARDOSO, F. A.; CAMPORA, F. L.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V.M. Caracterização reológica de argamassas do mercado por squeeze-flow. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE ARGAMASSAS, 7, 2017, Recife. **Anais...** Recife, 2007, p.1-10.

CARDOSO, F. A.; CAMPORA, F. L.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V.M. Influência do tipo de mistura no comportamento reológico de argamassas avaliado por squeeze-flow. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE ARGAMASSAS, 9, 2011, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte, 2011, p. 1-10

CARDOSO, F. A.; JOHN, V. M.; PILEGGI, R. G. Rheological behavior of mortars under different squeezing rates. **Cement and concrete research**, v. 39, n. 9, p. 748-753, 2009.

CARDOSO, F. A.; JOHN, V. M.; PILEGGI, R. G.; BANFILL, P. F. G. Characterisation of rendering mortars by squeeze-flow and rotational rheometry. **Cement and Concrete Research**. v.57 , p.79-87, 2014.

CARDOSO, F. A.; P ILEGGI, R. G.; JOHN, V. M. **Squeeze- flow aplicado a argamassas de revestimento: Manual de utilização**. Boletim técnico da Escola Politécnica da USP, v. 1, p. 1- 29, 2010.

CARDOSO, F. A.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V. M. Caracterização reológica de argamassas pelo método de squeeze-flow. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE ARGAMASSAS, 6, 2005, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis, 2005, p. 1-10

CARVALHO, S. Z.; VERNILLI, F.; ALMEIDA, B.; DEMARCO, M.; SILVA, S. N. The recycling effect of BOF slag in the Portland cement properties. **Resources, Conservation and Recycling**. v. 127 p. 216-220, 2017.

CAVALCANTI, V. M. M.; PARAHYBA, E. R. **A indústria de agregados para construção civil na Região Metropolitana de Fortaleza.**- Fortaleza, 2011.110p. Disponível em : <http://www.dnpm.gov.br/dnpm/publicacoes-economia-mineral/arquivos/a-industria-de-agregados-para-construcao-civil-na-regiao-metropolitana-de-fortaleza>

CHANG, J.; XIONG, C.; ZHANG, Y.; WANG, D. Foaming characteristics and microstructure of aerated steel slag block prepared by accelerated carbonation. **Construction and Building Materials**. v. 209, p. 222-233, 2019.

CHAVES, M. A.; SANTOS, B. E. Uso de imagens CBERS na identificação de áreas de extração de areia na Região Metropolitana de Salvador – BA. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 13, 2007, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis, INPE, 2007, p. 1071-1078.

CARDOSO, F. A.; CAMPORA, F. L.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V.M. Influência do tipo de mistura no comportamento reológico de argamassas avaliado por squeeze-flow. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13, 2007, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis, 2007, p.1-10.

CHEN, Z.; XIE, J.; XIAO, Y.; CHEN, J.; WU, S. Characteristics of bonding behavior between basic oxygen furnace slag and asphalt binder. **Construction and Building Materials** v. 64 p.60-66, 2014.

CINTRA, C. L. D.; PAIVA, A. E. M.; BALDO, J. B. Argamassas de revestimento para alvenaria contendo vermiculita expandida e agregados de borracha reciclada de pneus - Propriedades relevantes. **Cerâmica**. v. 60, p.69-76, 2014.

DAS, B.; PRAKASH, S.; REDDY, P. S. R.; MISRA, V. N. An overview of utilization of slag and sludge from steel industries, **Resources Conservation & Recycling**. v. 50 n.1 p.40–57, 2007.

DO Ó, S. W. **Análise da retenção de água em argamassas de revestimento aditivadas.** 2004, 173p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Faculdade de Tecnologia. Universidade de Brasília. Distrito Federal, 2004.

DUCMAN, V.; MLADENOVIC, A. The potential use of steel slag in refractory concrete. **Materials Characterization**. v. 62, p. 716-723, 2011.

EISHAH, S. I. A.; DIEB, A. S. E.; BEDIR, M. S. Performance of concrete mixtures made with electric arc furnace (EAF) steel slag aggregate produced in the Arabian Gulf region. **Construction and Building Materials** v. 34 p. 249-256, 2012.

ETXEBERRIA, M.; PACHECO, C.; MENESES, J.M.; BERRIDI, I. Properties of concrete using metallurgical industrial by-products as aggregates. **Construction and Building Materials** v.24, n 9. p. 1594–1600, 2010.

FALESCHINI, F.; BRUNELLI, K.; ZANINI, M.A.; DABALÀ, M.; PELLEGRINO, C. Electric Arc Furnace slag as coarse recycled aggregate for concrete production. **Journal of Sustainable Metallurgy**. v. 2, n.1, p 44–50, 2015.

FERNANDES, D. P. **Estudo de estabilização química, geo-mecânica e ambiental das escórias de aciaria LD para fins de aplicação como material de lastro ferroviário em vias sinalizadas**. 2010. 142 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Programa de Pós-Graduação em Geotecnia. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

FILOMENO, O. L. **Caracterização das argamassas de assentamento empregadas na região de Florianópolis e estudo comparativo entre argamassas de assentamento de cimento e cal e cimento e saibro**. 1993, 97 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de pós-graduação em engenharia civil. Universidade federal de Santa Catarina. Florianópolis, Santa Catarina, 1993.

FONTANA, L. M. T.; TORALLES-CARBONARI, B. M.; MAZÃO, F. P.; PIEDADE, G. H. Escória de aciaria de forno elétrico como agregado para concreto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 55, 2013, Gramado. **Anais...** Gramado, 2013.

FONTANA, L. M. T. **Argamassa pesada com escória de aciaria de forno elétrico para atenuação de radiação**. 2015, 135 p. Dissertação (mestrado) em Engenharia de Edificações e Saneamento. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Edificações e Saneamento. Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2015.

FRANÇA, M. S. de.; CARDOSO, F. A.; PILEGGI, R.G. Influence of laboratory mixing procedure on the properties of mortars. **Ambiente construído**, Porto Alegre, v. 13, n. 2, p. 111-124, 2013.

GAO, J.; SHA, A.; ANG, Z.; TONG, Z.; LIU, Z. Utilization of steel slag as aggregate in asphalt mixtures for microwave deicing. **Journal of Cleaner production** v. 152 p. 429-442, 2017.

GAO, X.; OKUBO, M.; MARUOKA, N.; SHIBATA, H.; ITO, T.; KITAMURA, S.Y.; Production and utilisation of iron and steelmaking slag in Japan and the application of steelmaking slag for the recovery of paddy fields damaged by Tsunami. **Miner. Process. Extractive Metall.** v.124, p.116–124, 2015.

GEISELER, J. Use of steelworks slag in Europe. **Waste management**. v.16, p.59-63, 1996.

GEYER, R. M. T.; VIEIRA JUNIOR, A.; COSTA, A. F.; ROCHA, A.; PAIVA JUNIOR, J. A. Utilização de escória de aciaria elétrica na produção de tijolos de solo-cimento-escória. In: SEMINÁRIO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 5, 2002, São Paulo. **Anais...** São Paulo, 2002. p. 257-265.

GONZÁLEZ-ORTEGA, M. A.; SEGURA, I.; CAVALARO, S. H. P.; TORALLES-CARBONARI, B.; AGUADO, A.; ANDRELLO, A. C. Radiological protection and

mechanical properties of concretes with EAF steel slags. **Construction and Building Materials** v.51, p. 432-438, 2014.

GREEN, K.M; CARTER, M.A.; HOFF, W. D.; WILSON, M.A. The effects of lime and admixtures on the water-retaining properties of cement mortars. **Cement and Concrete Research**, v. 29, p. 1743-1747, 1999.

GUMIERI, A.G; **Estudo da viabilidade Técnica da utilização de escórias de aciaria do processo LD como adição em cimentos**. 2002, 251p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) Programa de Pós-graduação em Engenharia civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

GUO, J.; BAO, Y.; WANG, M. Steel slag in China: Treatment, recycling and management. **Waste management**. v. 78, p. 318-330, 2018.

GUO, Y.; XIE, J.; ZHAO, J.; ZUO, K. Utilization of unprocessed steel slag as fine aggregate in normal - and high-strength concrete. **Construction and Building materials**. v. 204, p. 41-49, 2019.

HAN,F.; YUN, S.; ZHANG, C.; XU, H.; WANG, Z. Steel slag as accelerant in anaerobic digestion for nohazardous tretment and digestate fertilizer utilization. **Bioresource technology**. v.282, p. 331-338, 2019.

HE, F.; FANG, Y.; XIE, J.; XIE, J. Fabrication and characterization of glass-ceramics materials developed from steel slag waste. **Materials & Design**. v.42, p. 198-203, 2012.

HE, H.; TAM, N. F. Y.; YAO, A. QIU, R.; LI, W. C.; YE, Z. Growth and Cd uptake by rice (*Oryza sativa*) in acidic and Cd – contaminated paddy soils amended with steel slag. **Chemosphere**. v. 189, p. 247-254, 2017.

IABr. (2014). **Relatório de Sustentabilidade**. Fonte: Instituto Aço Brasil: Disponível em: <http://www.acobrasil.org.br/sustentabilidade/> Acesso em 10 de outubro de 2017

IABr. (2018). **Relatório de Sustentabilidade**. Fonte: Instituto Aço Brasil: Disponível em: <http://www.acobrasil.org.br/sustentabilidade/> Acesso em 18 de janeiro de 2018

ILYUSHECHKIN, A. Y.; ROBERTS, D. G. ; FRENCH, D.; HARRIS, D. J. **IGCC Solids Disposal and Utilisation, Final Report for ANLEC Project 5-0710-0065**

INCE, C.; CARTER, A.; WILSON, M. A.; COLLIER, N. C.; EL-TURKI, A.; BALL, R. J.; ALLEN, G. C. Factors affecting the water retaining characteristics of limeand cement mortars in the freshly-mixed state. **Materials and Structures** v. 44, p. 509–516, 2011.

JANUZZI, R. V. **Estudo do comportamento mecânico de blocos com escória de aciaria visando à aplicabilidade em Alvenaria**. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação em Engenharia Civil). Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2012.



JANUZZI, R. V. **Modelagem do comportamento mecânico de blocos e prismas produzidos com escória de aciaria elétrica para alvenaria estrutural**. 2014, 135p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2014.

JIANG, YI; LING, T. C.; SHI, C.; PAN, S. Y. Characteristics of steel slags and their use in cement and concrete – A Review. **Resources, Conservation & recycling**. v. 136, p. 187-197, 2018.

KANDHAL, P. S.; HOFFMAN, G. Evaluation of steel slag fine aggregate in hot-mix asphalt mixtures. **Transportation Research Record**, v.1583, p.28-36, 1997.

KASHIWAYA, Y.; TOISHI, K.; KANEKI, Y.; YAMAKOSHI, Y.; Catalytic Effect of Slags on the Formation of Biodiesel Fuel. **ISIJ International**, v. 47, n. 12, p. 1829-1831. 2007.

KOUROUNIS, S.; TSIVILIS, S.; TSAKIRIDIS, P. E.; PAPADIMITRIOU, G. D.; TSIBOUKI, Z. Properties and hydration of blended cements with steelmaking slag. **Cement and Concrete Research**. v. 37, p. 815-822, 2007.

LAN, Y. P.; LIU, Q. C.; MENG, F.; NIU, D. L.; ZHAO, H. Optimization of magnetic separation process for iron recovery from steel slag. **Journal of iron and steel research, International**. v. 24, p.165-170, 2017.

LE, D. H.; SHEEN, Y. N.; BUI, Q. B.; An assessment on volume stabilization of mortar with stainless steel slag sand. **Construction and Building Materials** v.155, p. 200-208, 2017.

LI, G.; GUO, M. Current Development of Slag Valorisation in China. **Waste Biomass Valor**, v. 5, p.317-325, 2014.

LIU, J.; GUO, D.; ZHU, J.; CHEN, X. Status and development of the comprehensive utilization of steel slag at Baosteel. **Baosteel Technical Research**. v. 5, n. 2, p.15, 2011.

LIU, Y.; WANG, X. Application of the BSSF molten steel slag processing technology in POSCO. **Baosteel Technical Research**; Shanghai. v. 5, p. 20-23, 2011.

LI, Y.; NI, W.; CHEN, D. P.; WANG, Z. J.; ZHANG, B. Experimental investigation on concrete made from iron and steel slags for building high-strength artificial reefs. Beijing Keji Daxue Xuebao/**Journal of University of Science and Technology Beijing**. v.34, p. 1308-1313, 2012.

LOHANI, T. K.; PADHI, M.; DASH, K. P.; JENA, S. Optimum utilization of quarry dust as partial replacement of sand in concrete. **Internacional Journal of Applied Sciences and Engineering Research**, v. 1, n. 2, p. 391-404, 2012.

LU, T. H.; CHEN, T. L.; SHIN, P. H.; CHANG, J. E. Use of basic oxygen furnace slag fines in the production of cementitious mortars and the effects on mortar expansion. **Construction and Building Materials** v.167, p. 768–774, 2018.

- LUXÁN, M. P.; SOTOLONGO, R.; DORREGO, F.; HERRERO, E. Characteristics of the slags produced in the fusion of scrap steel by electric arc furnace. **Cement and Concrete Research** v.30, p. 517-519, 2000
- MAHIEUX, P. Y.; AUBERT, J. E.; ESCADEILLAS, G. Utilization of weathered basic oxygen furnace slag in the production of hydraulic road binders. **Construction and Building Materials** v.23, p. 742–747, 2009.
- MALLET, D. C.; WALLACE, S.; COMEAU, Y. **Steel Slag Filtration for Extensive Treatment of Mining Wastewater**. Proceedings of the Water Environment Federation. 2011.
- MANSUR, A. A. P.; NASCIMENTO, O. L.; MANSUR, H. S. Avaliação do teor de ar incorporado em argamassas modificadas com poli (álcool vinílico). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS, 9, 2007, Campina Grande. **Anais...** Campina Grande, UFCG, 2007, p.1-9.
- MASUERO, A. B.; VILELA, A. C.; DAL MOLIN, D. Estabilização e viabilidade técnica da utilização de escórias de aciaria elétrica. **Ambiente Construído**. v.4, n.2 p. 57-81, 2004.
- MATTOS, L. R. S.; DAL MOLIN, D. C. C.; CARNEIRO, A. M. P. Caracterização das argamassas para revestimento externo utilizadas em Belém/PA: Estudo do comportamento no estado fresco. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 4, 2001, Brasília. **Anais...** Brasília, Unb, 2001, p.1-12.
- MENADI, B.; KENAI, S.; KHATIB, J.; AIT-MOKHTAR, A.; Strenght and durability of concrete incorporating crushed limestone sand. **Construction and Building Materials**. v. 23, p. 625-633, 2009.
- MENOSSE, R. T., **Utilização do pó de pedra basáltica em substituição à areia natural do concreto**. 2004, 110 p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 2004.
- METWALLY, K. A.; FARIED, A. S.; TAWFIK, T. A.; Significance of blast furnace as coarse aggregate in concrete. **Life Science Journal** v. 14, n.9, p. 1-6, 2017.
- MIKHAIL, S. A.; TURCOTTE, A. M. Thermal behaviour of basic oxygen furnace waste slag. **Thermochimica acta** v. 263, p.87-94, 1995.
- MONOSI, S.; RUELLO, M. L.; SANI, D. Electric arc furnace slag as natural aggregate replacement in concrete production. **Cement and concrete composites**. v. 66, p 66-72, 2016.
- MONTEDO, O. R. K.; REITZ, G. M.; BERTAN, F. M.; PICCOLL, R.; HOTZA, D.; NOVAES DE OLIVEIRA, A.P. Utilização de Pó de Aciaria em Massa de Cerâmica Vermelha. **Cerâmica Industrial**. v.8, p. 14-17, 2003.
- MONTGOMERY, D. G.; WANG, G. Preliminary laboratory study of steel slag for blended cement manufacture. **Materials Forum**. v.15, p. 374-382, 1991.

MOTZ, H.; GEISELER, J. Products of steel slags an opportunity to save natural resources. **Waste management** v.21, n.3 p.285-293, 2001.

MUHMOOD, L.; VITTA, S.; VENKATESWARAN, D. Cementitious and pozzolanic behavior of electric arc furnace steel slags. **Cement and Concrete Research**. v.39, p. 102-109, 2009.

NAKAKURA, E. H.; CINCOTTO, M. A. **Análise dos requisitos de classificação de argamassas de assentamento e revestimento**. In: BT/PCC/359 – Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção, São Paulo, 2004

NETINGER, I.; KESEGIC, I.; GULJAS, I.; The effect of high temperatures on the mechanical properties of concrete made with different types of aggregates. **Fire Safety Journal**. v. 46, n.7, p. 425-430, 2011.

NETINGER, I.; BJEGOVIC, D.; VRHOVAC, G. Utilisation of steel slag as an aggregate in concrete. **Materials and structures** v. 44, p.1565-1575, 2011.

OUDA, A. S.; ABDEL-GAWWAD, H. A. The effect of replacing sand by iron slag on physical, mechanical and radiological properties of cement mortar. **HBRC Journal** v.13, p. 255-261, 2017.

OZTURK, M.; AKGOL, O.; SEVIM, U. K.; KARAASLAN, M.; DEMIRCI, M.; UNAL, E. Experimental work on mechanical, electromagnetic and microwave shielding effectiveness properties of mortar containing electric arc furnace slag. **Construction and Building Materials**. v. 165 p. 58-63, 2018.

PACHECO, L. C. D. **O estudo da escória de aciaria como agregado siderúrgico para uso em lastro ferroviário**. 2006. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ, 2006.

PALANKAR, N.; SHANKAR, A. U. R.; MITHUN, B. M. Studies on eco-friendly concrete incorporating industrial waste as aggregates. **International Journal of Sustainable Built Environment** v. 4, p. 378-390, 2015.

PAN, S.Y.; ADHIKARI, R.; CHEN, Y.H.; LI, P.; CHIANG, P.C. Integrated and innovativesteel slag utilization for iron reclamation, green material production and CO<sub>2</sub>fixation via accelerated carbonation. **Journal of Clean. Production**. v.137, p. 617–631. 2016.

PARENTE, E. B.; BOAVISTA, A. H.; SOARES, J. B. Estudo do Comportamento Mecânico de misturas de solo e escória de aciaria para aplicação na construção rodoviária na região metropolitana de fortaleza. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 17, 2003, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, 2002, p.1-8.

PARK, S. Study on the fluidity and Strength properties of high performance concrete utilizing crushed sand. **International Journal of Concrete Structures and Materials**. v.6, n.4, p. 231 - 237, 2012.

PEDRO, D.; BRITO, J.; VEIGA, R.; Mortars Made with Fine Granulate from Shredded Tires **Journal of Materials in Civil Engineering**. v 25, n.4 p. 519-529, 2013.

PELLEGRINO, C.; CAVAGNIS, P.; FALESCHINI, F.; BRUNELLI, K. Properties of concretes with Black/Oxidizing Electric Arc Furnace slag aggregate. **Cemente & Concrete Composites** v.37 p. 232-240, 2013.

PELLEGRINO, C.; GADDO, V. Mechanical and durability characteristics of concrete containing EAF slag as aggregate. **Cement & Concrete Composites** v.31, n. 9, p.663-671, 2009.

PENTEADO, C. L. S. G.; EVANGELISTA, B. L.; FERREIRA, G. C. S.; BORGES, P. H. A.; LINTZ, R. C. C. Use of electric arc furnace slag for producing concrete paving blocks. **Ambiente Construído**, v. 19, n. 2, p. 21-32, 2019.

QASRAWI, H. The use of steel slag aggregate to enhance the mechanical properties of recycled aggregate concrete and retain the environment. **Construction and Building Materials** v. 54 p. 298-304, 2014.

QIANG, W.; PEIYU, Y.; JIANWEI, Y.; BO, Z. Influence of steel slag on mechanical properties and durability of concrete. **Construction and Building Materials**. v. 47, p. 1414-1420, 2013.

QUARCIONI, V. A.; CHOTOLI, F. F.; ÂNGULO, S. C.; GUILGE, M. S.; CAVANI, G. R.; CASTRO, A. L.; CINCOTTO, M. A. Estimativa da porosidade de argamassas de cimento e cal pelo método de cálculo de volumes. **Ambiente Construído**, v. 9, n. 4, p. 175-187, 2009.

RESENDE, A. D. **Utilização da escória de aciaria pura e com adição de argila como camada de base em pavimentação rodoviária**. 2010, 210p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica). Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Ouro Preto, 2010.

ROHDE, L. **Escória de aciaria elétrica em camadas granulares de pavimentos – Estudo laboratorial**. 2012, 118p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) em engenharia civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

ROJAS, M. F. ROJAS, M. I. S. Chemical assessment of the electric arc furnace slag as construction material: Expansive compounds. **Cement and Concrete Research** v. 34 p. 1881-1888, 2004.

ROMANO, R. C. O. **Incorporação de ar em materiais cimentícios aplicados em construção civil**. 2013, 200p. Tese (Doutorado em Construção Civil). Departamento de

Engenharia de Construção civil. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2013.

RONDI, L.; BREGOLI, G.; SORLINI, S.; COMINOLI, L.; COLLIVIGNARELLI, C.; PLIZZARI, G. Concrete with EAF steel slag as aggregate: A comprehensive technical and environmental characterisation. **Composites Part B**. v. 90 p.195-202, 2016.

SALMAN, M.; CIZER, O.; PONTIKES, Y.; VANDEWALLE, L.; BLANPAIN, B.; BALEN, K.V. Effect of curing temperatures on the alkali activation of crystalline continuous casting stainless steel slag. **Construction and building materials**. v. 71, p. 308-316, 2014.

SALVIANO, A. B.; LEITE, A. L. Coberturas secas com escória de aciaria visando a neutralização de drenagem ácida de rochas: ensaios de coluna. **Geociências**, v. 33, n. 3, p. 492-505, 2014.

SANTAMARÍA-VICARIO, I.; RODRÍGUEZ, A.; GONZÁLEZ, S. G.; CALDERÓN, V. Design of masonry mortars fabricated concurrently with different steel slag aggregates. **Construction and Building Materials**. v. 95 p. 197-206, 2015.

SANTAMARÍA-VICARIO, I.; RODRÍGUEZ, A.; GONZÁLEZ, S. G.; CALDERÓN, V. Durability behavior of steelmaking slag masonry mortars. **Materials and design** v. 97 p. 307-315, 2016.

SANTOS, C. C. N. **Critérios de projetabilidade para as argamassas industrializadas de revestimento utilizando bomba de argamassa com eixo helicoidal**. 2003, 138p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção civil. Universidade de Brasília, Distrito Federal, 2003.

SAXENA, S.; TEMBHURKAR, A. R. Impact of use of steel slag as coarse aggregate and wastewater on fresh and hardened properties of concrete. **Construction and Building materials**. v. 165, p. 126-137, 2018.

SHEN, H.; FORSSBERG, E.; NORDSTROM, U. Physicochemical and mineralogical properties of stainless steel slags oriented to metal recovery. **Resources, Conservation and Recycling** v.40, n. 3, p. 245–271, 2004.

SHI-CONG, K.; CHI-SUN, P. Properties of concrete prepared with crushed fine stone, furnace bottom ash and fine recycled aggregate as fine aggregates. **Construction and Building Materials**. v. 23. p. 2877 – 2886, 2009.

SHIH, P. H.; WU, Z. Z.; CHIANG, H. L. Characteristics of bricks made from waste steel slag. **Waste management**. v. 24, p. 1043-1047, 2004.

SILVA, J.; BRITO, J.; VEIGA, M. R. Avaliação do comportamento à água de argamassas com incorporação de agregados cerâmicos. **Revista Engenharia Civil Um**. v. 28, p. 37-46, 2007.

SILVA, R. P.; BARROS, MERCIA M. S. B.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V. M. 2005. Avaliação do comportamento da argamassa no estado fresco através dos métodos de mesa de consistência, dropping ball e squeeze flow. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE ARGAMASSAS, 6, 2005, Fortaleza. **Anais...** Florianópolis, 2005, p.1-10.

SILVA, W. K. D. da. **Caracterização de escórias de aciaria e avaliação do seu uso na produção de argamassa de revestimento**. 2018. 72p. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

SOUZA, E. B. O. **Escórias de aciaria e resíduos de Concretos refratários em componentes de pavimentação**. 2007, 128p. Dissertação ( Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

SOUZA, T. V. P. **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.

STIEF, J. N. P. **Análise das deformações, por extensometria, em concreto armado**. 2009. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais 2009.

STOLZ; C. M.; MASUERO, A. B. Influence of grains distribution on the rheological behavior of mortars. **Construction and Building Materials**. v.177, p. 261-271, 2018.

TAO, G.; XIAO, Y.; YANG, L.; CUI, P.; KONG, D.; XUE, Y. Characteristics of steel slag filler and its influence on rheological properties of asphalt mortar. **Construction and building materials**. v. 201, p. 439-446. 2019.

TARAZONA BUITRAGO, N. D. **Aplicabilidade do agregado siderúrgico açobrita misturado com solo em camadas de pavimentos rodoviários**. 2016, 85p. Dissertação (mestrado em Engenharia civil).Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 2016.

TAVARES, D. S, **Avaliação Laboratorial de Mistura Asfáltica do Tipo SMA com Agregado Siderúrgico**. 2012, 138 p. Dissertação (mestrado em engenharia civil ) – Programa de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ/ COPPE. Rio de Janeiro, 2012.

TEO, P. T.; SEMAN, A. A.; BASU, P.; SHARIF, N. M. Recycling of malaysia's electric arc furnace (EAF) slag waste into heavy-duty green ceramic tile. **Waste Management**. v. 34, n.12, p. 2697-2708, 2014.

TEO, P. T.; SEMAN, A. A.; BASU, P.; SHARIF, N. M. Characterization of EAF steel slag waste: The potential green resource for ceramic Tile production. **Procedia Chemistry**. v. 19, p. 842-846, 2016.

TOKARSKI, R. B.; MATOSKI, A.; CECHIN, L.; WEBER, A. M. Comportamento das argamassas de revestimento no estado fresco, compostas com areia de britagem de rocha calcária e areia natural. **Revista Matéria**, v.23, n. 3, 2018.

TOSSAVAINEN, M.; ENGSTROM, F.; YANG, Q.; MENAD, N.; LARSSON, M. L. BJORKMAN, B. Characteristics of steel slag under different cooling conditions. **Waste Management**. v. 27 p. 1335-1344, 2007

TRISTÃO, F. A. **Influência da composição granulométrica da areia nas propriedades das argamassas de revestimento**. 1995, 218p. Dissertação (mestrado em Engenharia Civil)- Programa de Pós- Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1995.

TSAKIRIDIS, P. E.; PAPADIMITRIOU, G. D.; TSIVILIS, S.; KORONEOS, C. Utilization of steel slag for Portland cement clinker production. **Journal of hazardous materials**. v. 152, p. 805-811, 2008.

WANG, G. Determination of the expansion force of coarse steel slag aggregate. **Construction and Building Materials** v. 24 p. 1961-1966, 2010.

WANG, G.; WANG, Y.; GAO, Z. Use of steel slag as a granular material: Volume expansion prediction and usability criteria. **Journal of Hazardous Materials**. v.184 p. 555-560, 2010.

WANG, W.; SARDANS, J.; LAI, D. Y. F.; WANG, C. ZENG, C.; TONG, C.; LIANG, Y. PENUELAS, J. Effects of steel slag application on greenhouse gas emissions and crop yield over multiple growing seasons in a subtropical paddy field in China. **Field Crops Research**. v. 171, p. 146-156, 2015.

WORLDSTEEL ASSOCIATION. **World steel in figures 2018**. Belgium. ISBN: 978-2-930069-89-0. Disponível em : <https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:f9359dff-9546-4d6b-bed0-996201185b12/World+Steel+in+Figures+2018.pdf>. Acesso em 10 de janeiro, 2019.

XUE, Y.; SHAOPENG WU, S.; ZHOU, M. Adsorption characterization of Cu(II) from aqueous solution onto basic oxygen furnace slag. **Chemical Engineering Journal**. v. 231, p. 355–364, 2013.

XUE, Y.; WU, S.; HOU, H.; ZHA, J. Experimental investigation of basic oxygen furnace slag used as aggregate in asphalt mixture. **Journal of Hazardous Materials**. v.138, p. 261-268, 2006.

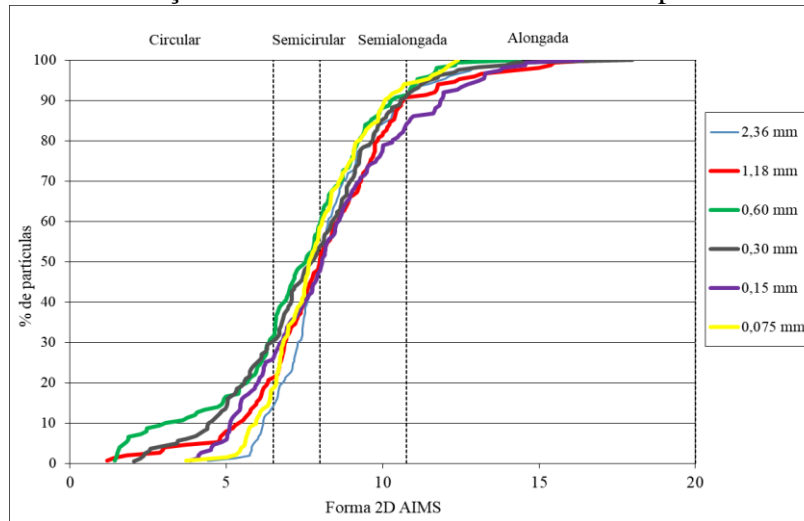
YADAV, S.; MEHRA, A. Experimental study of dissolution of minerals and CO<sub>2</sub> sequestration in steel slag. **Waste management**. v. 64, p. 348-357, 2017.

ZHANG, X.; MA, G. J.; TONG, Z.; XUE, Z. Microwave-assisted selective leaching behavior of calcium from Basic Oxygen Furnace (BOF) slag with ammonium chloride solution. **J. Min. Metall. Section B: Metall.** v.53, p. 139–146, 2017.



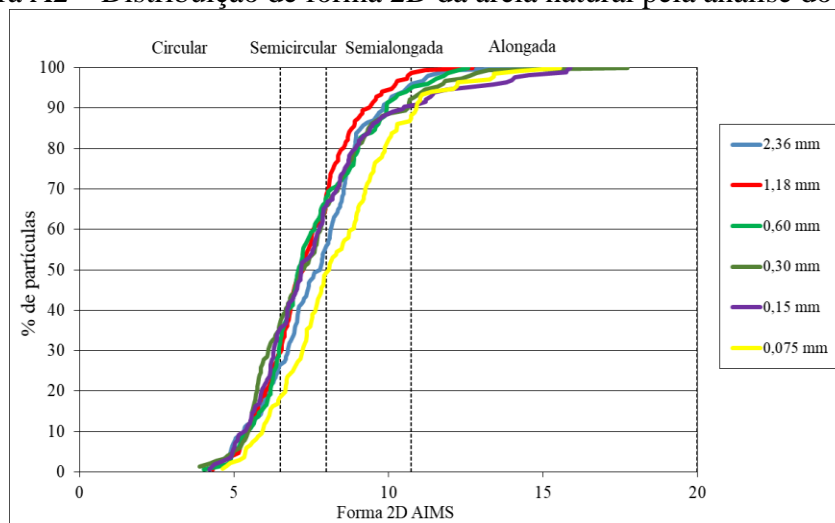
## APÊNDICE A – DISTRIBUIÇÃO DOS AGREGADOS DE ACORDO COM CADA PENEIRA

Figura A1 – Distribuição de forma 2D da escória de aciaria pela análise do AIMS



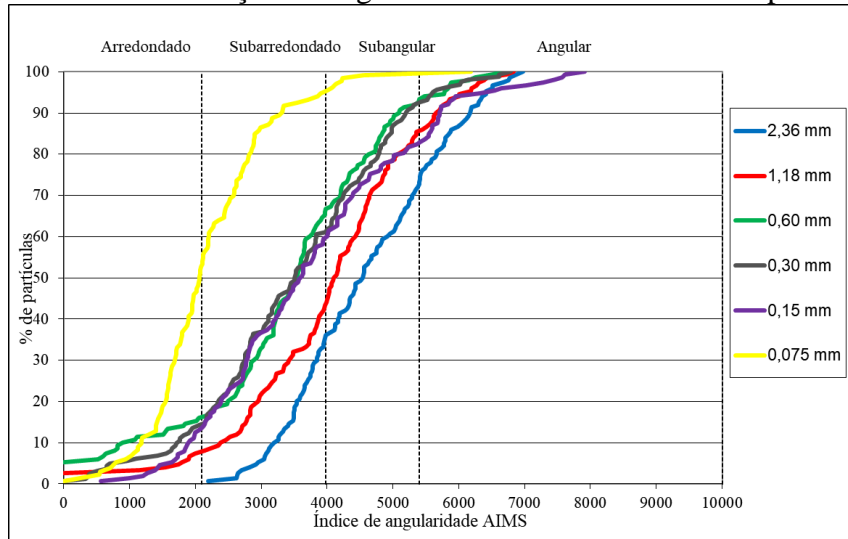
Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Figura A2 – Distribuição de forma 2D da areia natural pela análise do AIMS



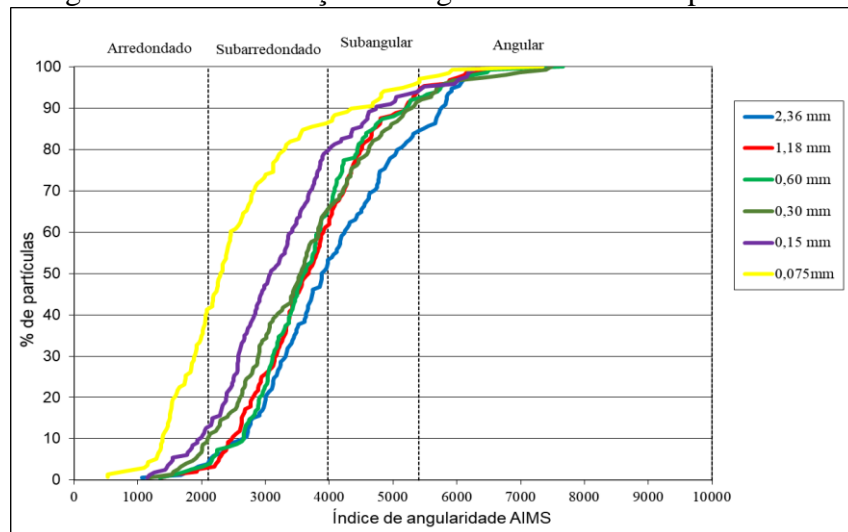
Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Figura A3 – Distribuição de angularidade da escória de aciaria pelo AIMS













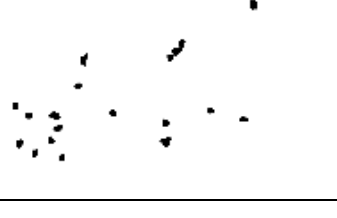
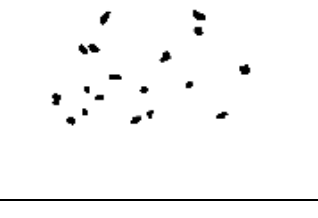
Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Figura A4 – Distribuição de angularidade da areia pelo AIMS



**APÊNDICE B – IMAGEM DAS PARTÍCULAS POR ABERTURA DE PENEIRA**

Tabela B1 – Imagens dos grãos obtida no AIMS

Abertura (mm)	Tipo de agregado miúdo	
	Areia Natural	Escória de aciaria
2,36		
1,18		
0,6		
0,3		
0,15		
0,075		

### APÊNDICE C – SQUEEZE-FLOW DAS AMOSTRAS DE ARGAMASSA.

Figura C1 – Comportamento reológico do traço 1:3 (grupo A) e seus respectivos teores de substituição por meio do squeeze-flow

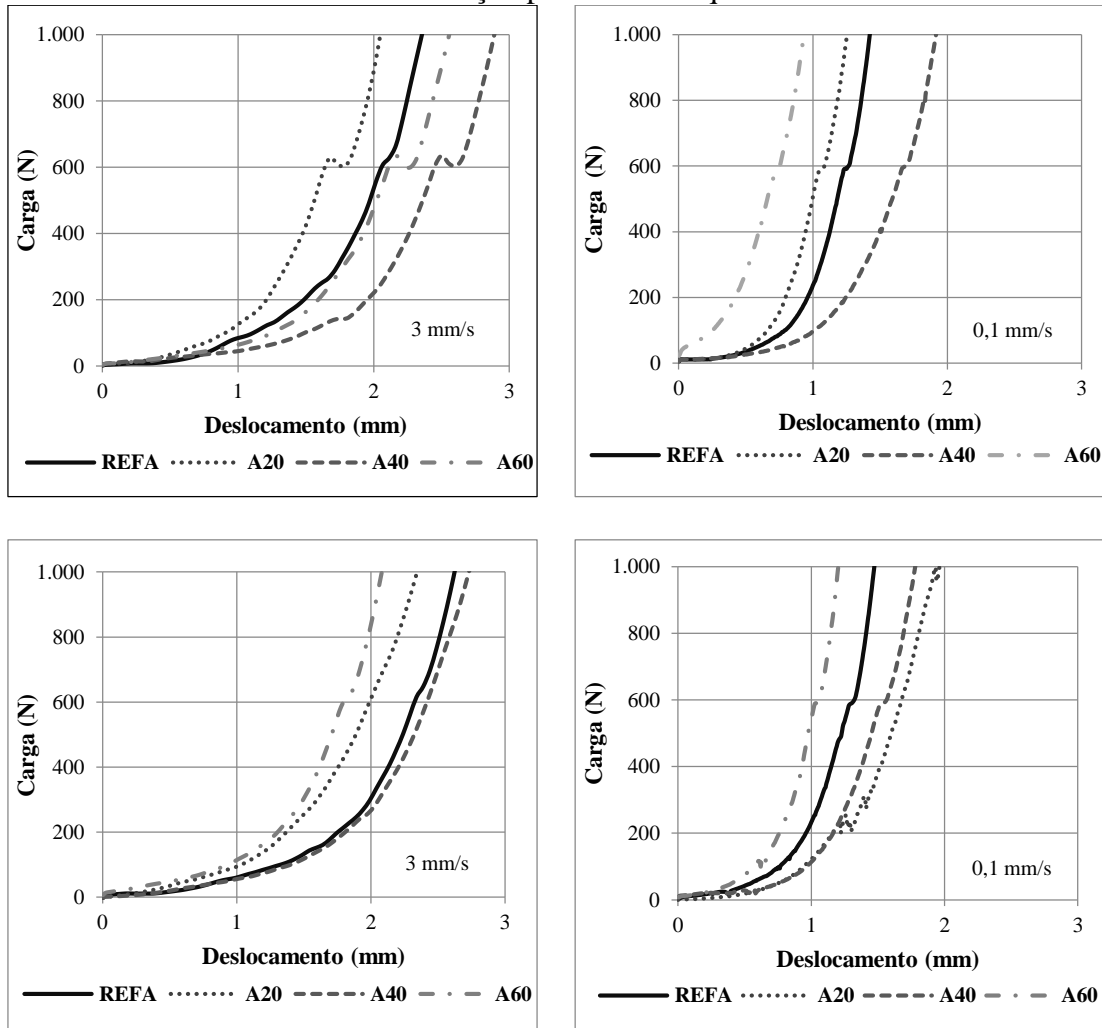
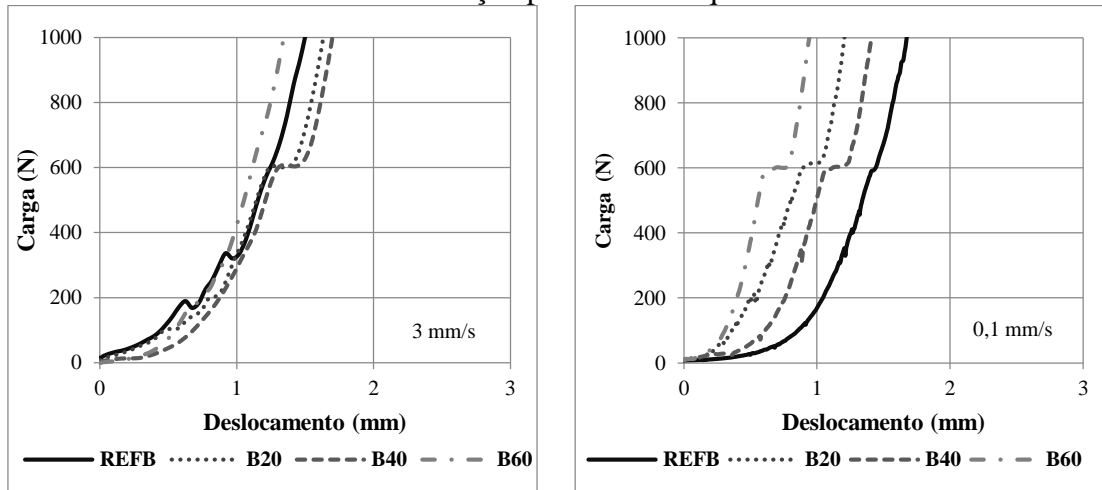


Figura C2 – Comportamento reológico do traço 1:5 (grupo B) e seus respectivos teores de substituição por meio do squeeze-flow



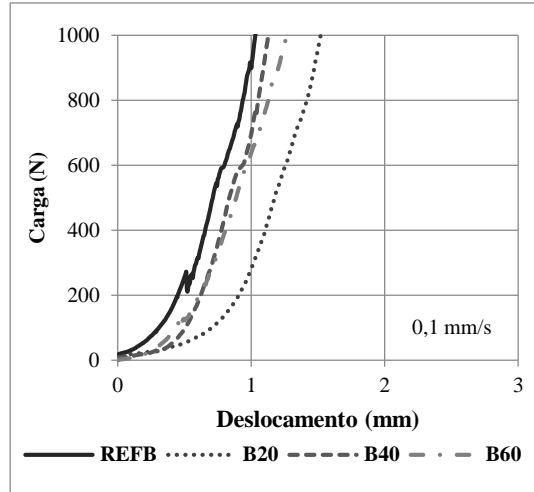
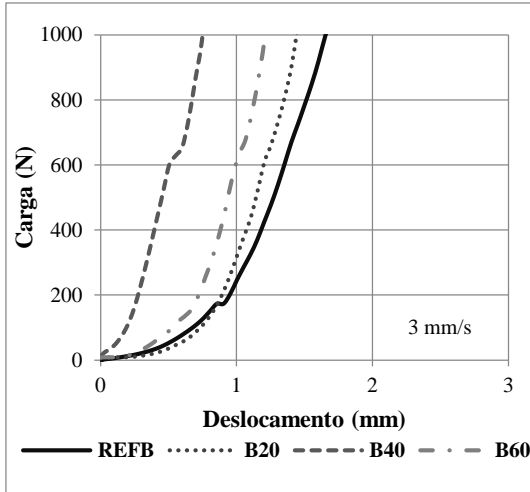


Figura C3 – Comportamento reológico do traço 1:7 (grupo C) e seus respectivos teores de substituição por meio do squeeze-flow

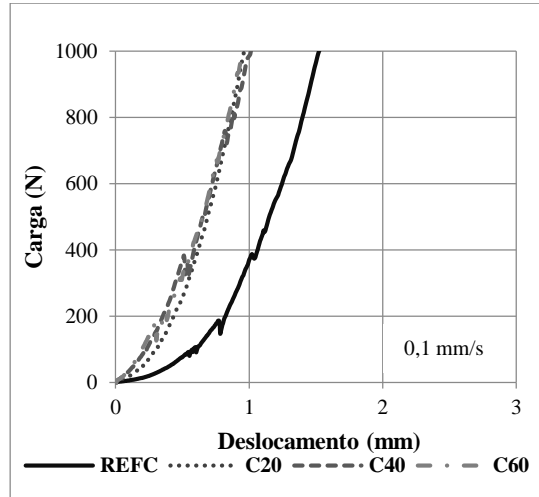
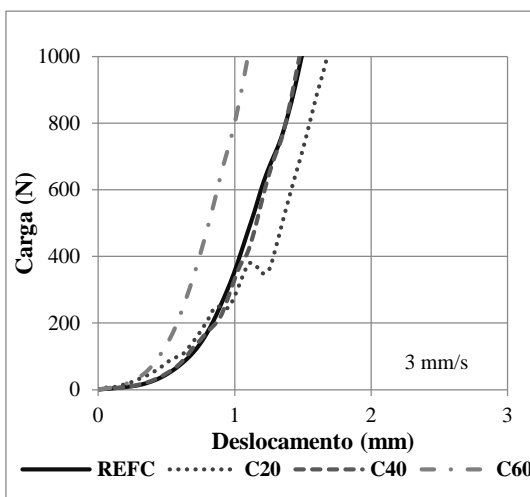
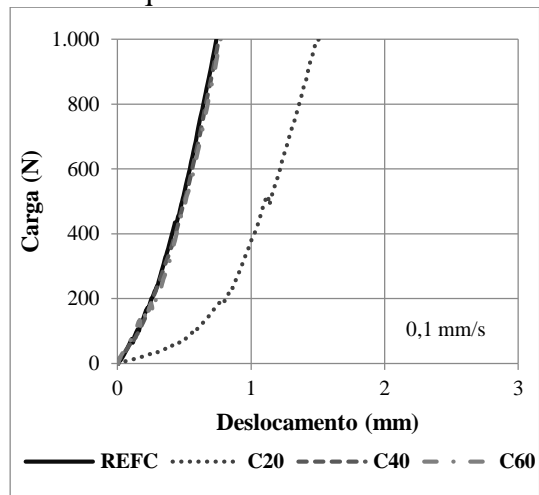
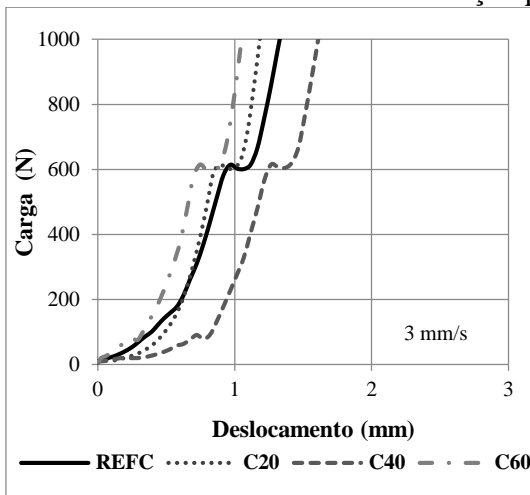


Figura C4 – Comportamento reológico do traço 1:1:4 (grupo D) e seus respectivos teores de substituição por meio do squeeze-flow

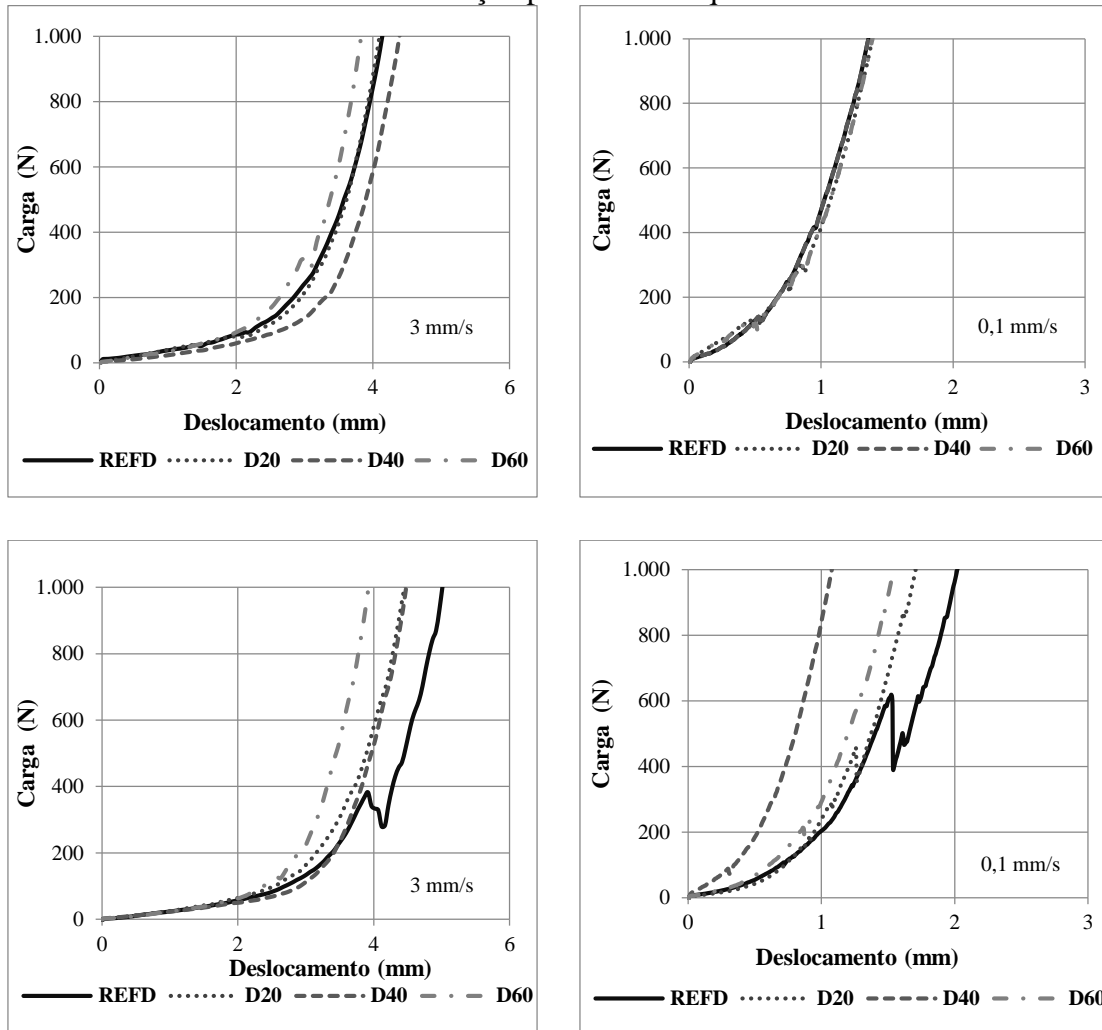
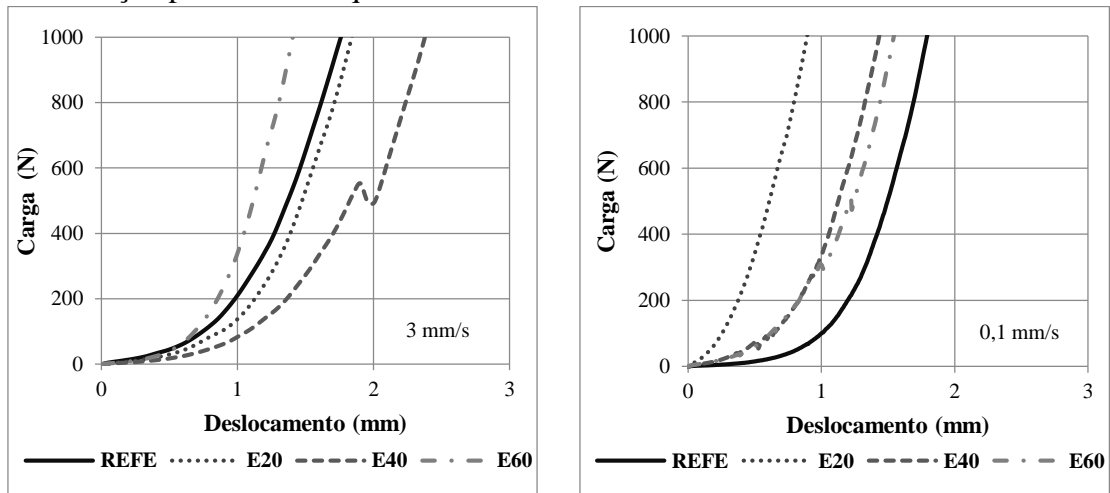


Figura C5 – Comportamento reológico do traço 1:1:6 (grupo E) e seus respectivos teores de substituição por meio do squeeze-flow



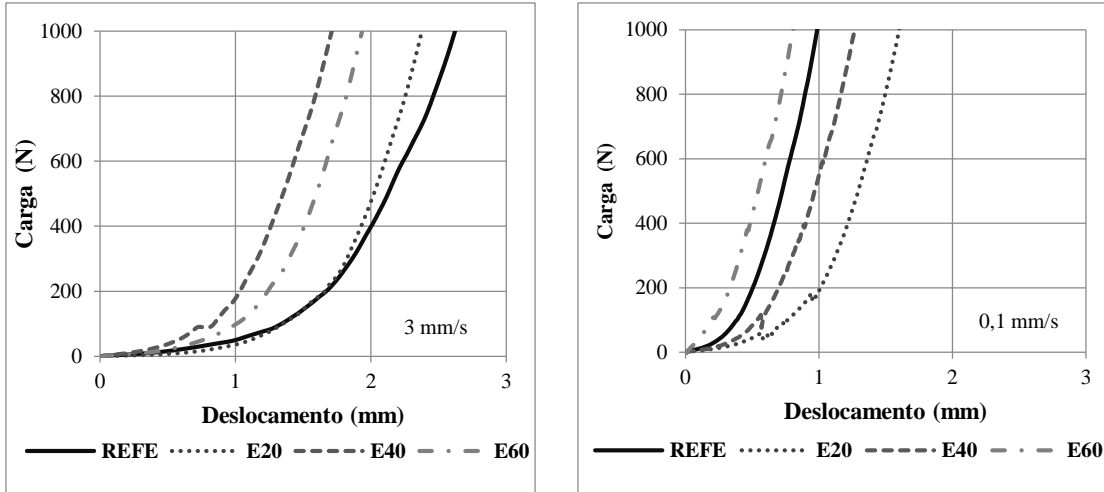


Figura C6 – Comportamento reológico do traço 1:1:8 (grupo F) e seus respectivos teores de substituição por meio do squeeze-flow

