



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
ENGENHARIA CIVIL

DOUGLAS ALEXANDRE LIMA

**PROPRIEDADES MECÂNICAS DE ARGAMASSAS COM SUBSTITUIÇÃO DE
AREIA NATURAL POR ESCÓRIA DE ACIARIA BAOSTEEL'S SLAG SHORT
FLOW (BSSF)**

FORTALEZA
2022

DOUGLAS ALEXANDRE LIMA

PROPRIEDADES MECÂNICAS DE ARGAMASSAS COM SUBSTITUIÇÃO DE AREIA
NATURAL POR ESCÓRIA DE ACIARIA BAOSTEEL'S SLAG SHORT FLOW (BSSF)

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

Orientador: Prof. Dr. Antônio Eduardo Bezerra
Cabral

FORTALEZA

2022

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

- L697p Lima, Douglas Alexandre.
Propriedades mecânicas de argamassas com substituição de areia natural por escória de aciaria Baosteel's Slag Short Flow (BSSF) / Douglas Alexandre Lima. – 2022.
84 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2022.
Orientação: Prof. Dr. Antônio Eduardo Bezerra Cabral.
1. Argamassa. 2. Escória de aciaria BSSF. 3. Resistência à compressão. 4. Resistência à tração na flexão. 5. Módulo de elasticidade dinâmico. I. Título.

CDD 620

DOUGLAS ALEXANDRE LIMA

PROPRIEDADES MECÂNICAS DE ARGAMASSAS COM SUBSTITUIÇÃO DE AREIA
NATURAL POR ESCÓRIA DE ACIARIA BAOSTEEL'S SLAG SHORT FLOW (BSSF)

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

Aprovada em: 11/02/2022.

BANCA EXAMINADORA

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

Profa. Dra. Mylene de Melo Vieira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Me. Felipe Alves Amancio
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus pais, Celso e Erineide.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por nunca me abandonar em nenhuma situação, ajudando a enfrentar os desafios encontrados até aqui.

Ao meu pai, José Celso da Silva Lima, que não mediu esforços e dedicou parte da sua vida à minha. À minha mãe, Maria Erineide Alexandre da Silva, que nunca me deixou desanimar durante essa caminhada. Agradeço por acreditarem em mim, confiando no meu potencial de chegar onde eu quero.

Aos professores das mais diversas disciplinas que tive durante esse período no Centro de Tecnologias, em especial ao meu orientador Prof. Dr. Antônio Eduardo Bezerra Cabral pela disponibilidade em me orientar para a realização do presente trabalho, bem como à professora Marisete Dantas pela sua paciência e dedicação durante as disciplinas de PG.

Aos amigos da graduação, que proporcionaram momentos que levarei comigo. Em especial ao Luis Fernando e à Sarah Lucas pela amizade e pelos trabalhos em grupo, principalmente durante o período pandêmico.

Aos técnicos do LMCC, Helano e Manuel, pela disponibilidade em ajudar na realização não somente desta pesquisa, mas de tantos outros trabalhos realizados no período em que fui bolsista. Período esse que me trouxe uma amizade que levarei por muito tempo. Muito obrigado Felipe Amâncio, pelas orientações e por compartilhar um pouco dos seus conhecimentos.

Enfim, sou agradecido a cada pessoa que cruzou meu caminho durante essa trajetória.

“Porque, aquele que pede, recebe; e, o que busca, encontra; e, ao que bate, se abre.”

Mateus: 7, 8

RESUMO

A geração de resíduos tornou-se um assunto considerado como uma das prioridades no quesito de melhorias ambientais, haja vista que o acúmulo de diversos materiais sem a devida destinação traz inúmeros transtornos ambientais e sociais. O baixo planejamento na destinação de subprodutos das diversas indústrias é um dos responsáveis pelo avanço do descarte inadequado. Além disso, o aumento do consumo nos grandes centros urbanos provoca o crescimento da produção industrial e, conseqüentemente, o aumento do volume de diversos tipos de materiais secundários, que não possuem, a priori, uma destinação adequada. Em contrapartida, o setor da construção civil sofre com a escassez de materiais convencionais para a sua indústria, direcionando esforços para a substituição dos insumos convencionais por materiais de descarte que possuam condições de aplicabilidade técnica e financeira. Nesse sentido, o presente trabalho teve por objetivo avaliar a aplicabilidade da substituição do agregado miúdo, areia, pela escória de aciaria Baosteel's Slag Short Flow (BSSF) avaliando a propriedades no endurecido de argamassas produzidas com teores de substituição da areia pela escória em volume. O trabalho experimental foi constituído pela caracterização da escória, além da caracterização das propriedades no estado fresco das argamassas nos traços 1:3, 1:5, 1:7 (cimento:agregado miúdo) e nos traços 1:1:4, 1:1:6, 1:1:8 (cimento:cal:agregado miúdo). Os teores de substituição estudados no presente trabalho foram de 0, 20, 40 e 60%. Contou-se, por meio dos ensaios, a necessidade de uma maior quantidade de água para a obtenção do espalhamento fixo de 260 ± 5 mm. Além disso, a substituição da areia pela escória provocou um aumento considerável na massa específica no estado endurecido, bem como o aumento do módulo de elasticidade dinâmico tanto para as argamassas simples como para as argamassas mistas. Em relação a resistência à compressão e a resistência à tração na flexão, de acordo com a análise de variância, o teor de substituição não exerceu influência significativa nessa propriedade.

Palavras-chave: Argamassa; Escória de aciaria BSSF; Resistência à compressão; Resistência à tração na flexão; Módulo de elasticidade dinâmico.

ABSTRACT

The generation of waste has become an issue considered as one of the priorities in terms of environmental improvements, since the accumulation of various materials without the proper destination brings numerous environmental and social disorders. The low planning in the destination of by-products from the various industries is one of those responsible for the advancement of improper disposal. In addition, the increase in consumption in large urban centers causes the growth of industrial production and, consequently, an increase in the volume of various types of secondary materials, which do not have, a priori, an adequate destination. On the other hand, the civil construction sector suffers from a shortage of conventional materials for its industry, directing efforts to the substitution of conventional inputs by discarded materials that have technical and financial applicability conditions. In this sense, the present work aimed to evaluate the applicability of replacing the fine aggregate, sand, by Baosteel's Slag Short Flow (BSSF) by evaluating the hardened properties of mortars produced with levels of sand replacement by slag in volume. The experimental work consisted of slag characterization and characterization of the fresh state properties of mortars in mixtures 1:3, 1:5, 1:7 (cement:fine aggregate) and in mixtures 1:1:4, 1:1:6, 1:1:8 (cement:lime:fine aggregate). The substitution contents studied in this work were 0, 20, 40 and 60%. The tests showed the need for a greater amount of water to obtain a fixed spread of 260 ± 5 mm. Moreover, the substitution of sand by slag caused a considerable increase in the specific mass in the hardened state, as well as an increase in the dynamic modulus of elasticity for both simple and mixed mortars. In relation to the compressive strength and flexural tensile strength, according to the analysis of variance, the substitution content had no significant influence on this property.

Keywords: Mortar; steel slag; compressive strength; flexural tensile strength; dynamic modulus of elasticity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Produção de aço mundial ao longo dos anos	16
Figura 2 – Local de produção da escória de aciaria BSSF	18
Figura 3 – Esquema simplificado do alto forno, indicando os principais equipamentos	20
Figura 4 – Processo de produção do aço	22
Figura 5 – Porcentagem dos coprodutos gerados na produção do aço.....	23
Figura 6 – Destinação da escória de aciaria no Brasil em 2017	24
Figura 7 – Composição química da escória de aciaria de BOF	25
Figura 8 – Mapeamento simplificado das aplicações da escória de aciaria	28
Figura 9 – Camadas de revestimento.....	29
Figura 10 – Escória de aciaria BSSF	34
Figura 11 – Aggregate Imaging Measurement System.....	36
Figura 12 – Mesa para o ensaio de determinação do índice de consistência das argamassas ..	40
Figura 13 – Espalhamento da argamassa no ensaio de determinação do índice de consistência	40
Figura 14 – Argamassadeira utilizada para o amassamento das argamassas.....	42
Figura 15 – Método gravimétrico para ensaio de massa específica e teor de ar incorporado ..	42
Figura 16 – Equipamento para moldagem dos corpos-de-prova.....	43
Figura 17 – Equipamento de Ultrassonografia	44

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Curva granulométrica do agregado miúdo	34
Gráfico 2 – Correlação entre a relação a/c e o teor de substituição da areia por escória de aciaria em argamassas simples	47
Gráfico 3 – Correlação entre a relação a/c e o teor de substituição da areia por escória de aciaria em argamassas mistas	48
Gráfico 4 – Influência do traço na massa específica das argamassas.....	49
Gráfico 5 – Influência do teor de substituição de areia por escória na massa específica das argamassas	50
Gráfico 6 – Resultados da massa específica obtida em cada traço de acordo com o teor de substituição de areia por escória de aciaria	51
Gráfico 7 – Correlação entre o teor de substituição de areia por escória de aciaria e a massa específica das argamassas simples	52
Gráfico 8 – Correlação entre o teor de substituição de areia por escória de aciaria e a massa específica das argamassas compostas.....	52
Gráfico 9 – Resíduos padronizados para os dados de resistência à compressão para as argamassas simples.....	53
Gráfico 10 – Resíduos padronizados para os dados de resistência à compressão para as argamassas compostas	54
Gráfico 11 – Influência do teor de substituição na resistência à compressão nas argamassas simples.....	55
Gráfico 12 – Influência do teor de substituição na resistência à compressão nas argamassas mistas.....	55
Gráfico 13 – Resistência à compressão das argamassas simples e mistas	56
Gráfico 14 – Resíduos padronizados para os dados de resistência à tração na flexão para argamassas simples.....	58
Gráfico 15 – Resíduos padronizados para os dados de resistência à tração na flexão para argamassas mistas.....	58
Gráfico 16 – Influência do teor de substituição na resistência à tração na flexão nas argamassas simples.....	59
Gráfico 17 – Influência do teor de substituição na resistência à tração na flexão das argamassas mistas.....	60
Gráfico 18 – Resistência à tração na flexão das argamassas simples e mistas.....	61
Gráfico 19 – Correlação entre a resistência à compressão e a resistência à tração na flexão ..	62

Gráfico 20 – Influência do teor de substituição da areia natural por escória de aciaria na densidade aparente das argamassas simples	63
Gráfico 21 – Influência do teor de substituição da areia natural por escória de aciaria na densidade aparente das argamassas mistas	63
Gráfico 22 – Correlação entre o teor de substituição e a densidade no estado endurecido das argamassas simples	64
Gráfico 23 – Correlação entre o teor de substituição e a densidade no estado endurecido das argamassas mistas	64
Gráfico 24 – Densidade no estado endurecido das argamassas simples e mistas	65
Gráfico 25 – Influência do teor de substituição na VPU nas argamassas simples	66
Gráfico 26 – Influência do teor de substituição na VPU nas argamassas mistas	66
Gráfico 27 – Velocidade de Propagação Ultrassônica das argamassas estudadas de acordo com o teor de substituição e o traço	67
Gráfico 28 – Influência do teor de substituição no módulo de elasticidade dinâmico das argamassas de cimento Portland	68
Gráfico 29 – Influência do traço no módulo de elasticidade dinâmico das argamassas de cimento Portland	68
Gráfico 30 – Influência do teor de substituição no módulo de elasticidade dinâmico das argamassas mistas	69
Gráfico 31 – Influência do traço no módulo de elasticidade dinâmico das argamassas mistas	69
Gráfico 32 – Módulo dinâmico das argamassas de cimento Portland de acordo com o traço e o teor de substituição	70
Gráfico 33 – Correlação entre o teor de substituição e o módulo dinâmico das argamassas simples	71
Gráfico 34 – Correlação entre o teor de substituição e o módulo dinâmico das argamassas mistas	72
Gráfico 35 – Correlação entre o consumo de cimento (kg/m^3) e o módulo dinâmico das argamassas de cimento Portland	73
Gráfico 36 – Correlação entre o consumo de cal (kg/m^3) e o módulo dinâmico das argamassas de cimento Portland	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição mineralógica das escórias de aciaria	26
Tabela 2 – Características físicas e químicas do cimento utilizado.....	33
Tabela 3 – Ensaio realizados para a caracterização das propriedades físicas dos agregados miúdos.	35
Tabela 4 – Valores obtidos na caracterização dos agregados	35
Tabela 5 – Classificação dos agregados pela metodologia utilizando o AIMS.....	36
Tabela 6 – Classificação dos agregados conforme resultados obtidos pelo AIMS	37
Tabela 7 – Concentração das partículas de acordo com a sua angularidade	37
Tabela 8 – Concentração das partículas de acordo com a sua Forma 2D.....	37
Tabela 9 – Composição química da escória de aciaria BSSF.....	38
Tabela 10 – Dados e resultado do ensaio de expansibilidade a quente de Le Chatelier da escória de aciaria BSSF	38
Tabela 11 – Composição dos traços de argamassas analisadas	41
Tabela 12 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios realizados nas argamassas no estado fresco	45
Tabela 13 – Tratamento estatístico (ANOVA) para análise de significância entre a massa específica das argamassas em relação ao teor e aos traços utilizados	49
Tabela 14 – Tratamento estatístico (ANOVA) para análise de significância entre os teores de substituição de areia por escória de aciaria na resistência à compressão	56
Tabela 15 – Tratamento estatístico (ANOVA) para análise de significância entre os teores de substituição de areia por escória de aciaria na resistência à tração na flexão	60

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BSSF	Baosteel's Slag Short Flow
CSP	Companhia Siderúrgica do Pécem
VPU	Velocidade de Propagação Ultrassônica
KR	Kanbara Reactor
BOF	Basic Oxygen Furnace
N	Newton
MPa	Megapascal
FEA	Fornalha de Arco Elétrico
AIMS	Aggregate Imaging Measurement System

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Objetivos	18
<i>1.1.1 Objetivo Geral</i>	18
<i>1.1.2 Objetivos Específicos</i>	18
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 Processo de produção de aço e resíduos decorrentes	19
2.2 Características das escórias de aciaria	24
2.3 Utilização da escória de aciaria	27
2.4 Argamassas de revestimento	28
<i>2.4.1 Propriedades das argamassas no estado fresco</i>	29
<i>2.4.2 Propriedades das argamassas no estado endurecido</i>	30
2.5 Uso da escória de aciaria em argamassas	31
3 MATERIAIS E MÉTODOS DE PESQUISA	33
3.1 Materiais	33
3.2 Métodos	38
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
4.1 Estado Fresco	45
<i>4.1.1 Relação água/cimento (a/c) das argamassas</i>	46
<i>4.1.2 Massa específica no estado fresco</i>	48
4.2 Estado Endurecido	52
<i>4.2.1 Resistência à compressão</i>	53
<i>4.2.2 Resistência à tração na flexão</i>	57
<i>4.2.3 Massa específica aparente</i>	62
<i>4.2.4 Módulo de elasticidade dinâmico</i>	67
5 CONCLUSÃO	75
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	77
REFERÊNCIAS	78

1 INTRODUÇÃO

O consumo dos recursos materiais tem crescido de forma proporcional ao crescimento urbano, bem como ao aumento do desenvolvimento dos setores econômicos, provocando uma série de impactos ao meio ambiente. A associação do consumo de matéria-prima ao crescimento econômico é uma das dificuldades para se atingir uma economia sustentável.

Nessa situação, a indústria da construção civil tem participação direta, pois se trata de uma das maiores consumidoras dos recursos naturais não renováveis. De acordo com Agopyan; John (2011), cerca de um terço dos recursos naturais extraídos da natureza possuem como destino a produção de materiais cimentícios. Em paralelo ao crescimento do setor da construção civil, em 2015, de acordo com a Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção (ANEPAC), o consumo de agregados naturais atingiu o somatório de 519 milhões de toneladas em 2015. Em 2019, o consumo médio mundial por habitante foi de 6 toneladas (ANEPAC, 2020).

Como um dos principais materiais consumidos na construção civil, os agregados naturais são empregados na produção de argamassas e concretos, porém a sua produção causa diversos impactos ao meio ambiente, porquanto a sua extração muitas vezes se dá de forma desordenada e em diversos casos de forma ilegal. Cerca de 90% da extração das areias naturais, por exemplo, são obtidos por meio da exploração de leitos de rios entre os agregados naturais; e 10% advindos de fontes como várzeas e outros meios (Almeida; Silva, 2005). Desse modo, é de suma importância a busca por outros meios para suprir essa necessidade.

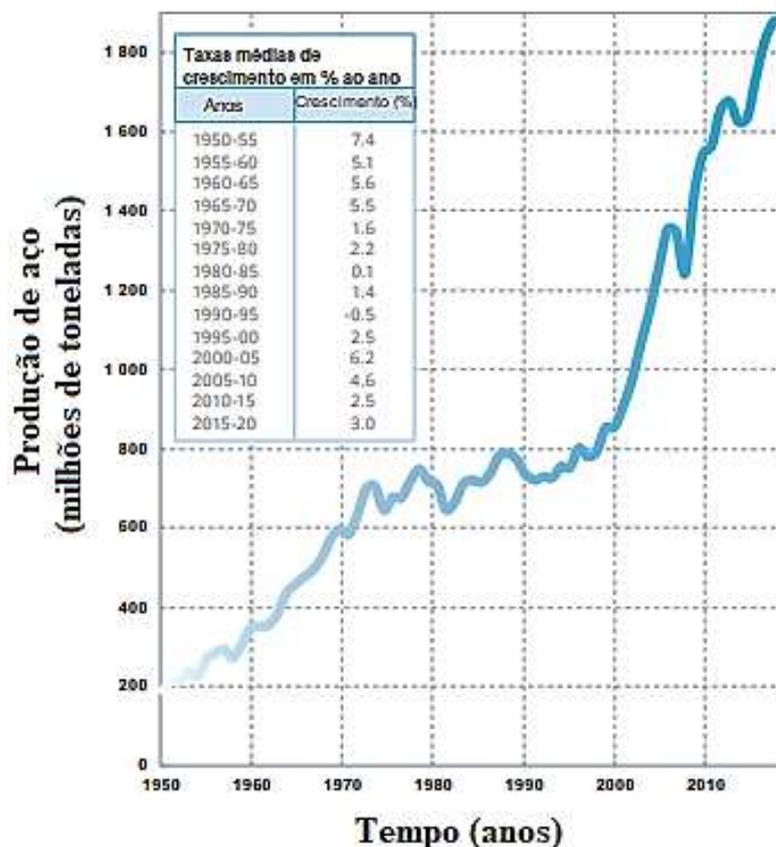
Com o desenvolvimento das cidades e o avanço do processo de urbanização, a demanda por insumos da construção civil vem crescendo cada vez mais, diminuindo a disponibilidade de areias naturais; fazendo com que a disponibilidade desse material se torne cada vez mais escassa em diversas regiões do mundo (Menadi et al., 2009; Shi-Cong; Chi-Sun, 2009; Park, 2012). Na Região Metropolitana de Fortaleza (RLM), por exemplo, a areia consumida na indústria da construção civil é extraída a distâncias que chegam a mais de 100 km dos principais consumidores, encarecendo o produto e dificultando a compra pelo consumidor (CAVALCANTI; PARAHYBA, 2011).

Em contrapartida, a indústria siderúrgica é uma das mais importantes produtoras de insumos destinados à produção de outros setores da indústria de transformação, que operam em diversas fases do processo produtivo. A sua operação se dá desde a transformação do ferro-gusa, até a produção de peças utilizadas na indústria automotiva. Os laminados longos, que

também são produzidos pela indústria siderúrgica, como por exemplo os vergalhões, são utilizados nos segmentos de habitação e infraestrutura (CARVALHO et al., 2015).

A produção mundial de aço, em 2018, alcançou um novo recorde, ao totalizar cerca de 1,7 bilhões de toneladas (Wordsteel Association, 2019). No Brasil, de acordo com o instituto Aço Brasil (IABr, 2020a), a produção de aço bruto no país atingiu 32,6 milhões de toneladas em 2019, correspondendo a 53,7% de toda a produção da América Latina, ocupando a nona posição na produção mundial de aço. Em relação aos produtos siderúrgicos (laminados, placas, blocos, tarugos e lingotes), a produção atingiu cerca de 35 milhões de toneladas no mesmo período. A Figura 1 apresenta a produção de aço mundial ao longo dos anos, com a taxa de crescimento médio ao ano.

Figura 1 – Produção de aço mundial ao longo dos anos



Fonte: Wordsteel Association, 2021 (Adaptado)

Porém, a indústria da siderurgia produz grande quantidade de escória como resíduo (Qasrawi, 2014), pois para cada três toneladas de aço produzidos, uma tonelada de escória é formada (Shen et al., 2004; Das et al., 2007). Dessa forma, é notório perceber que a necessidade

de consumo do aço aumenta a quantidade de resíduos gerados, tornando a sua produção um problema ambiental com elevada problematização, dispensando a inércia quanto o seu reaproveitamento.

Dessa forma, a indústria da construção civil é uma das mais propícias a utilizar esse tipo de resíduo, pois, atualmente, vem buscando soluções de incorporação de materiais de construção não convencionais que garantam a melhoria das propriedades dos seus produtos e a geração de menor impacto ambiental — de forma que consiga reduzir os seus custos. Uma das aplicações é a utilização dos resíduos das siderúrgicas como insumos na produção de elementos cimentícios, tais como argamassas e concretos, como forma de agregado.

Do ponto de vista econômico, o valor das escórias se torna bastante atrativo, pois a sua utilização reduz custos de produção de argamassas. Além disso, a sua utilização pode ser influenciada pelo aumento da conscientização sobre a importância das questões ambientais e pela busca de novas soluções sustentáveis, sendo, pois, indispensável a sua caracterização e o seu comportamento nessa aplicação.

Neste sentido, vem crescendo as pesquisas relacionadas ao aproveitamento de agregados alternativos em compósitos cimentícios tem crescido cada vez mais, com destaque para a areia de britagem (Tokarski, R.B. et al., 2018), borracha de pneu (Kurz, et al., 2018), resíduo de vidro (Trentin, P.O., et al, 2020), resíduos de rochas ornamentais (Souza, N.S.L., et al., 2020), lodo de tratamento de água (Buselatto, D.M., et al., 2019) e de esgoto (SOUZA, M.M., et al., 2020).

Portanto, faz-se necessário encontrar meios de aproveitamento do resíduo da indústria siderúrgica no setor da construção civil, buscando reduzir os custos dos produtos da construção civil e reduzindo os danos ambientais gerados pelo consumo e pela extração desenfreada de areias na produção de elementos cimentícios. A Companhia Siderúrgica do Pécem (CSP) (Figura 2), localizada em São Gonçalo do Amarante, é a principal produtora de Aço no estado do Ceará, em que a sua operação gera uma série de coprodutos, como as escórias de aciaria, e uma das possíveis aplicações seria na utilização desse material como substituto do agregado miúdo em argamassas de revestimento. Essa aplicação é bastante atrativa por possibilitar a utilização de um material gerado em grande escala (escória) em substituição a um material que vem se tornando escasso (areia natural); reduzindo os custos relacionados a compra dos agregados miúdos, bem como minimizar os danos provocados pela extração de areia natural em rios.

Figura 2 – Local de produção da escória de aciaria BSSF



Fonte: Adaptado de Google Earth (2022)

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste estudo é analisar a viabilidade utilização da escória de aciaria BSSF, da CSP, por meio da avaliação da viabilidade técnica da utilização do material como substituto, parcial, do agregado natural miúdo na produção de argamassas de revestimento, observando possíveis alterações nas suas propriedades mecânicas em relação à referência, por meio de uma análise estatística de variância.

1.1.2 Objetivos Específicos

- a. Analisar a capacidade de resistência à compressão e à tração na flexão das argamassas.
- b. Analisar o comportamento da velocidade de propagação ultrassônica
- c. Analisar o comportamento do módulo de elasticidade

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O uso de materiais não convencionais na construção civil tem se tornado uma tendência nos últimos anos. Isso se deve, sobretudo, para que se possa dar uma destinação adequada a um determinado resíduo industrial, podendo, inclusive, melhorar as propriedades do produto final – processo este que é definido por um termo chamado *upcycling* –, ou, ainda, mantendo as características semelhantes dos materiais convencionais. Dentre os materiais que ganharam destaque nesse quesito estão as escórias de aciaria, que, quando incorporadas nos compósitos cimentícios, melhoram, por exemplo, a sua capacidade mecânica.

Dessa forma, faz-se necessário entender o processo de produção desse resíduo, as suas diversas aplicações em outras indústrias, as propriedades das argamassas de revestimento e, finalmente, a aplicação das escórias na produção de argamassas; a fim de situar a aplicabilidade desse material por meio de testes, tais aspectos serão tratados nos itens 2.1 a 2.4.

2.1 Processo de produção de aço e resíduos decorrentes

O aço é um dos principais materiais utilizados na fabricação de diversos produtos como eletrônicos, componentes estruturais de edifícios, tubulações, aviões, etc. Trata-se de um dos principais elementos que possibilitam à sociedade usufruir da modernidade e comodidade oferecidas pelos bens de consumo (JANUZZI, 2014).

Em suma, o aço é uma liga de ferro e carbono, sendo o ferro encontrado em basicamente em toda crosta terrestre associado ao oxigênio e à sílica. A forma mineral do ferro é um composto de ferro, misturado com areia fina. Assim como o ferro, o carbono também é encontrado de forma abundante sob diversas formas. Na siderurgia, o processo de transformação do aço depende, muitas vezes, da utilização do carvão mineral ou carvão vegetal em alguns casos. O carvão exerce dois papéis principais na fabricação do aço: como combustível, proporciona à temperatura atingir cerca de 1.500 °C, necessária para a fusão do minério; como redutor, associa-se ao oxigênio que se separa do minério devido à alta temperatura, deixando livre o ferro. O processo de remoção do oxigênio do ferro para ligar-se ao carbono é denominado redução e acontece em um equipamento conhecido como alto forno como mostrado na Figura 3 (ARAÚJO, 1997).

Figura 3 – Esquema simplificado do alto forno, indicando os principais equipamentos



Fonte: Adaptado de Araújo, 1997

O processo realizado antes de serem levados ao alto forno consiste na preparação do carvão e do minério para melhoria da eficiência do processo. O minério é transformado em bolas e o carvão passa por um processo de destilação para a obtenção do coque, dele se obtendo ainda subprodutos carboquímicos. No processo de redução, ocorre a liquefação do ferro

produzindo o chamado ferro gusa ou ferro de primeira fusão. Impurezas como o calcário e a sílica formam a escória, que pode ser matéria-prima para a fabricação de cimento (ARAÚJO, 1997).

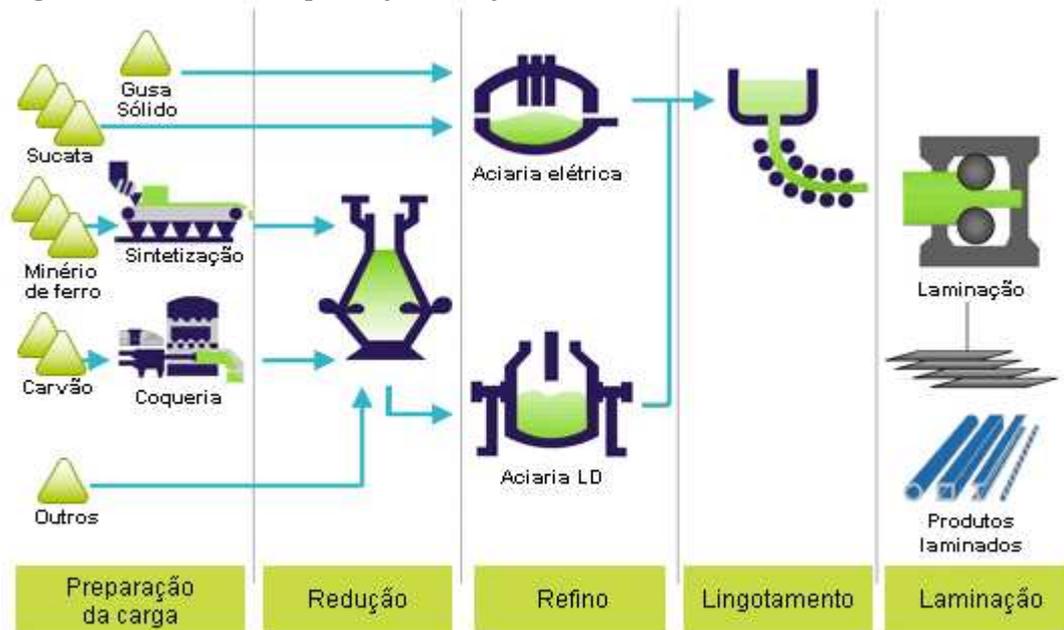
A escória de alto-forno possui como característica as suas propriedades aglutinantes, que são reutilizadas como adições ativas na fabricação de cimento Portland (Rojas et al 2004). Devido a esse fator, cerca de 90% da escória de alto-forno produzida nas siderúrgicas foram comercializadas com as cimenteiras em 2017 (IABr, 2018). Em contraste a isso, as escórias de aciaria apresentam baixa ou inexistente atividade pozolânica, não sendo oportuna para a produção de cimentos (METWALLY et al, 2017).

Segundo o Instituto Aço Brasil (IABr) (2014) existem, em suma, dois tipos de produção de aço: a produção de aço à base de gusa líquida com uma pequena proporção de sucata metálica (usinas integradas) e a produção de aço à base da sucata (usinas semi-integradas) e uma pequena quantidade de gusa sólido. O primeiro processo consiste em três estágios: produção do ferro gusa no alto forno, fabricação do aço nos convertedores a oxigênio (*Linz-Donawitz* ou LD) ou o processo nos fornos elétricos a arco (FEA), metalurgia secundária em fornos panela. Nas usinas denominadas integradas, a produção do aço envolve três passos básicos: primeiro, a fonte de energia (calor) para a fusão e redução do minério de ferro é produzida (coqueria). Em seguida, o minério de ferro, introduzido sob a forma de sinter ou pelotas, é fundido em um alto forno; e, finalmente, o ferro gusa do alto forno é refinado para a produção do aço na aciaria (OLIVEIRA e SOUZA, 2007).

Nas usinas integradas pode haver a utilização de dois tipos de agentes redutores: carvão mineral (usinas integradas a coque) e carvão vegetal (usinas integradas a carvão vegetal). As usinas integradas operam as três fases básicas de produção, a saber, redução, refino e laminação (IABr, 2014), conforme apresentado na Figura 4. Na preparação da carga, 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 (coquerias) e convertido em coque. Na fase de redução do minério de ferro, ocorre a 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. No refino, há a 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). No lingotamento: o aço produzido nas aciarias vaza em lingoteiras, solidificandose na forma de lingotes ou em máquinas de lingotamento contínuo, onde é cortado já na forma de produtos semi-acabados (placas, blocos ou tarugos). Apor meio da laminação, forjamento e outros processos mecânicos, são produzidas bobinas, barras, chapas, vergalhões, fio-máquinas, perfis e folhas metálicas, entre outros.

Figura 4 – Processo de produção do aço

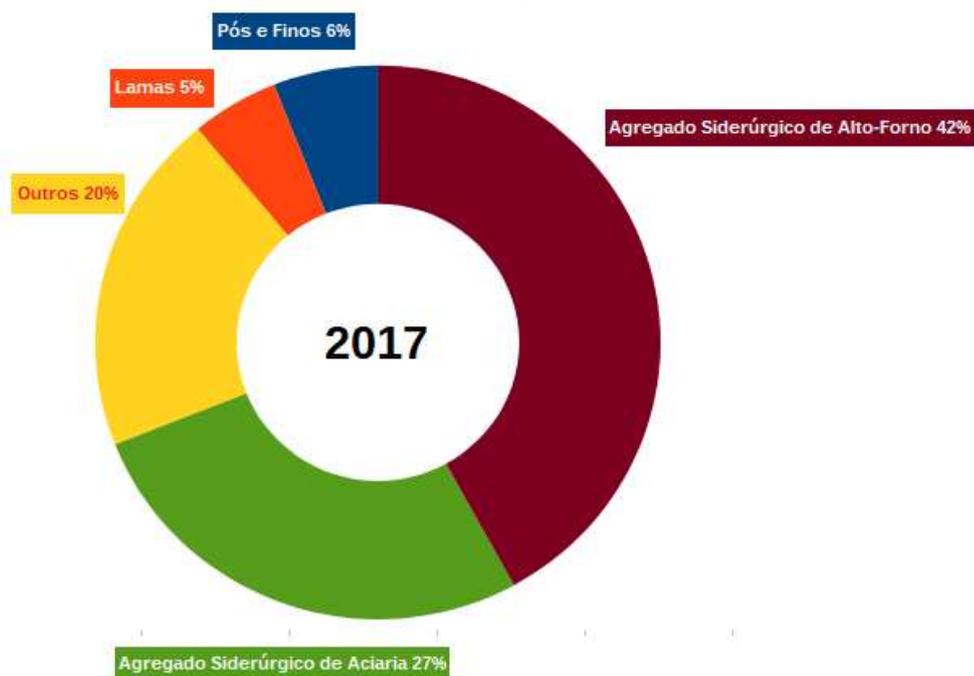


Fonte: IABr (2014).

O processo de produção de aço pode ser realizado por meio da utilização de oxigênio básico em um forno de fabricação de aço (BOF) ou por um processo de fornalha de arco elétrico (FEA) (Gumieri, 2002), que são utilizados para fabricação de produtos longos (vergalhões, barras e perfis industriais para a construção civil). Em relação à produção de chapas, os conversores a oxigênio vêm sendo tipicamente empregados com destaque (FERNANDES, 2010).

O processo de produção do aço gera inúmeros resíduos, geralmente denominados de coprodutos pela indústria geradora — como a escória de alto forno e as escórias de aciaria. Em 2017, por exemplo, a geração de resíduos e coprodutos pelas empresas associadas chegou a mais de 600 kg para cada tonelada de aço produzida. Entre 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 5 (IABr, 2018).

Figura 5 – Porcentagem dos coprodutos gerados na produção do aço.



Fonte: IABr, 2018

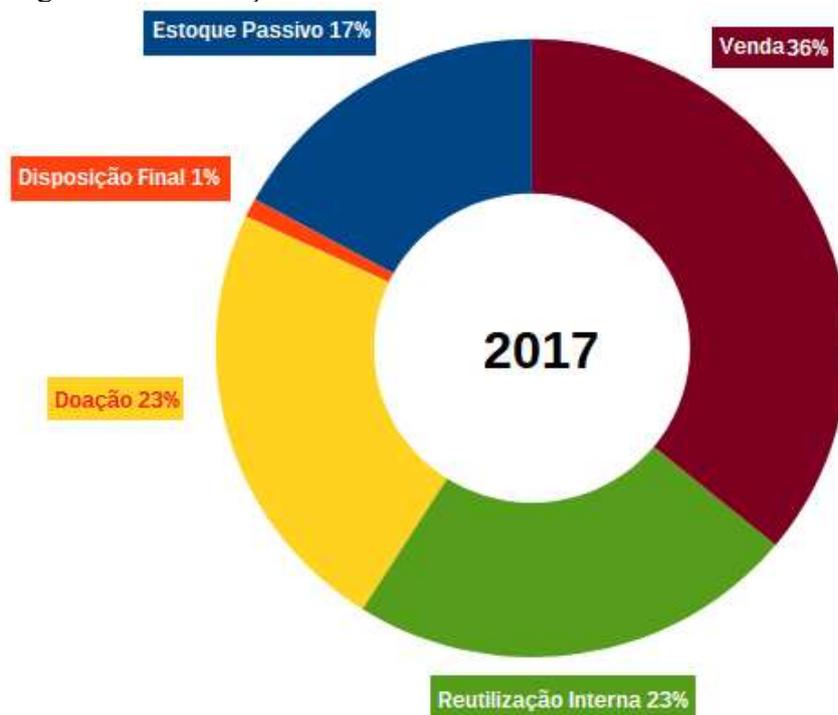
Em relação ao processo de produção da Companhia Siderúrgica do Pecém (CSP), local onde foram coletadas as amostras para o estudo em questão, há, além da produção da escória de alto-forno, a geração de outras escórias como a KR (Kanbara Reactor), BOF (*Basic Oxygen Furnace*), panela e Baosteel Slag Short Flow (BSSF). A planta da CSP é um exemplo de usina integrada a coque, na qual utiliza conversor a oxigênio para o refino do aço, tratando-se da primeira usina integrada da região Nordeste do país (ADECE, 2016).

Na produção BSSF, a escória é fundida em altas temperaturas em uma câmara rotativa, e, por meio da ação do resfriamento e da aplicação de força mecânica, a escória passa por um processo de vitrificação e, em seguida, é triturada em menores tamanhos. Esse sistema é difundido não somente no Brasil, mas sim em todo o Ocidente, e trata-se de uma tecnologia desenvolvida pelas indústrias chinesas e sul-coreanas (IABr, 2018). Tal processo, possibilitou o resfriamento mais veloz, o que favorece a sua reciclagem por meio da fundição em altas temperaturas em um mecanismo rotativo. A escória na sua forma líquida é colocada em um recipiente que possibilita a sua granulação para posterior separação magnética (SOUZA, 2016).

A maior parte desses resíduos e produtos secundários é destinada ao reaproveitamento, que, em 2017, atingiu um aproveitamento de 86%. A venda das escórias produzidas atingiu cerca de 92% do agregado siderúrgico de alto forno, sendo a maior parte

(98%) destinada à produção de cimento. Em contrapartida, as escórias de aciaria apresentaram alcance de mercado de apenas 36%, sendo 23% do volume produzido destinado à utilização interna. A Figura 6 apresenta a destinação desse material no ano de 2017 (IABr, 2018).

Figura 6 – Destinação da escória de aciaria no Brasil em 2017

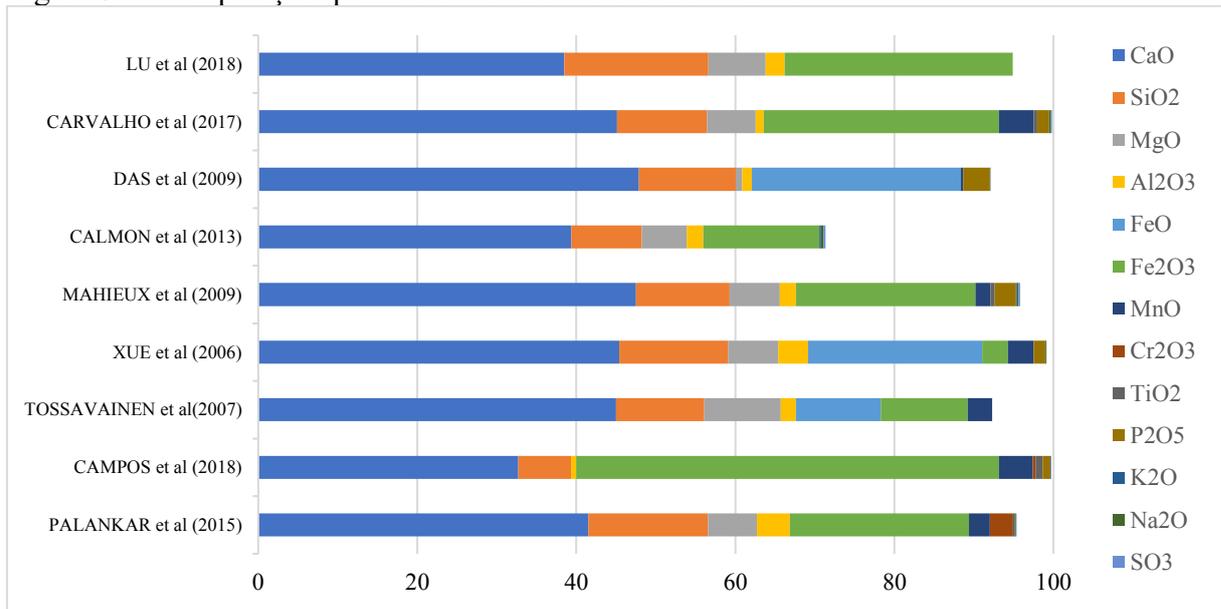


Fonte: IABr, 2018 (Adaptado)

2.2 Características das escórias de aciaria

Por ser um resíduo obtido a partir da produção do aço, a composição da escória apresenta vários óxidos de Ca, Mg, Si, Fe e Mn, em que as suas quantidades e concentração dependem da origem química da matéria-prima utilizada na fabricação do aço, além disso o tipo de refratário utilizado no forno também possui significância em sua composição (Prado et al, 2001). Fatores como o processo ou tipo de forno utilizado no beneficiamento do aço, a especificação do aço produzido, o tipo de matéria-prima, o resfriamento do rejeito, além de outras particularidades dependem da produção e da composição da escória (CASTELO BRANCO, 2004). Na Figura 7 são apresentadas as caracterizações químicas das escórias de aciaria realizada por diversos autores.

Figura 7 – Composição química da escória de aciaria de BOF



Fonte: AMANCIO, 2019

Após a fase de oxidação do fósforo e do silício, parte da cal e do magnésio que estão presentes na escória precipitam ao atingir os limites de solubilidade da escória fundida. A esse fato pode-se associar os altos teores de CaO e MgO livres na escória. A Tabela 1 apresenta a composição mineralógica das escórias, que são compostas por silicato dicálcico (larnita), ferrita cálcica, óxido de ferro (FeO), cal livre (CaO), periclásio (MgO), portlandita (Ca(OH)₂) e calcita (CaCO₃), dentre outros componentes químicos (MACHADO, 2000).

Tabela 1 – Composição mineralógica das escórias de aciaria

Fase Mineral	Fórmula	Ponto de fusão (°C)
Silicato dicálcico - Larnita (β C2S)	$\beta - 2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	2130
Silicato tricálcico (C3S)	$3 \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	1900
Silicato de magnésio	$\beta - 2\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$	-
Ferrita dicálcica	$2 \text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	1430
Mervinita	$\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{SiO}_4)_2$	-
Diopsita	$\text{CaMg}(\text{SiO}_3)_2$	-
Brown millerita	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	1410
Bredigita	$\alpha - 2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	-
Gelenita	$\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$	-
Óxidos de alumínio e magnésio	$\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	-
Wüstita (óxido de ferro)	FeO	-
Periclásio (óxido de magnésio)	MgO	2800
Óxido de cálcio	CaO	2570

Fonte: Adaptado de Machado, 2000

Segundo Geyer (2001) e Diniz (2009), a escória de aciaria é normalmente vazada em uma panela ou descarregada em áreas, onde podem solidificar em forma cristalina, além de ser possível a aplicação dos dois processos em conjunto. O resfriamento é realizado por meio da utilização de bicos que possuem como função aspergir água ou por meio de jatos de água de mangueiras, provocando choque térmico, fragmentando a escória. Em seguida, após o processo de resfriamento, o material é britado e classificado de acordo com a sua granulometria. Geralmente, faz-se um processo de recuperação da fração metálica, empregada na própria aciaria, na sintetização ou no alto-forno; a fração recuperada corresponde em 30% do volume da geração. A parte não recuperada é reaproveitada no alto-forno e na aciaria. Essa parte não recuperada é conhecida como sucata recuperada. A escória separada pela granulometria tem diversas outras finalidades como o seu emprego na construção civil ou ainda na produção de fertilizantes corretivos de solo (GEYER, 2001).

2.3 Utilização da escória de aciaria

No Brasil, a utilização de escórias de aciaria é bastante reduzida se comparado mundialmente, tendo a sua aplicação destinada principalmente ao setor de engenharia de transportes para a construção de bases e sub-bases de pavimentação. Porém, há inúmeros relatos de problemas, principalmente relacionados a erupções de trincas ocorridas nos pavimentos devido a expansão volumétrica da escória, tais problemas dificultam a utilização da escória de aciaria em obras de grande porte desse tipo, passando a sua utilização a ser concentrada em obras de menor responsabilidade técnica, além disso, devido a grandes distâncias dessas obras das siderúrgicas, o custo do transporte aumenta e torna a aplicação da escória mais onerosa do que outros materiais, implicando na necessidade de armazenamento desse material (Cardoso et al, 2014). Uma outra aplicação é a sua utilização para o nivelamento de terrenos e aterros. Para a produção de concreto existe uma parcela destinada à produção de agregados e produção de cimentos, porém, de toda a sua aplicação no país, essa destinação chega a apenas 3% do reaproveitamento (IABr, 2018).

Em contrapartida, na Europa a taxa de utilização da escória de aciaria é de 87% e nos Estados Unidos é de quase 85% (Guo et al, 2018), sendo aplicado principalmente para a produção de concreto asfáltico, construção de bases e subases de pavimentação e material de enchimento. Na China, por exemplo, em que a utilização desse material se concentra na construção de estradas e na agricultura como fertilizante e para correção de solos, a taxa de reutilização das escórias de aciaria é de menos de 30%, valor bastante divergente de países industrializados como o Japão, 98,4%. Na literatura existem diferentes aplicações da escória de aciaria como por exemplo na produção de cimentos (Salman, 2014), Materiais cerâmicos (Badlee et al, 2013; Teo et al, 2014; Bai et al, 2010; He et al, 2012; Teo et al, 2014), Geotecnia e pavimentação (Penteado et al, 2019; Cardoso; Dias, 2014; Oliveira e Souza, 2007), Agregados em Materiais cimentícios (Guo et al, 2018; Baalamurugan et al, 2019); Chang et al, 2019), Agricultura (Wang et al, 2015; Gao et al, 2015; He et al, 2017) Ambiental (HAN et al, 2019).

A Figura 8 apresenta uma esquematização simplificada das principais áreas de aplicação da escória de aciaria encontradas na literatura, em que se pode perceber aplicações em diversas áreas de produção.

Figura 8 – Mapeamento simplificado das aplicações da escória de aciaria

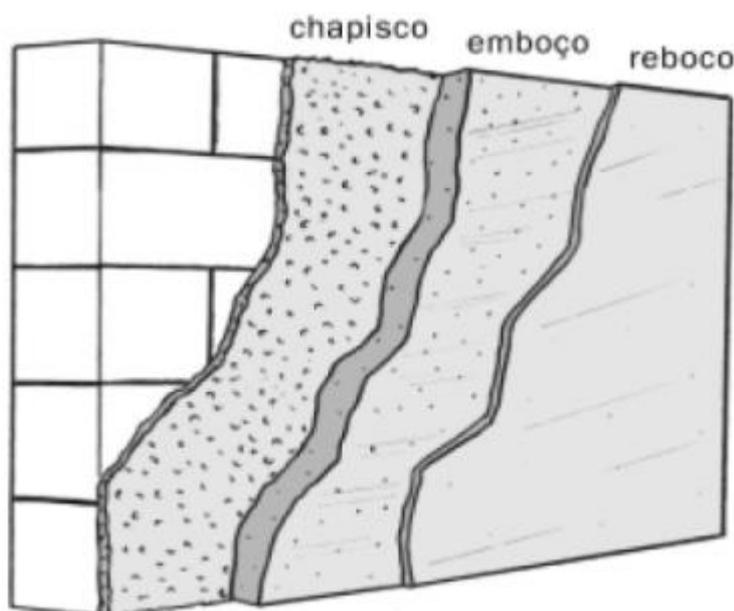


Fonte: Autor, 2022

2.4 Argamassas de revestimento

A argamassa, de acordo com a NBR 13281 (ABNT, 2005), é um compósito cimentício composta por agregados miúdos, aglomerantes e água, com aditivos ou não, com propriedades de aderência e endurecimento, podendo ser dosada em obra ou em fábrica. As principais funções de um revestimento de argamassa de parede são: i) Proteger contra a ação do intemperismo a alvenaria e a estrutura, no caso dos revestimentos externos; ii) Integrar o sistema de vedação dos edifícios, contribuindo com diversas funções, tais como: isolamento térmico (~30%), isolamento acústico (~50%), estanqueidade à água (~70 a 100%), segurança ao fogo e resistência ao desgaste e abalos superficiais; iii) Regularizar a superfície dos elementos de vedação e servir como base para acabamentos decorativos, contribuindo para a estética da edificação (Carasek, 2010). Convencionalmente, o revestimento de paredes consiste das seguintes etapas: chapisco, emboço e reboco (Figura 9). Tais camadas de revestimento se diferenciam entre si de acordo com a sua metodologia de aplicação, dosagem e controle, a fim de que o produto final atenda às propriedades desejadas.

Figura 9 – Camadas de revestimento



Fonte: ABCP (2002)

A NBR 13529 define chapisco como a camada de preparo da base, constituída de mistura de cimento, areia e aditivos, aplicada de forma contínua ou descontínua, com a finalidade de uniformizar a superfície quanto à absorção e melhorar a aderência do revestimento. Já o emboço, a norma define como uma camada de revestimento executada para cobrir e regularizar a superfície da base com ou sem chapisco, proporcionando uma superfície que permita receber outra camada de reboco ou revestimento decorativo, ou que se constitua no acabamento final. Enquanto o reboco, trata-se da terceira camada de revestimento, executada após o emboço. Também é conhecida como revestimento fino. Consiste em uma argamassa de cimento, cal hidratada e areia fina peneirada aplicada numa espessura não maior do que 5 mm; para finalizar e dar acabamento ao emboço, corrigindo eventuais distorções (SALGADO, 2009).

2.4.1 Propriedades das argamassas no estado fresco

Entre as propriedades das argamassas no seu estado fresco, a trabalhabilidade é a propriedade que determina a facilidade com que elas podem ser misturadas, transportadas, aplicadas, consolidadas e finalizadas, em uma condição homogênea (Carasek, 2010). A argamassa é trabalhável quando há a possibilidade de penetrar facilmente a colher de pedreiro, sem ser fluida; se mantém coesa ao ser transportada, mas não pode ocorrer aderência à colher

ao lançamento, distribuindo-se com facilidade e preenchendo toda a base sem que ocorra o endurecimento rápido após a aplicação (BAÍA et al, 2008).

A maior ou menor facilidade de a argamassa deformar-se sob ação de cargas está relacionado a consistência; já, em relação à plasticidade, trata-se da propriedade que confere à argamassa a capacidade de conserva-se deformada após a retirada das tensões de deformação (CARASEK, 2010).

2.4.2 Propriedades das argamassas no estado endurecido

A resistência mecânica das argamassas está relacionada com a sua capacidade de resistir a esforços de tração, compressão ou cisalhamento, advindos de cargas estáticas ou dinâmicas atuantes nas edificações, ou decorrentes de efeitos das condições ambientais (NAKAKURA; CINCOTTO, 2004).

A resistência mecânica não é uma propriedade fundamental nas argamassas, da mesma forma que é para o concreto. Contudo, a análise dessa propriedade se faz necessária, pois se relaciona com a deformabilidade das argamassas, a qual irá interferir na durabilidade do sistema de revestimento (TRISTÃO, 1995).

A capacidade do revestimento de absorver deformações pode ser avaliada por meio do módulo de elasticidade, que pode ser obtido pelo método estático ou dinâmico. Quanto menor o valor do módulo, maior será a capacidade do revestimento de absorver deformações (Nakakura et al 2004; Silva, 2006). Essa capacidade de deformação do revestimento de argamassa, que pode ser avaliada por meio do módulo de elasticidade, está associada às resistências à compressão, de tração na flexão e de aderência à tração (SILVA et al, 2008).

O módulo de elasticidade dinâmico pode ser obtido através da relação que envolve a medição da velocidade de pulso ultrassônico através do corpo-de-prova da argamassa e o seu coeficiente de Poisson. Em adição, quer o módulo de elasticidade, quer a velocidade de propagação do pulso ultrassônico, são variáveis que podem ser utilizadas para monitorar o desempenho de um revestimento de argamassa quanto ao seu comportamento mecânico. Além disso, o ensaio para determinação do módulo de elasticidade pelo método dinâmico, além de rápido, de simples realização e não destrutivo, pode ser realizado no próprio elemento (SILVA et al, 2008).

2.5 Uso da escória de aciaria em argamassas

Silva (2018) produziu argamassas mistas com o traço misto usual em obras na proporção de cimento, cal hidratada e areia úmida 1:1:6, realizando a substituição do agregado miúdo por escória de aciaria BSSF, nos teores de 10, 20 e 30%, constatando que houve aumento do fator água/cimento (a/c) com o aumento do teor de substituição, indicando que a escória possui uma maior absorção de água se comparada com a areia natural.

Estudos realizados por Le et al (2017), em argamassas com substituição nos teores de 25, 50,75 e 100% no traço 1:2,75, constataram que quanto maior o teor de substituição menor é a fluidez das argamassas no estado plástico, justificando esse fato pela textura da superfície áspera e pela forma angular da escória de aciaria em relação à areia natural.

Em relação à massa específica, quanto maior a taxa de substituição de escória pela areia, maior a massa específica obtida, isso é provocado devido a densidade da escória ser maior do que a densidade da areia (Santamaría-Vicario et al, 2015). 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.

Lacerda (2015) analisou a absorção de água das argamassas com areia natural e os teores de substituição de 12,5%, 25% e 50%; constatando que todas as argamassas com escória apresentaram valores inferiores de absorção de água quando comparadas com argamassas com areia natural, o que contribui para um aumento da durabilidade do revestimento, relacionando esse fato ao aumento nos diâmetros dos capilares e, por conseguinte, redução da pressão capilar de sucção.

Quanto à resistência à compressão e a resistência à tração na flexão, as argamassas produzidas com agregado miúdo de escória de aciaria apresentaram valores maiores quando comparadas com as argamassas com areia natural (Ouda et al, 2017). A resistência mecânica das argamassas está relacionada com a sua capacidade de resistir a esforços de tração, compressão ou cisalhamento, advindos de cargas estáticas ou dinâmicas atuantes nas edificações, ou decorrentes de efeitos das condições ambientais (Nakakura et al 2004). Os maiores valores de resistência à compressão e à tração na flexão foram encontrados para o teor de substituição de 40%, sendo de até 18% para a resistência à compressão e de 30% para a flexão aos 28 dias, fixando o mesmo fator a/c para todas as argamassas (Ozturk et al., 2018). Isso pode ser justificado pela forma multiangular do agregado de escória, melhorando o atrito entre partículas e matriz (LE et al, 2017).

Contrário a isso foi constatado por Lacerda (2015), que constatou que a resistência à compressão e à tração na flexão das argamassas com agregado de escória de aciaria foi inferior ao da argamassa de referência, chegando a uma redução aos 28 dias de até 12% para a compressão e de 26% na resistência à flexão.

Além disso, em se tratando da resistência de aderência, as argamassas com agregados naturais foram as que maiores valores do que se comparadas com a resistência das argamassas com teores de escória de aciaria de acordo com análise de SANTAMARÍA VICÁRIO et al (2015).

Em relação ao módulo de elasticidade, em pesquisa com concretos, Al-Otaibi (2002) verificou que o teor de Na_2O afeta de forma significativa essa propriedade. O mesmo autor encontrou valores de módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias próximos de 46 GPa para concreto de escória ativada alcalinamente. Esses valores foram superiores aos dos concretos de referência, sem escória, e aos do concreto com 60% de substituição de cimento por escória e mesmo fator água/cimento (ambos próximos de 42 GPa). O módulo de elasticidade dinâmico pode ser obtido através da relação que envolve a medição da velocidade de pulso ultrassônico através do corpo-de-prova da argamassa e o seu coeficiente de Poisson. Em adição, quer o módulo de elasticidade, quer a velocidade de propagação do pulso ultrassônico, são variáveis que podem ser utilizadas para monitorar o desempenho de um revestimento de argamassa quanto ao seu comportamento mecânico. Além disso, o ensaio para determinação do módulo de elasticidade pelo método dinâmico, além de rápido, de simples realização e não destrutivo, pode ser realizado no próprio elemento (SILVA et al, 2008). Estudos realizados por Qasrawi (2014), em concretos com agregados de escória de aciaria, constataram que a substituição da areia por escória provoca um aumento no módulo de elasticidade que pode ser de até 17% (QASRAWI, 2014).

Quanto às fissuras, Campos et al (2018) estudaram a durabilidade do revestimento argamassado com escória, analisando as fissuras aos 28 dias, constatando que nenhum painel produzido apresentou fissuras visíveis na superfície. Santamaría-Vicario et al (2015) analisaram a microestrutura das argamassas com areia natural e com areia de escória constatando que o volume e a distribuição dos poros foram mais significativos em argamassas com adições de escória de aciaria que nas mostras de referência produzidas com agregado natural. Santamaría-Vicario et al (2015) ao investigarem a durabilidade das argamassas com areia natural e com escória de aciaria, constataram que sob o efeito do congelamento e descongelamento e ciclos de molhagem e secagem, os dois tipos de argamassas apresentam se com comportamento semelhante.

3 MATERIAIS E MÉTODOS DE PESQUISA

3.1 Materiais

Na presente pesquisa foi utilizado cimento Portland CP V – ARI. A Tabela 2 apresenta as características químicas e físicas do cimento, em que tais dados foram fornecidos pela fábrica.

Tabela 2 – Características físicas e químicas do cimento utilizado

Ensaio	Resultado	Norma
Perda ao fogo	4,39%	NM 18/12
Massa específica	3,06 g/cm ³	NM 23/01
Finura (#200)	0,20%	11579/12
Finura (#325)	4,80%	12826/14
Início de pega	2:15 h:min	NM 65/03
Fim de pega	3:45 h:min	NM 65/03
Óxido de Magnésio – MgO	4,17%	NM 11- 2/12
Anidrido Sulfúrico – SO ₃	3,24%	NM 16/12
Resíduo Insolúvel	0,69%	NM 15/12
Anidrido Carbônico – CO ₂	2,97%	11578/91
Expansibilidade a quente	0,00 mm	11582/16
Expansibilidade a quente	0,00 mm	11582/16
Resistência à compressão	1 dia	2590,00%
	3 dias	3660,00%
	7 dias	4430,00%
	28 dias	5320,00%
		16697/2018

Fonte: Boletim técnico APODI (2018)

A água utilizada para a produção das argamassas foi referente ao sistema de abastecimento de Fortaleza. Para as argamassas mistas, utilizou-se cal hidratada do tipo CH-I, devido a sua maior capacidade reativa, com massa específica na ordem de 2,56 g/cm³. Destaca-se o melhor desempenho dessa categoria em relação à menor quantidade de impurezas, embora o mercado cearense consuma em grandes quantidades a cal do tipo CH-III.

O agregado natural foi proveniente da Região Metropolitana de Fortaleza (RMF). Realizou-se a caracterização da areia por meio de ensaios como massa específica (NBR NM 52:2009), absorção (NBR NM 30:200), granulometria (NBR NM 248:2003) no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC).

A escória utilizada no presente trabalho foi a Baosteel's Slag Short Flow (BSSF) que possui como origem a Companhia Siderúrgica do Pecém (CSP), que disponibilizou o

material para a pesquisa (Figura 10). A siderúrgica citada está localizada em São Gonçalo do Amarante, no estado do Ceará.

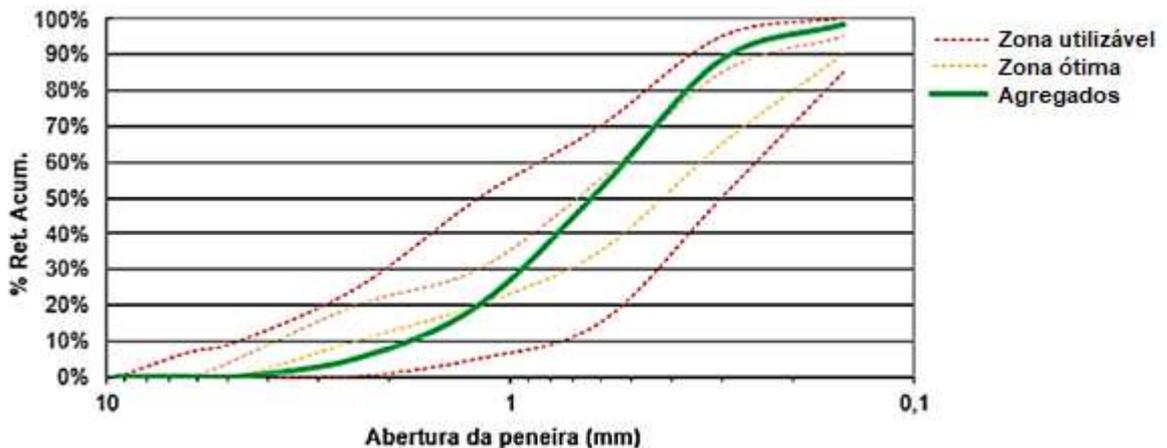
Figura 10 – Escória de aciaria BSSF



Fonte: Autor (2022)

Para a utilização da escória, secou-se em estufa a $105 \pm 5^\circ\text{C}$ até a constância da massa. Em seguida, realizou-se o peneiramento conforme estabelecido na NBR 248 (ABNT, 2003), realizando o ajuste da distribuição granulométrica para se assemelhar à distribuição dos grãos da areia natural a fim de descartar a influência do tamanho dos grãos nas propriedades de resistência a compressão e à tração na flexão das argamassas, além de outras propriedades que se relacionam ao estado fresco do material. O Gráfico 1 apresenta a curva granulométrica dos agregados que se enquadra na zona utilizável, conforme especifica a NBR 7211 (ABNT, 2009). Quanto às propriedades físicas dos agregados miúdos (areia natural e escória de aciaria) serão analisados conforme apresentado na Tabela 3.

Gráfico 1 – Curva granulométrica do agregado miúdo



Fonte: Adaptado de Amancio (2019)

Tabela 3 – Ensaio realizados para a caracterização das propriedades físicas dos agregados miúdos.

ENSAIO	NORMA
Dimensão máxima	NBR NM 248 (ABNT,2003)
Módulo de finura	NBR NM 248(ABNT, 2003)
Massa unitária	NBR NM 45 (ABNT, 2006)
Absorção de água	NBR NM 52 (ABNT, 2009)
Massa específica	NBR NM 52 (ABNT, 2009)
Teor de material pulverulento	NBR NM 46 (ABNT, 2003)
RAA	NBR 15577-4 (ABNT, 2018)

Fonte: Autor (2021)

A Tabela 4 apresenta os valores obtidos na caracterização da areia natural e da escória de aciaria BSSF.

Tabela 4 – Valores obtidos na caracterização dos agregados

ENSAIO	UNIDADE	AREIA NATURAL	ESCÓRIA DE ACIARIA BSSF
Dimensão máxima	mm	2,36 mm	2,36 mm
Módulo de finura	-	2,52	2,52
Massa unitária	g/cm ³	1,41 g/cm ³	2,08 g/cm ³
Absorção de água	%	0,90%	2,10%
Massa específica	g/cm ³	2,59 g/cm ³	3,86 g/cm ³
Teor de material pulverulento	%	1,00 %	1,30 %

Fonte: Autor (2022)

Por meio do Aggregate Image Measurement System (AIMS) (Figura 11) foi verificada a forma dos grãos dos agregados: areia natural e escória de aciaria. Por meio deste ensaio é possível classificar os agregados conforme a sua forma, através de parâmetros de forma 2D e angularidade dos agregados miúdos, além disso é possível realizar a verificação da textura superficial, esfericidade, lamelaridade, angularidade dos agregados graúdos. Para os agregados miúdos, objeto de estudo do presente trabalho, a forma 2D é definida em uma escala de 0 a 20, sendo o valor 0 admitido como um círculo perfeito. Em uma escala de 0 a 10.000 é definida a

angularidade das bordas do material analisado. Dessa forma, de acordo com esses parâmetros, um círculo perfeito possui a angularidade baixa, tendendo ao limite nulo (BESSA, 2012).

Figura 11 – Aggregate Imaging Measurement System



Fonte: BESSA (2012)

Al Rousan (2004) desenvolveu a classificação de acordo com os índices obtidos por meio da análise de diversos agregados no AIMS. A Tabela 5 mostra esta classificação conforme os parâmetros de Forma 2D, Angularidade, Textura Superficial e Esfericidade utilizando essa metodologia.

Tabela 5 – Classificação dos agregados pela metodologia utilizando o AIMS

Parâmetro	Limites / Classificação				
	< 0,6	0,6 – 0,7	0,7 – 0,8	> 0,8	-
Esfericidade ($\geq 4,75\text{mm}$)	Achatado/ alongada	Baixa esfericidade	Esfericidade moderada	Alta esfericidade	-
Forma 2D ($\leq 2,36\text{mm}$)	< 6,5	6,5 - 8,0	8,0 - 10,5	>10,5	-
Angularidade ($\leq 2,36\text{mm}$)	Circular	Semicircular	Semialongado	Alongado	-
Textura superficial ($\geq 4,75\text{mm}$)	< 165	165 – 275	275 - 350	350 - 460	>460
	Polido	Macio	Baixa rugosidade	Rugosidade moderada	Alta rugosidade

Fonte: Al Rousan (2004)

A Tabela 6 apresenta a classificação dos materiais utilizados como agregados e as Tabelas 7 e 8 apresentam as concentrações de partículas em cada classe de acordo com a angularidade e a forma 2D, respectivamente.

Tabela 6 – Classificação dos agregados conforme resultados obtidos pelo AIMS

Parâmetro	Tipo de agregado	Tratamento estatístico			Classificação
		Média	n° de partículas	Desvio padrão	
Angularidade	Areia natural	3491	961	1216,9	Subarredondada
	Escória	3650	948	1486,7	Subarredondada
Forma 2D	Areia natural	7,7	909	1,96	Semicircular
	Escória	8,0	895	2,35	Semicircular
Esfericidade	Areia natural	0,74	50	0,08	Esfericidade moderada
	Escória	0,76	50	0,08	Esfericidade moderada
Textura Superficial	Areia natural	136	50	53	Polido
	Escória	298	50	117	Baixa rugosidade

Fonte: Amancio (2019)

Tabela 7 – Concentração das partículas de acordo com a sua angularidade

Agregado	Concentração das partículas (%)				Classificação
	Arredondado	Subarredondado	Subangular	Angular	
Areia natural	12	56	24	8	Subarredondada
Escória BSSF	16	43	29	13	Subarredondada

Fonte: Amancio (2019)

Tabela 8 – Concentração das partículas de acordo com a sua Forma 2D

Agregado	Concentração das partículas (%)				Classificação
	Circular	Semicircular	Semialongado	Alongado	
Areia natural	30	33	31	7	Semicircular
Escória BSSF	24	30	37	10	Semicircular

Fonte: Amancio (2019)

Dessa forma, é possível perceber que a escória de aciaria possui uma maior concentração de partículas alongadas e semialongadas, conforme é apresentado na Tabela 7 e Tabela 8 a classificação da areia natural e da escória de aciaria BSSF foi subarredondadas quanto a angularidade e semicircular em relação a forma 2D.

Quanto a caracterização química da escória de aciaria, por meio do ensaio de Fluorescência de raio X (FRX) no laboratório de Raio-X, do Departamento de Física da Universidade Federal do Ceará, realizado com um espectrômetro de raios-X Rigaku ZSX mini II, constatou-se que a composição desse material é basicamente constituída de Fe₂O₃, SiO₂, CaO, compondo mais de 90% escórias. A Tabela 9 apresenta a composição da escória de aciaria BSSF estudada.

Tabela 9 – Composição química da escória de aciaria BSSF

Óxidos	Amostra (%)
K ₂ O	0,04
Co ₂ O ₃	0,12
Cr ₂ O ₃	0,21
Al ₂ O ₃	0,63
TiO ₂	0,63
P ₂ O ₅	1,01
MnO	5,09
SiO ₂	5,84
CaO	33,46
Fe ₂ O ₃	52,98

Fonte: Amancio (2019)

Destaca-se que a escória de aciaria não apresentou expansibilidade a frio, ocorrendo apenas expansibilidade a quente, porém os resultados obtidos se encontram dentro do limite especificado de 5 mm pela NBR 16697 (ABNT, 2018), conforme é apresentado na Tabela 10. A metodologia do ensaio adotado foi baseada no ensaio de determinação da expansibilidade do cimento pelo método de Le Chatelier, definido na NBR 11582 (ABNT, 2016). Para a realização do ensaio, realizou-se a substituição de cimento por escória de aciaria BSSF de 50% de volume, para Mehta e Monteiro, valor considerado suficiente para que ocorra o fenômeno da expansibilidade, caso possua características expansivas.

Tabela 10 – Dados e resultado do ensaio de expansibilidade a quente de Le Chatelier da escória de aciaria BSSF

Agulha	Leitura Inicial	Leitura Final	Varição da abertura
1	0 mm	1,36 mm	1,36 mm
2	0 mm	1,19 mm	1,19 mm
3	0 mm	0,93 mm	0,93 mm
Abertura final média			1,16 mm

Fonte: Amancio (2019)

3.2 Métodos

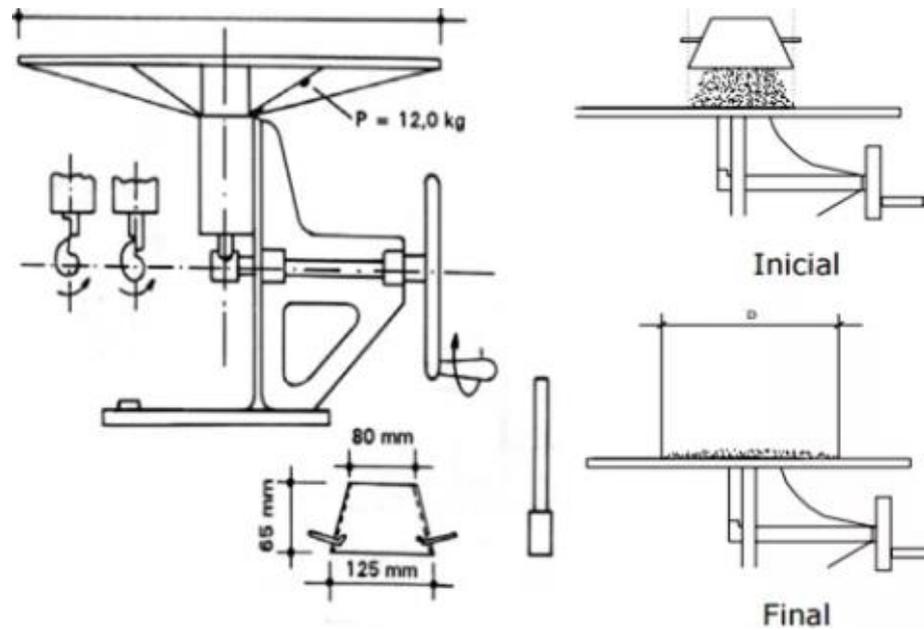
O presente trabalho foi realizado durante a participação no Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica, dando-se continuidade ao estudo da aplicação

de escórias de aciaria em argamassas realizado por Amancio (2019), realizando-se a complementação em relação ao estudo das propriedades no estado endurecido de argamassas com substituição de areia natural por escória de aciaria BSSF. Além disso, os dados obtidos na presente pesquisa produziram um artigo com o título Propriedades mecânicas de argamassas com substituição da areia natural por escória de aciaria BSSF (baosteel's slag short flow) (AMANCIO et al, 2020).

As argamassas foram preparadas de acordo com a NBR 16541 (ABNT, 2016). A substituição da areia natural por escória foi realizada em volume, por meio das massas específicas, nos teores de 0%, 20%, 40% e 60% de substituição de areia por escória BSSF. Os teores foram definidos após a realização de ensaios preliminares, que possibilitaram constatar que para teores mais elevados, como 80 e 100% de substituição, as argamassas apresentavam baixa trabalhabilidade e elevada densidade e exsudação. Os traços utilizados foram 1:3, 1:5 e 1:7 (cimento:agregado) para argamassas simples de cimento Portland e para as argamassas mistas estudadas optou-se pela utilização dos traços 1:1:4, 1:1:6 e 1:1:8 (cimento:cal:agregado). Essas proporções são referentes a combinação de massa e volume dos materiais, pois, a quantidade de agregado para o traço 1:3, por exemplo, é de 3 padiolas de 40 L para cada 1 saco de cimento (50 kg). A escolha dos referidos traços partiu da escolha dos traços 1:5 e 1:1:6, que são as proporções empregadas nas construtoras da cidade de Fortaleza, acrescentando mais duas variações, uma mais rica e outra mais pobre em relação a proporção aglomerante e agregados.

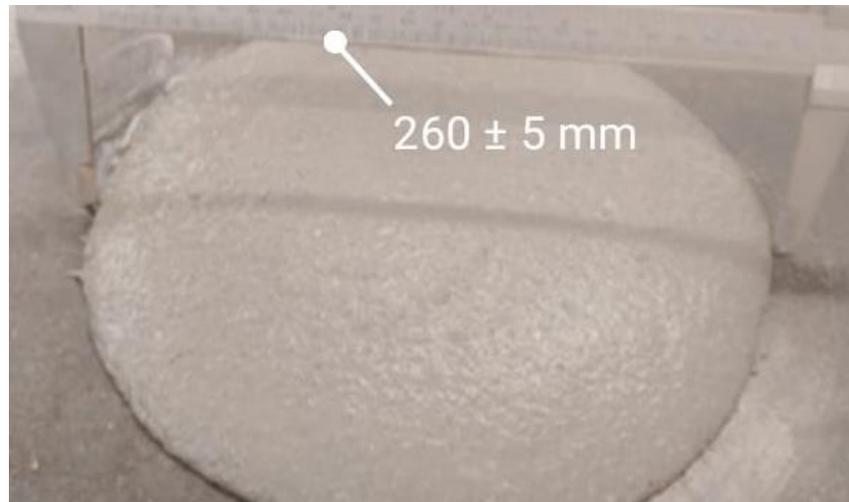
A relação a/c foi determinada por meio do ensaio de flow-table (Figura 12) conforme a NBR 13276 (ABNT, 2016), fixando um intervalo de espalhamento entre 255 e 265 mm na mesa de abatimento (Figuras 13), a fim de determinar a quantidade de água para cada traço estudado. A preparação de cada argamassa utilizada nesse estudo seguiu as diretrizes da NBR 16541 (ABNT, 2016).

Figura 12 – Mesa para o ensaio de determinação do índice de consistência das argamassas



Fonte: Adaptado de NBR 7215 (ABNT, 2019)

Figura 13 – Espalhamento da argamassa no ensaio de determinação do índice de consistência



Fonte: Autor (2022)

A substituição do material convencional pela escória de aciaria em volume se deu a partir da utilização da Equação 01, sendo M a massa do material e μ a massa específica. Essa substituição se faz necessária para que os traços tivessem a mesma quantidade de cimento por m^3 , e assim comparar os resultados com o traço de referência.

$$M_{escória} = \frac{\mu_{escória}}{\mu_{areia}} M_{areia} \quad \text{Eq. (1)}$$

A Tabela 11 apresenta as proporções de cada material em cada traço, sendo o consumo de água encontrado conforme a NBR 13276 (ABNT, 2016).

Tabela 11 – Composição dos traços de argamassas analisadas

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

Fonte: Amancio (2019)

Com as proporções dos traços, realizou-se a produção das argamassas conforme o procedimento prescrito na NBR 16541 (ABNT, 2016). A Figura 14 apresenta a argamassadeira utilizada para o amassamento das argamassas.

Figura 14 – Argamassadeira utilizada para o amassamento das argamassas



Fonte: Autor (2022)

Em seguida, realizou-se a determinação da massa específica das argamassas por meio do método gravimétrico conforme estabelecido na NBR 13278 (ABNT, 2005). Para a determinação do teor de ar incorporado, é necessário conhecer o valor que corresponde à densidade de massa teórica, que se trata da relação entre a massa seca do material e a densidade de massa de cada componente. A Figura 15 apresenta o material e o recipiente utilizado para o ensaio.

Figura 15 – Método gravimétrico para ensaio de massa específica e teor de ar incorporado

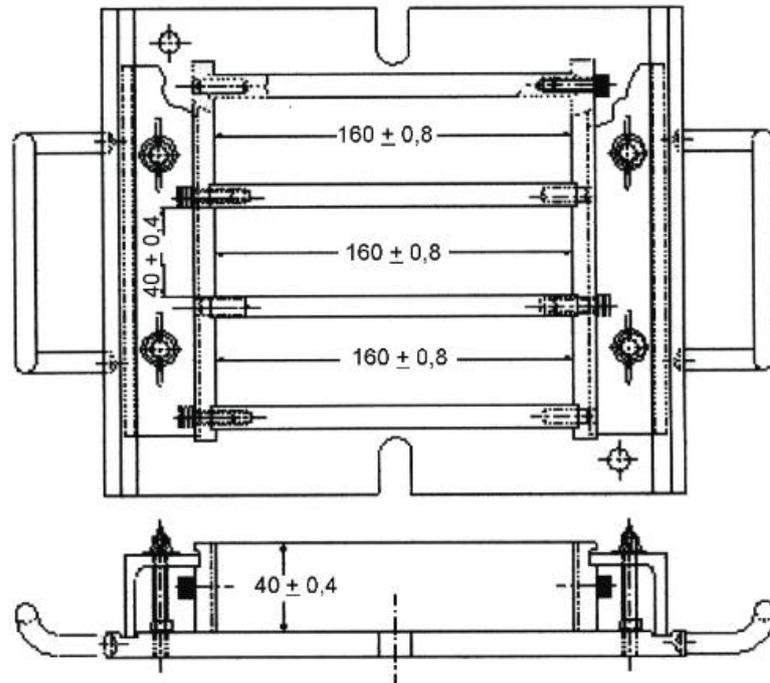


Fonte: Autor (2022)

Por fim, para se investigar as propriedades das argamassas no estado endurecido, moldou-se os corpos de prova prismáticos de 40 x 40 x 160 cm (Figura 16) para a realização dos ensaios de caracterização das argamassas no estado endurecido na idade de 28 dias, pois as

propriedades das argamassas, nessa idade, possuem estabilidade. Para a determinação da resistência à compressão e à tração na flexão, foram adotados os procedimentos descritos na NBR 13279 (ABNT, 2005). Além disso, verificou-se a densidade das argamassas no estado endurecido seguindo a metodologia da NBR 13280 (ABNT, 2005).

Figura 16 – Equipamento para moldagem dos corpos-de-prova



Fonte: NBR 13279 (ABNT, 2005)

Para os ensaios de módulo de elasticidade dinâmico foram seguidos os procedimentos descritos na NBR 15630 (ABNT, 2009), em que primeiramente é determinada a velocidade ultrassônica de propagação (VPU) por meio do equipamento Lab+ (Figura 17), com frequência dos transdutores na ordem de 54 Hz, conforme Equação 2, sendo L a distância entre os pontos de acoplamento dos transdutores (comprimentos do corpo de prova, em mm) e T – o tempo registrado pelo mostrador digital, em μs .

Figura 17 – Equipamento de Ultrassonografia



Fonte: Proceq (2022)

$$V = L / T \quad \text{Eq. (2)}$$

Em seguida, o módulo de elasticidade dinâmico foi determinado conforme Equação 3.

$$Ed = \rho \cdot v^2 \cdot \frac{(1+\mu) \cdot (1-2\mu)}{(1-\mu)} \quad \text{Eq. (3)}$$

Sendo:

ρ – densidade de massa aparente no estado endurecido da argamassa (kg/m^3)

v – velocidade de propagação ultrassônica ($\text{mm} / \mu\text{s}$)

μ – coeficiente de Poisson, sendo usualmente 0,20 nesta equação.

Para uma melhor representação dos dados, foi realizado o tratamento por meio de análise estatística de Análise de Variância, ANOVA. Para essa análise utilizou-se o software Statistica® 7.0. Inicialmente, descartou-se, por meio dos resíduos, os dados espúrios, que não representam de forma efetiva a realidade estudada. Para isso, considerou-se como nível de confiança a porcentagem de 95%, ou seja, resíduos maiores do que 1,96 para mais ou para menos foram descartados. Após a eliminação dos dados não representativos, realizou-se uma nova análise até que todos os valores de resíduos estejam entre o intervalo mencionado. Por fim, por meio da ANOVA, é considerada a significância provocada pela alteração do objeto em estudo de acordo com os parâmetros analisados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção é dividida em duas macros etapas: na primeira são apresentados e discutidos os resultados obtidos na caracterização das argamassas estudadas no seu estado fresco; e na última, são apresentados e discutidos os resultados referentes as propriedades no estado endurecido das argamassas analisadas. Em ambas as divisões, é realizado a comparação entre as argamassas de referência (0% de substituição) e as argamassas com teores de substituição da areia natural pela escória de aciaria BSSF.

4.1 Estado Fresco

A Tabela 12 apresenta os valores correspondentes dos valores obtidos nos ensaios de caracterização das argamassas em estado fresco de forma resumida.

Tabela 12 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios realizados nas argamassas no estado fresco

Traço	Ident.	Grupo	a/c	Flow table (mm)	Massa esp. (kg/m ³)			Teor de ar (%)		
					1	2	3	1	2	3
1:3	REFA	A	0,52	258	2165	2160	2162	3	3	4
	A20		0,54	263	2294	2306	2290	1	1	2
	A40		0,56	258	2392	2400	2393	2	1	2
	A60		0,55	260	2533	2517	2523	2	2	2
1:5	REFB	B	0,83	259	2062	2072	2067	4	4	4
	B20		0,85	258	2207	2205	2206	3	4	3
	B40		0,88	263	2315	2316	2317	4	4	4
	B60		0,9	260	2463	2454	2457	3	4	3
1:7	REFC	C	1,19	262	2035	2027	2031	4	4	4
	C20		1,24	259	2118	2141	2123	6	5	5
	C40		1,33	256	2273	2272	2274	4	4	4
	C60		1,32	261	2399	2424	2418	4	3	3
1:1:4	REFD	D	0,79	261	2096	2105	2099	2	2	2
	D20		0,8	260	2230	2232	2228	2	1	2
	D40		0,81	262	2325	2328	2326	2	2	2
	D60		0,8	264	2412	2432	2427	4	3	3
1:1:6	REFE	E	1,07	257	2045	2063	2051	4	3	4
	E20		1,08	264	2202	2194	2181	3	3	4
	E40		1,1	258	2316	2339	2312	3	2	3
	E60		1,09	262	2445	2442	2442	3	4	4
1:1:8	REFF	F	1,38	258	2012	2031	2018	5	4	4
	F20		1,41	263	2151	2143	2133	4	5	5
	F40		1,45	258	2262	2273	2263	5	4	5
	F60		1,56	263	2374	2393	2387	4	4	4

Fonte: Amancio (2019)

4.1.1 Relação água/cimento (a/c) das argamassas

Para a obtenção dos valores correspondentes do fator a/c, utilizou-se, por meio de tentativa e erro, o procedimento estabelecido na NBR 13276 (ABNT, 2016), que define um intervalo de espalhamento da argamassa entre 255 mm e 265 mm no equipamento conhecido como Flow Table. Esse procedimento foi realizado em cada traço avaliado e para cada teor de substituição do agregado miúdo pela escória. Observou-se que quanto maior a porcentagem de substituição da areia pela escória, maior foi o fator a/c para a obtenção de um espalhamento no intervalo supracitado. Esse comportamento pode estar relacionado devido a maior absorção de água e pela textura e angularidade das partículas se comparadas com os grãos de areia. Conforme apresentado na metodologia (Tabela 7 e Tabela 8), ambos os agregados foram classificados como subarredondados e semicirculares em relação a angularidade e a forma, embora a areia tenha apresentado uma maior quantidade de grãos circulares e semicirculares; arredondada e subarredondada — facilitando, dessa forma, a movimentação dos grãos, implicando na menor necessidade de água para o mesmo espalhamento. Além disso, devido a massa específica da escória de aciaria ser maior do que da areia natural, as argamassas mais pesadas tendem a se espalharem mais no ensaio de consistência, favorecendo a utilização de uma menor quantidade de água para se obter o espalhamento mencionado, Fato constatado também por CARASEK et al (2016).

Le et al (2017) observaram que à medida que se aumentava a porcentagem de substituição do agregado natural pela escória, as argamassas apresentavam uma menor fluidez devido à superfície áspera e pela forma dos grãos, que se apresentaram como mais arredondados. Cardoso et al (2007) aponta a influência do coeficiente de atrito no comportamento de concretos no estado fresco, porém cabe salientar que o comportamento das argamassas é diferente dos concretos devido a quantidade de agregados, interação dos agregados graúdos com os miúdos.

O comportamento diferente observado na Tabela 4 para o teor de 60% e 40% mostra a provável influência do aumento da massa específica do material, que terá maior facilidade de espalhamento devido ao aumento da energia gravitacional, proporcionando uma maior facilidade para atingir o intervalo de espalhamento definido na NBR 13276. Esse aumento se deve a maior massa específica das escórias em relação a areia natural, em que esse comportamento pode ser observado nos traços 1:3, 1:7, 1:1:4 e 1:1:6, em que a relação a/c para o teor de 60% de substituição foi menor que o encontrado no teor de 40% e, em alguns casos, com um maior espalhamento.

As Equações 4 a 9 e os Gráficos 2 e 3 apresentam as correlações entre o fator água/cimento (a/c) e o teor de substituição por escória (E) de acordo com cada traço utilizado.

$$F_{a/c(1:3)} = 0,06 E + 0,53 \quad (R^2 = 0,69) \quad \text{Eq. (4)}$$

$$F_{a/c(1:5)} = 0,12 E + 0,83 \quad (R^2 = 0,99) \quad \text{Eq. (5)}$$

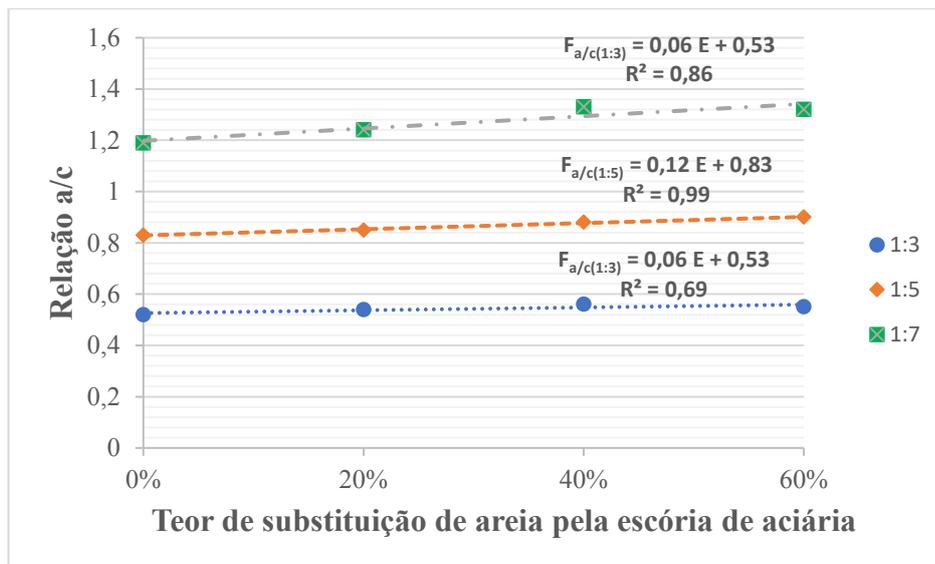
$$F_{a/c(1:7)} = 0,24 E + 1,20 \quad (R^2 = 0,84) \quad \text{Eq. (6)}$$

$$F_{a/c(1:1:4)} = -0,4167 E^3 + 0,25 E^2 + 0,0167 E + 0,79 \quad (R^2 = 1) \quad \text{Eq. (7)}$$

$$F_{a/c(1:1:6)} = -0,833 E^3 + 0,625 E^2 - 0,0417 E + 1,07 \quad (R^2 = 1) \quad \text{Eq. (8)}$$

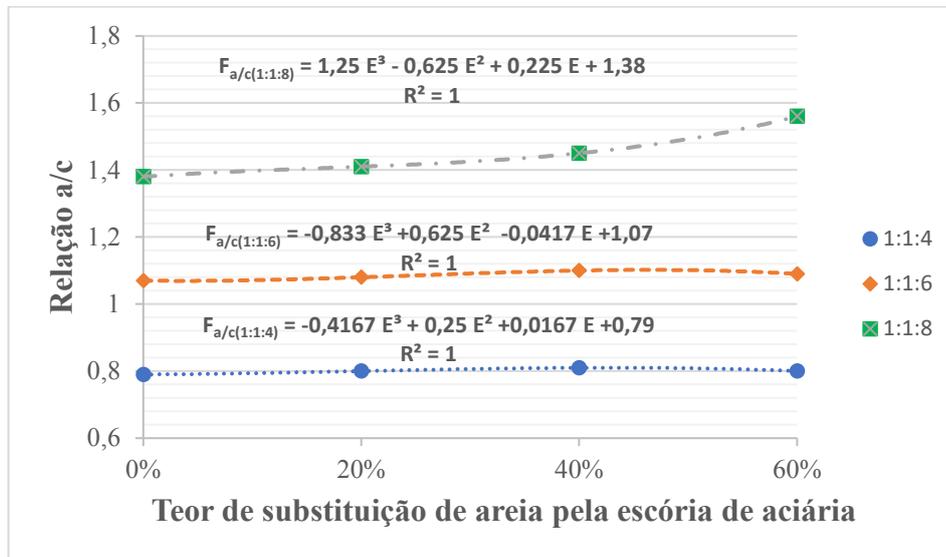
$$F_{a/c(1:1:8)} = 1,25 E^3 - 0,625 E^2 + 0,225 E + 1,38 \quad (R^2 = 1) \quad \text{Eq. (9)}$$

Gráfico 2 – Correlação entre a relação a/c e o teor de substituição da areia por escória de aciaria em argamassas simples



Fonte: Adaptado de Amancio (2019)

Gráfico 3 – Correlação entre a relação a/c e o teor de substituição da areia por escória de aciaria em argamassas mistas



Fonte: Adaptado de Amancio (2019)

Observa-se que existiu uma maior demanda de água nas argamassas mistas, esse fator pode ser associado a maior área superficial da cal, que é maior do que a área superficial do cimento e dos agregados utilizados, aumentando a área necessária a ser molhada. Essa maior exigência de água também foi observada por Quarcioni et al (2009), observando o aumento da demanda de água para manter a consistência das argamassas.

Em somatório a isso, é notória a menor relação a/c para os traços mais ricos. Esse fato se deve ao aumento do teor de cimento, que auxilia em uma maior trabalhabilidade devido ao aumento da quantidade de pasta no sistema, tornando os agregados mais envolvidos, tal observação também foi observada por Mattos, Dal Molin; Carneiro (2001). Esse envolvimento das partículas auxilia positivamente no espalhamento das argamassas devido a maior fluidez existente no sistema.

4.1.2 Massa específica no estado fresco

Os valores de massa específica das argamassas analisadas estão apresentados na Tabela 13. Realizou-se o tratamento dos dados por meio da padronização dos resíduos para detectar e retirar os dados espúrios, assim como foi definido na metodologia de pesquisa, de modo que os valores estejam no intervalo de confiança de 95%. Após esse tratamento, foi realizada a análise de variância para a análise dos dados.

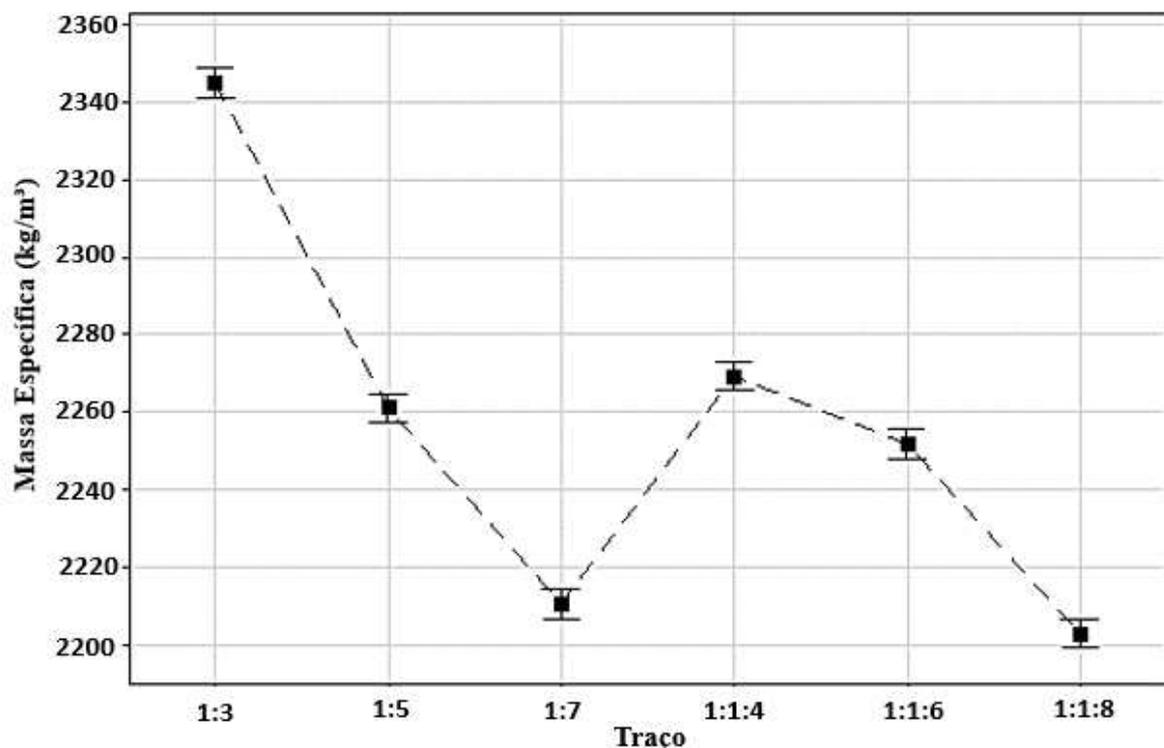
Tabela 13 – Tratamento estatístico (ANOVA) para análise de significância entre a massa específica das argamassas em relação ao teor e aos traços utilizados

Efeito	SQ	GDL	MQ	F crítico	Valor p	Significância
Traço	149144	5	29829	757	0	Sim
Teor de substituição	1298497	3	432832	10989	0	Sim
Traços e teor de substituição	10187	15	679	17	0	Sim
Erro	1773	45	39			

Fonte: Autor (2022)

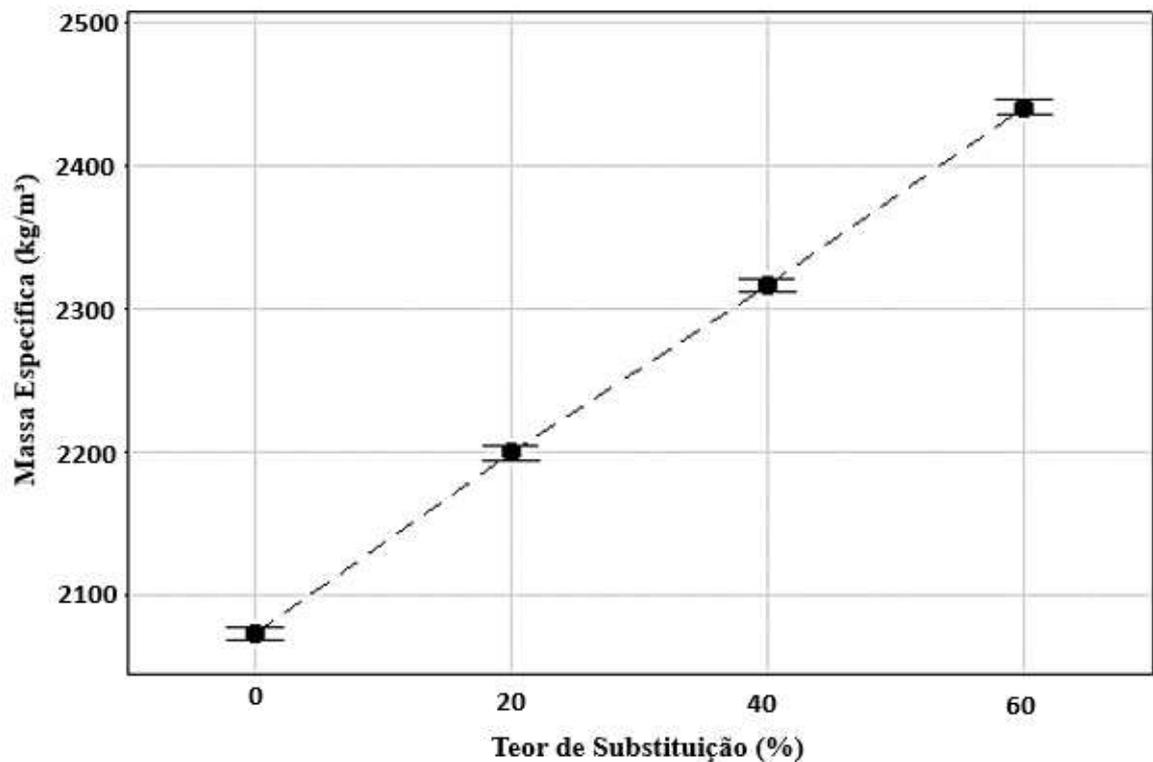
Dessa forma, observa-se que o teor de substituição e o traço utilizado apresentam influência significativa na massa específica das argamassas. O aumento significativo da massa específica nas argamassas com teor de escória é notório, isso se deve devido a maior massa específica da escória se comparar com a massas específica da areia natural, essa com $2,59 \text{ g/cm}^3$ e aquelas com $3,86 \text{ g/cm}^3$. Além disso, as argamassas com maior consumo de aglomerantes apresentaram massa específica maiores em relação às demais, fato esperado devido a maior massa específica do cimento em relação à areia natural. Os Gráficos 4 e 5 apresentam o comportamento da massa específica de acordo com a influência do traço e o teor de substituição da areia natural pela escória de aciaria, respectivamente.

Gráfico 4 – Influência do traço na massa específica das argamassas



Fonte: Autor (2022)

Gráfico 5 – Influência do teor de substituição de areia por escória na massa específica das argamassas

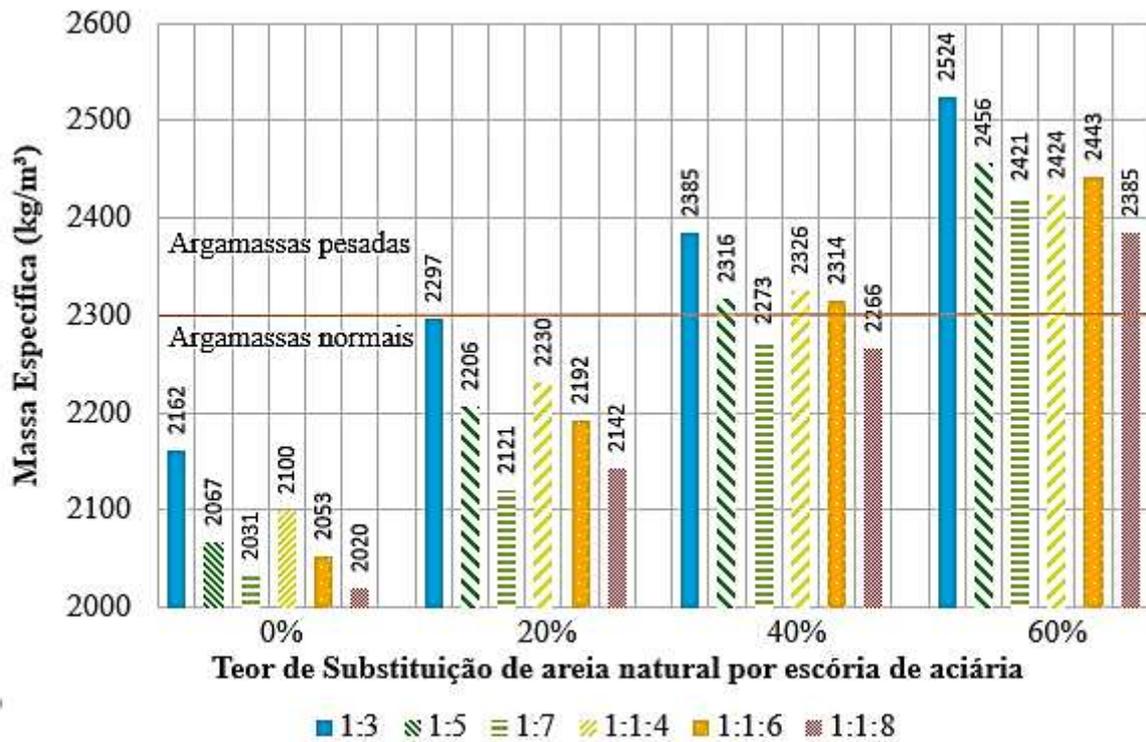


Fonte: Autor (2022)

De acordo com Cintra et al (2004), a massa específica está intimamente ligada com a sua trabalhabilidade, que é reduzida quando a massa específica das argamassas é elevada. Dessa forma, as argamassas produzidas com escória podem reduzir a produtividade na execução do revestimento, o que poderia ser contornado com a utilização de aditivos incorporadores de ar.

A NBR 13281 (ABNT, 2005) define que as argamassas com valores de massa específica acima de 2000 kg/m³ como D6. Porém, existem diversas outras classificações na literatura, Carasek (2010) define que argamassas que possuem massa específica entre 1400 a 2300 kg/m³ são classificadas como normais; e acima de 2300 kg/m³, pesadas. O Gráfico 6 apresenta os valores encontrados para cada traço analisado e a divisão entre as argamassas classificadas como normais e pesadas, sendo a última classificação apresentada de forma mais acentuada com teor de substituição de 60%.

Gráfico 6 – Resultados da massa específica obtida em cada traço de acordo com o teor de substituição de areia por escória de aciaria



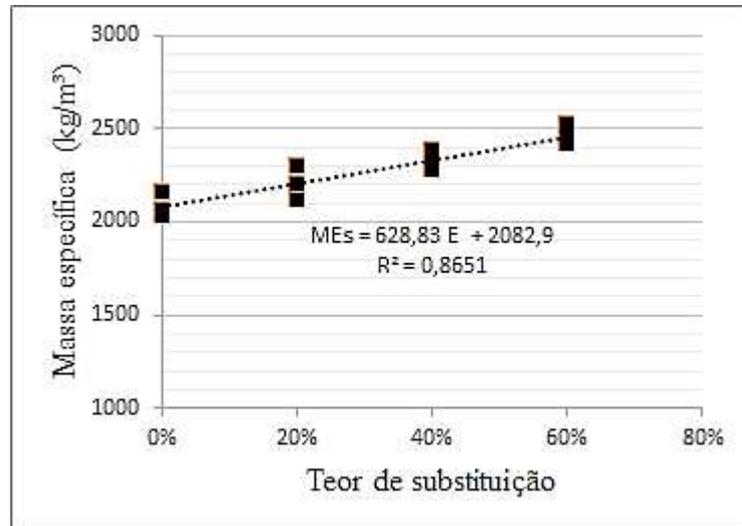
Fonte: Autor (2022)

Com os resultados, determinou-se a possível correlação entre a massa específica e as argamassas simples e mistas no seu estado fresco de acordo com o teor de substituição. As Equações 10 e 11 apresentam a estimativa dessa propriedade por meio da correlação apresentada nos Gráficos 7 e 8.

$$MEs = 628,83 E + 2082,9 \quad (R^2 = 0,87) \quad \text{Eq. (10)}$$

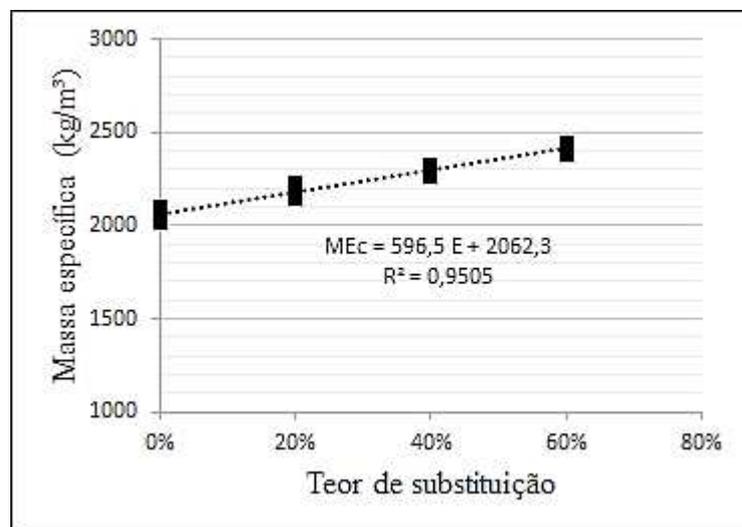
$$MEc = 596,5 E + 2062,3 \quad (R^2 = 0,95) \quad \text{Eq. (11)}$$

Gráfico 7 – Correlação entre o teor de substituição de areia por escória de aciaria e a massa específica das argamassas simples



Fonte: Adaptado de Amancio (2019)

Gráfico 8 – Correlação entre o teor de substituição de areia por escória de aciaria e a massa específica das argamassas compostas



Fonte: Amancio (2019)

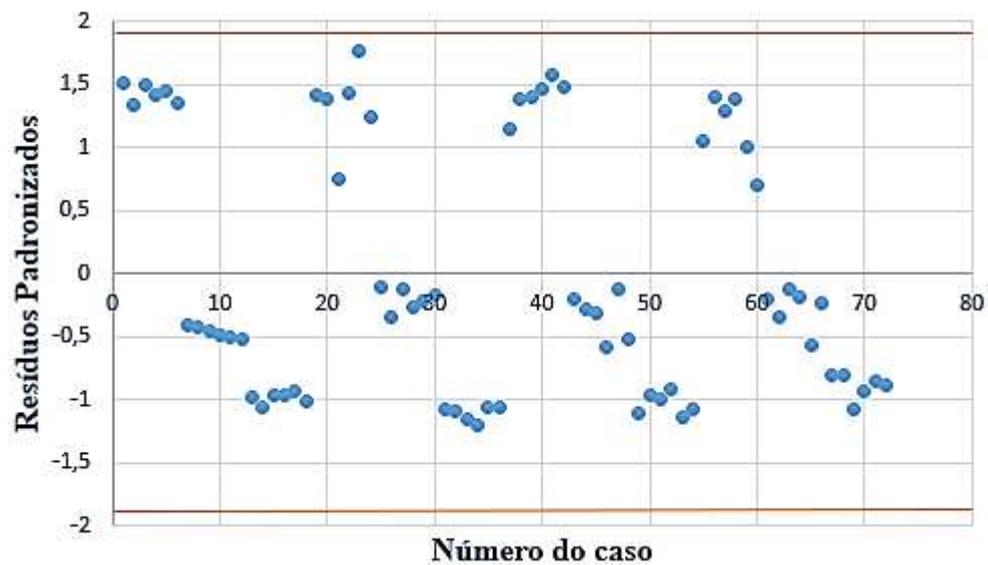
4.2 Estado Endurecido

O desempenho das argamassas depende das suas características no estado plástico e no estado endurecido. Portanto, é de suma importância a análise do comportamento mecânico das argamassas produzidas com a substituição de areia natural pela escória de aciaria, a fim de garantir o bom desempenho desse material ao longo da sua vida útil.

4.2.1 Resistência à compressão

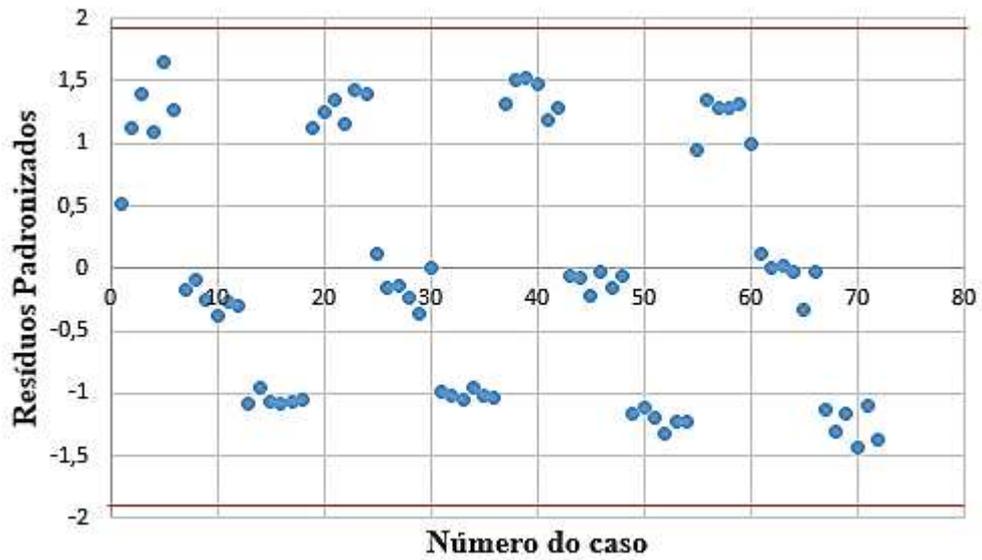
Realizou-se o tratamento dos resíduos padronizados para detectar e descartar os dados espúrios, conforme mencionado na metodologia da pesquisa. Os Gráficos 9 e 10 apresentam os resíduos padronizados para os valores de resistência à compressão, tais valores são considerados outliers quando os resíduos padronizados ultrapassam um valor de referência de 1,96 para mais ou para menos, que é o valor crítico para um nível de confiança de 95%).

Gráfico 9 – Resíduos padronizados para os dados de resistência à compressão para as argamassas simples



Fonte: Autor (2022)

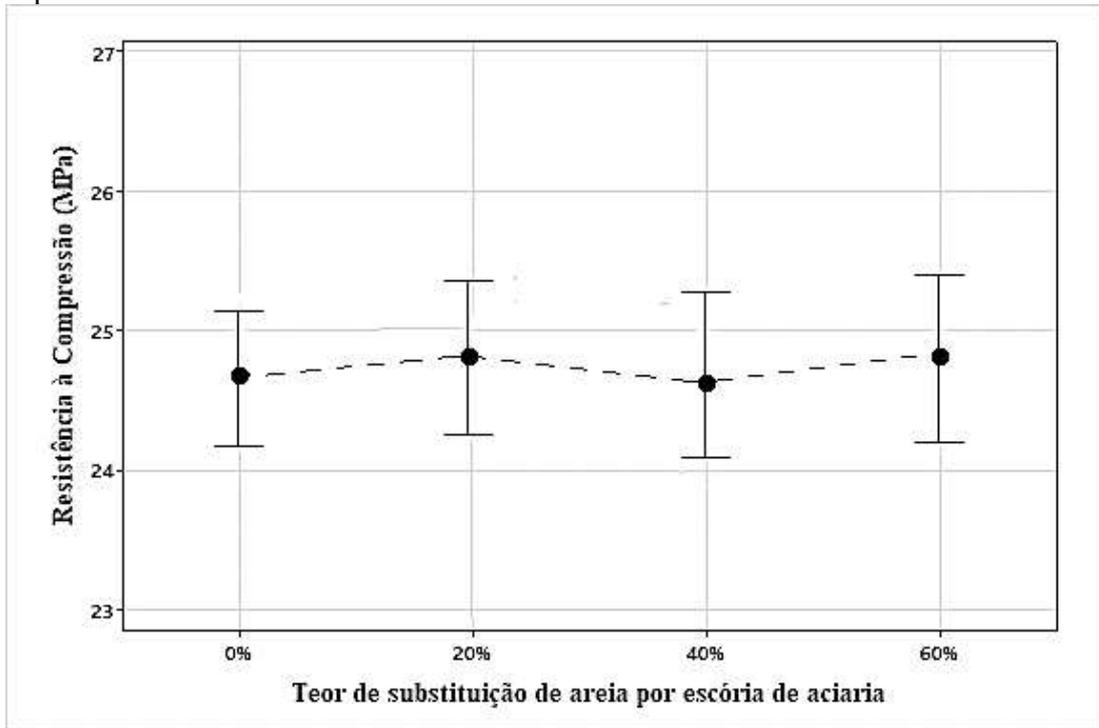
Gráfico 10 – Resíduos padronizados para os dados de resistência à compressão para as argamassas compostas



Fonte: Autor (2022)

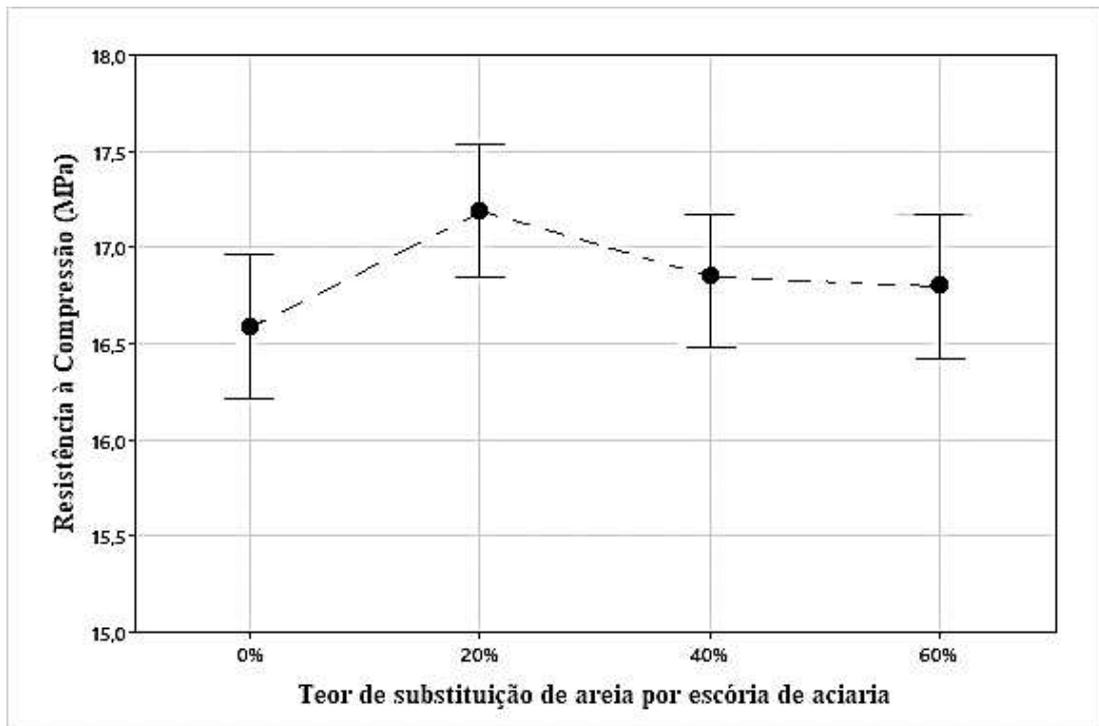
Os Gráficos 11 e 12 apresentam o comportamento provocado pela substituição da areia natural pela escória de aciaria BSSF na capacidade de resistência à compressão das argamassas simples e mistas, respectivamente, após a realização do tratamento dos dados. Conforme é observado nos gráficos, não há influência significativa da substituição do material na resistência à compressão.

Gráfico 11 – Influência do teor de substituição na resistência à compressão nas argamassas simples



Fonte: Autor (2022)

Gráfico 12 – Influência do teor de substituição na resistência à compressão nas argamassas mistas



Fonte: Autor (2022)

Em seguida, realizou-se a análise de variância, em que se analisou a influência dos teores de substituição da areia natural pela escória como variável explicativa, utilizando um critério de 95% de confiabilidade para as argamassas simples e mistas. Dessa forma, observou-se que o teor de substituição não exerce influência significativa na resistência à compressão para ambos os tipos de argamassa, havendo apenas influência do traço, conforme é apresentado na Tabela 14.

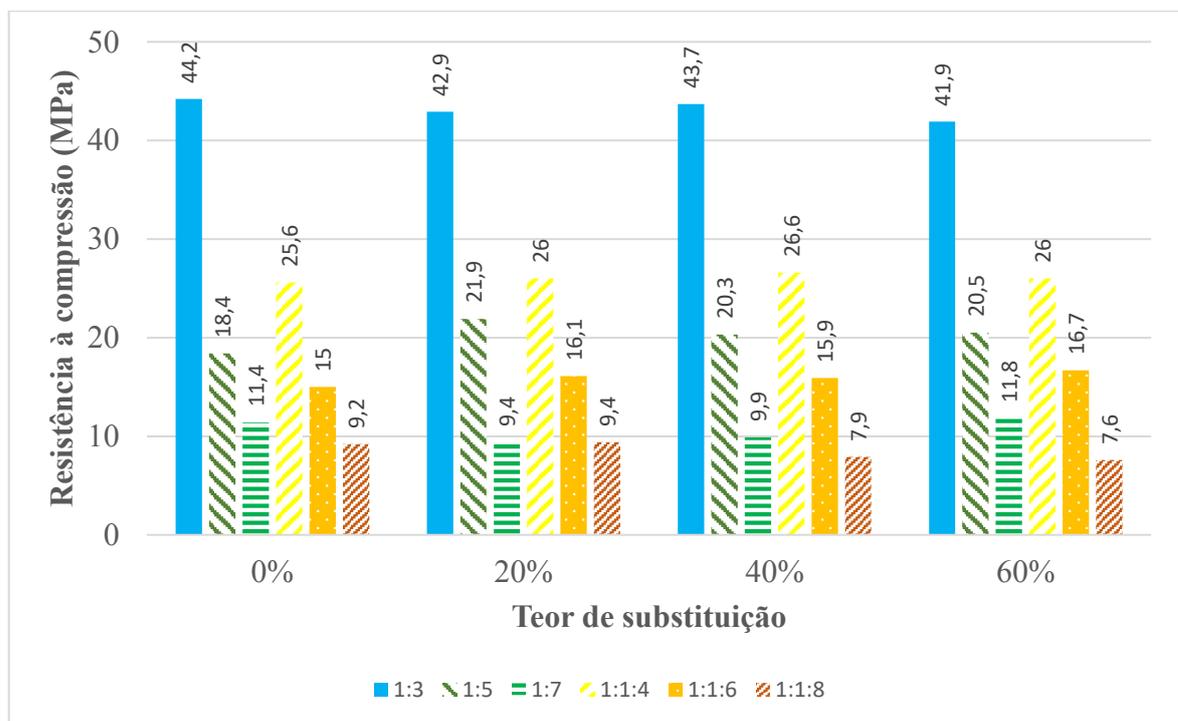
Tabela 14 – Tratamento estatístico (ANOVA) para análise de significância entre os teores de substituição de areia por escória de aciaria na resistência à compressão

Efeito	SQ	GL	MQ	F	VALOR - P	Significância
Traço	3225,8	5	645,15	556,7	0	Sim
Teor de substituição (%)	0,32458	3	0,1082	0,093	0	Não
Erro	17,38	15	1,159			

Fonte: Autor (2022)

O Gráfico 13 apresenta os valores de resistência à compressão das argamassas simples e mistas para cada teor de substituição. De acordo com a NBR 13281 (ABNT, 2005), todas as argamassas se enquadram na classificação P6, pois apresentaram resistência à compressão maior do que 8,0 MPa.

Gráfico 13 – Resistência à compressão das argamassas simples e mistas



Fonte: Autor (2022)

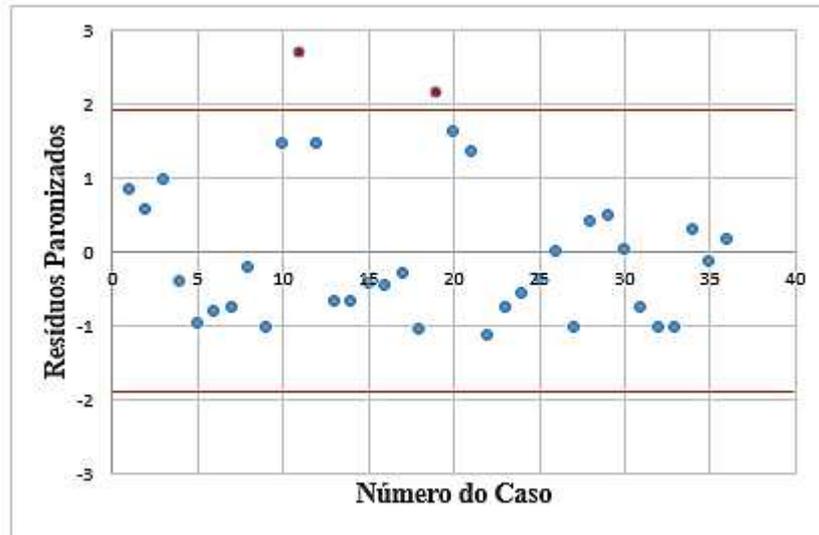
Pelo Gráfico 13, é possível observar uma tendência de redução da resistência à compressão para os traços 1:3 e 1:1:8 e um aumento nos traços 1:5 e 1:1:6. De acordo com a análise de variância, não ocorre influência significativa da resistência com o aumento de teor de escória, mesmo com o aumento do fator *a/c*. Alguns estudos realizados por Ouda *et al* (2016) indicam o aumento da resistência à compressão de argamassas com o aumento do teor de escoria, relacionando esse ganho com a forma irregular dos grãos de escória, que favorecem o travamento entre a pasta de cimento e os grãos do material, melhorando, assim, a zona de transição. O não ganho da resistência, dessa forma, poderia ser relacionado devido o aumento de água nas argamassas, sobrepondo o efeito positivo do maior intertravamento causado pela utilização das escórias de aciaria.

Fato contrário foi observado por Lacerda (2015), em que no seu estudo verificou que a resistência à compressão da argamassa utilizando a escória como agregado foi inferior à argamassa de referência em até 35% para a idade de 7 dias e de 12% para a idade de 28 dias. Todavia, ressalta-se que não foi realizado o ajuste granulométrico dos agregados, o que pode influenciar nas propriedades mecânicas das argamassas analisadas.

4.2.2 Resistência à tração na flexão

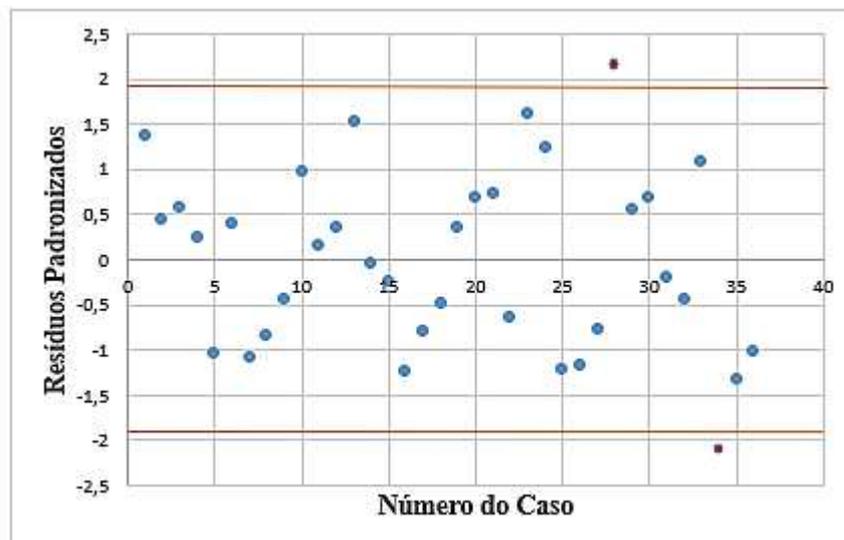
Assim como foi realizado para a determinação da resistência à compressão, também se realizou o tratamento dos resíduos padronizados para detectar e descartar os dados espúrios. Os Gráficos 14 e 15 apresentam os resíduos padronizados para os valores de resistência à tração na flexão, tais valores são considerados outliers quando os resíduos padronizados ultrapassam um valor de referência de 1,96 para mais ou para menos, que é o valor crítico para um nível de confiança de 95%).

Gráfico 14 – Resíduos padronizados para os dados de resistência à tração na flexão para argamassas simples



Fonte: Autor (2022)

Gráfico 15 – Resíduos padronizados para os dados de resistência à tração na flexão para argamassas mistas

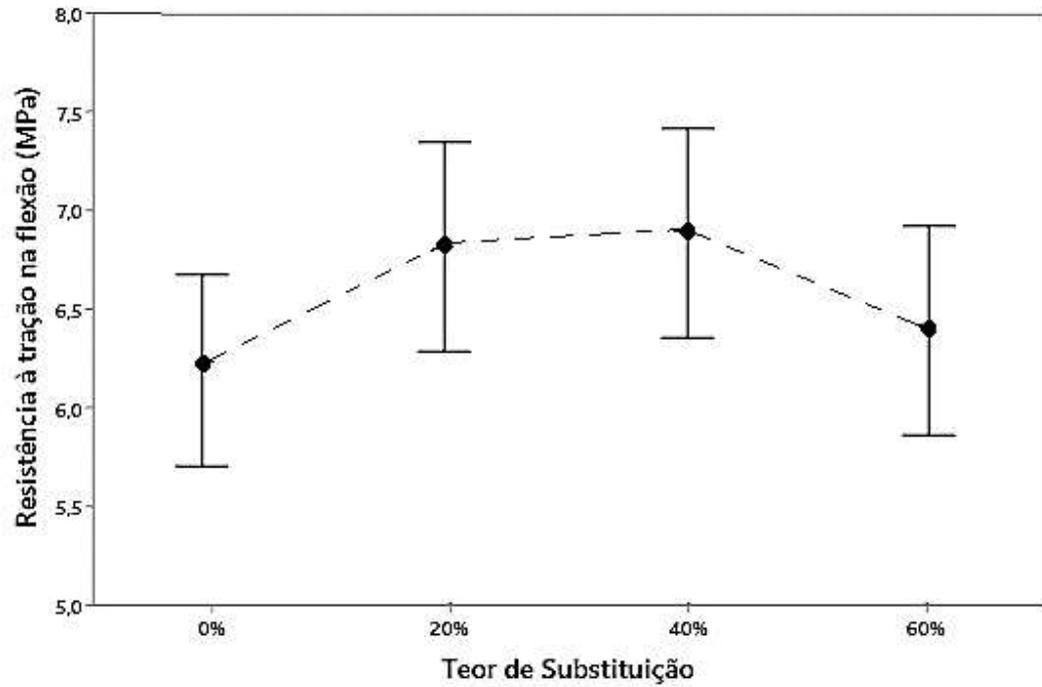


Fonte: Autor (2022)

Os Gráficos 16 e 17 apresentam o comportamento provocado pela substituição da areia natural pela escória de aciaria BSSF na capacidade de resistência à tração na flexão das argamassas simples e compostas, respectivamente, após o tratamento dos dados. Conforme é observado nos gráficos, assim como na resistência à compressão, a substituição da areia por

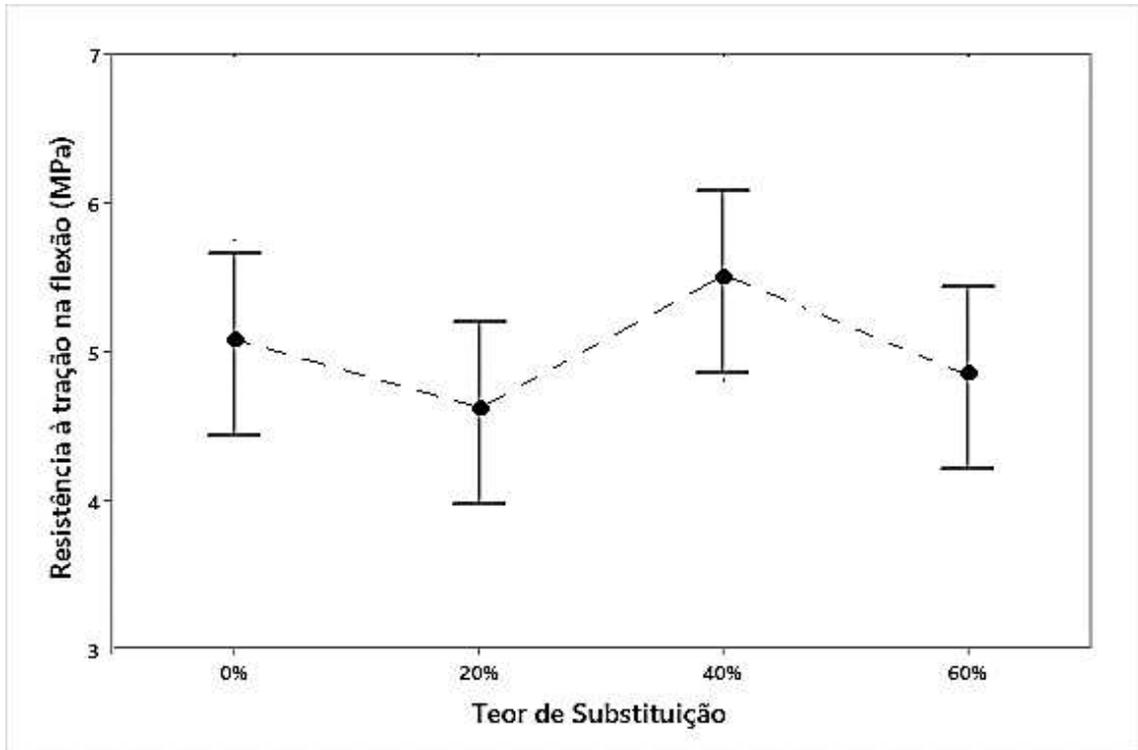
escória de aciaria não exerce influência significativa na capacidade de resistência à tração na flexão.

Gráfico 16 – Influência do teor de substituição na resistência à tração na flexão nas argamassas simples



Fonte: Autor (2022)

Gráfico 17 – Influência do teor de substituição na resistência à tração na flexão das argamassas mistas



Fonte: Autor (2022)

Em seguida, realizou-se a análise de variância, em que se analisou a influência dos teores de substituição da areia natural pela escória como variável explicativa, utilizando um critério de 95% de confiabilidade para as argamassas simples e mistas. Dessa forma, observou-se que o teor de substituição não exerce influência significativa na resistência à compressão para ambos os tipos de argamassa, havendo apenas influência do traço e a interação teor-traço, conforme é apresentado na Tabela 15.

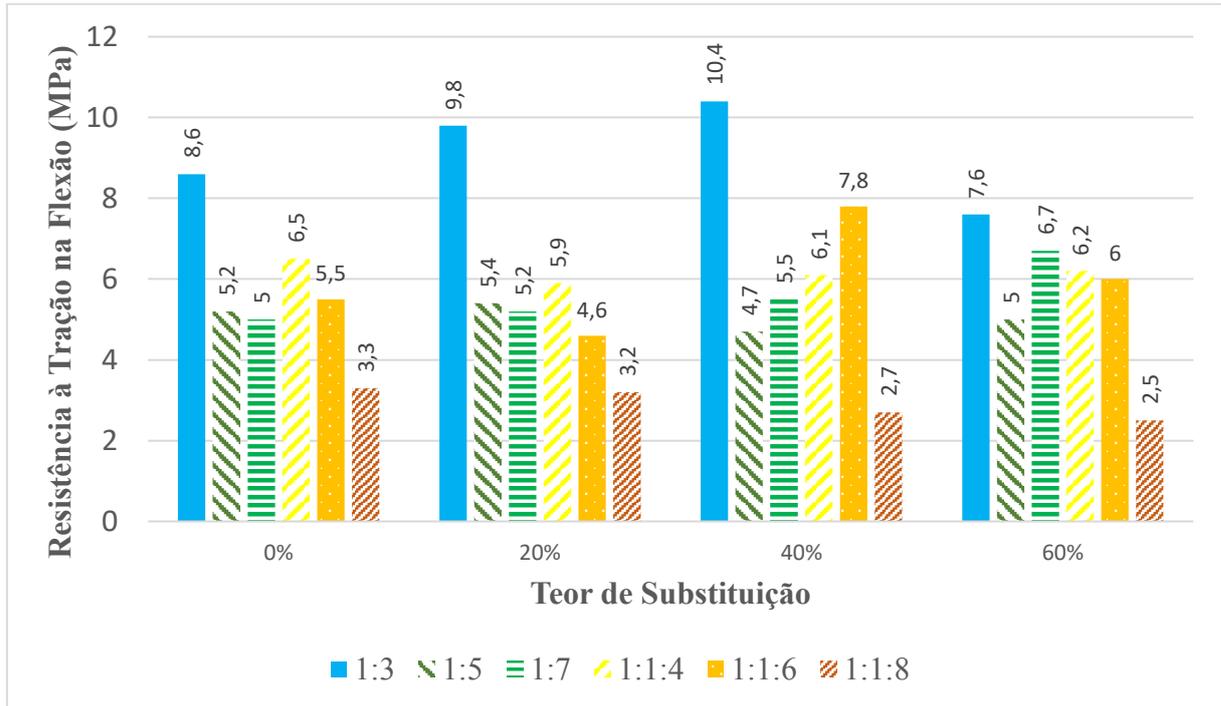
Tabela 15 – Tratamento estatístico (ANOVA) para análise de significância entre os teores de substituição de areia por escória de aciaria na resistência à tração na flexão

Efeito	SQ	GL	MQ	F	VALOR - P	Significância
Traço	79,5683	5	15,91367	22,4311	0	Sim
Teor de substituição (%)	1,2283	3	0,99	0,4094	0,9648	Não
Erro	11,54	15				

Fonte: Autor (2022)

O Gráfico 18 apresenta os valores de resistência à tração na flexão das argamassas simples e mistas para cada teor de substituição.

Gráfico 18 – Resistência à tração na flexão das argamassas simples e mistas

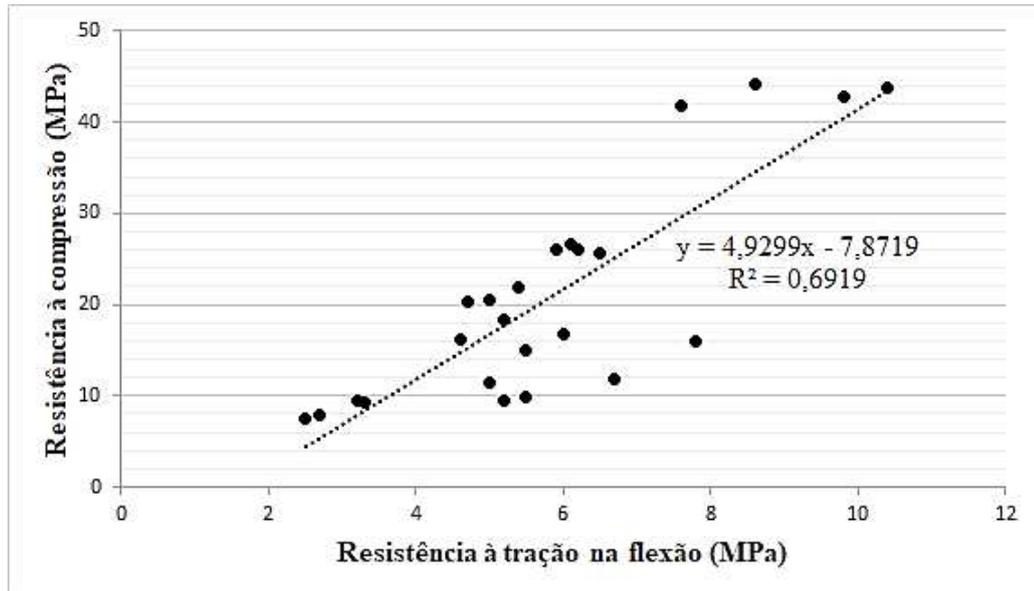


Fonte: Autor (2022)

Em relação à classificação das argamassas quanto a sua capacidade de resistir à tração na flexão, todas são classificadas em R6, pois apresentaram resistência à tração na flexão maior do que 3,5 MPa, exceto traço 1:1:8, que foi classificado no grupo R5 para os teores de substituição de 0, 20, 40%; e R4 no teor de substituição de 60%.

Mesmo com a tendência de aumento da resistência à compressão com o aumento da resistência à tração na flexão, observa-se, por meio da correlação entre as duas propriedades, que o R^2 apresentou um valor de 0,69, conforme é apresentado na Gráfico 19, em que mostra a possível relação entre as duas propriedades mecânicas das argamassas estudadas.

Gráfico 19 – Correlação entre a resistência à compressão e a resistência à tração na flexão

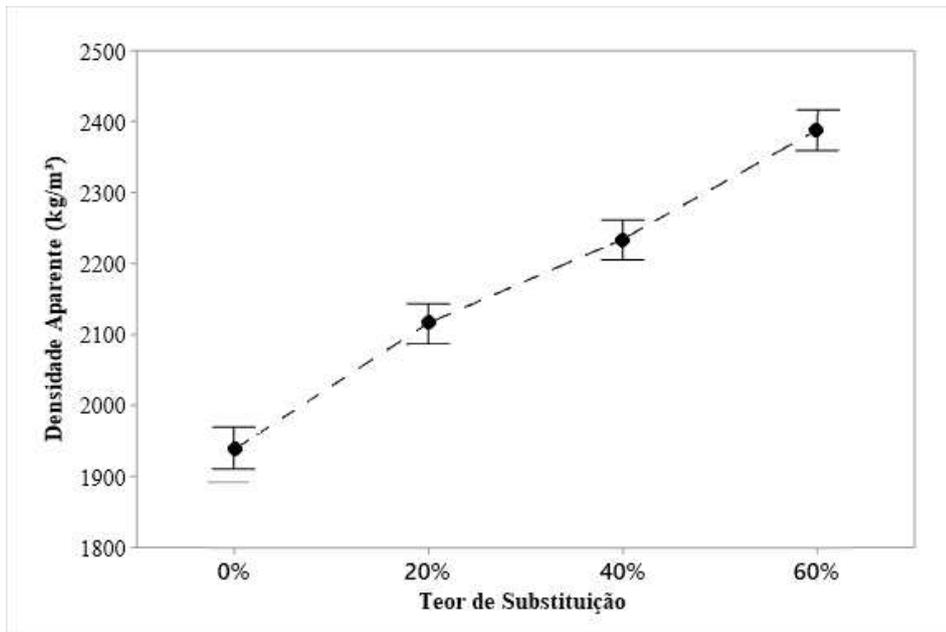


Fonte: Autor (2022)

4.2.3 Massa específica aparente

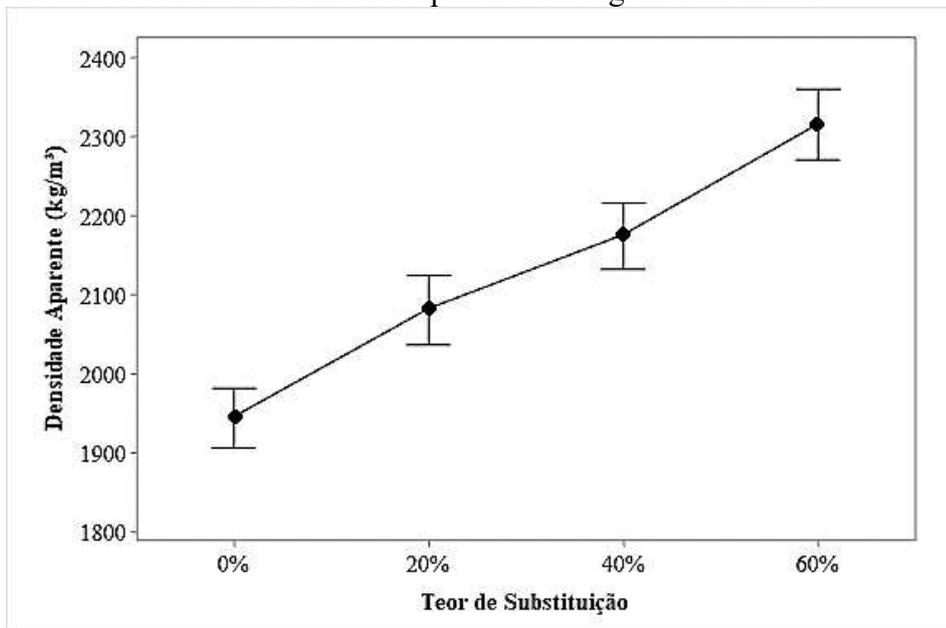
Em relação a massa específica aparente das argamassas estudadas, percebeu-se que quanto maior a porcentagem de substituição da areia natural pela escória, maior a massa específica aparente obtida, conforme apresentado pelos Gráficos 20 e 21. Isso se deve ao fato de a massa específica da escória ser maior que a massa específica da areia. O teste de variância mostra que o teor de substituição exerce influência significativa na densidade aparente do estado endurecido das argamassas simples e mistas.

Gráfico 20 – Influência do teor de substituição da areia natural por escória de aciaria na densidade aparente das argamassas simples



Fonte: Autor (2022)

Gráfico 21 – Influência do teor de substituição da areia natural por escória de aciaria na densidade aparente das argamassas mistas

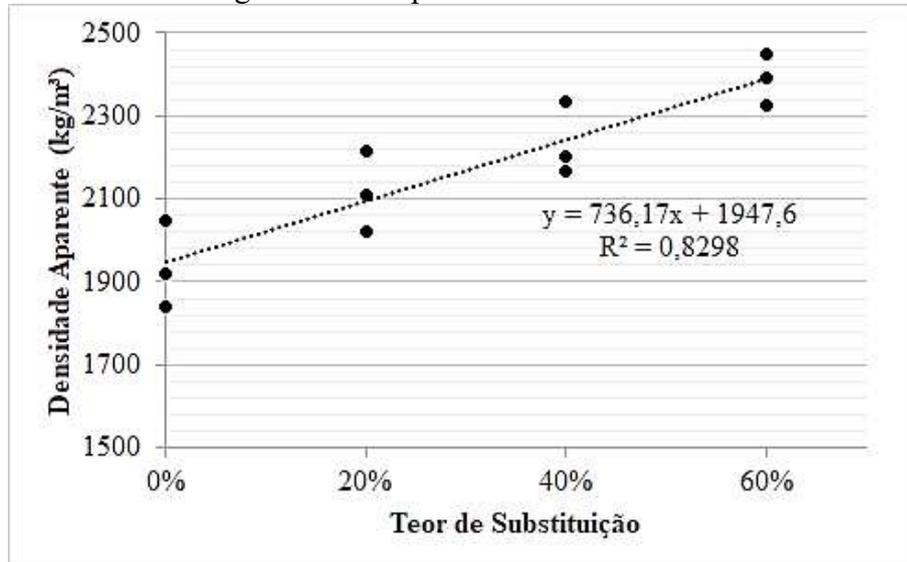


Fonte: Autor (2022)

Por meio da correlação, foi possível perceber uma possível relação entre a massa específica no estado endurecido e o teor de substituição das argamassas, com R^2 de 0,83 e 0,89

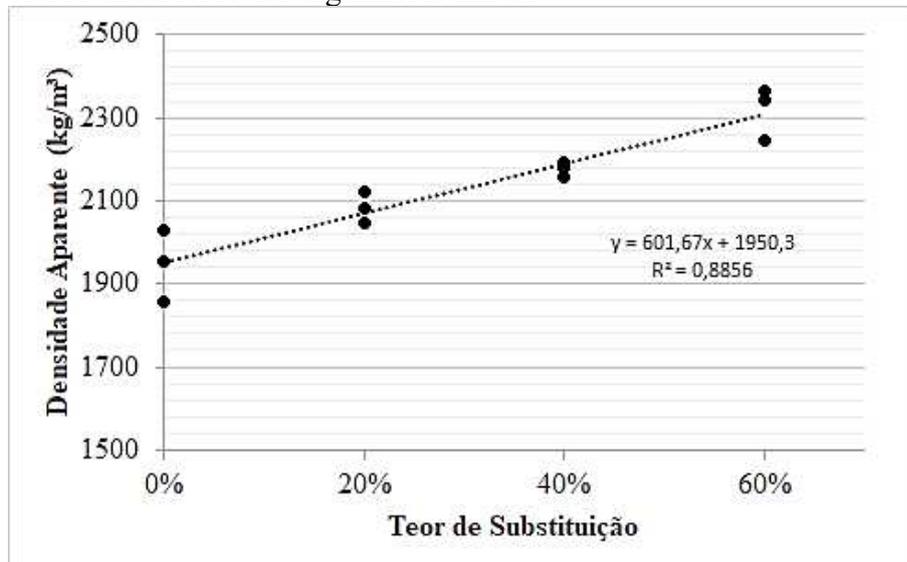
para as argamassas simples e mistas, respectivamente, conforme é apresentado nos Gráficos 22 e 23.

Gráfico 22 – Correlação entre o teor de substituição e a densidade no estado endurecido das argamassas simples



Fonte: Autor (2022)

Gráfico 23 – Correlação entre o teor de substituição e a densidade no estado endurecido das argamassas mistas

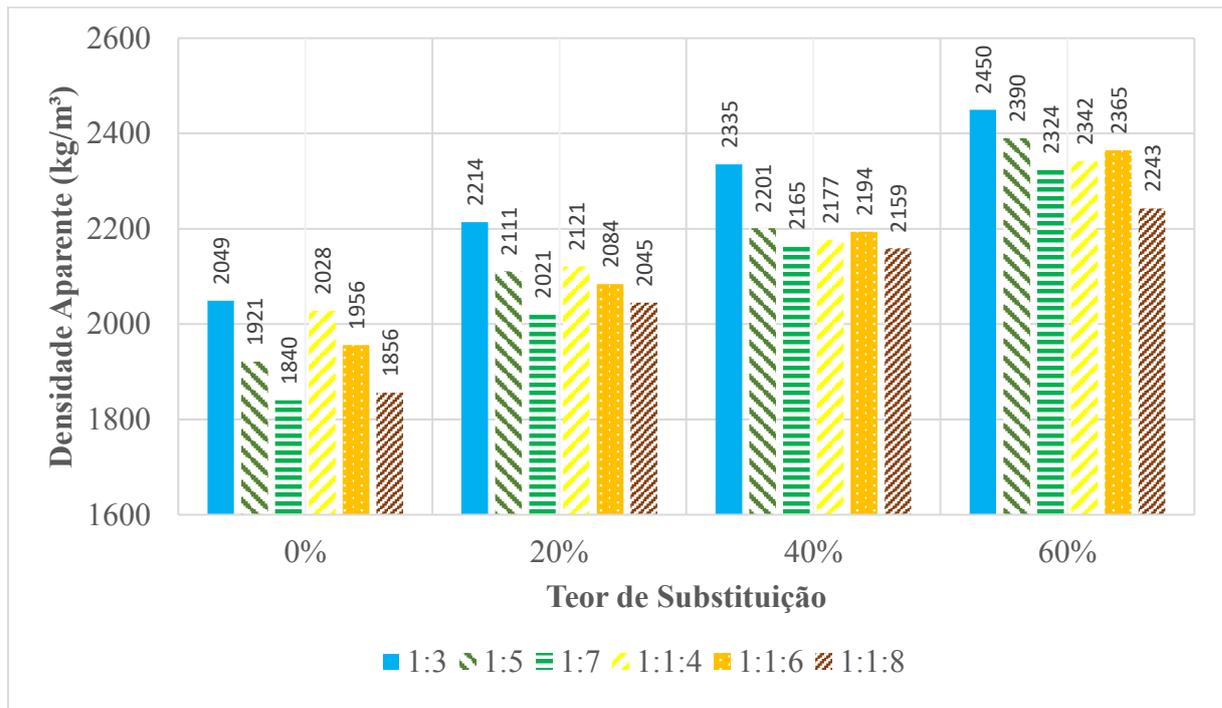


Fonte: Autor (2022)

As influências na massa específica devido a proporção dos materiais utilizados estão relacionadas, principalmente, pela maior quantidade de cimento em determinados traços, pois a maior massa específica do cimento em relação ao agregado natural implica em um

aumento da massa específica das argamassas. O Gráfico 24 apresenta o efeito mencionado, em que é apresentado o comportamento da massa específica aparente no estado endurecido conforme o teor de utilização de escória nas argamassas simples e mistas.

Gráfico 24 – Densidade no estado endurecido das argamassas simples e mistas

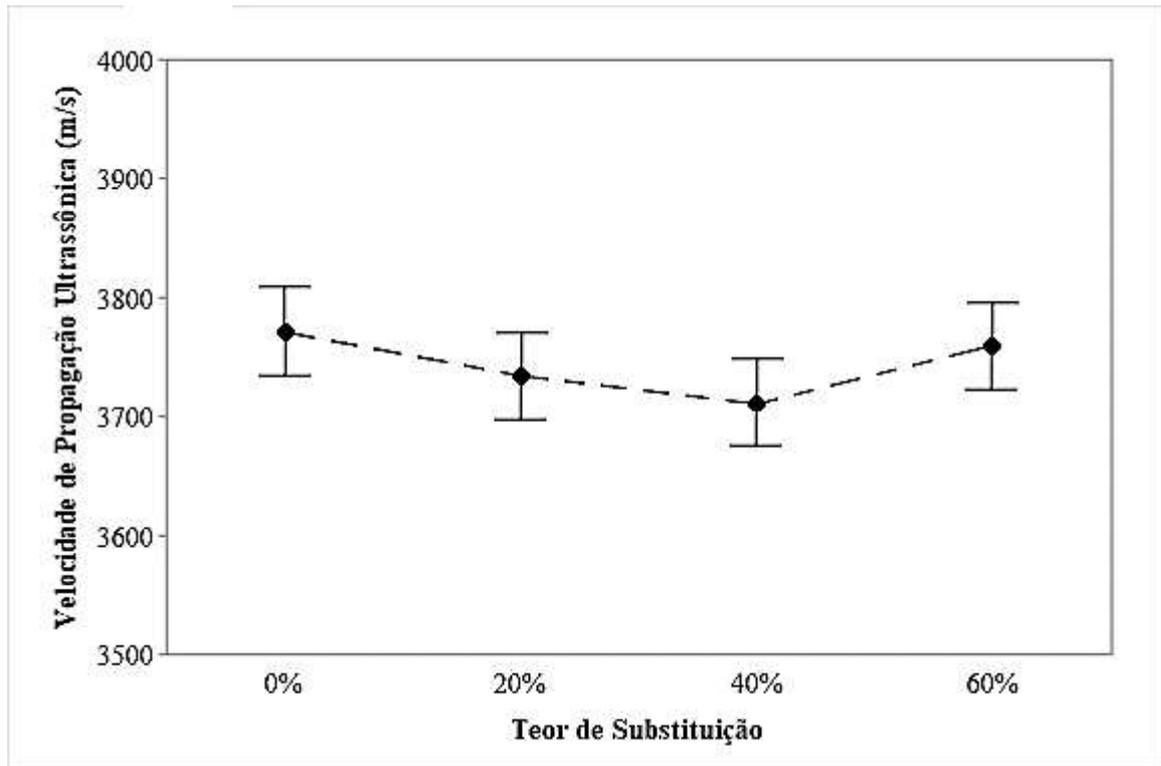


Fonte: Autor (2022)

Dessa forma, em relação a classificação da NBR 13281:2005, a massa específica aparente no estado endurecido das argamassas embora tenha ocorrido um crescimento com a substituição da areia natural pela escória de aciaria, todas as argamassas investigadas se enquadram na mesma categoria, M6, pois a massa específica aparente de todas no seu estado endurecido apresentaram um valor acima de 1800 kg/m³.

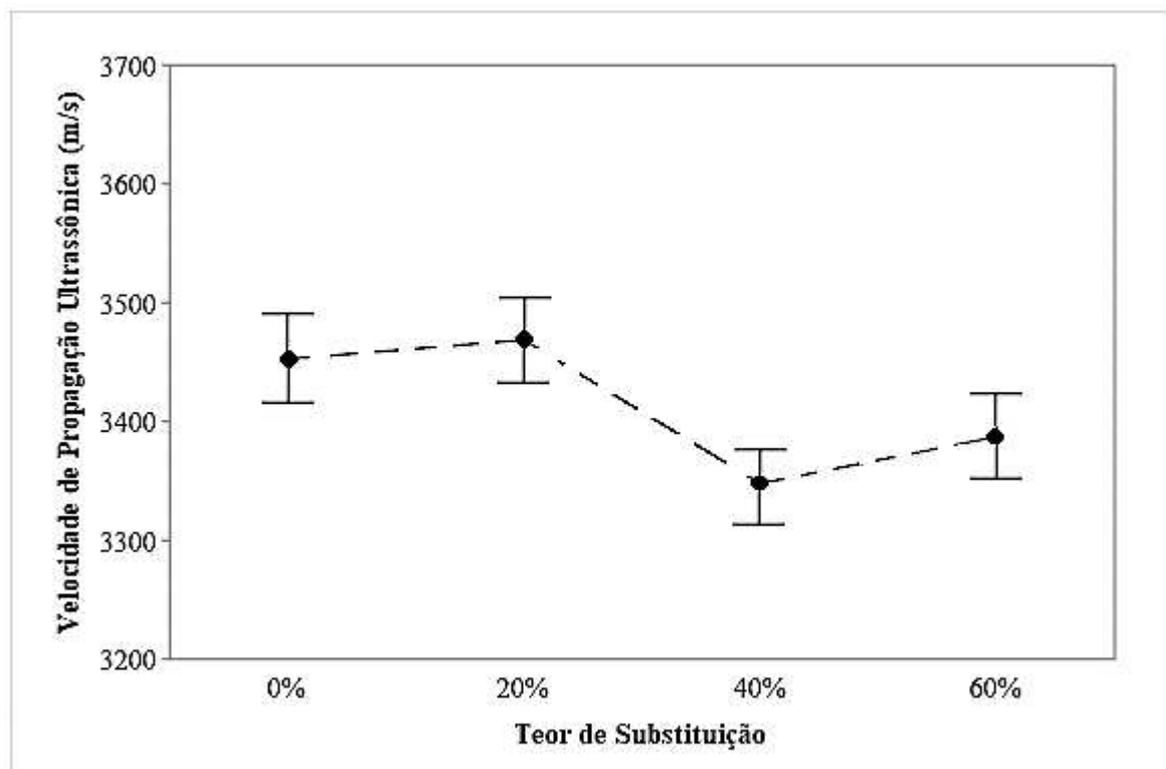
Em relação a Velocidade de Propagação Ultrassônica, por meio da análise de variância, observou-se que o teor de substituição não exerce influência significativa na VPU das argamassas simples (Gráfico 25), porém há influência nas argamassas mistas (Gráfico 26).

Gráfico 25 – Influência do teor de substituição na VPU nas argamassas simples



Fonte: Autor (2022)

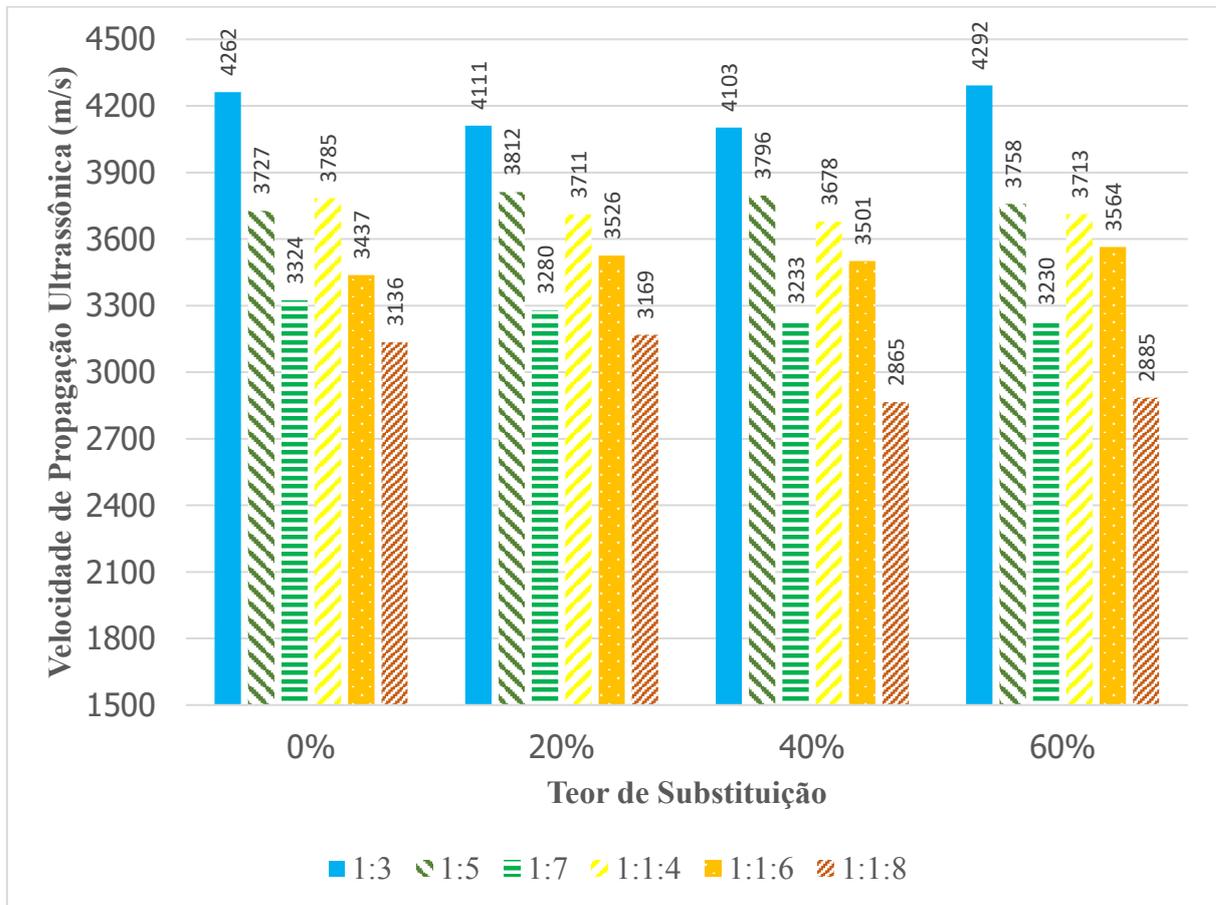
Gráfico 26 – Influência do teor de substituição na VPU nas argamassas mistas



Fonte: Autor (2022)

Em relação aos traços utilizados, pode-se constatar, com a análise de variância, que para as argamassas simples e mistas, não exercem influência significativa na VPU. O Gráfico 27 apresenta o comportamento da VPU associado ao teor de substituição para os traços investigados, mostrando que, apesar das argamassas com escória apresentaram um maior fator a/c, favorecendo a porosidade do material, a ANOVA constatou que a substituição não afeta significativamente essa propriedade.

Gráfico 27 – Velocidade de Propagação Ultrassônica das argamassas estudadas de acordo com o teor de substituição e o traço

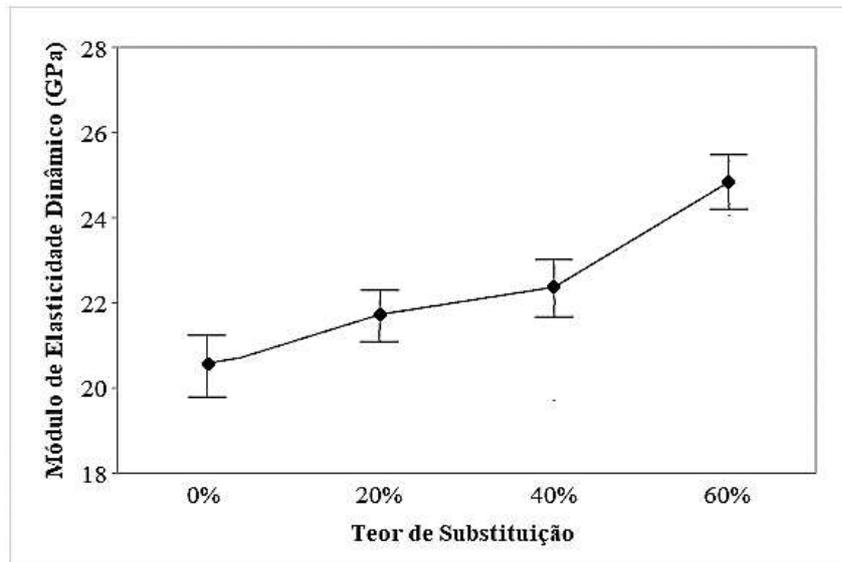


Fonte: Autor (2022)

4.2.4 Módulo de elasticidade dinâmico

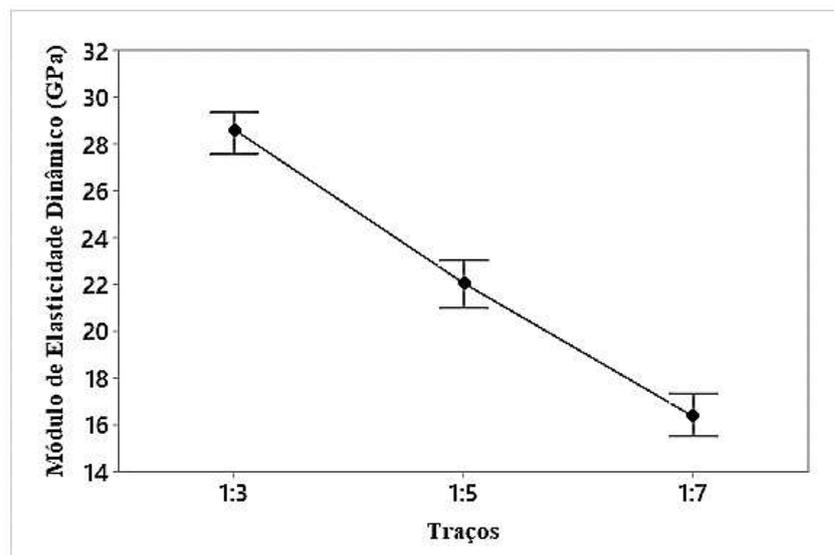
Em relação ao módulo de elasticidade dinâmico, os Gráficos 28 a 31 demonstram a influência do teor de substituição de areia natural por escória de aciaria, além da influência do traço no módulo de elasticidade dinâmico para as argamassas simples e mistas. Por meio do teste da ANOVA, constatou-se que o teor de substituição e o traço exercem influência significativa no módulo dinâmico.

Gráfico 28 – Influência do teor de substituição no módulo de elasticidade dinâmico das argamassas de cimento Portland



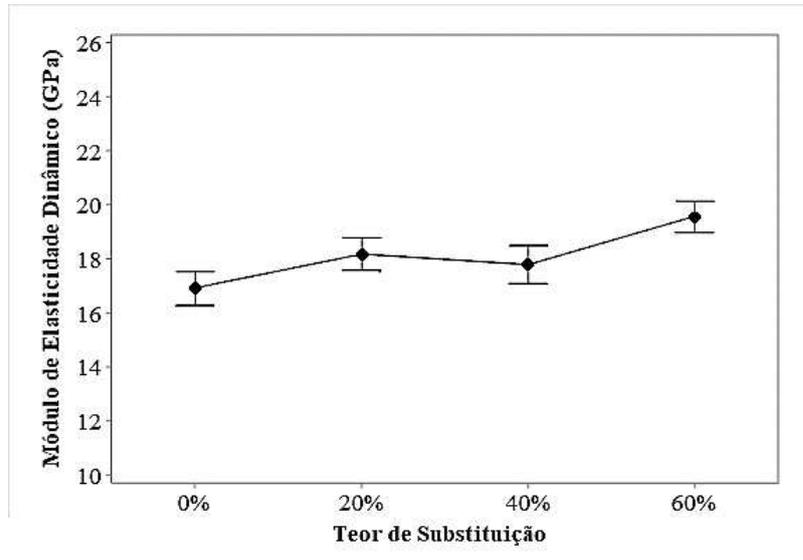
Fonte: Autor (2022)

Gráfico 29 – Influência do traço no módulo de elasticidade dinâmico das argamassas de cimento Portland



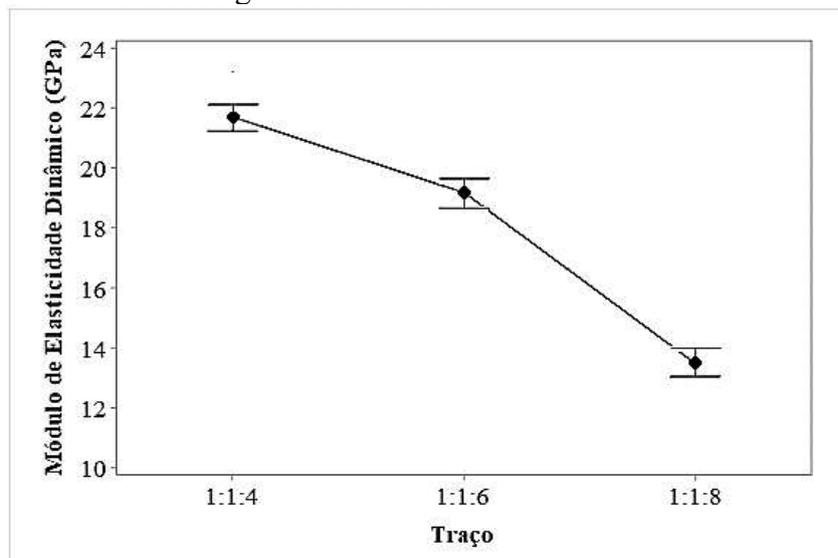
Fonte: Autor (2022)

Gráfico 30 – Influência do teor de substituição no módulo de elasticidade dinâmico das argamassas mistas



Fonte: Autor (2022)

Gráfico 31 – Influência do traço no módulo de elasticidade dinâmico das argamassas mistas



Fonte: Autor (2022)

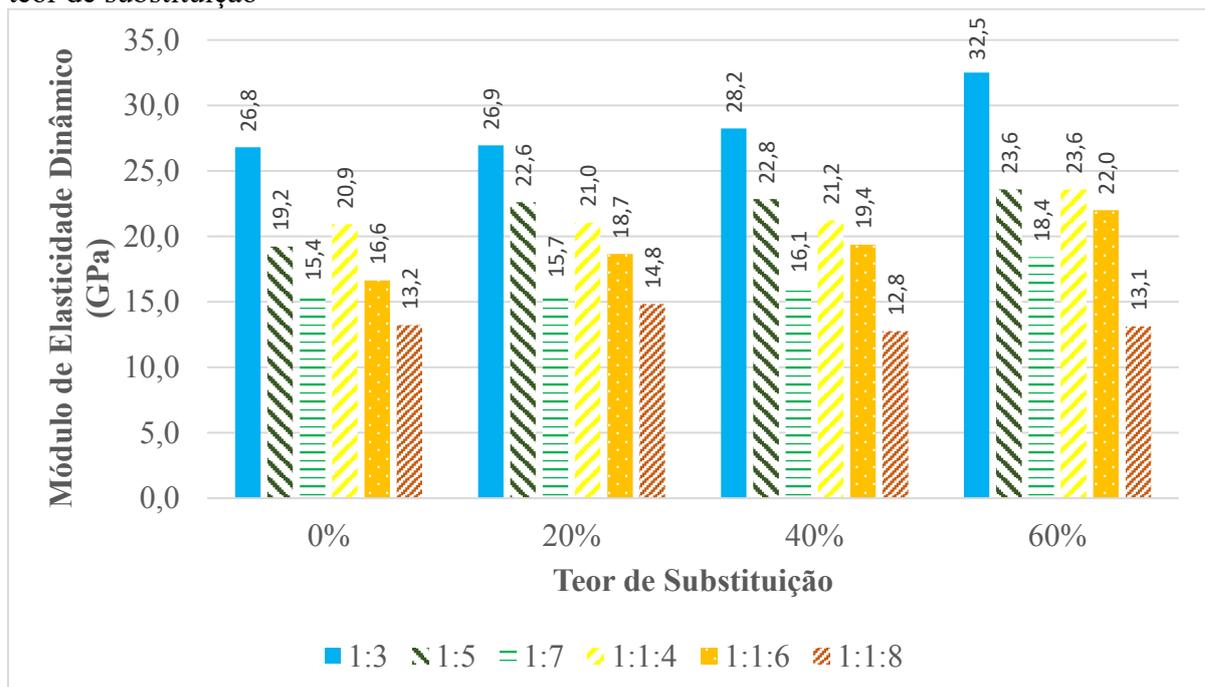
O Gráfico 32 apresenta o comportamento do módulo de elasticidade dinâmico das argamassas de acordo com o teor de substituição e o traço. O módulo de elasticidade dinâmico das argamassas apresentou valores elevados, sendo os traços com maiores consumos de cimento com os maiores valores de módulo de elasticidade devido ao aumento rigidez das argamassas. Uma outra hipótese é o baixo teor de ar nas argamassas, pois as bolhas de ar aumentam a capacidade de deformação do material e reduz a sua rigidez, e, conforme apresentado na Tabela

12, os valores de teor de ar nas argamassas ficaram entre 1 e 5 %, valores semelhantes aos encontrados por Do Ó, S.W (2004) para argamassas de revestimento produzidas sem aditivos sendo simples ou mistas: 2 a 5% do volume total.

Apesar das argamassas com maior teor de substituição apresentarem maior fato a/c, em relação às argamassas de referência, aquelas apresentaram maior valor de módulo de elasticidade dinâmico. Esse fator se deve possivelmente devido a massa específica da escória ser superior ao da areia natural: 3,86 g/cm³ e 2,59 g/cm³, respectivamente. Além disso, a dureza da escória de aciaria é similar ou até mesmo superior à de agregados naturais de origem quartzosa e granítica (Motz, H.; Geiseler, J., 2001; Luxan, M. P.; Sotolongo, R., Dorrego, F., et al., 2000). Essas características favorecem o aumento do módulo de elasticidade dinâmico das argamassas com maiores teores de escória de aciaria BSSF. No mesmo sentido, CARRIJO (2005), em estudo experimental constatou que concretos com agregados mais densos tendem a gerar concretos com maiores valores de módulo de elasticidade

Destaca-se a importância de um revestimento que possua a capacidade de resistir à deformabilidade a fim de evitar eventuais fissuras, o que, contudo, não foram obtidos nas argamassas com escória de aciaria, pois os altos valores encontrados podem prejudicar essa propriedade, haja vista que quanto maior o valor do módulo de elasticidade, menor será a capacidade do revestimento de absorver as deformações.

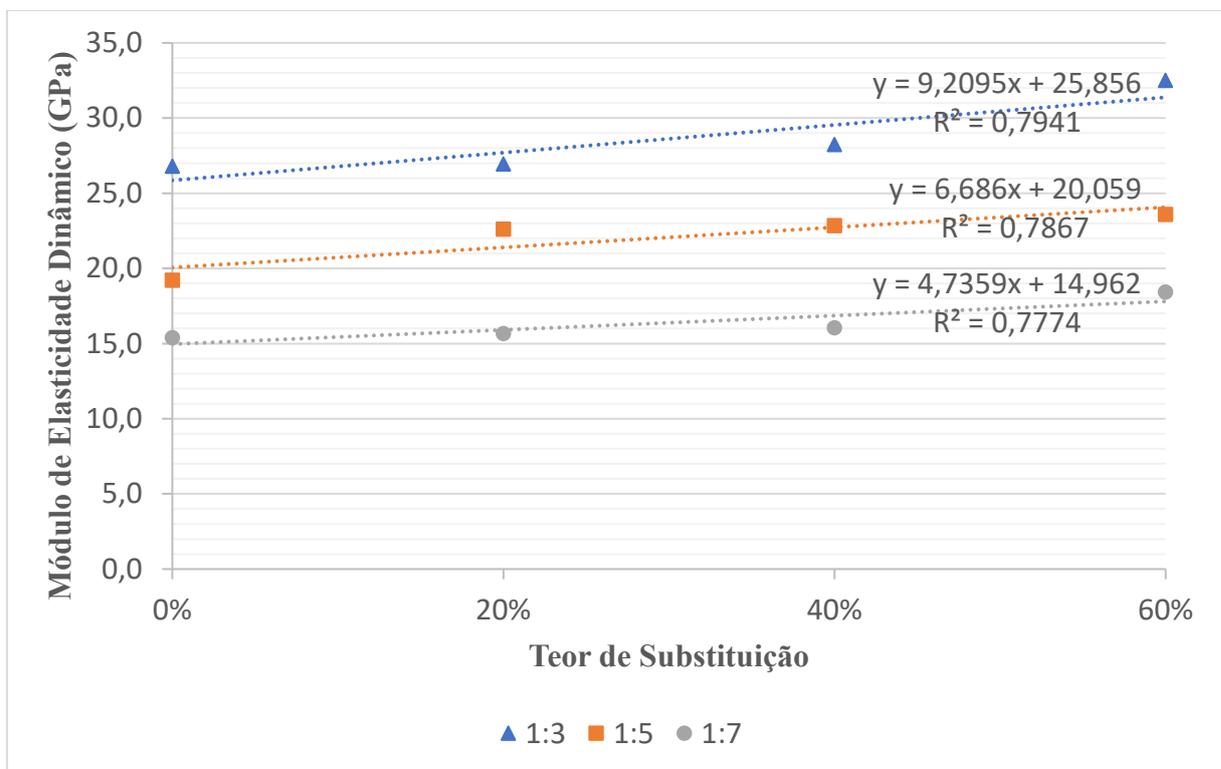
Gráfico 32 – Módulo dinâmico das argamassas de cimento Portland de acordo com o traço e o teor de substituição



Fonte: Autor (2022)

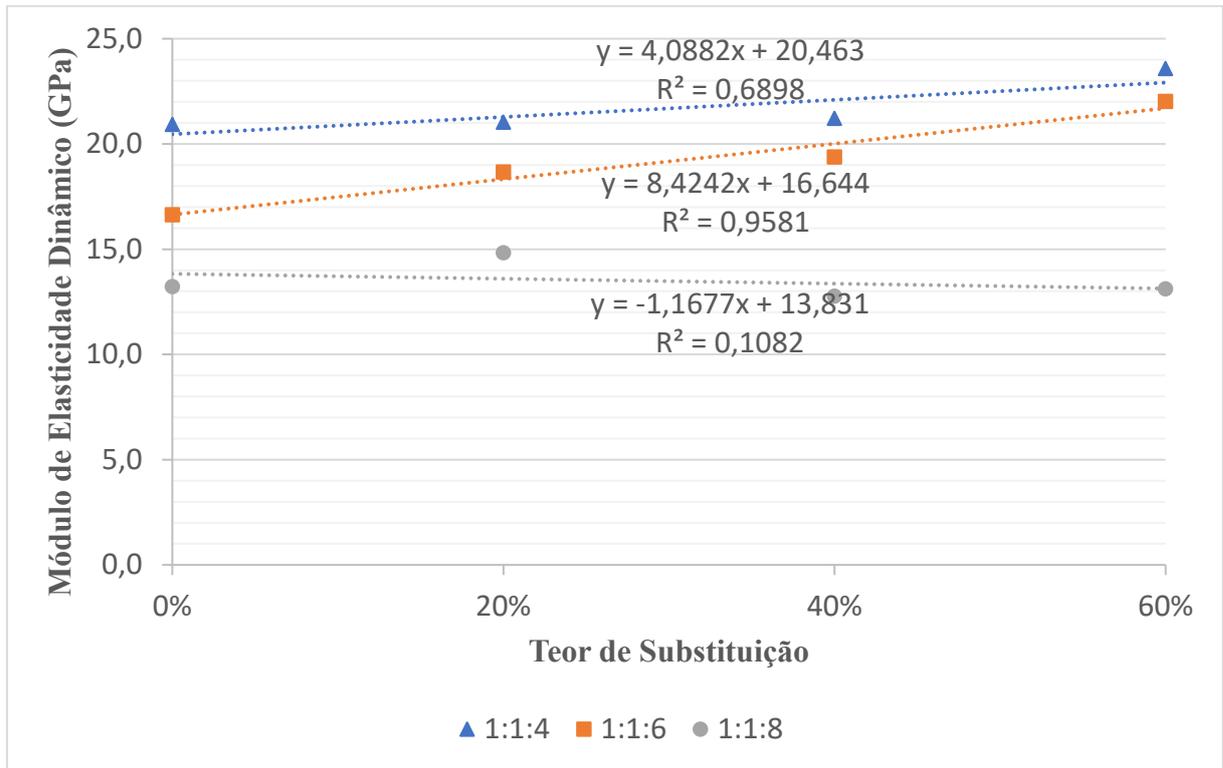
Por meio da análise estatística de correlação, foi possível encontrar uma relação linear entre o teor de substituição e o módulo de elasticidade dinâmico das argamassas (Gráficos 33 e 34), encontrando coeficientes de determinação (R^2) na ordem de 0,7 para os traços 1:3, 1:5, 1:7; e 0,68, 0,96 e 0,10 para os traços de argamassas mistas nos traços 1:1:4, 1:1:6 e 1:1:8, respectivamente.

Gráfico 33 – Correlação entre o teor de substituição e o módulo dinâmico das argamassas simples



Fonte: Autor (2022)

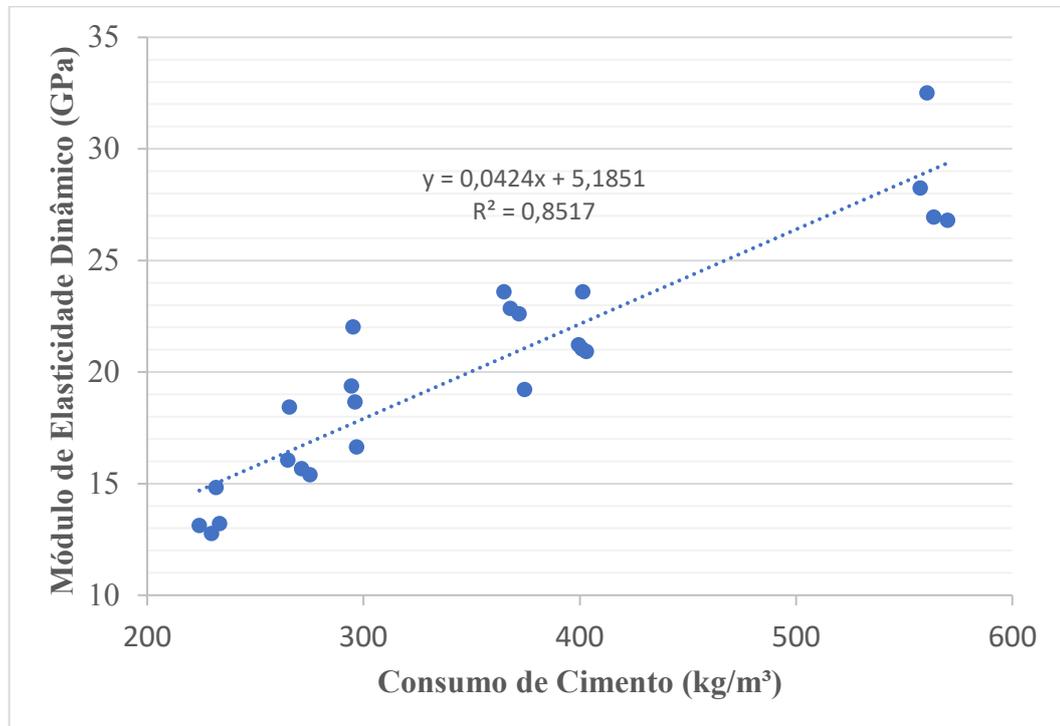
Gráfico 34 – Correlação entre o teor de substituição e o módulo dinâmico das argamassas mistas



Fonte: Autor (2022)

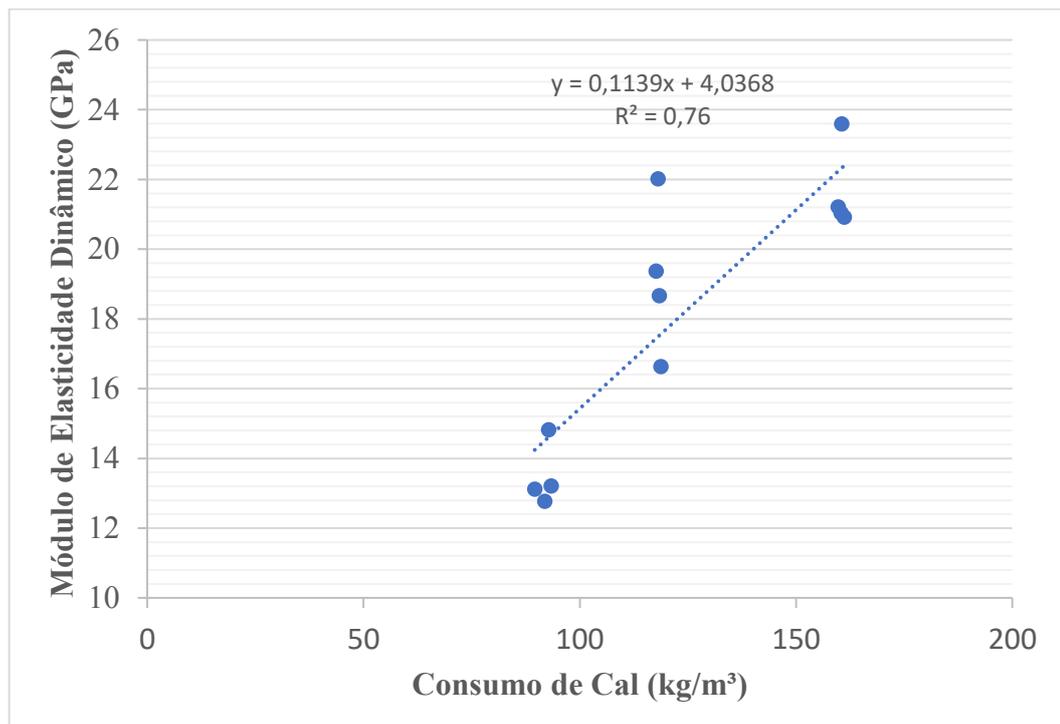
Devido ao fator dos traços mais ricos apresentaram maior módulo de elasticidade dinâmico, foi possível estabelecer a correlação entre o consumo de cimento (kg/m^3) para as argamassas de cimento Portland e o consumo de cal (kg/m^3) para as argamassas mistas, conforme apresentado nos Gráficos 35 e 36, respectivamente.

Gráfico 35 – Correlação entre o consumo de cimento (kg/m^3) e o módulo dinâmico das argamassas de cimento Portland



Fonte: Autor (2022)

Gráfico 36 – Correlação entre o consumo de cal (kg/m^3) e o módulo dinâmico das argamassas de cimento Portland



Fonte: Autor (2022)

Com isso, observa-se que o módulo de elasticidade é diretamente proporcional às relações entre cal/cimento e agregado e maior devido a maior compactação do conjunto aglomerante e agregado, implicando em um menor tempo de propagação da onda ultrassônica e conseqüentemente em uma maior velocidade.

5 CONCLUSÃO

No presente trabalho, houve a precaução de fixar todos os componentes das argamassas, exceto o teor de substituição, que é a única variável responsável pelo possível comportamento heterogêneo das argamassas com escória quando comparadas com as argamassas com agregado convencional. Além disso, a análise estatística adotada proporcionou uma melhor análise das propriedades analisadas descartando os eventuais *outlets* que poderiam acarretar em uma análise não correta dos dados.

Em relação às propriedades das argamassas no estado fresco, a substituição da areia natural pela escória de aciaria BSSF provocou alterações significativas nas propriedades das argamassas. Conforme o aumento da substituição, a demanda por água para a obtenção da mesma trabalhabilidade aumentou. Esse aumento pode ser relacionado diretamente com a forma e a textura dos grãos do material.

No que diz respeito a massa específica, o aumento da substituição implicou em um aumento proporcional, chegando em um aumento de quase 20% em relação ao teor de substituição de 60%. Tal aumento dificulta a trabalhabilidade, reduzindo a produtividade e até a qualidade do revestimento, haja vista que a energia necessária para a aplicação do revestimento tende a ser maior, além disso o seu maior peso dificulta a aderência da argamassa no substrato.

Quanto às propriedades mecânicas das argamassas, as argamassas com a substituição da areia natural pela escória apresentaram ganhos de resistência à compressão e à tração na flexão, porém, por meio da análise de variância, se observou que o teor de substituição não influencia de forma significativa na resistência das argamassas.

De acordo com os parâmetros estabelecidos na NBR 13281 (ABNT, 2005), a maioria das argamassas estudadas, por possuírem resistência à compressão maior do que 8 MPa, são classificadas como P6; e, pelo motivo de possuírem resistência à tração na flexão maior do que 3,5 MPa, possuem como classificação, em sua maioria, R6.

O aumento da utilização da água para as argamassas com maior teor de substituição pode influenciar no aumento da porosidade das argamassas, implicando em um aumento na Velocidade de Propagação Ultrassônica, porém essa propriedade não foi afetada significativamente.

A estrutura mais densa dos grãos de escória do que a estrutura da areia natural possivelmente influencia em maiores valores de módulo de elasticidade dinâmica das argamassas com escória de aciaria BSSF. Esse aumento pode significar em uma possível

redução da vida útil dos revestimentos, pois as argamassas que possuem um valor menor de módulo tendem a apresentar uma maior quantidade de fissuras, auxiliando, assim, em possíveis avanços de degradação provocados por intempéries.

Dessa forma, percebe-se a necessidade de realizar melhorias em relação ao estado fresco das argamassas de modo a melhorar a sua capacidade de resistir à deformações, o que poderia ser feito por meio da utilização de aditivos incorporadores de ar e limitando a utilização da escória como substituta do agregado miúdo a um teor ótimo para esse fim.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Averiguar das propriedades reológicas das argamassas com teores de escória em substituição do agregado natural areia com a utilização de aditivos incorporadores de ar para a melhoria das propriedades reológicas do material, a fim de aumentar o estágio plástico das argamassas, facilitando a sua aplicação e aumentando a sua vida útil, por meio da possível melhoria em seus parâmetros de absorção de água, fissurabilidade e outras propriedades solicitadas para um bom desempenho das argamassas.
- Verificar a possibilidade de utilizar maiores teores de substituição, pois o presente trabalho limitou-se ao limite de 60% devido à dificuldade de se trabalhar com maiores teores.
- Realizar um estudo comparativo sobre a produtividade entre as argamassas com substituição de escória utilizando aditivos incorporadores de ar e argamassas comuns (com agregado natural).
- Estudar a capacidade de aderência das argamassas com escória de aciaria.

REFERÊNCIAS

ABCP. **Manual de revestimentos de argamassa**. 1. ed. São Paulo, SP, Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), 2002.

AGOPYAN, V.; JOHN, V. M. **O desafio da sustentabilidade na construção civil**. In: GODEMBERG, J. (Coord.). *Sustentabilidade*. 5 v. São Paulo: Blücher, 2011

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.

AL-OTAIBI, S. **Performance of Alkali-activated Slag Concrete**. Sheffield, United Kingdom: Department of Civil and Structural Engineering – University of Sheffield, 2002.

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.

AMANCIO, F. A. **Estudo de propriedades no estado fresco de argamassas de revestimento com escória de aciaria BSSF**. 2019. 86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

AMANCIO, F.A. ; LIMA, Douglas Alexandre; DIAS, Alisson Rodrigues de Oliveira; MESQUITA, Esequiel Fernandes Teixeira; CABRAL, Antônio Eduardo Bezerra. Propriedades mecânicas de argamassas com substituição da areia natural por escória de aciaria BSSF (baosteel's slag short flow). *Revista Matéria*, Rio de Janeiro, v. 25, n. 1, 2020.

ARAÚJO, L. A. Manual de siderurgia. **Arte & Ciência**. v. 01, São Paulo, p. 55 - 101.

Associação Brasileira de Cimento Portland. **Manual de revestimentos de argamassa**. 2002. Disponível em: <http://www.comunidade-da-construcao.com.br/upload/ativos/279/anexo/ativos_manu.pdf>. Acesso em: 14 out. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2009. 9p.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13280**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13281**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13529**: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas — Terminologia. Rio de Janeiro, 2013

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15630**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16541**: Argamassa de assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura para a realização de ensaios. Rio de Janeiro, 2016.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 30**: Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001. 3 p.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2009. 6 p.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE ENTIDADES DE PRODUTORAS DE AGREGADOS PARA CONSTRUÇÃO CIVIL – ANEPAC 2020. Revista Areia e Brita (2020). ISSN 1518-4641. Disponível em: <https://www.anepac.org.br/publicacoes/revista-areia-e-brita/item/471-edicao-76-dezembro-2020>. Acesso em 03 de agosto de 2021.

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, pp. 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, pp. 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.150–151 pp. 133-138 (2010).

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

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). Universidade Federal do Ceará. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes, 2012.

BUSELATTO, D.M., et al. Incorporação de lodo de estação de tratamento de água (ETA) como agregado miúdo em concretos: avaliação das propriedades físico-mecânicas. **Revista Matéria**. v.24, n.1, Rio de Janeiro, 2019.

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, pp. 145-152, 2018.

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

CARDOSO, A. V. M.; DIAS, F. M. A utilização de escória de aciaria para manufatura de blocos de pavimentação. 21º **CBECIMAT** - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais 09 a 13 de Novembro de 2014, Cuiabá, MT, Brasil.

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.

CARRIJO, P.M. **Análise da influência da massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto.** Dissertação de M.Sc, Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo, SP, Brasil, 2005.

CARVALHO, P. S. L.; MESQUITA, P. P. D.; ARAÚJO, E. D. G. Sustentabilidade da siderurgia brasileira: eficiência energética, emissões e competitividade. **BNDES Setorial**, v. 41, p. 181-236, 2015.

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

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>. Acesso em 01 de agosto de 2021.

CEARÁ. ADECE - AGÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO DO ESTADO DO CEARÁ. **Companhia Siderúrgica do Pecém (CSP).** 2016. Disponível em: <<https://www.adece.ce.gov.br/projetos-estruturantes/csp/>>. Acesso em: 05 out. 2021.

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, pp. 222-233, 2019.

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. **Revista Cerâmica**. v. 60, p.69-76, 2014 convencional e com escória de aciaria. 2009. 135p. Dissertação (Mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Departamento de Engenharia Civil, 2009

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 (1) p. 40–57, março, 2007.

DINIZ, A. G. F.; OLIVEIRA, I. L. Influência das fontes de alumínio secundário na geração de escória: uma análise estatística. **Revista Produção**. Online, v. 9, n. 2, p. 284-302, 2009.

DO Ó, S. W. **Análise da retenção de água em argamassas de revestimento aditivadas.** Dissertação de M.Sc, Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Brasília, DF, Brasil, 2004.

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) - Universidade Federal de Ouro, Preto, Ouro Preto, 2010.

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, pp. 116–124. (2015).

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

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, pp. 318-330, 2018.

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, pp. 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, pp. 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, pp. 247-254, 2017.

IABr. (2014). **Relatório de Sustentabilidade.** Fonte: Instituto Aço Brasil: Disponível em: <http://www.acobrasil.org.br/sustentabilidade/>. Acesso em 10 de julho de 2021.

IABr. (2018). **Relatório de Sustentabilidade.** Fonte: Instituto Aço Brasil: Disponível em: <http://www.acobrasil.org.br/sustentabilidade/>. Acesso em 18 de julho de 2021.

IABr. (2020). **Relatório de Sustentabilidade.** Fonte: Instituto Aço Brasil: Disponível em: <http://www.acobrasil.org.br/sustentabilidade/>. Acesso em 16 de novembro de 2021.

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

KURZ, M.N., BRANDELLI, T.M., PALIGA, C.M., et al., A potencialidade do uso de resíduo de borracha de pneu em argamassa: análise das propriedades físicas e mecânicas. **Revista Matéria.** v.23, n.3, Rio de Janeiro, 2018.

LACERDA, C. **Traços de argamassa utilizando escória de aciaria elétrica.** 2015, 70p. Dissertação (Mestrado) – UniFOA / Mestrado Profissional em Materiais, 70 p.Volta Redonda: UniFOA, 2015.

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, pag. 200-208, novembro, 2017.

LUXAN, M. P., SOTOLONGO, R., DORREGO, F., et al. Characteristics of the slag produced in the fusion of scrap steel by electric arc furnace, **Cement and Concrete Research**, v. 30, pp. 517-519, abril, 2000.

MACHADO, A. T. (2000). **Estudo Comparativo dos Métodos de Ensaio para Avaliação da Expansibilidade das Escórias de Aciaria**. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo Escola Politécnica, Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo.

MATTOS, L. R. S.; DAL MOLIN, D. C. C.; CARNEIRO, A. M. P. (2001). **Caracterização das argamassas para revestimento externo utilizadas em Belém/PA: Estudo do comportamento no estado fresco**. IV Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas. Anais... Brasília, 23 a 25 de maio de 2001.

MEHTA, P. K. MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**, PINI, S. Paulo, 2014.

MENADI, B. KENAI, S. KHATIB, J. AIT-MOKHTAR, A. Strength and durability of concrete incorporating crushed limestone sand. **Construction and Building Materials**. nº 23, p. 625-633, fevereiro, 2009.

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.

MOTZ, H.; GEISELER, J. Products of steel slag an opportunity to save natural resources. **Waste management** v. 21, pp. 285-293, junho 2001.

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

OLIVEIRA e SOUZA, Eduardo Bezerra. **Escória de aciaria e resíduo de concretos refratários em componentes de pavimentação**. Programa de Pós-Graduação em Saneamento da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

OU DA, 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, março, 2018.

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, dezembro, 2012.

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, abr./jun. 2019.

PRADO, R. de M.; FERNANDES, F.M.; NATALE, W. Uso agrícola da escória siderúrgica no Brasil: estudo na cultura da cana-de-açúcar. **Jaboticabal: Funep**, p. 67, 0002001.

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, março, 2014.

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, out./dez. 2009.

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, outubro 2004.

SALGADO, Julio. **Técnicas e Práticas Construtivas para Edificação**, 1.ed. Editora Érica, 2009.

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, pp. 308-316, 2014.

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

SHEN, H.; FORSSBERG, E., NORDSTROM, U. Physicochemical and mineralogical properties of stainless steel slags oriented to metal recovery. Resources, **Conservation and Recycling**. v 40, nº 3, p. 245–271, fevereiro, 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.

SILVA, N. G.; CAMPITELI, V. C. Correlação entre o módulo de elasticidade dinâmico e resistências mecânicas de argamassa de cimento cal e areia. **Revista Ambiente Construído**, v. 8, n. 4, p. 21-35, 2008

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) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2018.

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

SOUZA, M.M., et al. Uso do lodo de esgoto na produção de agregados leves: uma revisão sistemática de literatura. **Revista Matéria**. v.25, n.1, Rio de Janeiro, 2020.

SOUZA, N.S.L., et al. Desenvolvimento de agregados leves a partir de resíduo de corte de pedras ornamentais (granitos e mármore) e argila. **Revista Matéria**. v.25, n.1, Rio de Janeiro, 2020.

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

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, pp 2697-2708 (2014).

TOKARSKI, R.B., et al. 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. Rio de Janeiro, 2018.

TRENTIN, P.O., et al. Substituição parcial de agregado miúdo por resíduo de vidro moído na produção de argamassa. **Revista Matéria**. v.25, n.1, Rio de Janeiro, 2020.

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, 1995.

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, pp. 146-156 (2015).

WORDSTEEL ASSOCIATION. **World steel in figures 2019**. Belgium. Disponível em : <<https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:96d7a585-e6b2-4d63-b943-4cd9ab621a91/World%2520Steel%2520in%2520Figures%25202019.pdf>> Acesso em 24 de novembro, 2021.