

**FACULDADE IMED
ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO STRICTO SENSU EM
ENGENHARIA CIVIL**

JACKSON LUÍS WAECHTER
(Engenheiro Civil)

**MATRIZ CIMENTÍCIA DESENVOLVIDA COM AREIA
VERDE DE FUNDIÇÃO DESCONTAMINADA POR
DIFERENTES PROCESSOS DE TRATAMENTO**

Passo Fundo

2021

JACKSON LUÍS WAECHTER

**MATRIZ CIMENTÍCIA DESENVOLVIDA COM AREIA VERDE DE FUNDIÇÃO
DESCONTAMINADA POR DIFERENTES PROCESSOS DE TRATAMENTO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da IMED - Faculdade Meridional como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo de Almeida Silva

Passo Fundo

2021

CIP - Catalogação na Publicação

W126m Waechter, Jackson Luís
MATRIZ CIMENTÍCIA DESENVOLVIDA COM AREIA
VERDE DE FUNDIÇÃO DESCONTAMINADA POR
DIFERENTES PROCESSOS
DE TRATAMENTO / Jackson Luís Waechter. - 2021.
103 f.

Orientador: Rodrigo de Almeida Silva. Dissertação
(Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade IMED,
Passo Fundo, 2021.

1. resíduo da areia verde de fundição. 2.
ozonização. 3. tratamento. I. Silva, Rodrigo de
Almeida, orient. II. Título.

Elaborado pelo Sistema de Geração Automática da UFRJ com os dados
fornecidos pelo(a) autor(a), sob a responsabilidade de Miguel Romeu Amorim

Neto - CRB-7/6283.

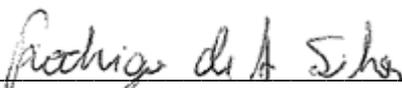
JACKSON LUÍS WAECHTER

**MATRIZ CIMENTÍCIA DESENVOLVIDA COM AREIA VERDE DE FUNDIÇÃO
DESCONTAMINADA POR DIFERENTES PROCESSOS DE TRATAMENTO**

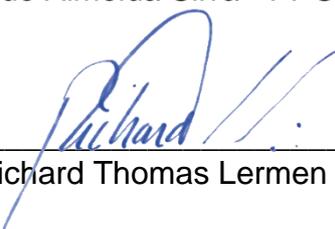
Dissertação de Mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da IMED - Faculdade Meridional como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil.

Passo Fundo, 30 de abril de 2021.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Rodrigo de Almeida Silva - PPGEC/IMED (Orientador)



Prof. Dr. Richard Thomas Lermen - PPGEC/IMED



Profa. Dra. Francieli Tiecher Bonsembiante - PPGEC/IMED



Profa. Dra. Ângela Borges Masuero – PPGCI/UFRGS

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Rodrigo de Almeida Silva, agradeço pela orientação e aos ensinamentos repassados durante toda a pesquisa. Agradeço também pela confiança a mim depositada como o seu orientando, pelo seu empenho para que esta pesquisa tenha se concretizado e por torna-se um grande amigo.

À minha família e todos os meus amigos que estiveram ao meu lado durante essa etapa, dando o suporte necessário para concluí-la. À minha companheira, Jéssica Flesch Novaes, que sempre me incentivou e encorajou para a realização do mestrado, sempre acreditando que vou alcançar os meus objetivos.

Aos técnicos de laboratório da IMED pelo suporte e paciência na execução dos ensaios, sempre me auxiliando quando era necessário.

À STARA S.A pelo fornecimento do resíduo da areia verde de fundição utilizada neste trabalho.

À Fundação IMED e à STARA S.A pela bolsa de estudos que proporcionou à minha dedicação e o desenvolvimento da pesquisa, sendo de grande valia para alcançar os objetivos deste trabalho.

RESUMO

A indústria da fundição é responsável pela produção de metais ferrosos e não ferrosos, utilizando a areia para a produção de peças fundidas. É utilizado dois tipos de areia no processo: a areia verde, utilizada para produção dos moldes das peças fundidas, e a areia fenólica, utilizada para a produção dos machos dos moldes. Após alguns ciclos de utilização, a areia se torna um resíduo para a indústria. O descarte do resíduo da areia de fundição (RAF) e a demanda da construção civil por agregados ocasiona um grande impacto ambiental e econômico. Por isso, a utilização do RAF na construção civil, como agregado miúdo em matrizes cimentícias, se torna interessante. Contudo, o RAF tem elementos em sua composição que podem ser prejudiciais quando incorporado em matrizes cimentícias. Portanto, o objetivo deste trabalho é aplicar o resíduo de areia verde de fundição tratado, por diferentes processos de descontaminação, em substituição parcial da areia natural em matrizes cimentícias, avaliando a influência dos processos de descontaminação do resíduo nas propriedades físicas e ambientais do agregado e quando incorporado em argamassa, avaliando a melhor mistura do agregado miúdo pelo resíduo, levando em conta características técnicas e ambientais e analisando os resíduos e as argamassas quanto às suas características físicas e ambientais. Os resultados mostraram que o tratamento proposto conseguiu limpar o resíduo. Quando realizada a substituição de 60% da areia natural pelo resíduo tratado com ozônio por 5 horas, a argamassa teve um comportamento semelhante ao da argamassa de referência para a sua resistência à compressão, absorção de água, índice de vazios e massa específica. O tratamento se mostrou uma alternativa para maior utilização do resíduo em materiais cimentícios evitando o seu descarte.

Palavras-chave: resíduo da areia verde de fundição; ozonização, tratamento.

ABSTRACT

The foundry industry is responsible for the production of ferrous and non-ferrous metals, using sand as a mold for the production of castings. Two types of sand are used in the process: green sand, used for the production of molds for castings, and phenolic sand, used for the production of mold cores. After a few cycles of use, the sand becomes a waste for the industry. The disposal of waste foundry sand (WFS) and the demand of civil construction for aggregates causes a great environmental and economic impact. For this reason, the use of WFS in civil construction, as a fine aggregate in cementitious matrices, becomes interesting. However, the WFS has elements in its composition that can be harmful when incorporated into cementitious matrices. Therefore, the aim of this work is to apply the waste green foundry sand treated by different decontamination processes, in partial replacement of natural sand in cementitious matrices, evaluating the influence of the decontamination processes of the residue on the physical and environmental properties of the aggregate and when incorporated in mortar, evaluating the best mixture of fine aggregate by residue, taking into account technical and environmental characteristics and analyzing residues and mortars in terms of their physical and environmental characteristics. The results showed that the proposed treatment was able to clean the residue. When replacing 60% of natural sand with ozone-treated waste for 5 hours, the mortar had a behavior similar to that of the reference mortar for its compressive strength, water absorption, void index and specific mass. The treatment proved to be an alternative for greater use of the residue in cementitious materials, avoiding its disposal.

Keywords: waste green foundry sand; ozonation, treatment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição das empresas de acordo com a destinação final do RAF .	19
Figura 2 – Etapas do processo de fundição	25
Figura 3 – Fluxograma de entradas e saídas no processo de fundição	26
Figura 4 – Esquema de forno cubilô para fusão do ferro fundido.....	28
Figura 5 – Hierarquia do gerenciamento dos resíduos.....	30
Figura 6 – Recuperador mecânico	31
Figura 7 – Esquema de processo de regeneração úmida.....	32
Figura 8 – Regenerador térmico.....	32
Figura 9 – Distribuição granulométrica dos agregados analisado	49
Figura 10 – Teor de material pulverulento dos agregados analisados	51
Figura 11 – Massa específica dos agregados analisados	53
Figura 12 – Influência do tipo de tratamento na massa unitária dos agregados analisados	54
Figura 13 – Influência do tipo de tratamento no índice de vazios dos agregados analisados	54
Figura 14 – Perda ao fogo dos agregados analisados	56
Figura 15 – Imagem do RAVF em microscópio digital	58
Figura 16 – Imagem do RAVFT – A1 em microscópio digital.....	59
Figura 17 – Imagem RAVFT – O1 em microscópio digital.....	59
Figura 18 – Aspectos das argamassas no estado fresco	62
Figura 19 – Influência do tipo de tratamento na resistência à compressão aos 28 dias das argamassas estudadas	64
Figura 20 – Resistência à compressão das argamassas com RAVF e RAVFT - P	65
Figura 21 - Resistência à compressão das argamassas com RAVFT – O1, RAVFT – O3 e RAVFT – O5	65
Figura 22 - Resistência à compressão das argamassas com RAVFT – A1, RAVFT – A3 e RAVFT – A5.....	66
Figura 23 – Resistência à tração na flexão aos 28 dias das argamassas estudadas	69

Figura 24 - Resistência à tração na flexão das argamassas com RAVF e RAVFT – P.....	70
Figura 25 - Resistência à tração na flexão das argamassas com RAVFT – O1, RAVFT – O3 e RAVFT – O5	70
Figura 26 - Resistência à tração na flexão das argamassas com RAVFT – A1, RAVFT – A3 e RAVFT – A5	71
Figura 27 – Absorção de água por imersão das argamassas estudadas.....	74
Figura 28 – Absorção de água das argamassas com RAVF e RAVFT – P.....	74
Figura 29 - Absorção de água das argamassas com RAVFT – O1, RAVFT – O3 e RAVFT – O5.....	75
Figura 30 - Absorção de água das argamassas com RAVFT – A1, RAVFT – A3 e RAVFT – A5	75
Figura 31 – Índice de vazios das argamassas estudadas.....	78
Figura 32 - Índice de vazios das argamassas com RAVF e RAVFT – P.....	79
Figura 33 - Índice de vazios das argamassas com RAVFT – O1, RAVFT – O3 e RAVFT – O5.....	79
Figura 34 - Índice de vazios das argamassas com RAVFT – A1, RAVFT – A3 e RAVFT – A5	80
Figura 35 – Massa específica das argamassas estudadas.....	83
Figura 36 - Massa específica das argamassas com RAVF, RAVFT – P.....	83
Figura 37 - Massa específica das argamassas com RAVFT – O1, RAVFT – O3 e RAVFT – O5.....	84
Figura 38 – Massa específica das argamassas com RAVFT – A1, RAVFT – A3 e RAVFT – A5	84
Figura 39 – Resistência à compressão x tipo de tratamento e taxa de substituição das argamassas estudadas.....	87
Figura 40 - Resistência à compressão x tempo de tratamento e taxa de substituição das argamassas estudadas.....	88
Figura 41 – Absorção de água x tipo de tratamento e taxa de substituição das argamassas estudadas	89
Figura 42 - Absorção de água x tempo de tratamento e taxa de substituição das argamassas estudadas	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Ranking dos países na produção de fundidos	23
Tabela 2 – Processos oxidativos avançados.....	34
Tabela 3 – Análise granulométrica dos agregados	50
Tabela 4 – Análises dos parâmetros do extrato lixiviado dos agregados analisados	57
Tabela 5 – Descrição dos traços das argamassas.....	61
Tabela 6 – ANOVA: Resistência à compressão x taxa de substituição.....	66
Tabela 7 - ANOVA: Resistência à compressão x tipo de tratamento	67
Tabela 8 - ANOVA: Resistência à compressão x tempo de tratamento	67
Tabela 9 – Informação de grupo usando método de Tukey para a resistência à compressão x taxa de substituição	68
Tabela 10 - Informação de grupo usando método de Tukey para a resistência à compressão x tipo de tratamento	68
Tabela 11 - Informação de grupo usando método de Tukey para a resistência à compressão x tempo de tratamento	68
Tabela 12 - ANOVA: Resistência à tração na flexão x taxa de substituição	71
Tabela 13 - ANOVA: Resistência à tração na flexão x tipo de tratamento	72
Tabela 14 - ANOVA: Resistência à tração na flexão x tempo de tratamento	72
Tabela 15 - Informação de grupo usando método de Tukey para a resistência à tração na flexão x taxa de substituição	72
Tabela 16 - Informação de grupo usando método de Tukey para a resistência à tração na flexão x tipo de tratamento	73
Tabela 17 - Informação de grupo usando método de Tukey para a resistência à tração na flexão x tempo de tratamento	73
Tabela 18 - ANOVA: Absorção de água (%) x taxa de substituição.....	76
Tabela 19 - ANOVA: Absorção de água (%) x tipo de tratamento.....	76
Tabela 20 - ANOVA: Absorção de água (%) x tempo de tratamento	76
Tabela 21 - Informação de grupo usando método de Tukey para a absorção de água x taxa de substituição	77
Tabela 22 - Informação de grupo usando método de Tukey para a absorção de água x tipo de tratamento.....	77

Tabela 23 - Informação de grupo usando método de Tukey para a absorção de água x tempo de tratamento.....	77
Tabela 24 - ANOVA: Índice de vazios (%) x taxa de substituição	80
Tabela 25 - ANOVA: Índice de vazios (%) x tipo de tratamento	81
Tabela 26 – ANOVA Índice de vazios (%) x tempo de tratamento	81
Tabela 27 - Informação de grupo usando método de Tukey para a índice de vazios x taxa de substituição	81
Tabela 28 - Informação de grupo usando método de Tukey para a índice de vazios x tipo de tratamento.....	82
Tabela 29 - Informação de grupo usando método de Tukey para a índice de vazios x tempo de tratamento	82
Tabela 30 - ANOVA: Massa específica x taxa de substituição.....	85
Tabela 31 - ANOVA: Massa específica x tipo de tratamento.....	85
Tabela 32 – ANOVA Massa específica x tempo de tratamento.....	85
Tabela 33 - Informação de grupo usando método de Tukey para a massa específica x taxa de substituição.....	86
Tabela 34 - Informação de grupo usando método de Tukey para a massa específica x tipo de tratamento.....	86
Tabela 35 - Informação de grupo usando método de Tukey para a massa específica x tempo de tratamento	86
Tabela 36 – ANOVA: Resistência à compressão x taxa de substituição, tipo de tratamento e tempo de tratamento para as argamassas com os resíduos tratados com ozônio e ar comprimido	90
Tabela 37 - ANOVA: Absorção de água x taxa de substituição, tipo de tratamento e tempo de tratamento para as argamassas com os resíduos tratados com ozônio e ar comprimido.....	90
Tabela 38 - Análises dos parâmetros do extrato lixiviado das argamassas estudadas.....	92

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Pesquisas com o RAF no mundo	35
---	----

ABREVIações E NOMENCLATURAS

ABIFA – Associação Brasileira de Fundição

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANOVA – Análise de variância

DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral

EPA - *Environmental Protection Agency*

FEPAM - Fundação Estadual de Proteção ambiental Henrique Luis Roessler

GWQS - *Ground water quality standards*

MEV - Microscopia Eletrônica de Varredura

POA - Processos Oxidativos Avançados

RAF – Resíduo da Areia de Fundição

RAVF – Resíduo da Areia Verde de Fundição

RAVFT – Resíduo da Areia Verde de Fundição Tratado

RAVFT – P – Resíduo da Areia Verde de Fundição Tratado com Peneiramento

RAVFT – O1 – Resíduo da Areia Verde de Fundição Tratado com Ozônio por 1 hora

RAVFT – O3 – Resíduo da Areia Verde de Fundição Tratado com Ozônio por 3 hora

RAVFT – O5 – Resíduo da Areia Verde de Fundição Tratado com Ozônio por 5 hora

RAVFT – A1 – Resíduo da Areia Verde de Fundição Tratado com Ar comprimido por 1 hora

RAVFT – A3 – Resíduo da Areia Verde de Fundição Tratado com Ar comprimido por 3 hora

RAVFT – A5 – Resíduo da Areia Verde de Fundição Tratado com Ar comprimido por 5 hora

RAVF/20 – Argamassa com o RAVF com taxa de substituição de 20%

RAVF/40 – Argamassa com o RAVF com taxa de substituição de 40%

RAVF/60 – Argamassa com o RAVF com taxa de substituição de 60%

RAVFT – P/20 – Argamassa com o RAVFT – P com taxa de substituição de 20%

RAVFT – P/40 – Argamassa com o RAVFT – P com taxa de substituição de 40%

RAVFT – P/60 – Argamassa com o RAVFT – P com taxa de substituição de 60%

RAVFT – O1/20 – Argamassa com o RAVFT – O1 com taxa de substituição de 20%

RAVFT – O1/40 – Argamassa com o RAVFT – O1 com taxa de substituição de 40%

RAVFT – O1/60 – Argamassa com o RAVFT – O1 com taxa de substituição de 60%

RAVFT – A1/20 – Argamassa com o RAVFT – A1 com taxa de substituição de 20%

RAVFT – A1/40 – Argamassa com o RAVFT – A1 com taxa de substituição de 40%

RAVFT – A1/60 – Argamassa com o RAVFT – A1 com taxa de substituição de 60%

WHO- *Word health organization standard limits*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
1.4 Objetivos	22
1.4.1 Objetivo Geral	22
1.4.2 Objetivos Específicos	22
2 REVISÃO DE LITERATURA	23
2.1 Indústria da fundição	23
2.1.1 Areia de fundição	25
2.1.2 Outros resíduos da fundição	27
2.2 Definição, classificação e manejo dos resíduos	28
2.3 Regeneração da areia de fundição	30
2.4 Reutilização do resíduo da areia de fundição.....	34
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	49
4.1 Caracterização dos agregados	49
4.1.1 Granulometria.....	49
4.1.2 Teor de material pulverulento.....	50
4.1.2 Massa específica.....	52
4.1.3 Massa unitária e volume dos vazios.....	53
4.1.3 Perda ao fogo.....	55
4.1.4 Análise ambiental dos resíduos.....	57
4.1.5 Microscopia digital	58
4.2 Caracterização das argamassas no estado fresco	59
4.3 Caracterização das argamassas no estado endurecido	62
4.3.1 Resistência à compressão	62
4.3.2 Resistência à tração na flexão	68
4.3.2 Absorção de água	73
4.3.4 Índice de vazios.....	78
4.3.5 Massa específica.....	82
4.3.6 Análise dos resultados	87
4.3.7 Análise ambiental das argamassas	91
5 CONCLUSÕES	93

REFERÊNCIAS.....	95
------------------	----

1 INTRODUÇÃO

É reconhecido que o crescimento industrial levou ao desenvolvimento econômico da nossa sociedade ao longo dos anos (WANG *et al.*, 2020b). Em 250 anos, a sociedade industrial dobrou a expectativa de vida do ser humano, multiplicando por seis a população do planeta, que chega a 7,6 bilhões de habitantes em 2017 (GUEVANE, 2021). Este feito é resultado do desenvolvimento técnico-científico que gerou um complexo industrial, que é dependente de fluxo constante e crescente de extração de matérias primas não renováveis. Estas matérias primas são utilizadas para produzir bens de consumo, que ao final da via útil, irão se somar aos resíduos gerados em cada etapa do processo (JOHN, 2017).

Os resíduos gerados nos processos produtivos pelo setor industrial se tornam grandes problemas frente ao seu manejo, causando danos ambientais e elevados custos para a sua disposição final. Nos dias atuais, a disposição final em aterros sanitários não é mais possibilidade legal, sendo os aterros de resíduos industriais a única alternativa. Portanto, o desenvolvimento de políticas ambientais recentes levam à abordagem sustentável para o gerenciamento integrado dos resíduos (KRISHNA *et al.*, 2020).

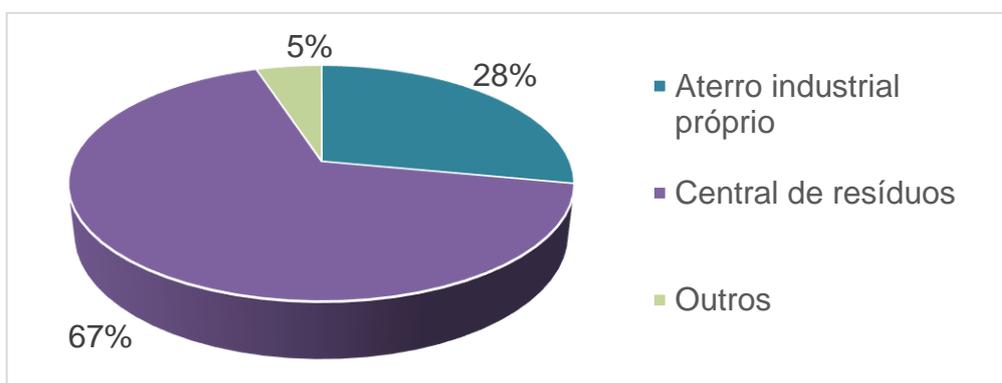
Um dos principais setores que impulsionam o desenvolvimento da economia mundial é a indústria de fundição (ABIOYE *et al.*, 2018). Ela é responsável por alimentar outras indústrias, produzindo componentes e ferramentas para os setores da agricultura, automotivos, têxteis, usinas de energia, petróleo e gás, cimentícia, mineração, construção civil, entre outros (AGBO; AYENI, 2017). A produção de fundidos vem crescendo rapidamente nos últimos anos, tendo sua produção mundial subindo de 92 milhões de toneladas, em 2010, para 110 milhões de toneladas, em 2015 (MODERN CASTING, 2015).

Com a produção de 2,29 milhões de toneladas de fundidos no ano de 2019 pelas indústrias brasileiras (REVISTA DA ABIFA, 2020), pode-se estimar a geração de 2,29 milhões de toneladas para o resíduo da areia de fundição (RAF), sendo um dos resíduos sólidos industriais de maior volume no Brasil. O RAF, por possuir uma grande quantidade de metais e resinas fenólicas impregnadas na areia, e por isso pode ser classificado como resíduo classe II-A (resíduo não perigoso e não inerte) ou como resíduo classe I (resíduo perigoso), de acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2004), dependendo da sua composição.

Uma das únicas alternativas aceitas pelos órgãos de controle ambiental é o descarte em aterros industriais, sendo essa uma das maiores despesas para o setor de fundição (REVISTA DA ABIFA, 2014). Segundo Biolo (2005), o custo de descarte varia entre US\$20 a US\$50 por tonelada de resíduo descartado. Para Brondino, Silva e Brondino (2014), o custo apenas do despejo do RAF, na cidade de Curitiba/PR, era de R\$118,00 por tonelada de resíduo descartado. Em outro estudo, realizado em uma indústria de fundição do Reino Unido, o custo do descarte era de £50,00 por tonelada de resíduo descartado (MAVROULIDOU; LAWRENCE, 2019). Os altos custos de descarte para a indústria de fundição tornam um dos principais problemas para este setor e impacta substancialmente no valor final dos fundidos.

Na década passada, no estado do Rio Grande do Sul, das 77 indústrias de fundição cadastradas junto ao órgão ambiental estadual, Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luis Roessler (FEPAM), apenas uma empresa apresentou projeto alternativo para a destinação do RAF. A proposta era o uso como insumo na massa cerâmica na fabricação de tijolos cerâmicos (ADEGAS E BERNARES, 2008). Do estudo realizado, 67% das empresas de fundição destinaram seus resíduos para aterros industriais licenciados, 28% destinaram para aterros industriais próprios, e destes apenas a metade estão licenciados pela FEPAM; os 5% restantes armazenam seus resíduos em locais não licenciados, conforme Figura 1.

Figura 1 - Distribuição das empresas de acordo com a destinação final do RAF



Fonte: Retirado de Adegas e Bernardes (2008)

O RAF possui granulometria e elementos químicos característicos provenientes do processo de fundição. Quando utilizado o RAF como substituição

do agregado miúdo em concretos e argamassas, a característica do resíduo modifica as suas propriedades, alterando suas características mecânicas, químicas e durabilidade (GURUMOORTHY; ARUNACHALAM, 2019; MANOHARAN *et al.*, 2018).

Na construção civil, a areia serve essencialmente como agregado miúdo na produção de concreto e argamassas, sendo estimado o consumo de 349 milhões de toneladas de areia no Brasil no ano de 2015 (DNPM, 2016). A grande quantidade de areia demandada pelo setor da construção civil faz com que a extração dos leitos dos rios aumente, agravando o problema ambiental.

A extração acima da capacidade de reposição da dinâmica fluvial causa desequilíbrio no balanço de massa dos sedimentos, modificando as condições do canal a montante, jusante e lateralmente do ponto de extração, impactando diretamente nos ecossistemas. A areia é o principal material extraído dos rios e isso só pode ser feito através de um manejo adequado, se a quantidade de material retirada não for compatível com a quantidade de sedimentos que o sistema consegue repor, pode haver o colapso do ecossistema local (OLIVEIRA; MELLO, 2007).

Por outro lado, apesar de a indústria da construção civil demandar muitos insumos de origem natural, contribuindo para os problemas ambientais, ela também possui grande capacidade de incorporação de resíduos na fabricação de materiais para construção, especialmente pelo seu consumo em escala. Isso possibilita a redução de custos de produção para os novos produtos. Sendo assim, a substituição do agregado miúdo pelo RAF em matrizes cimentícias surge como uma alternativa para diminuir o impacto ambiental e econômico das indústrias de fundição, bem como reduzir o impacto ambiental causado pela extração de areia na construção civil.

Em matrizes cimentícias, a substituição do agregado miúdo pelo RAF apresenta variabilidade em seus resultados frente ao seu desempenho mecânico, tendo, em alguns casos, um bom comportamento para determinadas taxas de substituição, aumentando suas resistências à compressão e à tração e melhorando os seus resultados de durabilidade. A areia de fundição, por possuir uma grande quantidade de óxidos metálicos, material orgânico (como fenóis), carvão e finos (como argilas) (SIDDIQUE; SINGH, 2011), alteram as propriedades químicas das

matrizes cimentícias, além de conter substâncias que podem tornar o material prejudicial ao meio ambiente e ao ser humano.

Existem diversos processos de regeneração para a areia de fundição, segundo Bonin *et al.* (1995, apud Pinto, 2013), regeneração é o termo dado ao tratamento da areia de fundição para reduzir as superfícies dos grãos elementos contaminantes como aglomerantes, aditivos e resíduos metálicos, tornando a areia mais próxima do possível à condição nova. Dentre os processos de regeneração os mais empregados são os tratamentos mecânicos, úmido, térmico e químico (SCHEUNEMANN, 2005).

Os resultados de estudos feitos com o RAF em matrizes cimentícias evidenciam que a substituição do agregado miúdo pelo RAF é possível, mas a taxa de substituição encontrada não converge para o mesmo ponto. Alguns estudos apontam que para qualquer taxa de substituição, o desempenho do elemento cimentícios, frente as suas resistências à compressão e à tração, foram inferiores quando comparados às matrizes de referências (KAUR; SIDDIQUE; RAJOR, 2013; KHATIB; HERKI; KENAI, 2013; PRABHU; HYUN; KIM, 2014; TORRES; BARTLETT; PILGRIM, 2017). Contudo, outros estudos também mostram que a parcial substituição do agregado miúdo pelo RAF pode ser benéfica para as características mecânicas e de durabilidade, com taxas de substituição chegando à 40%, em massa (ANDRADE; LUIZA; CARNIN, 2018; GURUMOORTHY; ARUNACHALAM, 2016; MANOHARAN *et al.*, 2018; SIDDIQUE *et al.*, 2015; SINGH; SIDDIQUE, 2012a, 2012b).

Essas diferenças dos resultados encontrados pelos autores supracitados se devem ao tipo e quantidade de ligante que é adicionado na areia de fundição, influenciando as propriedades físicas do concreto (MANOHARAN *et al.*, 2018).

O presente estudo tem como objetivo propor a reutilização do Resíduo da Areia Verde de Fundição (RAVF) em argamassas, a partir da sua descontaminação, através de diferentes processos.

¹BONIN, André Luís. Reutilização da Areia Preta de Fundição na construção civil. Congresso de Fundição. São Paulo, p-203-221. Setembro, 1995.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo Geral

Aplicar o resíduo de areia verde de fundição tratado pelo processo de ozonização em substituição parcial da areia natural em matrizes cimentícias.

1.4.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos identificados nesta dissertação:

- a) avaliar a influência dos processos de descontaminação do RAVF nas propriedades físicas e químicas do agregado e quando incorporado em argamassa;
- b) avaliar o melhor percentual de substituição do agregado miúdo pelo resíduo, levando em conta características técnicas e ambientais;
- c) analisar o RAVF e o resíduo a areia verde de fundição tratado (RAVFT), as argamassas quanto às suas características físicas e ambientais.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Indústria da fundição

O setor de fundição é responsável por produzir peças fundidas em ferro, aço e ligas não ferrosas. As três principais matérias-primas para a produção de peças fundidas são o ferro gusa, alumínio e os ferroligas, sendo que o Brasil é autossuficiente na produção dessas matérias-primas. A produção de fundidos destina-se a alimentar os setores automotivo, siderúrgico, bens de capital, exportação, infraestrutura, entre outros (REVISTA DA ABIFA, 2016).

O Brasil, em 2018, ocupou a nona posição mundial na produção de fundidos, conforme Tabela 1, produzindo um total de 2,28 milhões de toneladas, estimando um crescimento para 3,2 milhões de toneladas para o ano de 2023.

Tabela 1 - Ranking dos países na produção de fundidos

Colocação	País	Produção em 2018 (milhões de toneladas)
1	China	49,35
2	Índia	13,39
3	Estados Unidos	10,76
4	Japão	5,76
5	Alemanha	5,43
6	Rússia	4,20
7	México	2,91
8	Coreia	2,57
9	Brasil	2,28
10	Itália	2,26

Fonte: Adaptado (REVISTA ABIFA, 2020)

Os diferentes processos de fundição são classificados de acordo com o processo de moldagem (modelagem em areia, moldagem em casca fundição, em moldes metálicos, fundição centrífuga, fundição de precisão) (ADEGAS, 2007). Um dos processos mais utilizado é o de areia como material para o molde, sendo esse o método que consegue abranger todos os tipos de metais (NUNES, 2013).

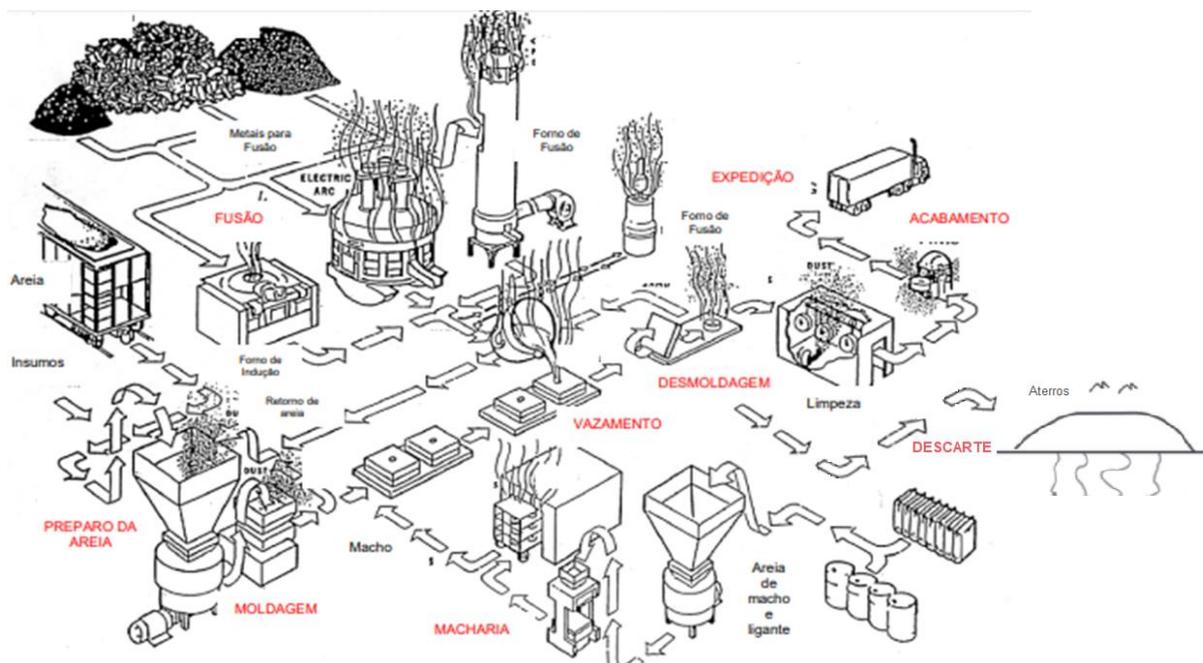
O processo de fabricação das peças de fundição consiste, essencialmente, na fusão de ferro, aço e ligas de metais não ferrosos que, em sua forma líquida, são

derramados dentro dos moldes com o formato que se deseja atribuir às peças (BIOLO, 2005). De acordo com Biolo (2005), as principais etapas do processo são:

- Confecção do modelo – confecção do modelo da peça a ser fundida, utilizando materiais como madeira, polímeros, resinas e metais como o alumínio e o ferro fundido. Essa peça irá servir como molde para imprimir seu formato na areia.
- Confecção dos moldes – São preenchidos com areia de fundição duas caixas, uma contendo o molde e outra com os canais de vazamento. A areia é compactada e as duas metades são montadas para ser preenchido com o metal no seu estado líquido.
- Confecção dos machos – Caso a peça que se deseja fabricar contenha buracos é adicionado uma peça no interior do molde para evitar o preenchimento do metal fundido.
- Fusão e vazamento - Essa é a etapa onde a matéria prima é aquecida até seu ponto de fusão e feito o seu vazamento no interior dos moldes nos canais de vazamento.
- Solidificação – Etapa onde é feito o resfriamento gradual das peças para não provocar tensões mecânicas evitando o aparecimento de trincas e formação de bolhas.
- Desmoldagem – Após o resfriamento da peça é realizada a retirada do molde. Nesta etapa uma parcela da areia é recuperada sendo reutilizada na confecção dos moldes e outra parte acaba se tornando um resíduo.
- Outras operações – Depois da peça fundida, ela é encaminhada para o acabamento onde pode receber operações de usinagem, tratamento térmico e de superfície, pintura, entre outros, dependendo das exigências do produto acabado.

As etapas do processo de fundição podem ser ilustradas conforme Figura 2.

Figura 2 – Etapas do processo de fundição



Fonte: Adaptado de Jansen (2013)

2.1.1 Areia de fundição

A areia é a principal componente para o processo de moldagem nas peças fundidas, sendo também o principal resíduo da indústria de fundição. Dependendo do tipo de peça a ser produzida, o consumo de areia varia entre 800 a 1000 kg para cada tonelada de fundidos, aproximadamente (NUNES, 2013). Esse resíduo é descartado em aterros industriais e torna-se um problema tanto para o meio ambiente, que tem seus aterros sobrecarregados, quanto para as empresas do setor de fundição, que despendem um alto valor econômico para fazer o correto descarte (ADEGAS, 2007).

Normalmente extraída de jazidas de cava ou dos leitos dos rios, a areia utilizada nas indústrias de fundição tem granulometria definida variando entre 0,05 mm a 2,0 mm de diâmetro, e sendo a mais utilizada a areia de sílica (SiO_2), pois é a mais abundante e mais fácil de extrair da superfície terrestre (SCHEUNEMANN, 2005).

A areia de fundição é um produto constituído através da areia base (areia de sílica) e da mistura de elementos para proporcionar resistência e trabalhabilidade

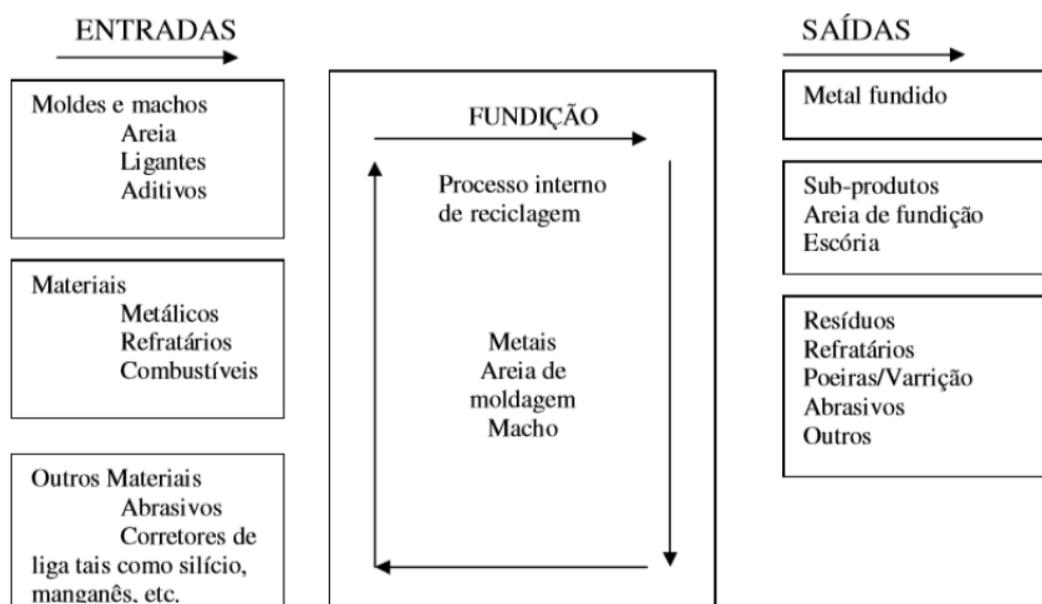
para a produção dos moldes. Existem dois tipos de areia para moldagem das peças: a areia verde e a areia fenólica (PINTO, 2013).

A areia verde é usada para confeccionar os moldes das peças e é composta por areia de sílica (85 a 95 %), bentonita (4 a 10%), como aglutinante, pó de carvão (2 a 10%), para melhorar o acabamento superficial das peças e água (2 a 5%). As areias verdes também tem em sua composição substâncias como óxido de magnésio (MgO), óxido de potássio (K₂O) e dióxido de titânio (TiO₂) (SIDDIQUE; SINGH, 2011).

A areia fenólica é usada para confeccionar os machos dos moldes e é composta por areia de sílica (93 a 99%) e ligantes químicos (1 a 3 %). Os ligantes químicos mais comuns utilizados são uretanos fenólicos, resinas epóxis furfil álcool, e silicatos de sódio. Muitas vezes é utilizado gás amônia como catalisador (SIDDIQUE; SINGH, 2011).

No processo global, parte da areia usada na moldagem das ligas retorna ao início do sistema, outra parte é descartada devido à perda das características dos componentes de mistura. O processo necessita de uma frequente reposição de areia base no sistema, gerando o resíduo da areia de fundição (CARNIN, 2009). A Figura 3 exemplifica os processos de entradas e saídas do processo de fundição.

Figura 3 – Fluxograma de entradas e saídas no processo de fundição



Fonte: Adaptado de Lenahan (2002)

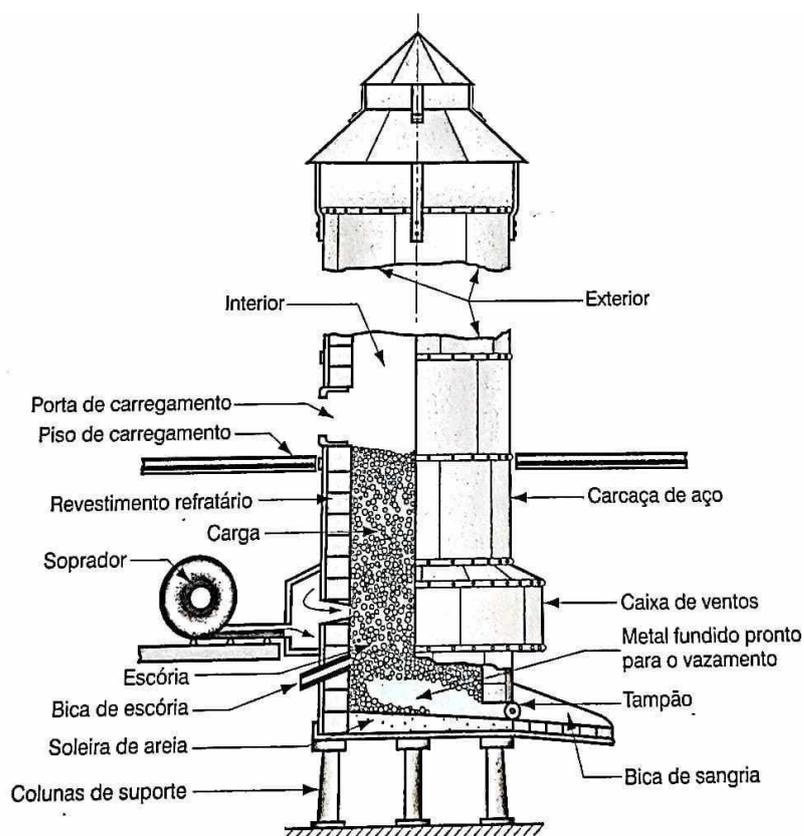
2.1.2 Outros resíduos da fundição

A indústria de fundição gera, além das areias, as escórias, pó de exaustão (proveniente da preparação da areia, desmoldagem das peças de ferro fundido, do forno de fusão e da limpeza das peças de usinagem), lama do tratamento da água de refrigeração e cavaco de usinagem. Os maiores volumes de resíduos a areia de fundição e a escória de fundição (PEREIRA; VALENTINA; WITMISZYN, 2014; TIECHER *et al.*, 2019).

A escória granulada de fundição (EGF) é gerada através do forno cubilô (Figura 4), que é um forno que opera com ferro-gusa, sucata de aço e ferro fundido, calcário, ferro-silício, ferro-manganês, e usa o coque como combustível para a produção do ferro fundido (TÂMEGA, 2017). A EGF é vazada, ainda quente, por um canal de água corrente para receber um resfriamento brusco. Esse resfriamento da EGF líquida faz com que ela se solidifique em um formato granulado (TIECHER *et al.*, 2019).

O processo de fundição está associado à produção da escória, que constitui um dos principais resíduos deste setor. As principais fontes de escória do forno cubilô são o revestimento refratário e diversos óxidos formados durante o processo (RAJESWARAN *et al.*, 2019). Os principais óxidos formados são o óxido de sílica, óxido de magnésio, óxido de alumínio e óxido de cálcio (TEIXEIRA; SOARES; TEIXEIRA, 2018; TIECHER *et al.*, 2019).

Figura 4 – Esquema de forno cubilô para fusão do ferro fundido



Fonte: Groover (2014)

2.2 Definição, classificação e manejo dos resíduos

Resíduos sólidos, segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004), são todos os resíduos nos estados sólidos e semissólidos, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. São incluídos nesta definição lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.

A lei federal nº 12.305 (BRASIL, 2010) classifica os resíduos quanto à origem (domiciliares, de limpeza urbana, sólidos urbanos, de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviço, dos serviços públicos de saneamento básico, industriais, de serviços a saúde, da construção civil, agrossilvopastoris, de serviços de

transporte e de mineração) e quanto à periculosidade (perigosos e não perigosos). Perante a NBR 10004 (ABNT, 2004), os resíduos são classificados como resíduos de classe I (perigosos), classe II A (não perigosos e não inertes) e classe II B (não perigosos e inertes). Para esta classificação são analisados parâmetros dos extratos lixiviados e solubilizados em comparação com os limites estabelecidos na norma.

A FEPAM, através de sua diretriz técnica N° 001/2010 apresenta o procedimento para a incorporação de resíduos sólidos em processos industriais, com o objetivo do aproveitamento dos resíduos como forma de destinação final. Ela apresenta quatro etapas a serem observadas para a incorporação dos resíduos em novos produtos (FEPAM, 2010):

- Etapa 01: Unidade Geradora do resíduo estuda e desenvolve junto a uma Unidade de Pesquisa, a viabilidade da proposta, através de estudos e ensaios preliminares de bancada;
- Etapa 02: Unidade Geradora do resíduo identifica a Unidade de Destino que irá efetivar os testes, em escala industrial, observando os resultados dos estudos de bancada;
- Etapa 03: Unidade Geradora solicita Autorização à FEPAM para a realização do teste em escala industrial, a ser efetivado na Unidade de Destino do resíduo;
- Etapa 04: Unidade de Destino do resíduo solicita o Licenciamento Ambiental da atividade de incorporação do resíduo, junto ao seu processo industrial.

É importante salientar que dentro das etapas da diretriz técnica N° 001/2010 da FEPAM não são mencionadas as características físico-químicas que o resíduo e o novo produto devem atender, somente solicitando uma caracterização do resíduo.

Atualmente, a legislação da utilização do resíduo da areia de fundição como matéria prima para novos produtos e processos ainda é muito vaga. Apenas os estados de Santa Catarina pela Resolução CONSEMA N° 11/2008 e São Paulo pela Decisão de diretoria N° 152/2007/C/E, de 08 de agosto de 2007 – CETESB mostram e indicam aspectos para utilização do resíduo da areia de fundição como armazenagem, transporte e ensaios de toxicidade na qual o resíduo tem que se enquadrar.

A NBR 15702 (ABNT, 2009) estabelece diretrizes para a aplicação do resíduo de areia de fundição como matéria prima para concreto asfáltico e cobertura diária em aterros sanitários, definindo condições a serem respeitadas como classificação do resíduo, concentrações máximas de parâmetros permitidos, documentação a ser gerada, entre outras.

A política nacional de resíduos sólidos, conforme lei nº 12.305 (BRASIL, 2010), estabelece como prioridade na gestão e gerenciamento de resíduos a seguinte ordem: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento e disposição final. A Figura 5 mostra a hierarquia do gerenciamento de resíduos que tem como objetivo reduzir a quantidade de resíduos descartáveis, preservando espaços valiosos e limitados em aterros (WASTE... 2021).

Figura 5 – Hierarquia do gerenciamento dos resíduos



Fonte: Adaptado Waste... (2021)

2.3 Regeneração da areia de fundição

A regeneração da areia de fundição é o processo que se realiza a limpeza superficial de seus grãos, removendo as substâncias aderentes do mesmo, e retirando as partículas resultantes da limpeza, com objetivo de deixar a areia em condições semelhantes a uma areia nova, permitindo sua utilização no próprio

processo sem detrimento da qualidade dos moldes ou machos produzidos (SCHEUNEMANN, 2005). Basicamente existem três métodos de tratamento para a areia de fundição: recuperação mecânica a seco, recuperação úmida e recuperação térmica (JOSEPH; BANGANAYI; OYOMBO, 2017).

A regeneração mecânica a seco usa o atrito entre partículas para remover uma camada superficial que envolve os grãos de sílica e uma separação por ar ou por uma tela de vibração para remover as partículas finas. Esse método é o mais econômico e efetivo, mas produz uma grande quantidade de poeira (PARK; KIM; YU, 2012). A Figura 6 ilustra um recuperador mecânico.

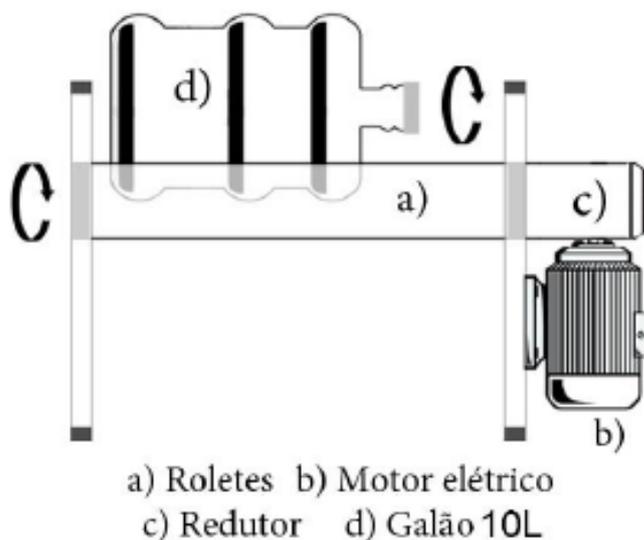
Figura 6 – Recuperador mecânico



Fonte: Sponchiado *et al.* (2017)

A regeneração úmida utiliza a fase de atrito mecânico úmido que é realizada com água e ácido clorídrico ou sulfúrico, após é seca. Esse processo é mais recomendado em areias verdes. Contudo, a regeneração úmida gera um lodo, que precisa ser tratado, ocasionando um custo adicional para o seu tratamento (PARK; KIM; YU, 2012). A Figura 7 demonstra um esquema de regeneração úmida.

Figura 7 – Esquema de processo de regeneração úmida



Fonte: Maciel (2017)

O processo de recuperação térmica faz uso de calor em forno rotativo ou em forno de leito fluidizado para incinerar aglutinantes e contaminantes acima de 700°C. As emissões gasosas desse processo, se não controladas, podem causar um forte impacto ambiental (PARK; KIM; YU, 2012). A Figura 8 ilustra a um regenerador térmico.

Figura 8 – Regenerador térmico



Fonte: Sponchiado *et al.* (2017)

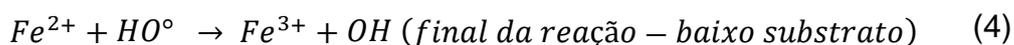
Outros processos de regeneração vêm sendo estudados, como os processos químicos. Scheunemann (2005) utilizou um tratamento químico, através dos

processos de oxidação avançados (POA) conhecido como Fenton, em areia de macharia. Esse processo utiliza uma mistura de peróxido de hidrogênio e íon ferroso, gerando radicais hidroxil altamente reativos que atacam e destroem a matéria orgânica, podendo atingir a total mineralização dos compostos orgânicos e obter CO₂, H₂O e sais inorgânicos, se o grau de oxidação for suficiente (SCHEUNEMANN, 2005).

O processo Fenton, empregado por Scheunemann (2005), retirou as capas de resina aderidas nas partículas de areia sem modificar sua estrutura cristalina e reduziu o material carbonáceo presente. Nos testes de resistência à tração para machos com areia regenerada e para uma mistura de areia (25% de areia nova e 75% areia regenerada) apresentou valores melhores do que os especificados pelo setor produtivo, porém os resultados ficaram abaixo dos machos produzidos com a areia nova.

Esse processo tem como grande vantagem ser altamente destrutivo para o material orgânico, sendo os contaminantes existentes destruídos quimicamente em vez de sofrerem apenas uma mudança de fase, como acontece em outros processos, e por sua funcionalidade operacional, ocorrendo seu processo em reatores simples sem a necessidade de equipamentos complexos e condições extremas de temperatura e pressão (SCHEUNEMANN, 2005; BARROS *et al.*, 2006; MORAVIA; LANGE; AMARAL, 2011).

As equações químicas de 1 a 4 exemplificam o mecanismo de geração do Radical Hidroxil através da decomposição catalítica do peróxido de hidrogênio (H₂O₂) por sais de ferro, em meio ácido (MORAVIA; LANGE; AMARAL, 2011), e a sua ação sobre os compostos orgânicos (RH) causando sua mineralização.



Os POA's envolvem a geração e o uso de espécies transitórias, principalmente o radical livre hidroxil (OH[°]), como oxidantes fortes para destruir componentes que dificilmente são degradados por oxidantes convencionais. Os radicais hidroxil alto potencial oxidante (2,80 V), sendo menor apenas que o flúor

(3,06 V). O (OH^\ominus) e podem ser gerados a partir de oxidantes fortes como o ozônio (O_3) ou o H_2O_2 , por catalisadores como íons metálicos ou foto catalisadores, e irradiação ultravioleta (UV), ultrassom ou feixe de elétrons. Os POA's são determinados como heterogêneo quando há a presença de catalisadores sólidos e homogêneo quando não há (PASQUALINI, 2010). A Tabela 2 mostra os principais POA's e suas classificações.

Tabela 2 – Processos oxidativos avançados

Sistema	Com irradiação	Sem irradiação
Homogêneo	$\text{O}_3 / \text{H}_2\text{O}_2 / \text{UV}$	
	O_3 / UV	$\text{O}_3 / \text{H}_2\text{O}_2$
	$\text{H}_2\text{O}_2 / \text{UV}$	$\text{Fe (II)} / \text{H}_2\text{O}_2$
	$\text{Fe (II)} / \text{H}_2\text{O}_2 / \text{UV}$	
Heterogêneo	Semicondutor / UV	
	Semicondutor / $\text{H}_2\text{O}_2 / \text{UV}$	

Fonte: Adaptado de Pasqualini, (2010)

2.4 Reutilização do resíduo da areia de fundição

A reutilização do resíduo da areia de fundição como matéria para a produção de novos materiais na construção civil leva a uma redução da extração da matéria prima comumente empregada, aumento da vida útil de aterros industriais e pode reduzir custos para a produção de fundidos. Vários pesquisadores vêm estudando sua aplicação em diversas áreas, como exemplificado no Quadro 1.

Quadro 1 - Pesquisas com o RAF no mundo

Citação	Título	Resultados principais
Kaur, Siddique e Rajor (2013)	Micro-structural and metal leachate analysis of concrete made with fungal treated waste foundry sand	Substituição do agregado miúdo pelo RAF e pelo RAF tratado com fungos de 10%, 15% e 20%, em massa, em concretos. Os concretos apresentaram no seu extrato lixiviado valores acima do permitido em alguns parâmetros quando comparado com normas internacionais, sendo observado uma redução na concentração de metais nos concretos com RAF tratado.
Khatib, Herki e Kenai (2013)	Capillarity of concrete incorporating waste foundry sand	Substituição do agregado miúdo pelo RAF de 30%, 60% e 100% em massa, em concretos. Queda na resistência à compressão de 26%, 45% e 50% para as taxas de substituição, respectivamente, e aumento na absorção por capilaridade.
Siddique <i>et al.</i> (2015)	Comparative investigation on the influence of spent foundry sand as partial replacement of fine aggregates on the properties of two grades of concrete	Substituição do agregado miúdo pelo RAF de 5%, 10%, 15% e 20%, em massa, em concretos. Aumento da resistência à compressão de até 26%.
Gurumoorthy e Arunachalam (2016)	Micro and mechanical behaviour of Treated Used Foundry Sand concrete	Substituição do agregado miúdo pelo RAF tratado com ácido clorídrico, em concentrações de 2,5%, 5% e 10%, com taxas de substituição de 10%, 20%, 30% e 40% em massa, em concretos. Aumento da resistência à compressão e à tração de 4% a 11%.
Casali <i>et al.</i> (2017)	Caracterização e influência do teor do resíduo de areia de fundição fenólica em argamassas de revestimento	Substituição do agregado miúdo pelo RAF de 10%, 30% e 100% em volume, em argamassas mistas. O ensaio de lixiviação não apresentou valores acima do permitido e o ensaio de solubilização alguns parâmetros ficaram acima do permitido pela NBR 10004 (ABNT, 2004)
Manoharan <i>et al.</i> (2018)	Engineering properties of concrete with partial utilization of used foundry sand	Substituição do agregado miúdo pelo RAF de 5%, 10%, 15%, 20% e 25% em massa, em concretos. Verificou-se que a resistência à compressão, à tração e o módulo de elasticidade foram, aproximadamente, iguais ao concreto de referência para substituição de 20%.
Souza, Martini e Ferreira, (2019)	Reutilização de areia descartada de fundição na produção de blocos de concreto estrutural	Substituição do agregado miúdo pelo RAF de 15% para a produção de blocos de concretos estruturais. Os valores de resistência à compressão apresentaram valores inferiores e teores de umidades superiores, quando comparado ao de referência. Porém as resistências atingiram os valores mínimos especificados

Fonte: Autor (2021)

Khatib, Herki e Kenai (2013) estudaram a capilaridade dos concretos com areia de fundição, além disso também foram realizados ensaios mecânicos nesses concretos com taxas de substituição de 0%, 30%, 60% e 100%, em massa. Os resultados observados mostraram que com o aumento da substituição do agregado miúdo pelo resíduo da areia de fundição a resistência à compressão dos concretos diminuiu para 26%, 45% e 50% para as taxas de substituição de 30%, 60% e 100%, respectivamente, quando comparado com o concreto de referência. O aumento da utilização do resíduo da areia de fundição também gera um aumento na absorção de água por capilaridade nesses concretos (KHATIB; HERKI; KENAI, 2013).

A inclusão do resíduo da areia de fundição também altera as características química dos concretos. Kaur, Siddique e Rajor (2013) analisaram os metais lixiviados dos concretos contendo o resíduo da areia de fundição. As análises foram realizadas para as substituições de 10%, 15% e 20% do agregado miúdo pelo resíduo da areia de fundição sem nenhum tratamento e para a areia tratada com fungo. O extrato lixiviados dos concretos analisados foram comparados com limites de normas internacionais como a *World health organization standard limits* (WHO) e a *Ground water quality standards* (GWQS). Esses concretos apresentaram no seu extrato lixiviado valores acima do permitido para metais como Cádmiu (Cd), Cromo (Cr), ferro (Fe), molibdênio (Mo), manganês (Mn), níquel (Ni) e chumbo (Pb) dentre os metais analisados. Com o tratamento de fungos realizado no RAF, observou-se uma diminuição nas concentrações de metais presente no concreto (KAUR; SIDDIQUE; RAJOR, 2013).

Siddique *et al.* (2015) utilizaram a areia de fundição como parcial substituição dos agregados finos para dois traços de concretos. Os dois traços de referência utilizados foram para concretos com resistência à compressão aos 28 dias de 30 e 40 MPa e as substituições do agregado miúdo pela areia de fundição foram de 5%, 10%, 15% e 20% em massa. Os resultados encontrados mostram um acréscimo de até 26% na resistência à compressão, de até 12,8% na resistência à tração e de até 5,9% para o módulo de elasticidade, além de melhorar a resistência à permeabilidade de cloreto, para a idade de 28 dias.

Gurumoorthy e Arunachalam (2016) estudaram o comportamento mecânico e a microestrutura do concreto com a areia de fundição tratada através de ácido clorídrico (HCl), em concentrações de 2,5%; 5% e 10%, para diminuir a

concentração de metais do resíduo. A areia de fundição tratada foi utilizada como substituição do agregado miúdo na porção de 10%, 20%, 30% e 40% em massa. Os ensaios mecânicos mostraram um bom comportamento da inclusão da areia de fundição em concretos, tendo um aumento da resistência à compressão e à tração de 4 a 11%, em relação ao concreto de controle. A análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV) mostrou que a utilização da areia de fundição tratada leva à redução de vazios no concreto e que o C-S-H tem uma melhor distribuição e formação, levando a redução da porosidade e aumento das resistências dos concretos (GURUMOORTHY; ARUNACHALAM, 2016).

O estudo feito por Casali *et al.* (2017) caracterizou a influência do teor do RAF em argamassas. Foram preparadas argamassas mistas, substituindo a areia natural, em volume, nos teores de 0%, 10%, 30% e 100% pelo RAF. Nas argamassas foram realizados ensaios de corrosividade, reatividade, lixiviação e solubilização. O ensaio de lixiviação nas argamassas não apresentou nenhuma concentração de extrato lixiviado acima do permitido pela norma NBR 10004 (ABNT, 2004). Já para os ensaios de solubilização, verificou-se concentrações acima do permitido pela norma para os parâmetros de alumínio, cromo total, fenóis totais, ferro e de fluoreto. Foi observado que para a argamassa de referência o parâmetro de alumínio também foi maior do que o recomendado pela norma (CASALI *et al.*, 2017).

Portanto, as pesquisas já realizadas mostram que a substituição parcial do agregado miúdo pelo RAF pode ser uma alternativa viável para diminuir o descarte do resíduo em aterros industriais e diminuir a extração de areia natural em demasia dos leitos dos rios. Além da parte ambiental, também pode apresentar uma redução de custos para a indústria de fundição, uma vez que estarão gerando matéria prima para a produção de novos materiais e não destinando o resíduo para o descarte.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

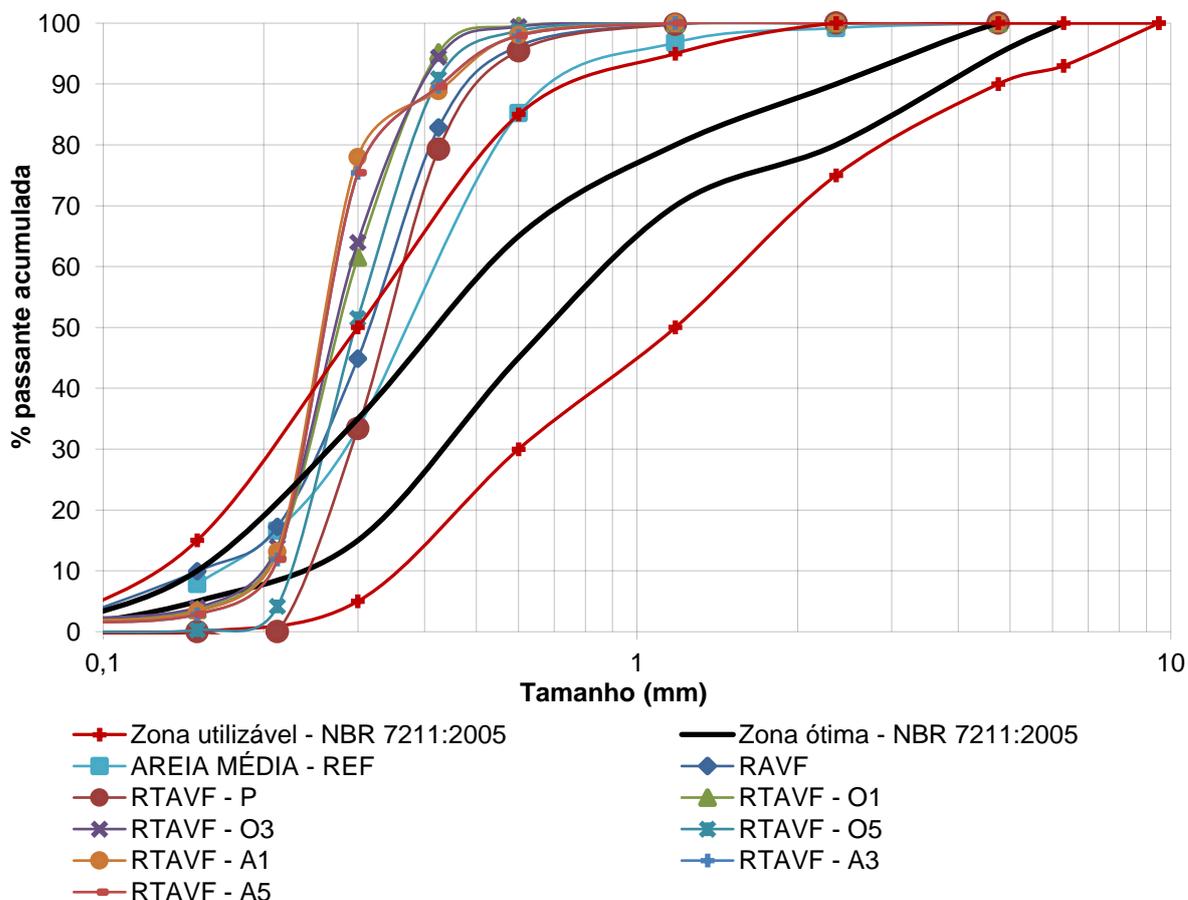
Os resultados deste trabalho são apresentados conforme metodologia apresentada no Capítulo 3.

4.1 Caracterização dos agregados

4.1.1 Granulometria

As distribuições granulométricas dos agregados são apresentadas na Figura 9. Na Tabela 3 são apresentados os módulos de finura e dimensão máxima das partículas.

Figura 9 – Distribuição granulométrica dos agregados analisado



Fonte: Autor (2021)

Tabela 3 – Análise granulométrica dos agregados

Abertura da peneira	REF	RAVF	RAVFT-P	RAVFT-O1	RAVFT-O3	RAVFT-O5	RAVFT-A1	RAVFT-A3	RAVFT-A5
Módulo de finura	1,78	1,49	1,71	1,35	1,33	1,50	1,21	1,24	1,12
Dimensão máxima (mm)	2,36	1,18	1,18	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60

Fonte: Autor (2021)

Pode-se observar que todos os resíduos apresentaram granulometria uniforme, ficando fora das zonas consideradas como ótima e utilizável segundo a NBR 7211 (ABNT, 2005). A areia de referência, que é comercialmente vendida como média, praticamente ficou dentro da zona utilizável, embora também tenha apresentado grande quantidade de partículas finas.

Como era de se esperar, devido à presença de carvão e bentonita, o módulo de finura do RAVF foi 16% menor que a areia de referência. Após o primeiro processo do tratamento através do peneiramento, o módulo de finura do RAVFT-P aumentou 15%, obviamente pela retirada de uma parcela grande de finos. No segundo processo do tratamento, onde os resíduos ficaram em um ambiente turbulento pela agitação das hélices e pela aplicação de ozônio ou ar comprimido, o módulo finura voltou a cair em relação ao RAVFT-P. Também se observou a redução da dimensão máxima de 1,18mm para 0,60 mm nos resíduos que passaram pela segunda parte do tratamento.

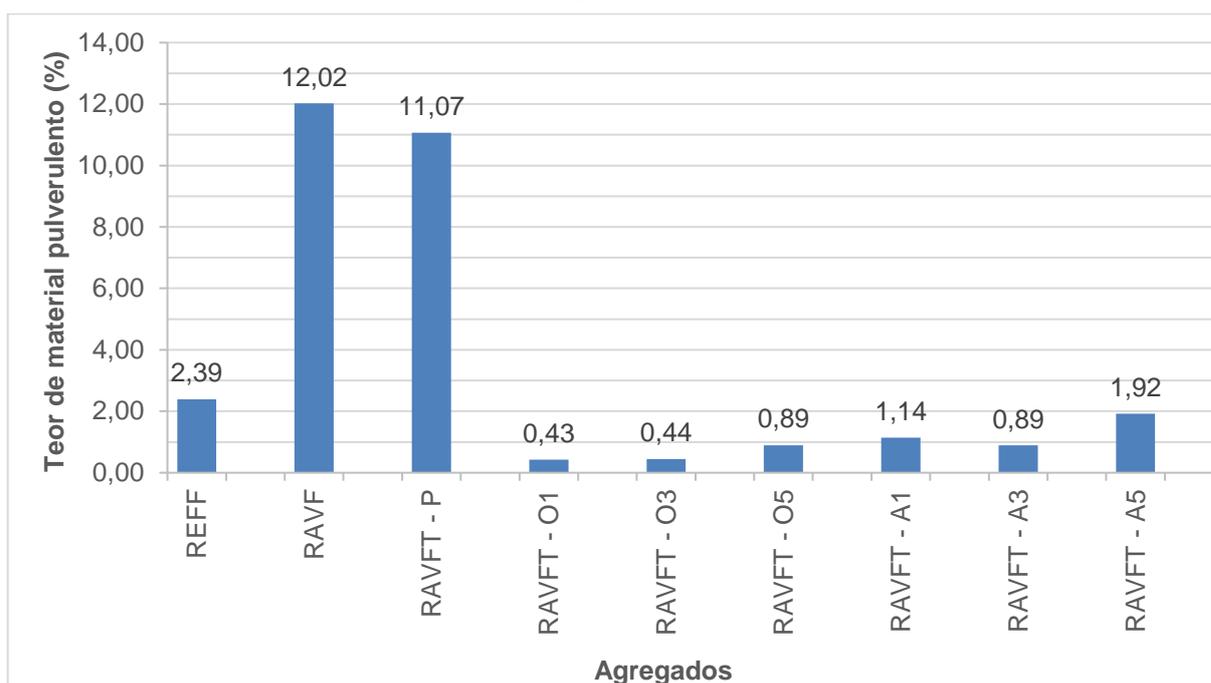
A diminuição do módulo de finura dos resíduos tratados com ozônio e ar comprimido em relação ao RAVFT-P está associada a desagregação das partículas finas aderidas aos grãos pela força de atrito que é gerada pelo tratamento.

4.1.2 Teor de material pulverulento

A determinação do teor de material pulverulento, por lavagem, conforme NBR NM 46 (ABNT, 2003), que possibilita a determinação de material mais fino que 0,075mm, por lavagem. Em geral, agregados com excesso de material pulverulento aumentam o consumo de água devido à alta superfície específica, ocasionando perda de resistências em concretos e argamassas, diminuindo sua durabilidade. Por

outro lado, até certa quantidade, o material com granulometria mais fina, pode promover um melhor empacotamento granulométrico, preenchendo os vazios, e conseqüentemente aumentando suas resistências (ANDRADE; LUIZA; CARNIN, 2018; SOUZA; MARTINI; FERREIRA, 2019). A Figura 10 apresenta os resultados do teor de material pulverulento dos agregados em estudo.

Figura 10 – Teor de material pulverulento dos agregados analisados



Fonte: Autor (2021)

É possível observar que o RAVF e o RAVFT - P apresentaram teores de material pulverulento pronunciadamente mais elevados que os demais agregados analisados. O RAVFT - P apresentou uma redução de apenas 8% de teor de material pulverulento em relação ao RAVF, mostrando que apenas com o processo de peneiramento não é possível reduzir a quantidade de finos presente no resíduo, possivelmente, pelo fato de não desagregar os grãos de areia e os finos ligados pela bentonita.

Quando o resíduo passa para a segunda parte do tratamento, os teores de material pulverulento caem até 96% quando comparado o RAVF. Na segunda parte do tratamento, quando o resíduo é colocado em meio aquoso turbulento, as partículas de carvão e bentonita se desagregam dos grãos de areia. Após o término do tempo de agitação essas partículas ficam suspensas na água e são retiradas por

sifonamento, enquanto os grãos maiores decantam para o fundo do aparelho experimental.

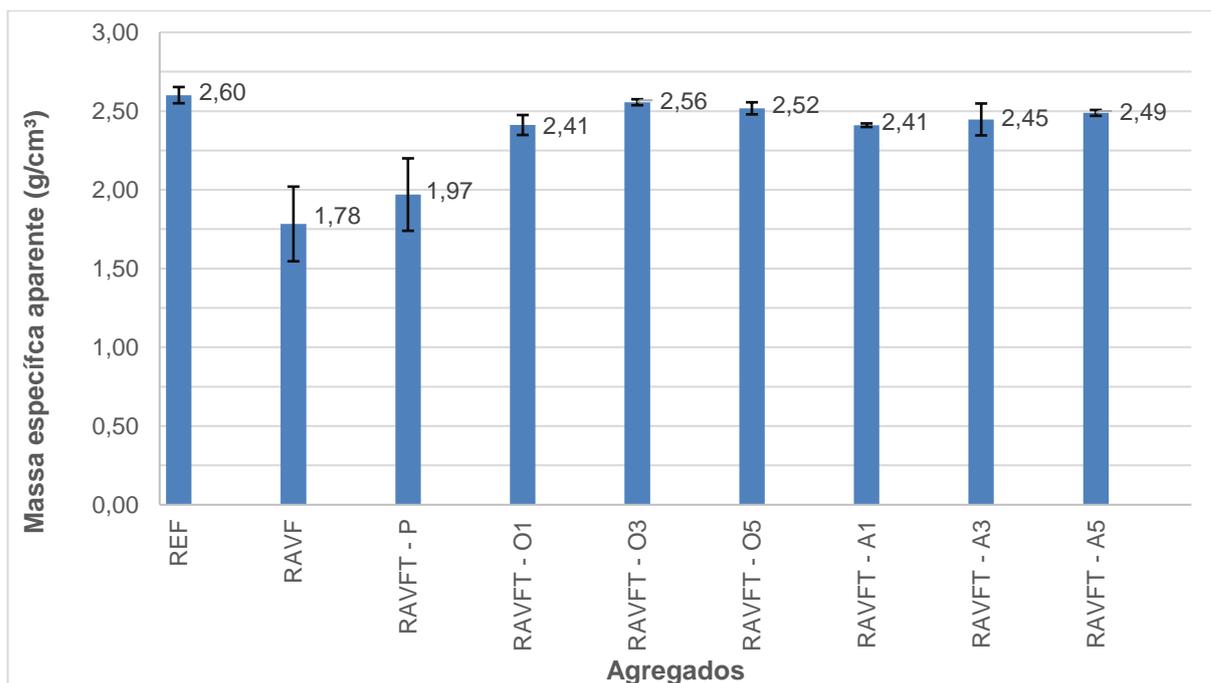
Alguns estudos com processo de tratamento similar também verificaram o teor de material pulverulento, sendo que Souza; Martini e Ferreira (2019) encontraram 16,6%; Todt *et al.* (2016) encontraram 11,27%; Andrade, Luiza e Carnin (2018) encontraram 8,70%; Coppio *et al.* (2019) encontraram 6,35% e 3,22% para dois tipos de resíduos de fundição analisados. A variabilidade dos resultados encontrados neste trabalho com os outros trabalhos citados pode estar relacionada com as diferentes técnicas de dosagem na produção da areia para os moldes em cada indústria de fundição.

A NBR 7211 (ABNT, 2005), apresenta como sendo a quantidade máxima de teor de material pulverulento de 3% para concretos submetidos a desgaste superficial e 5% para concretos protegidos de desgastes superficiais. Como visto, os resíduos, após a segunda parte do tratamento ficaram dentro dos limites estabelecidos pela NBR 7211 (ABNT, 2005).

4.1.2 Massa específica

Os resultados obtidos para a massa específica dos agregados são apresentados na Figura 11. O ensaio foi realizado em triplicata para cada resíduo e então calculado a média.

Figura 11 – Massa específica dos agregados analisados



Fonte: Autor (2021)

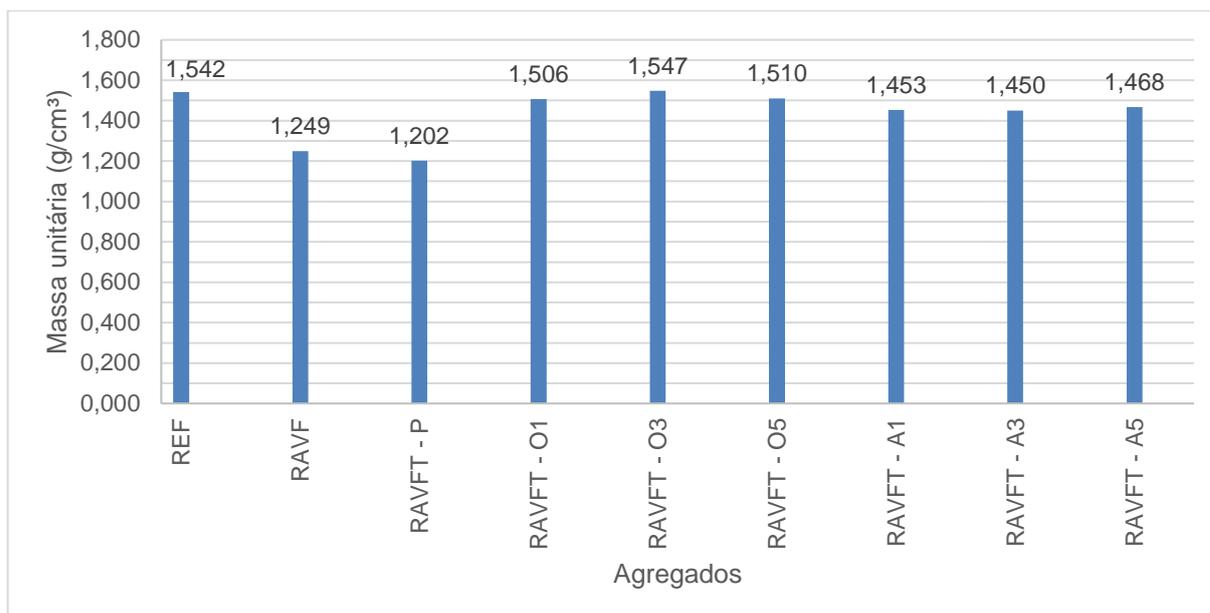
O RAVF, por não ter passado pelos processos de limpeza, apresentou massa específica menor dentre os demais agregados analisados, concordando com Beattker *et al.* (2014). À medida que acontece a remoção do particulado mais fino, pelos tratamentos, a massa específica dos agregados vai se aproximando ao da areia quartzosa, de referência. A aproximação dos resultados de massa específica dos agregados tratados em relação à areia de referência está relacionada ao grau de limpeza dos grãos do resíduo à medida que os processos são efetuados.

A massa específica encontrada em outros estudos para o resíduo da areia verde de fundição variou de 1,97 g/cm³ a 2,79 g/cm³ (BHARDWAJ; KUMAR, 2017). Essa variabilidade pode estar relacionada com a quantidade de material como bentonita, carvão, óxidos metálicos e aditivos adicionado nos processos industriais.

4.1.3 Massa unitária e volume dos vazios

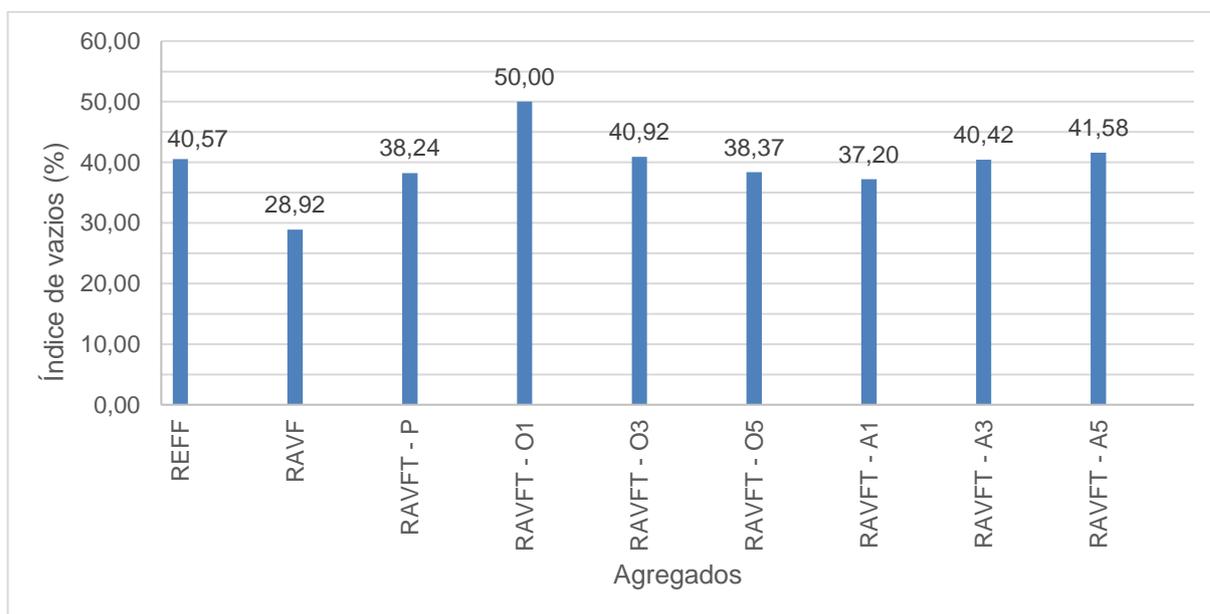
As Figura 12 e 16 mostram os resultados obtidos para a massa unitária e índice de vazios, respectivamente, dos agregados analisados.

Figura 12 – Influência do tipo de tratamento na massa unitária dos agregados analisados



Fonte: Autor (2021)

Figura 13 – Influência do tipo de tratamento no índice de vazios dos agregados analisados



Fonte: Autor (2021)

Ao analisar apenas a massa unitária dos resíduos, é possível observar que o RAVF e o RAVFT – P tiveram uma redução de massa unitária de 19% e 22%, respectivamente, em relação ao agregado de referência. Para os demais agregados, a redução da massa unitária foi de no máximo 6% (para o RAVFT – A3),

com exceção do RAFVT – O3 que teve um pequeno aumento da massa unitária de 0,3%.

Analisando o índice de vazios, o RAVF foi o que obteve o menor índice ficando 29% menor que o índice de vazios do agregado de referência. Os demais agregados também apresentaram índice de vazios até 8% menor que o agregado de referência. Apenas o RAVFT – O1 apresentou aumento do índice de vazios de 23% em relação à referência.

Apesar do RAVF ter apresentado massa unitária menor que o agregado de referência, esse resíduo também apresentou menor índice de vazios, possivelmente ocasionado pelo fato de o particulado fino ter deixado sua estrutura mais densa, ocasionando o processo de empacotamento de sua mistura. Para os resíduos tratados, pode-se observar um aumento da massa unitária, ocasionado pela retirada do carvão aderido nos grãos, e um aumento no índice de vazios, ocasionado pela diminuição do material fino presente no resíduo que preenchia os vazios, em relação ao RAVF. Com exceção do RAVFT – O1, os agregados que passaram por todo o tratamento proposto tiveram as suas massas unitárias e índices de vazios com valores próximos ao do agregado de referência.

4.1.3 Perda ao fogo

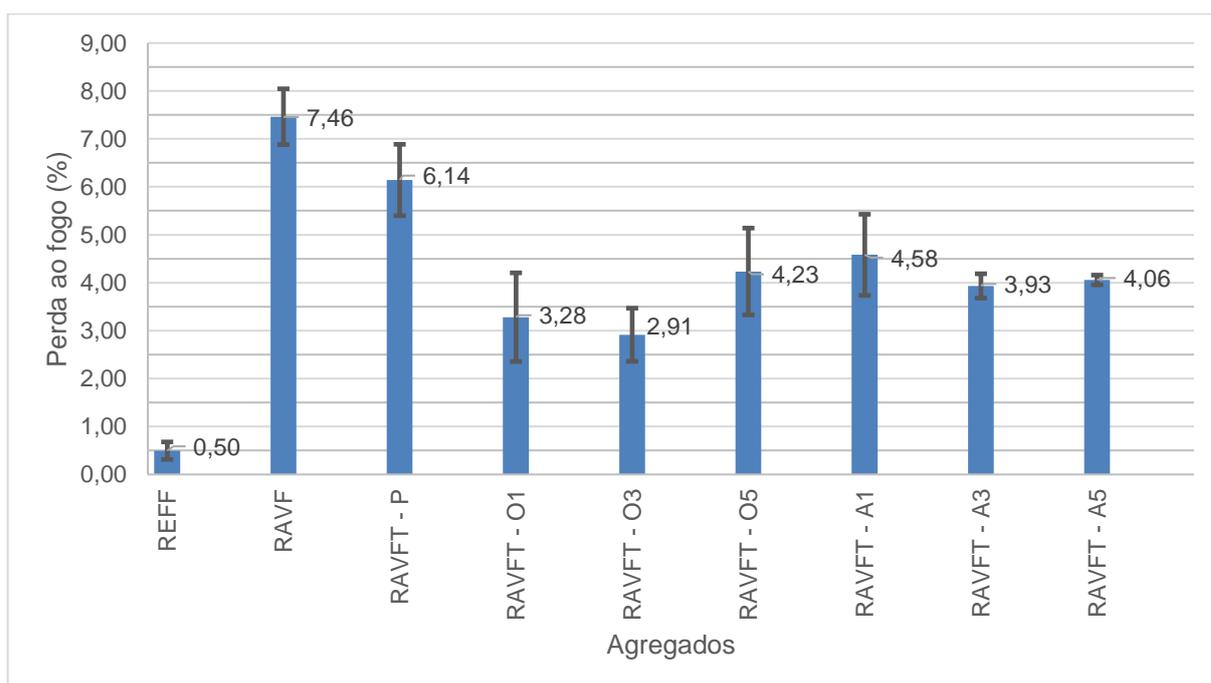
O ensaio perda ao fogo foi realizado em triplicata. Os resultados médios são apresentados na Figura 14.

O RAVF apresentou a maior perda ao fogo dentre os agregados analisados, como esperado, devido à quantidade de matéria orgânica presente, como o carvão. Após o primeiro processo de tratamento, o peneiramento, o índice medido na perda ao fogo para o RAVFT-P reduziu 18%, em relação ao RAVF. Após o tratamento completo, os resíduos tratados com ar comprimido e ozônio tiveram perda ao fogo reduzida em até 61% (RAVFT – O3) em relação ao RAVF.

Segundo Siddique e Singh (2011), a areia verde é composta de 2% a 10% de pó de carvão, sendo este o principal responsável pela perda ao fogo nas amostras analisadas. Nesse sentido, como esperado, o processo de tratamento reduziu a quantidade de carvão que recobre o RAVF. Mesmo assim, esse teor ficou acima do encontrado no agregado de referência.

A perda de massa está diretamente ligada à quantidade de impurezas orgânicas nas amostras, sendo que a NBR 7211 (ABNT, 2005) indica uma quantidade máxima para impurezas orgânicas em até 10% em relação a massa total de agregado miúdo. Essa ponderação indica que os resultados encontrados após o tratamento enquadrariam os agregados perante a norma brasileira.

Figura 14 – Perda ao fogo dos agregados analisados



Fonte: Autor (2021)

Outros estudos, apresentaram valores de perda ao fogo distintos, sendo de 1,30% no trabalho de Casali *et al.* (2017) e 5,15% para Siddique, Schutter e Noumowec (2009), ambos para o resíduo da areia de fundição. Essas variações apresentadas pela literatura e no presente estudo podem estar relacionadas à quantidade de materiais orgânicos que são inseridos na linha de produção de cada indústria.

A média de perda ao fogo dos resíduos tratados com ozônio foi de 3,47% e para os resíduos tratados com ar comprimido a média foi de 4,19%. Essa diferença pode estar relacionada com o poder de destrutivo do ozônio no material orgânico podendo atingir a completa mineralização deste, conforme indica Scheunemann, (2005) e Moravia, Lange e Amaral (2011)

4.1.4 Análise ambiental dos resíduos

Conforme já citado, as concentrações do extrato lixiviados dos agregados foram analisadas conforme metodologia apresentada pela NBR 10004 (ABNT, 2004) e NBR 15702 (ABNT, 2009) para os parâmetros de arsênio, bário, cádmio, cromo total, chumbo, mercúrio e selênio. Os resultados são mostrados na Tabela 4.

Para o parâmetro de chumbo, apenas o RAVFT – A5 apresentou valor acima do permitido pela NBR 15702 (ABNT, 2009). Acredita-se que esse valor representa um ponto fora da normalidade, visto que os resultados dos demais resíduos ficaram bem inferiores e dentro do limite máximo.

Segundo o limite da NBR 15702 (ABNT, 2009) todos os resíduos da areia de fundição, com exceção do RAVFT – A5 para o parâmetro de chumbo total, poderiam ser utilizados como matéria-prima em concreto asfáltico e também para cobertura diária em aterro sanitário, para as concentrações do extrato lixiviado. E, segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004), todos os resíduos foram classificados como resíduos não perigosos (classe II), ficando abaixo dos limites estabelecidos para esta norma, para estes parâmetros.

Tabela 4 – Análises dos parâmetros do extrato lixiviado dos agregados analisados

Parâmetro	Resultados (mg/L)						
	REF	RAVF	RAVFT - P	RAVFT - O5	RAVFT - A5	C.M.*	L.Q.*
Arsênio total	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,50	0,010
Bário Total	< 0,7	1,071	1,051	3,299	2,080	10,00	0,700
Cádmio Total	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,10	0,010
Chumbo total	0,027	0,014	0,011	0,179	0,721	0,50	0,010
Cromo total	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	0,50	0,050
Mercúrio total	< 1 x 10 ⁻³	1,18 x 10 ⁻³	1,26 x 10 ⁻³	1,59 x 10 ⁻³	< 1,00 x 10 ⁻³	20 x 10 ⁻³	1 x 10 ⁻³
Selênio total	< 0,01	0,016	0,012	< 0,01	< 0,01	0,10	0,010

*C.M. – Concentração máxima no extrato lixiviado da NBR 15702 (ABNT, 2009)

*L.Q. – Limite de quantificação

Fonte: Autor (2021)

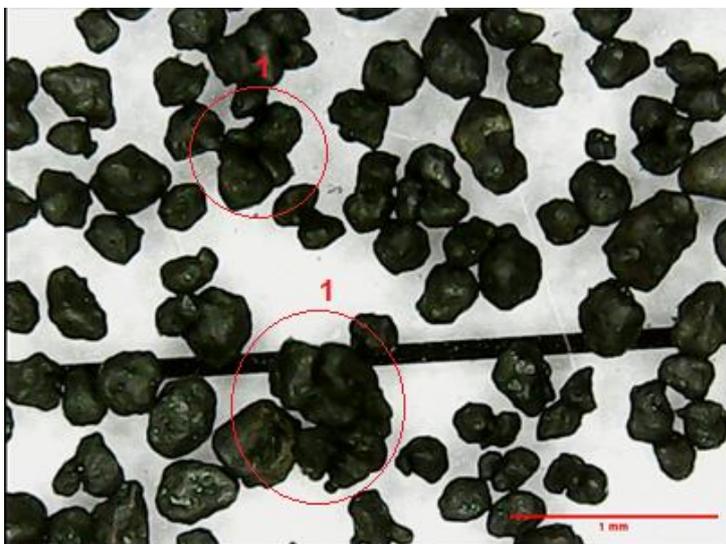
4.1.5 Microscopia digital

Foi realizada uma avaliação visual da textura dos resíduos tratados e não tratados, com o objetivo de ilustrar a agregação de resíduos nas partículas dos resíduos. Foram analisados o RAVF, RAVFT – A1 e o RAVFT – O1. As Figura 15 a 20 as imagens obtidas.

É possível observar que no resíduo sem tratamento, o RAVF, as partículas de areias estão completamente envoltas por uma camada de carvão, o que pode ser identificado pela sua tonalidade escura. Outro aspecto que se pode observar no RAVF é que as partículas da areia estão unidas entre si pela aglutinação produzida pela bentonita.

Para as amostras que passaram pelo tratamento proposto, RAVFT – A1 e RAVFT – O1, são observadas reduções da tonalidade escura nas partículas de areia, devido à redução de carvão na amostra. Em comparação com o RAVF, os resíduos tratados apresentaram a quebra da união que sustentava a ligação entre os grãos apresentando diversas partículas com o diâmetro muito pequeno.

Figura 15 – Imagem do RAVF em microscópio digital



1 – Diversos grãos de areia aglomerado uns aos outros pela ligação de bentonita, encobertos por uma fina camada de carvão

Fonte: Autor (2021)

Figura 16 – Imagem do RAVFT – A1 em microscópio digital

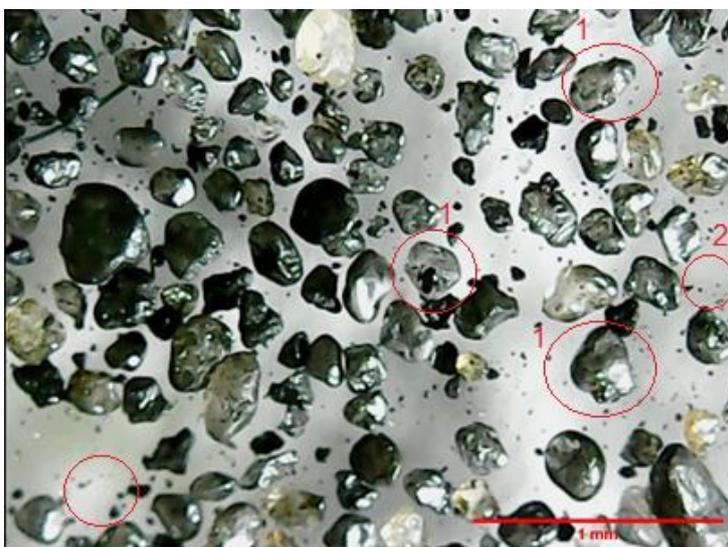


1 – Grãos de areia soltos e com tonalidade clara, sem a camada de carvão

2 – Partículas com diâmetro pequeno

Fonte: Autor (2021)

Figura 17 – Imagem RAVFT – O1 em microscópio digital



1 – Grãos de areia soltos e com tonalidade clara, sem a camada de carvão

2 – Partículas com diâmetro pequeno

Fonte: Autor (2021)

4.2 Caracterização das argamassas no estado fresco

Para estudar o efeito dos resíduos com os diferentes tipos de tratamento em matrizes cimentícias, realizou-se a confecção de argamassas, que foram

comparadas com o agregado de referência. A Tabela 5 mostra os traços utilizados, assim como a quantidade de superplastificante e a consistência medida.

Pode-se observar que as argamassas com RAVF e RAVFT – P com taxa de substituição de 60% não alcançaram a consistência desejada de 200 ± 10 mm com a quantidade máxima de aditivo superplastificante pré-estabelecida de 1% em relação à massa de cimento. Com o aumento da quantidade de resíduo, as argamassas ficaram com aspecto mais seco, sendo necessário mais aditivo superplastificante para manter a mesma consistência.

Agregados com teor de finos mais elevado exigem mais superplastificante (ou água) na argamassa a fim de alcançar o espalhamento estipulado. Resultados mostram o aumento da quantidade de superplastificante com o aumento de resíduo incorporado. A argamassa com o RAVFT – P, por ter passado por um processo de peneiramento e conter menos finos que o RAVF em sua composição, utilizou menos superplastificante que a argamassa com o RAVF para atingir a consistência desejada nas taxas de substituição de 20% e 40%.

Por sua vez, as argamassas com os resíduos tratados com ozônio e ar comprimido também utilizaram menos superplastificante que as demais argamassas, uma vez que esses agregados apresentaram menos partículas finas, considerando-se os resultados obtidos para o teor de material pulverulento e para o módulo de finura, comparativamente ao RAVF e o RAVFT – P. Porém, mesmo que os resíduos tratados com ozônio e ar comprimido tenham ficado com valores de módulo de finura e teor de material pulverulento menores que a areia de referência, as argamassas confeccionadas com o resíduo tratado precisaram de aditivo para atingir a consistência desejada, enquanto a argamassa de referência não. Isso pode ter sido ocasionado devido aos grãos, mesmo depois do tratamento, ainda estarem envoltos por uma camada de carvão, tendo-se, ainda, alguns grãos aglutinados, conforme Figura 16 e 20, o que sugere que ainda tenha bentonita fazendo a ligação entre os grãos.

Tabela 5 – Descrição dos traços das argamassas

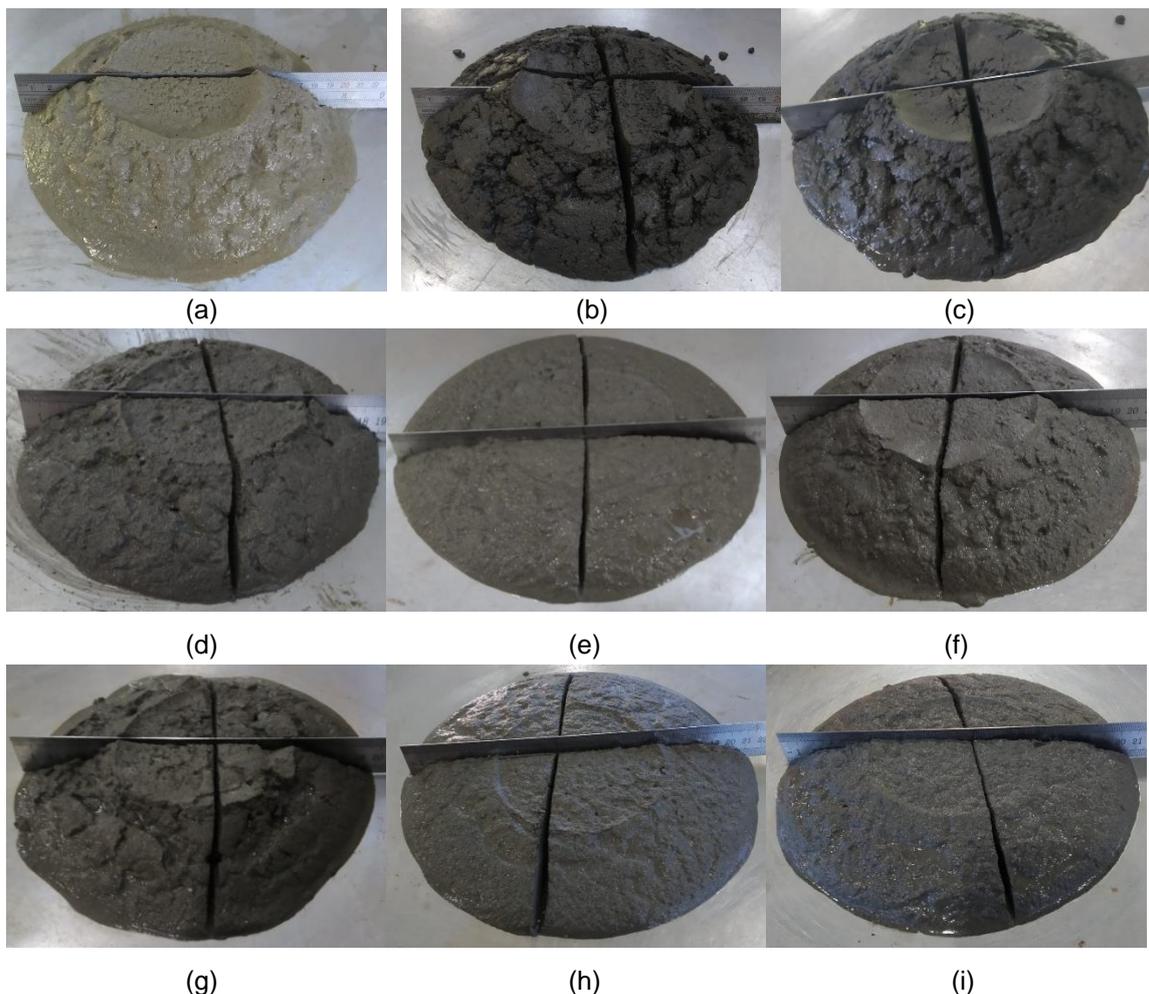
Agregado	Taxa de substituição (%)	Traço	a/c	Superplastificante (%) *	Consistência (mm)
REF	0	1:3	0,45	0	200
RAVF	20	1:3	0,45	0,42	190
	40	1:3	0,45	1,00	200
	60	1:3	0,45	1,00	165
RAVFT - P	20	1:3	0,45	0,31	210
	40	1:3	0,45	0,73	200
	60	1:3	0,45	1,00	165
RAVFT - O1	20	1:3	0,45	0,42	190
	40	1:3	0,45	0,52	190
	60	1:3	0,45	0,83	200
RAVFT – O3	20	1:3	0,45	0,42	210
	40	1:3	0,45	0,49	210
	60	1:3	0,45	0,74	205
RAVFT – O5	20	1:3	0,45	0,37	200
	40	1:3	0,45	0,42	200
	60	1:3	0,45	0,63	195
RAVFT - A1	20	1:3	0,45	0,10	195
	40	1:3	0,45	0,24	200
	60	1:3	0,45	0,56	210
RAVFT – A3	20	1:3	0,45	0,35	210
	40	1:3	0,45	0,70	210
	60	1:3	0,45	0,93	210
RAVFT – A5	20	1:3	0,45	0,31	205
	40	1:3	0,45	0,42	210
	60	1:3	0,45	0,57	200

* % em relação à massa de cimento

Fonte: Autor (2021)

A Figura 18 mostra os aspectos das argamassas no estado fresco durante o ensaio de consistência. Como esperado, as argamassas com o resíduo tiveram uma coloração mais escura, quando comparadas com a argamassa de referência. Sendo que a argamassa com o RAVF ficou com sua aparência visual mais escura que as demais argamassas devido a quantidade de carvão presente neste resíduo.

Figura 18 – Aspectos das argamassas no estado fresco



(a) REF; (b) RAVF /40%; (c) RAVFT – P/40%; (d) RAVFT – O1/40%; (e) RAVFT – O3/40%; (f) RAVFT – O5/40%; (g) RAVFT – A1/40%; (h) RAVFT – A3/40%; (i) RAVFT – A5/40%;

Fonte: Autor (2021)

4.3 Caracterização das argamassas no estado endurecido

As argamassas foram analisadas no estado endurecido aos 28 dias em relação a resistência à compressão, à tração na flexão e à absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica.

4.3.1 Resistência à compressão

Nas Figura 19 a 25 são apresentadas as resistências médias à compressão das argamassas aos 28 dias de idade.

Observa-se que a máxima resistência obtida foi para a argamassa com o RAVF com 20% de substituição, com acréscimo da resistência à compressão de 47% em relação à argamassa de referência. Para taxas de substituição maiores que 20%, a resistência caiu até 56% em relação à argamassa de referência (substituição de 60%).

Comportamentos similar pode ser observados em Manoharan *et al.* (2018), na qual observaram um aumento da resistência para taxas de substituição de até 20%. Segundo Siddique, Schutter e Noumowe (2009), o aumento da resistência à compressão é devido ao fato que a areia de fundição possuir grãos mais finos que areia de referência, fazendo que esses finos preencham os vazios e tornando a matriz mais densa.

Prabhu, Hyun e Kim (2014) também observaram uma queda significativa de resistência à compressão para teores de substituição maiores que 20%. A partir de um aumento maior na taxa de substituição, a redução da resistência à compressão pode estar ligada ao aumento das partículas finas e, conseqüentemente, ao aumento da área superficial dos agregados ocasionando um aumento na necessidade de água na matriz fazendo com que essa ligação não ocorra adequadamente (MANOHARAN *et al.*, 2018).

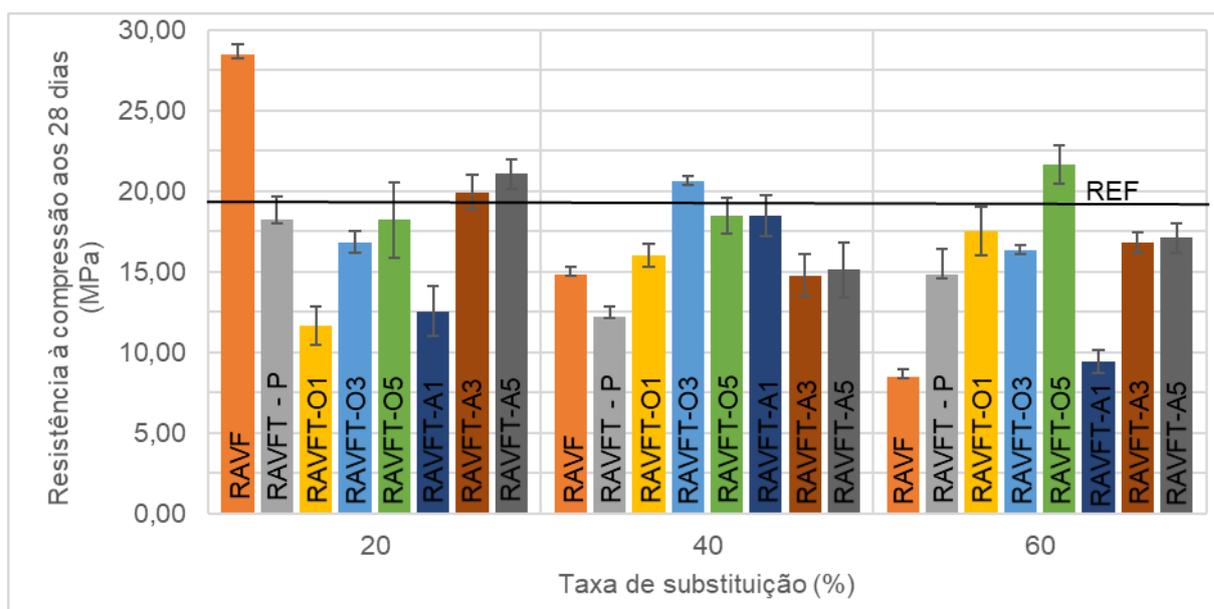
Para a argamassa com RAVFT – P, na qual o resíduo passou pelo processo de peneiramento, os valores de resistência à compressão foram de 5%, 37% e 23% menores do que a argamassa de referência para as taxas de substituições de 20%, 40% e 60%, respectivamente.

Nas argamassas com resíduo tratado com ozônio a maior resistência à compressão foi obtida com a argamassa com RAVFT – O5 e com 60% de substituição, no qual obteve um acréscimo na resistência à compressão de 12% em relação à argamassa de referência. Para as argamassas com o resíduo tratado com ar comprimido, a maior resistência à compressão foi obtida com a argamassa com o RAVFT – A5 e com 20% de substituição, no qual o acréscimo de resistência à compressão foi de 9% em relação à argamassa de referência. Para os dois tipos de tratamento, com ozônio e ar comprimido, os resultados variaram para as diferentes taxas de substituições.

A argamassa com o RAVFT – O5 não demonstrou grande alteração na resistência à compressão com a substituição do resíduo, sendo a única com

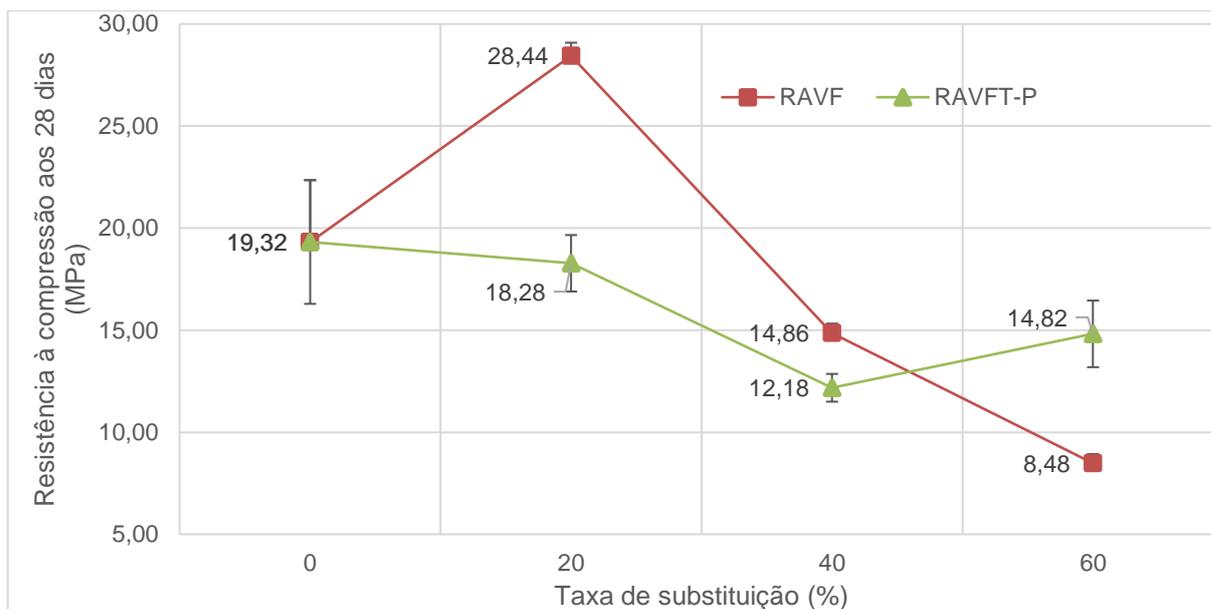
resistência à compressão incrementada para o nível de substituição de 60%. Uma maior substituição do agregado miúdo pelo resíduo tratado pode estar relacionada à retirada do excesso do material fino presente no RAVF, como apresentado nos resultados de teor material pulverulento, e também pela redução do material orgânica presente no RAVF, como mostrado nos resultados de perda ao fogo.

Figura 19 – Influência do tipo de tratamento na resistência à compressão aos 28 dias das argamassas estudadas



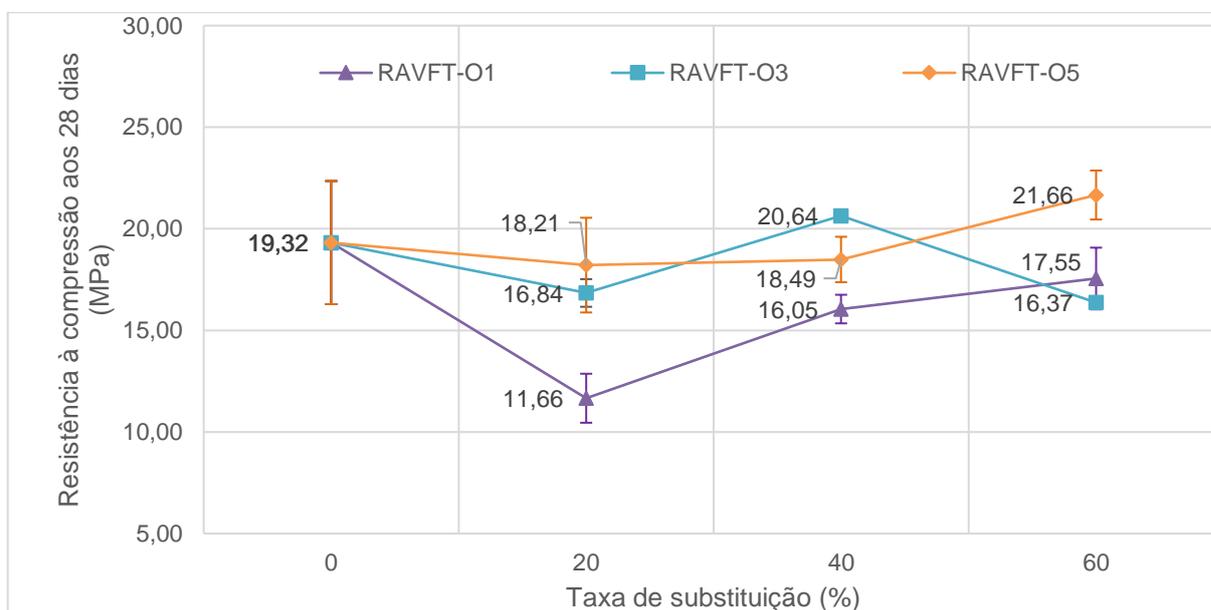
Fonte: Autor (2021)

Figura 20 – Resistência à compressão das argamassas com RAVF e RAVFT - P



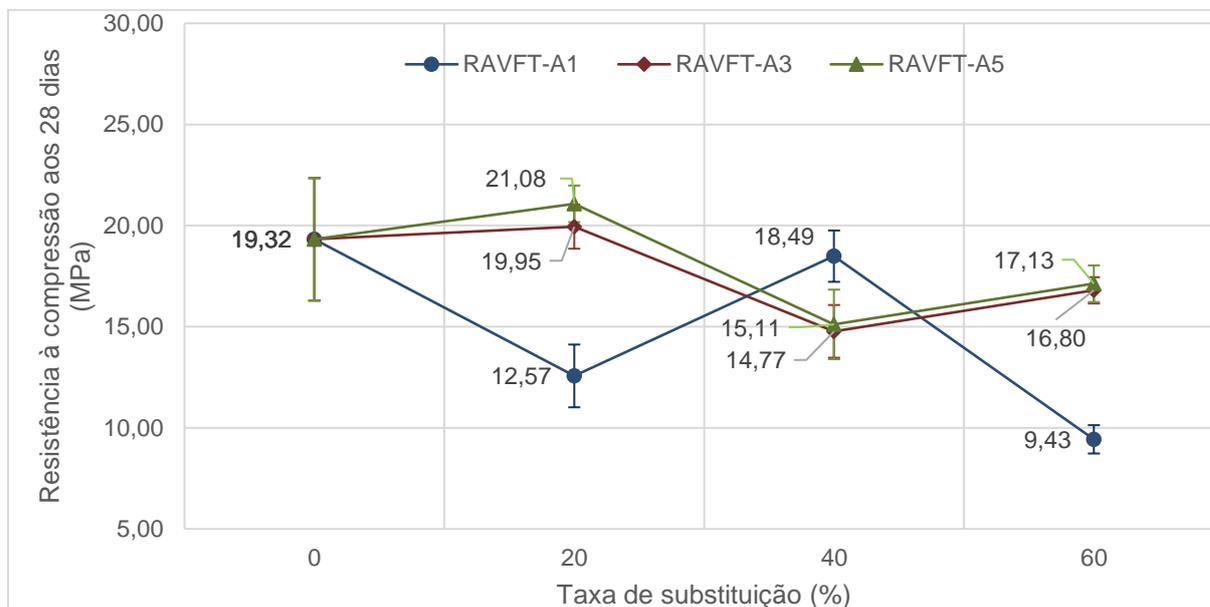
Fonte: Autor (2021)

Figura 21 - Resistência à compressão das argamassas com RAVFT – O1, RAVFT – O3 e RAVFT – O5



Fonte: Autor (2021)

Figura 22 - Resistência à compressão das argamassas com RAVFT – A1, RAVFT – A3 e RAVFT – A5



Fonte: Autor (2021)

As Tabelas 6 a 9 mostram a análise de variância correlacionando a resistência à compressão com a taxa de substituição, tipo de tratamento e tempo de tratamento utilizado. Com o nível de significância de 95% pode-se afirmar que há evidências de que taxa de substituição e tempo de tratamento são variáveis que interferem na resistência à compressão das argamassas analisadas e que o tipo de tratamento não interferiu nas resistências à compressão.

Tabela 6 – ANOVA: Resistência à compressão x taxa de substituição

Source	DF	SS	MS	F	P
Taxa de substituição (%)	3	182,8	60,9	3,59	0,016
Error	97	1647,4	17		
Total	100	1830,3			

S=4,121 R-Sq= 9,99% R-Sq (adj) = 7,21 %

Fonte: Autor (2021)

Tabela 7 - ANOVA: Resistência à compressão x tipo de tratamento

Source	DF	SS	MS	F	P
Tipo de tratamento	3	88,3	29,4	1,64	0,185
Error	97	1742	18		
Total	100	1830,3			

S=4,238 R-Sq= 4,82% R-Sq (adj) = 1,88 %

Fonte: Autor (2021)

Tabela 8 - ANOVA: Resistência à compressão x tempo de tratamento

Source	DF	SS	MS	F	P
Tempo de tratamento (h)	3	250,3	83,4	5,12	0,002
Error	97	1579,9	16,3		
Total	100	1830,3			

S=4,036 R-Sq= 13,68% R-Sq (adj) = 11,01%

Fonte: Autor (2021)

As Tabelas 9 a 12, apresentam a análise pelo método de Tukey, sendo possível observar que as argamassas pertencem ao mesmo grupo quando analisadas as variáveis taxa de substituição e tipo de tratamento, ou seja, não há diferença significativa entre elas quando se avalia a resistência à compressão das argamassas.

Para a variável tempo de tratamento, a análise Tukey mostrou que existe uma diferença significativa nos tempos utilizados, sendo que o tempo de tratamento de 5 e 3 horas pertencem ao mesmo grupo (grupo A), com a resistência à compressão das argamassas maior, e para o tempo de tratamento de 1 hora pertence a outro grupo (grupo B), com resistência à compressão inferior ao grupo A. O tempo de tratamento de 0 hora ficou entre os dois grupos, podendo pertencer tanto ao grupo A quanto ao grupo B.

Tabela 9 – Informação de grupo usando método de Tukey para a resistência à compressão x taxa de substituição

Taxa de substituição (%)	n	Média	Grupo
0	4	19,32	A
20	32	18,38	A
40	32	16,45	A
60	32	15,28	A

Fonte: Autor (2021)

Tabela 10 - Informação de grupo usando método de Tukey para a resistência à compressão x tipo de tratamento

Tipo de tratamento	n	Média	Grupo
Nenhum	16	17,77	A
Ozônio	37	17,58	A
Ar comprimido	36	16,15	A
Peneiramento	12	15,09	A

Fonte: Autor (2021)

Tabela 11 - Informação de grupo usando método de Tukey para a resistência à compressão x tempo de tratamento

Tempo de tratamento (h)	n	Média	Grupo
5	24	18,613	A
3	25	17,683	A
0	28	16,625	A B
1	24	14,291	B

Fonte: Autor (2021)

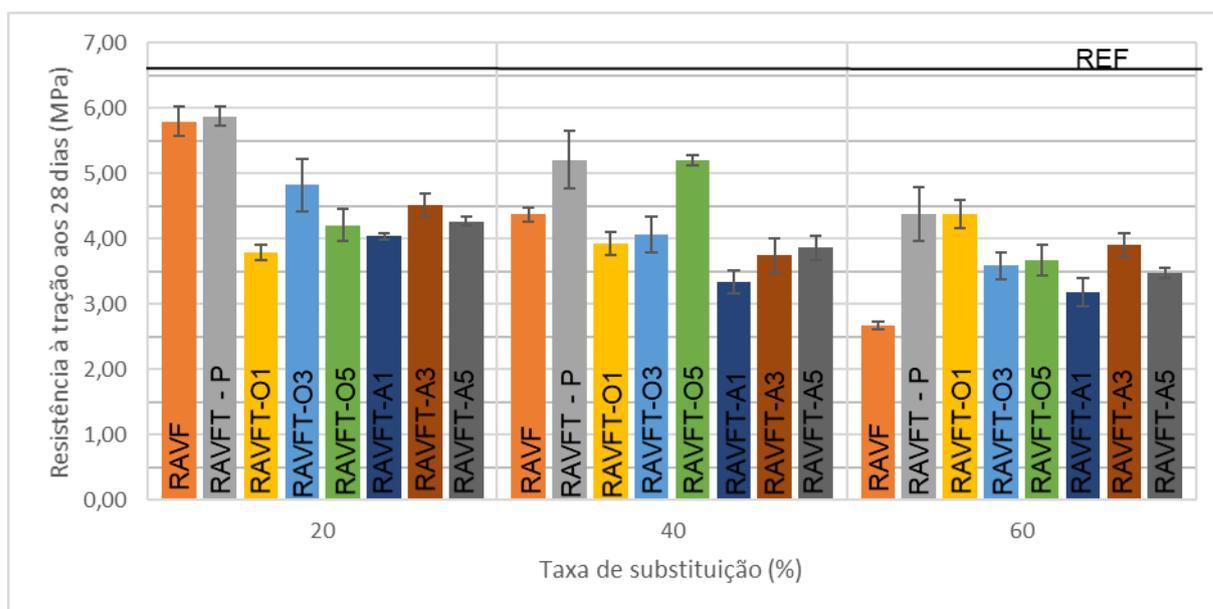
4.3.2 Resistência à tração na flexão

As resistências à tração na flexão das argamassas aos 28 dias são apresentadas nas

Figura 23 a 29. Para todas houve, queda na resistência à tração na flexão, quando comparada com o valor de referência sendo o pior desempenho observado na argamassa com o RAVF para a taxa de substituição de 60%, cuja queda de resistência à tração na flexão foi de 59%, em relação à argamassa de referência.

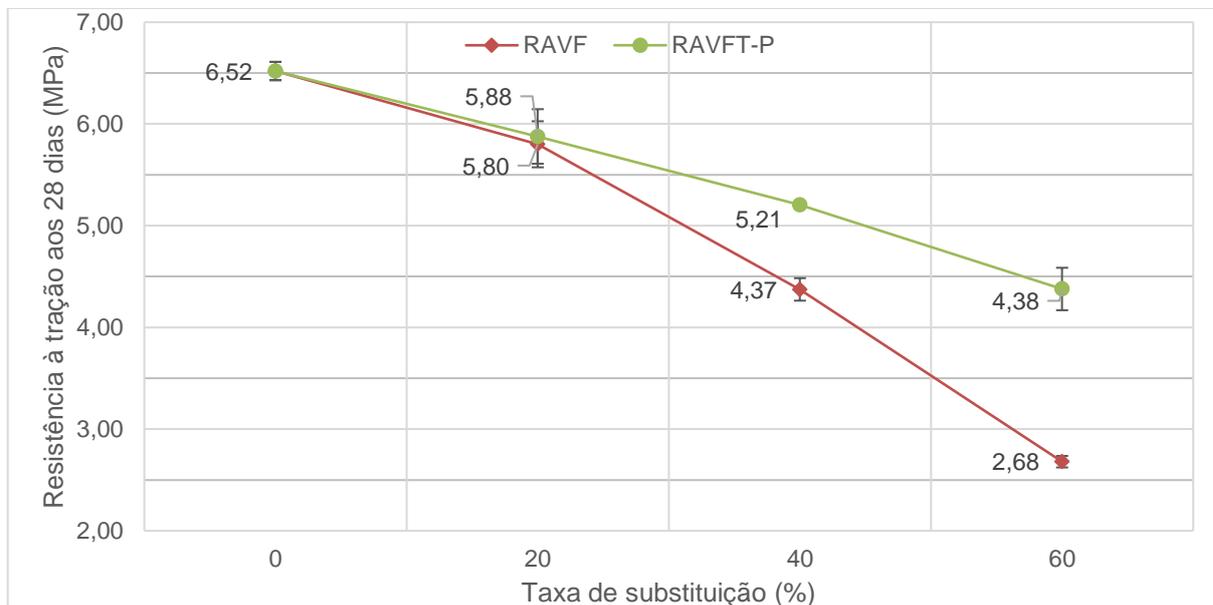
A redução da resistência à tração na flexão pela substituição da areia natural pelo resíduo de fundição também foi observada em alguns estudos (BASAR; DEVECI, 2012; CASALI *et al.*, 2017; PRABHU; HYUN; KIM, 2014). Como nos trabalhos citados, era esperado que as resistências à tração na flexão tivessem um comportamento similar a resistência à compressão, porém, não foi o que aconteceu com as argamassas analisadas.

Figura 23 – Resistência à tração na flexão aos 28 dias das argamassas estudadas



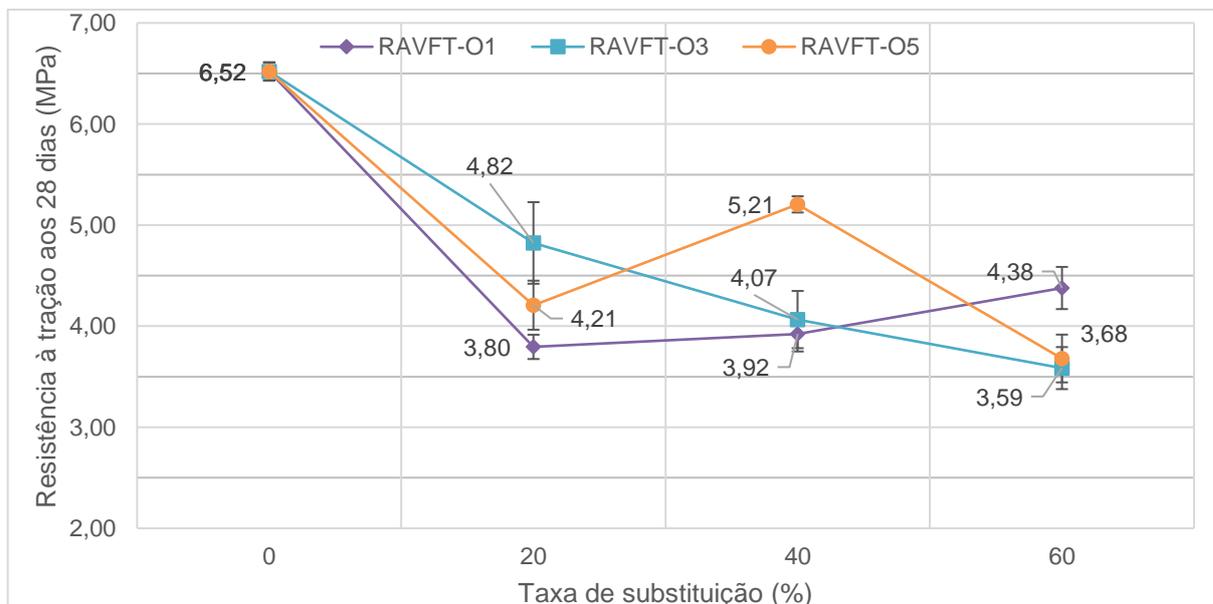
Fonte: Autor (2021)

Figura 24 - Resistência à tração na flexão das argamassas com RAVF e RAVFT – P



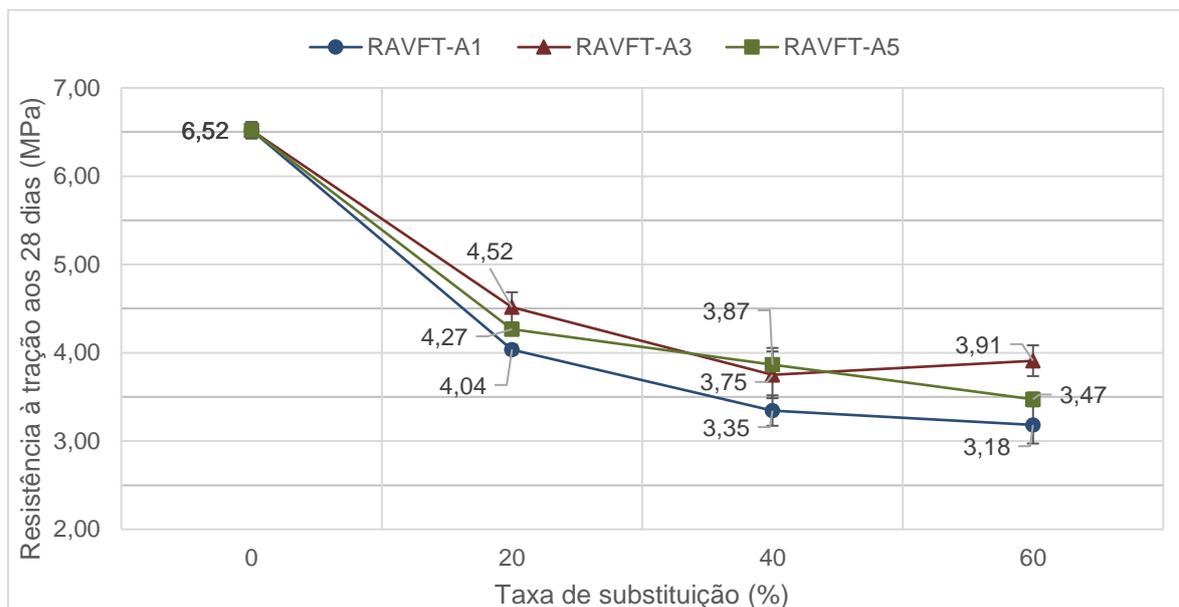
Fonte: Autor (2021)

Figura 25 - Resistência à tração na flexão das argamassas com RAVFT – O1, RAVFT – O3 e RAVFT – O5



Fonte: Autor (2021)

Figura 26 - Resistência à tração na flexão das argamassas com RAVFT – A1, RAVFT – A3 e RAVFT – A5



Fonte: Autor (2021)

As Tabelas 12 a 15 mostram a análise de variância correlacionando a resistência à tração na flexão com a taxa de substituição, o tipo de tratamento e tempo de tratamento utilizada. Com o nível de significância de 95% podemos afirmar que há evidências de que taxa de substituição, tipo de tratamento e tempo de tratamento são as variáveis que interferem na resistência à tração na flexão das argamassas analisadas.

Tabela 12 - ANOVA: Resistência à tração na flexão x taxa de substituição

Source	DF	SS	MS	F	P
Taxa de substituição (%)	3	39,672	13,224	37,67	0,000
Error	97	34,054	0,351		
Total	100	73,725			

S=0,5925 R-Sq= 53,81% R-Sq (adj) = 52,38%

Fonte: Autor (2021)

Tabela 13 - ANOVA: Resistência à tração na flexão x tipo de tratamento

Source	DF	SS	MS	F	P
Tipo de tratamento	3	24,62	8,207	16,21	0,000
Error	97	49,106	0,506		
Total	100	73,725			
S=0,7115 R-Sq= 33,39% R-Sq (adj) = 31,33%					

Fonte: Autor (2021)

Tabela 14 - ANOVA: Resistência à tração na flexão x tempo de tratamento

Source	DF	SS	MS	F	P
Tempo de tratamento (h)	3	24,675	8,225	16,27	0,000
Error	97	49,05	0,506		
Total	100	73,725			
S = 0,7111 R-Sq = 33,47% R-Sq(adj) = 31,41%					

Fonte: Autor (2021)

Analisando as Tabela 15 a 18, utilizando o método de Tukey, com nível de confiança de 95%, é possível observar que há diferenças significativa entre as médias das argamassas quando comparado a resistência à tração na flexão com a taxa de substituição, tipo de tratamento e tempo de tratamento. Sendo que as médias seguidas pela mesma letra, na coluna de grupo, não se diferenciam estatisticamente, a 5% de probabilidade

Tabela 15 - Informação de grupo usando método de Tukey para a resistência à tração na flexão x taxa de substituição

Taxa de substituição (%)	n	Média (MPa)	Grupo
0	4	6,52	A
20	32	4,62	B
40	32	3,95	C
60	32	3,63	C

Fonte: Autor (2021)

Tabela 16 - Informação de grupo usando método de Tukey para a resistência à tração na flexão x tipo de tratamento

Tipo de tratamento	n	Média	Grupo
Nenhum	16	5,0381	A
Peneiramento	12	4,8133	A
Ozônio	37	3,9632	B
Ar comprimido	36	3,7611	B

Fonte: Autor (2021)

Tabela 17 - Informação de grupo usando método de Tukey para a resistência à tração na flexão x tempo de tratamento

Tempo de tratamento (h)	n	Média	Grupo
0	28	4,9418	A
3	25	4,0124	B
5	24	3,8658	B
1	24	3,7063	B

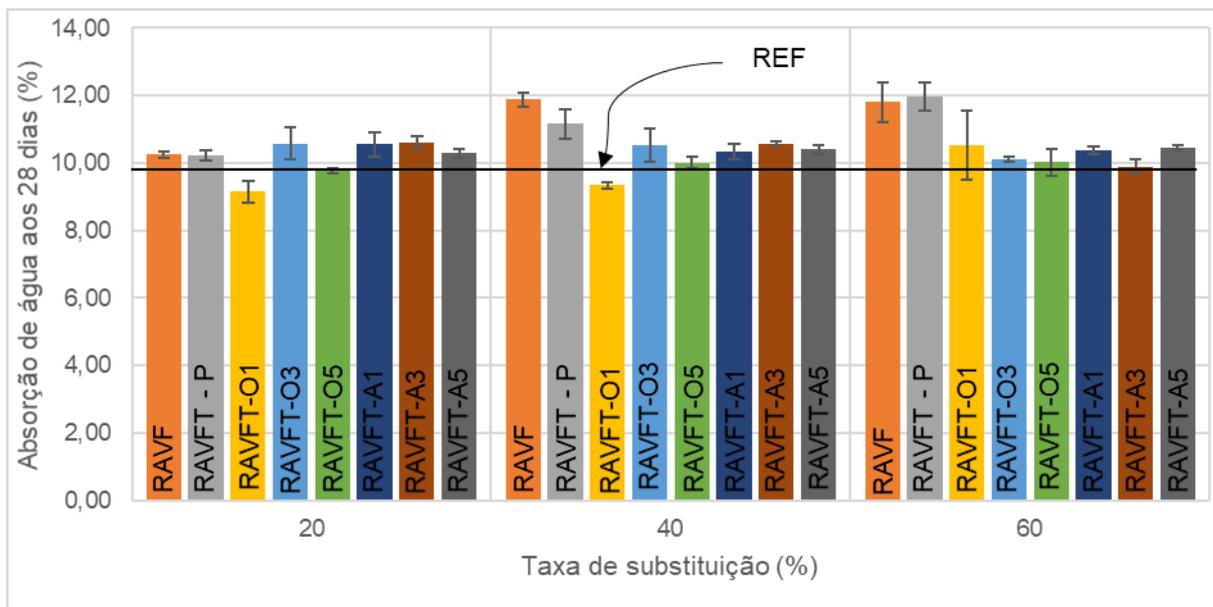
Fonte: Autor (2021)

4.3.2 Absorção de água

Nas Figura 27 a 33 são apresentados os valores encontrados para o ensaio de absorção de água por imersão.

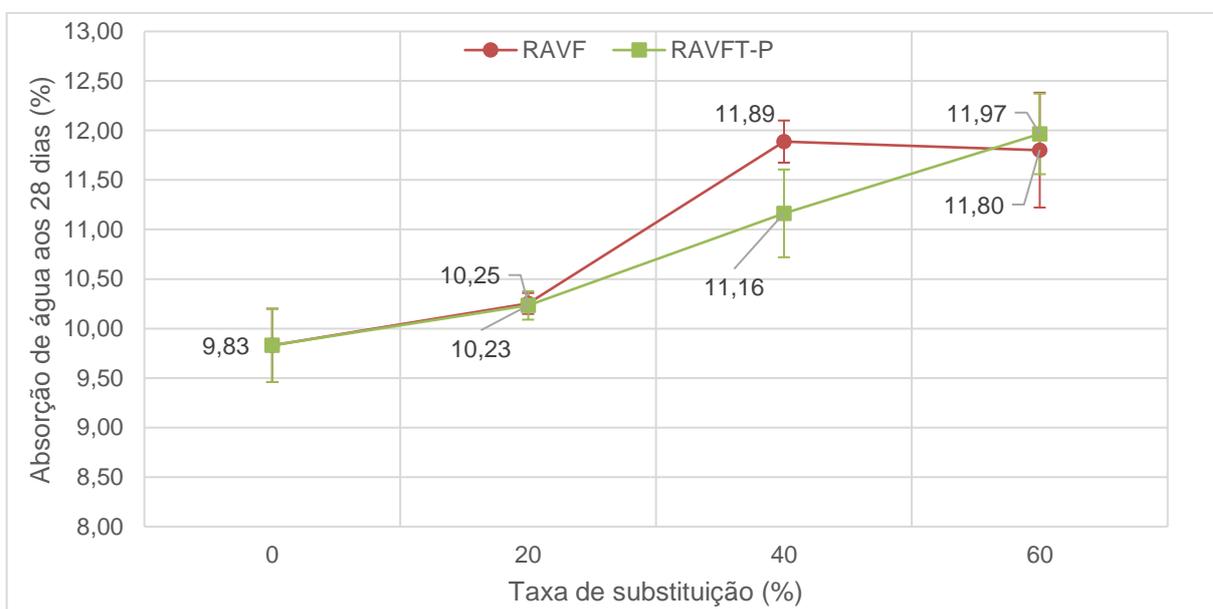
É possível observar que para as argamassas contendo RAVF e o RAVFT – P o aumento da taxa de substituição ocasionou um aumento gradativo na absorção de água. Resultados similares foram encontrados por Gurumoorthy e Arunachalam (2019); Khatib, Herki e Kenai (2013); Basar e Deveci (2012). Porém, era esperado que a absorção da argamassa com RAVF com 20% de substituição tivesse índice de vazios menores que a argamassa de referência, uma vez que o acréscimo observado para esta argamassa foi relacionado com a solidificação da matriz. Para as demais argamassas, o aumento da taxa de substituição não ocasionou necessariamente um aumento na absorção de água.

Figura 27 – Absorção de água por imersão das argamassas estudadas



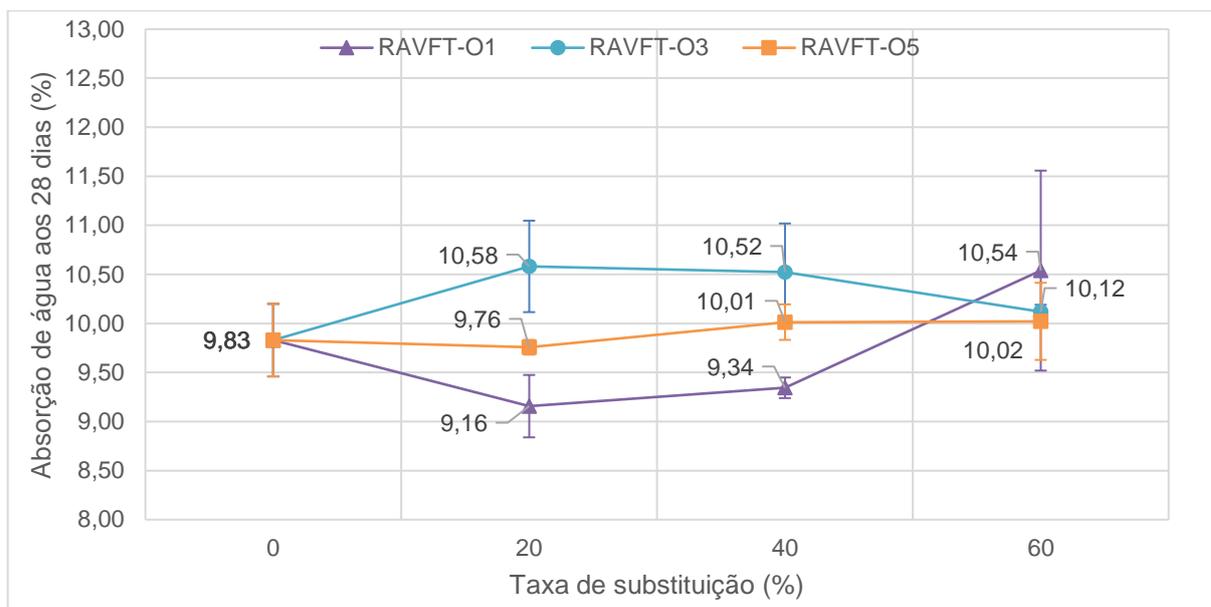
Fonte: Autor (2021)

Figura 28 – Absorção de água das argamassas com RAVF e RAVFT - P



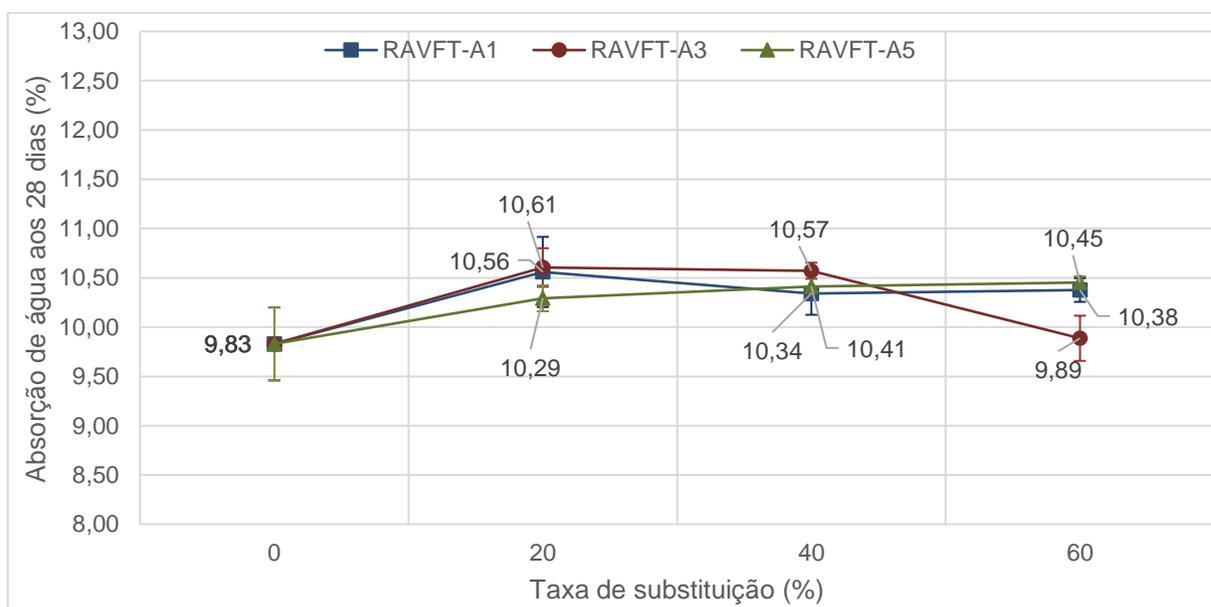
Fonte: Autor (2021)

Figura 29 - Absorção de água das argamassas com RAVFT – O1, RAVFT – O3 e RAVFT – O5



Fonte: Autor (2021)

Figura 30 - Absorção de água das argamassas com RAVFT – A1, RAVFT – A3 e RAVFT – A5



Fonte: Autor (2021)

As Tabelas 18 a 21 mostram a análise de variância correlacionando a absorção de água por imersão com a taxa de substituição, tipo de tratamento e tempo de tratamento utilizada. Com o nível de significância de 95% pode-se afirmar que há evidências de que o tipo de tratamento e tempo de tratamento são as variáveis que

interferem na absorção de água das argamassas analisadas, enquanto a variável taxa de substituição não interfere na absorção de água.

Tabela 18 - ANOVA: Absorção de água (%) x taxa de substituição

Source	DF	SS	MS	F	P
Taxa de substituição (%)	3	3,937	1,312	2,64	0,056
Error	70	34,85	0,498		
Total	73	38787			

S=0,7056 R-Sq= 10,15% R-Sq (adj) = 6,30%

Fonte: Autor (2021)

Tabela 19 - ANOVA: Absorção de água (%) x tipo de tratamento

Source	DF	SS	MS	F	P
Tipo de tratamento	3	12,406	4,135	10,970	0,000
Error	70	26,382	0,377		
Total	73	38,787			

S=0,6139 R-Sq= 31,98% R-Sq (adj) = 29,07%

Fonte: Autor (2021)

Tabela 20 - ANOVA: Absorção de água (%) x tempo de tratamento

Source	DF	SS	MS	F	P
Tempo de tratamento (h)	3	11,028	3,676	9,27	0,000
Error	70	27,76	0,397		
Total	73	38,787			

S=0,6297 R-Sq= 28,43% R-Sq (adj) = 25,36%

Fonte: Autor (2021)

Analisando as Tabela 21 a 24, utilizando o método de Tukey, com nível de confiança de 95%, é possível observar que há diferenças significativa entre as médias das argamassas quando comparado a absorção de água com o tipo de

tratamento e tempo de tratamento, enquanto para a variável taxa de substituição não houve diferença significativa entre as médias. Sendo que as médias seguidas pela mesma letra, na coluna de grupo, não se diferenciam estatisticamente, a 5% de probabilidade

Tabela 21 - Informação de grupo usando método de Tukey para a absorção de água x taxa de substituição

Taxa de substituição (%)	n	Média (%)	Grupo
60	22	10,60	A
40	24	10,53	A
20	25	10,14	A
0	3	9,83	A

Fonte: Autor (2021)

Tabela 22 - Informação de grupo usando método de Tukey para a absorção de água x tipo de tratamento

Tipo de tratamento	n	Média (%)	Grupo
Peneiramento	9	11,12	A
Nenhum	11	10,87	A B
Ar comprimido	27	10,39	B C
Ozônio	27	9,95	C

Fonte: Autor (2021)

Tabela 23 - Informação de grupo usando método de Tukey para a absorção de água x tempo de tratamento

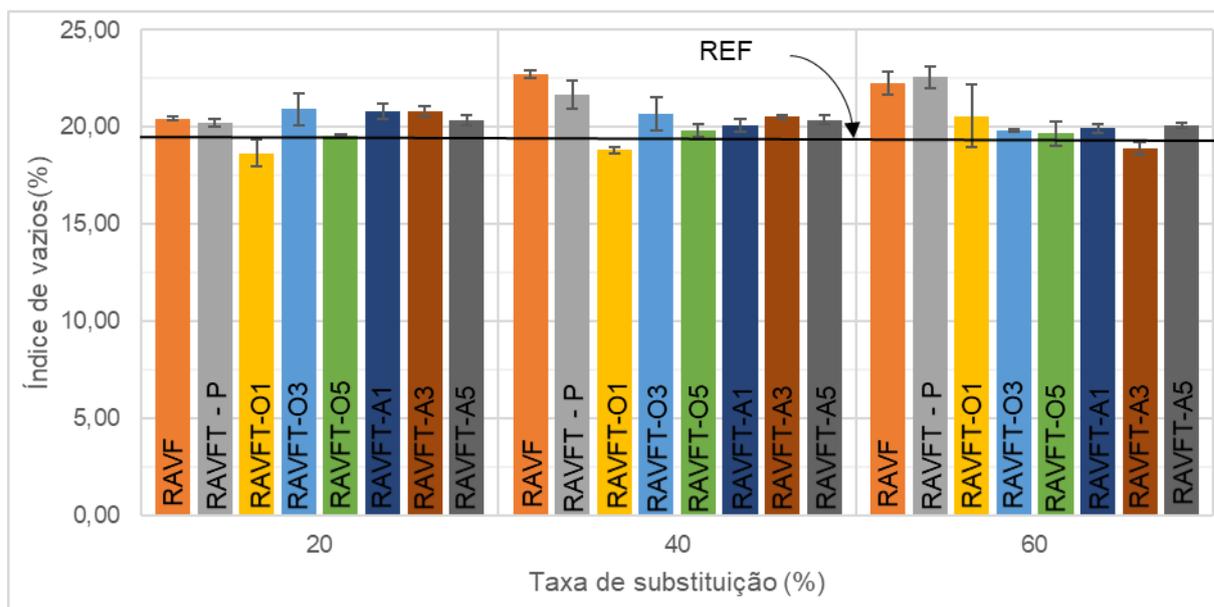
Tempo de tratamento (h)	n	Média	Grupo
0	20	10,98	A
3	18	10,38	B
5	18	10,16	B
1	18	9,98	B

Fonte: Autor (2021)

4.3.4 Índice de vazios

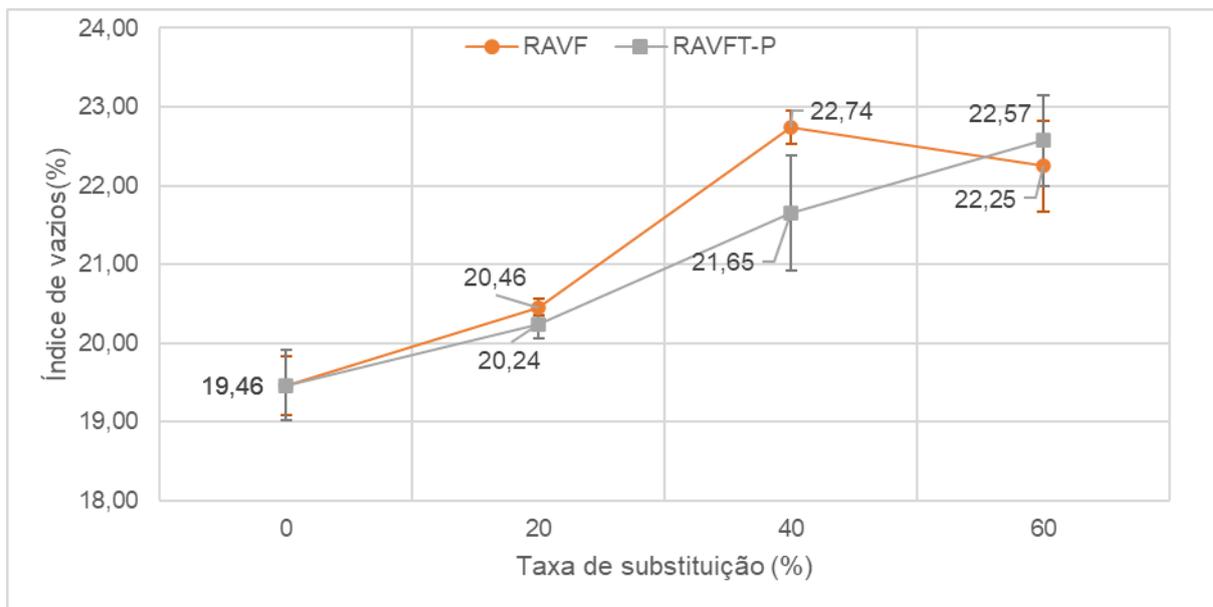
Nas Figura 31 a 37 são apresentados os valores médios do índice de vazios. Como esperado, essa propriedade teve o mesmo comportamento observado para absorção de água por imersão, uma vez que, a absorção de água está diretamente ligada a quantidade de poros existente na matriz.

Figura 31 – Índice de vazios das argamassas estudadas



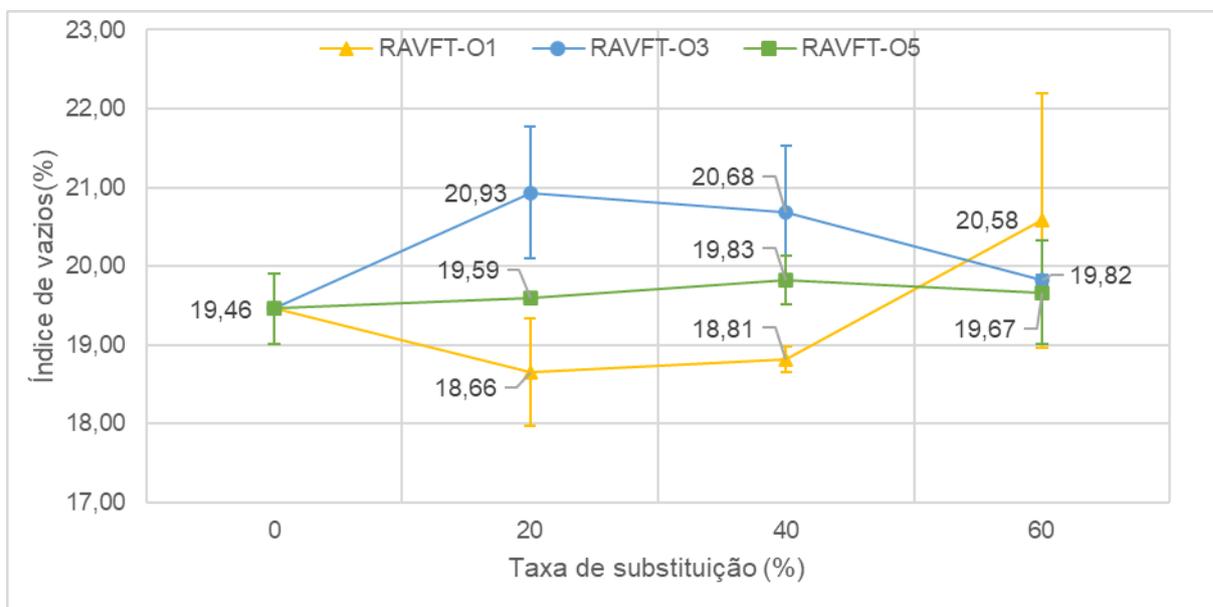
Fonte: Autor (2021)

Figura 32 - Índice de vazios das argamassas com RAVF e RAVFT – P



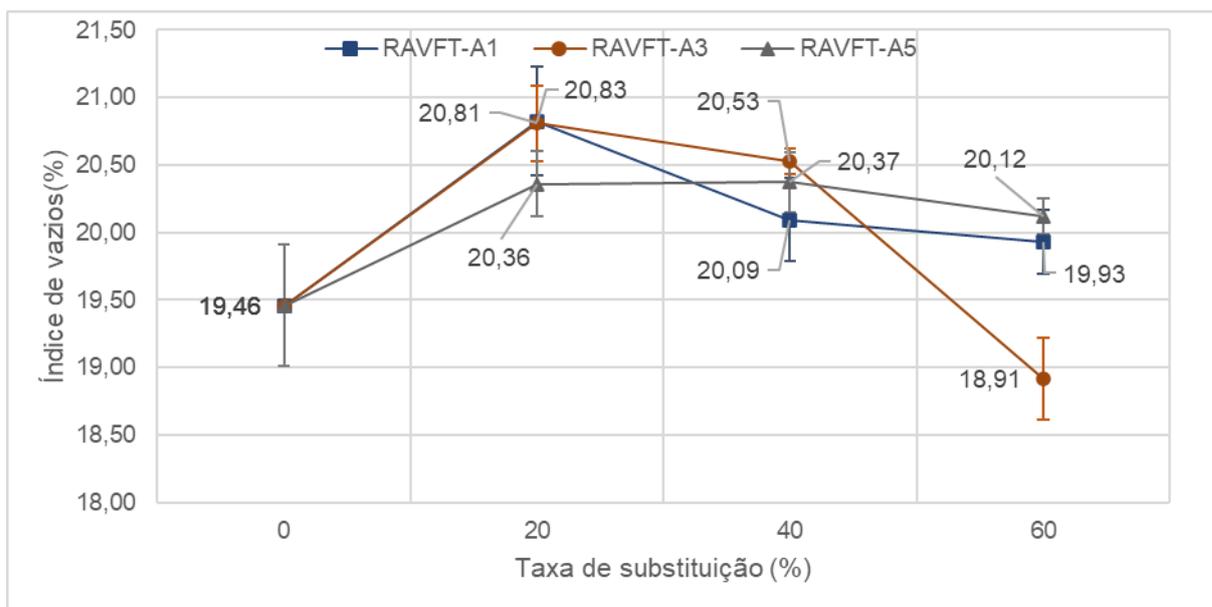
Fonte: Autor (2021)

Figura 33 - Índice de vazios das argamassas com RAVFT – O1, RAVFT – O3 e RAVFT – O5



Fonte: Autor (2021)

Figura 34 - Índice de vazios das argamassas com RAVFT – A1, RAVFT – A3 e RAVFT – A5



Fonte: Autor (2021)

As Tabelas 24 a 27 mostram a análise de variância correlacionando índice de vazios com a taxa de substituição, tipo de tratamento e tempo de tratamento utilizada. Com o nível de significância de 95% podemos afirmar que há evidências de que o tipo de tratamento e tempo de tratamento são as variáveis que interferem na resistência à tração na flexão das argamassas analisadas, enquanto a variável taxa de substituição não interfere na absorção de água.

Tabela 24 - ANOVA: Índice de vazios (%) x taxa de substituição

Source	DF	SS	MS	F	P
Taxa de substituição (%)	3	4,58	1,53	1,22	0,31
Error	70	87,69	1,25		
Total	73	92,27			

S=1,119 R-Sq= 4,96% R-Sq (adj) = 0,89%

Fonte: Autor (2021)

Tabela 25 - ANOVA: Índice de vazios (%) x tipo de tratamento

Source	DF	SS	MS	F	P
Tipo de tratamento	3	27,923	9,308	10,130	0,000
Error	70	64,349	0,919		
Total	73	92,273			

S=,9588 R-Sq= 30,26% R-Sq (adj) = 27,27%

Fonte: Autor (2021)

Tabela 26 – ANOVA Índice de vazios (%) x tempo de tratamento

Source	DF	SS	MS	F	P
Tempo de tratamento (h)	3	27,529	9,716	9,92	0,000
Error	70	64,743	0,925		
Total	73	92,273			

S=0,9617 R-Sq= 29,83% R-Sq (adj) = 26,83%

Fonte: Autor (2021)

Analisando as Tabela 27 a 30, utilizando o método de Tukey, com nível de confiança de 95%, é possível observar que há diferenças significativa entre as médias das argamassas quando comparado o índice de vazios com o tipo de tratamento e tempo de tratamento, enquanto para a variável taxa de substituição não houve diferença significativa entre as médias. Sendo que as médias seguidas pela mesma letra, na coluna de grupo, não se diferenciam estatisticamente, a 5% de probabilidade.

Tabela 27 - Informação de grupo usando método de Tukey para a índice de vazios x taxa de substituição

Taxa de substituição (%)	n	Média (%)	Grupo
40	24	20,59	A
60	22	20,4	A
20	25	20,17	A
0	3	19,46	A

Fonte: Autor (2021)

Tabela 28 - Informação de grupo usando método de Tukey para a índice de vazios x tipo de tratamento

Tipo de tratamento	n	Média (%)	Grupo
Peneiramento	9	21,49	A
Nenhum	11	21,13	A
Ar comprimido	27	20,22	B
Ozônio	27	19,77	B

Fonte: Autor (2021)

Tabela 29 - Informação de grupo usando método de Tukey para a índice de vazios x tempo de tratamento

Tempo de tratamento (h)	n	Média (%)	Grupo
0	20	21,29	A
3	18	20,28	B
5	18	19,99	B
1	18	19,71	B

Fonte: Autor (2021)

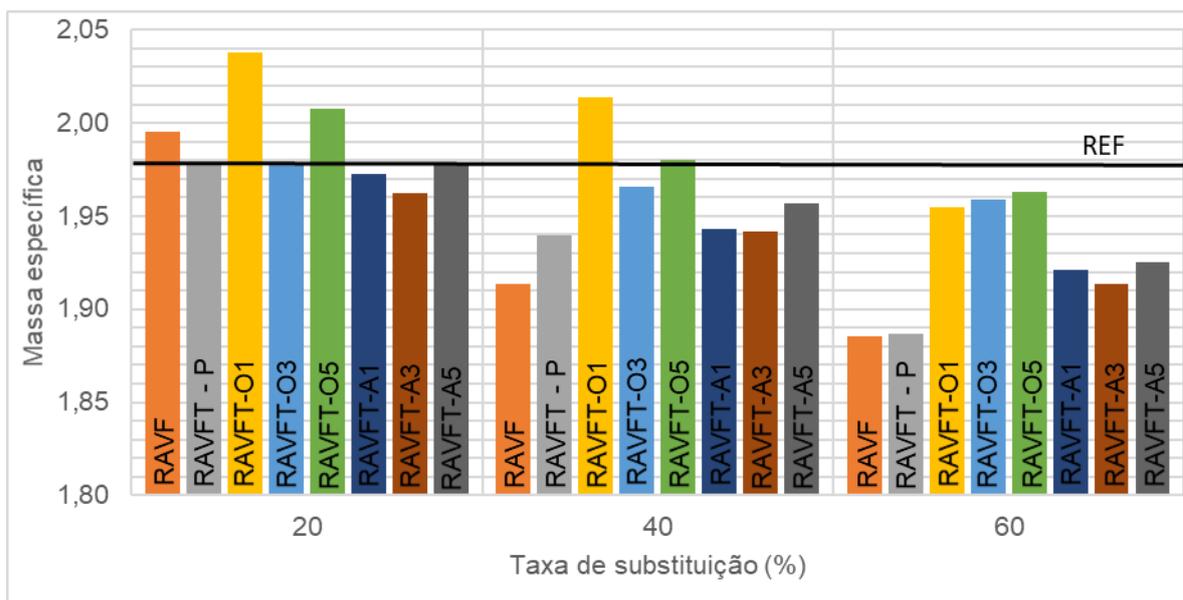
4.3.5 Massa específica

Nas Figura 35 a 41 são mostrados os resultados obtidos para a massa específica.

É possível observar que todas as argamassas tiveram leve redução de sua massa específica para taxas de substituição de 40% e 60%, sendo o mesmo efeito observado por Casali *et al.* (2017). Essa diferença em relação à argamassa de referência é atribuída ao aumento do volume de vazios à diferença da massa específica do agregado utilizado.

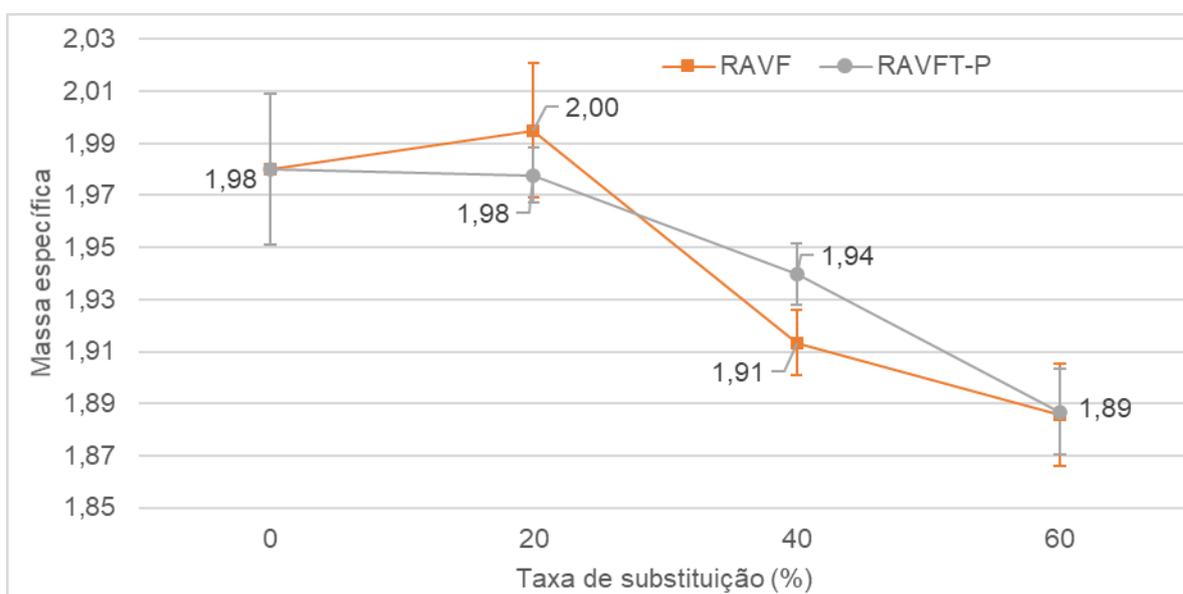
Assim como os resultados obtidos para a absorção de água e índice de vazios, a argamassa com o RAVFT – O5 mostrou um comportamento constante, sem grandes variações, com o aumento da taxa de substituição.

Figura 35 – Massa específica das argamassas estudadas



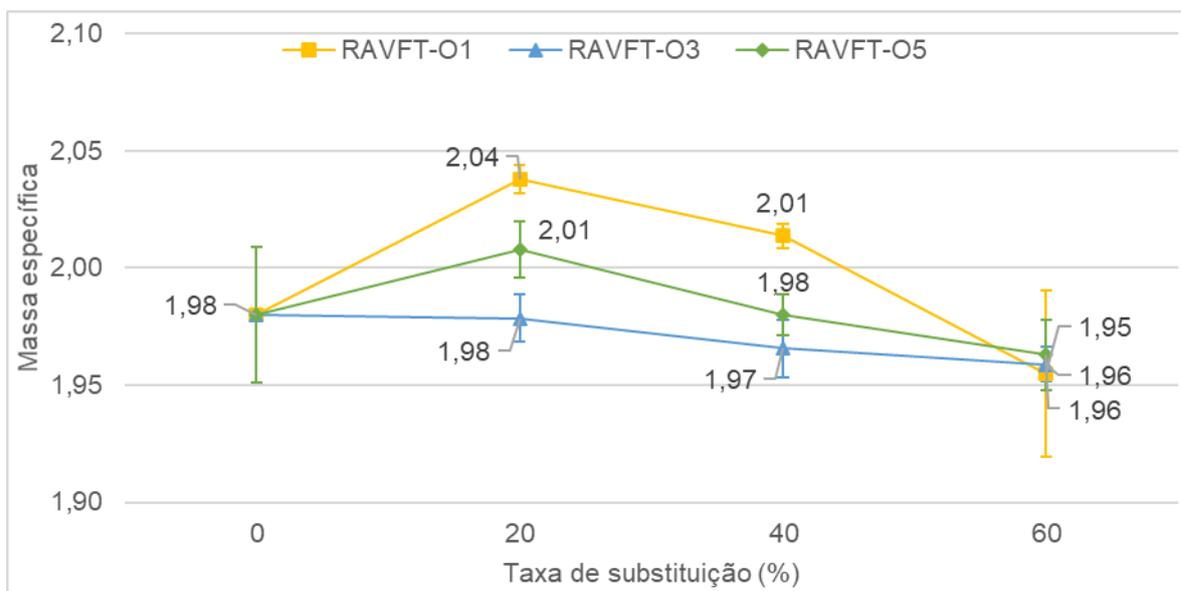
Fonte: Autor (2021)

Figura 36 - Massa específica das argamassas com RAVF, RAVFT – P



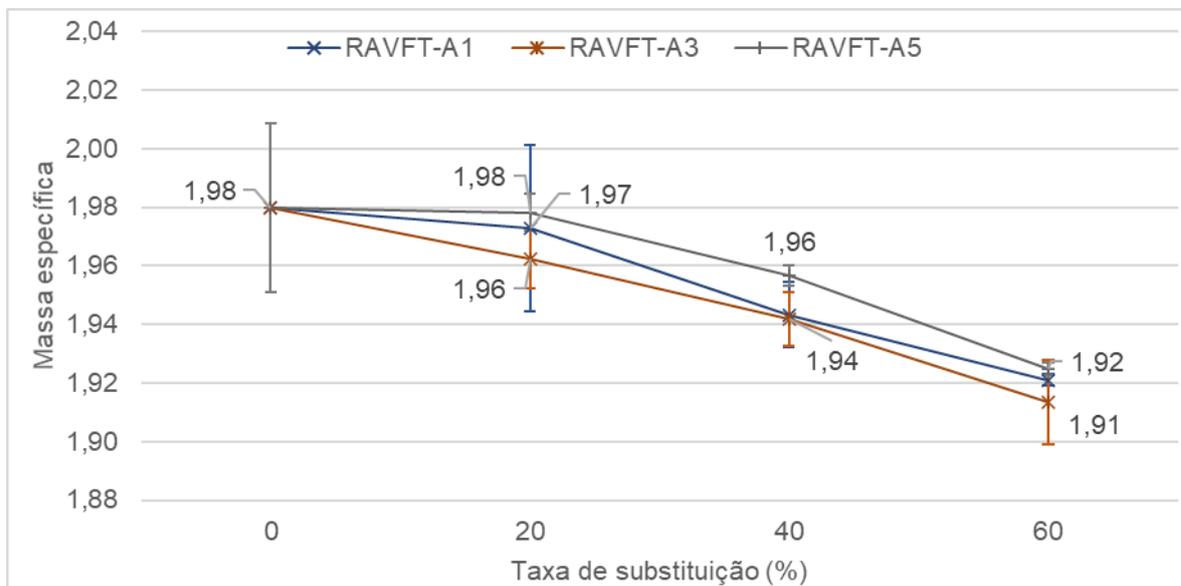
Fonte: Autor (2021)

Figura 37 - Massa específica das argamassas com RAVFT – O1, RAVFT – O3 e RAVFT – O5



Fonte: Autor (2021)

Figura 38 – Massa específica das argamassas com RAVFT – A1, RAVFT – A3 e RAVFT – A5



Fonte: Autor (2021)

As Tabelas 30 a 33 mostram a análise de variância correlacionando massa específica com a taxa de substituição, tipo de tratamento e tempo de tratamento utilizada. Com o nível de significância de 95% pode-se afirmar que há evidências de que a taxa de substituição, tipo de tratamento e o tempo de tratamento são as

variáveis que interferem na resistência à tração na flexão das argamassas analisadas.

Tabela 30 - ANOVA: Massa específica x taxa de substituição

Source	DF	SS	MS	F	P
Taxa de substituição (%)	3	0,05	0,017	18,73	0,00
Error	70	0,061	0		
Total	73	0,111			
S=0,030 R-Sq= 44,53% R-Sq (adj) = 42,15%					

Fonte: Autor (2021)

Tabela 31 - ANOVA: Massa específica x tipo de tratamento

Source	DF	SS	MS	F	P
Tipo de tratamento	3	0,032	0,011	9,74	0,00
Error	70	0,079	0,001		
Total	73	0,111			
S=0,033 R-Sq= 29,45% R-Sq (adj) = 26,43%					

Fonte: Autor (2021)

Tabela 32 – ANOVA Massa específica x tempo de tratamento

Source	DF	SS	MS	F	P
Tempo de tratamento (h)	3	0,014	0,005	3,46	0,021
Error	70	0,097	0,001		
Total	73	0,111			
S=0,037 R-Sq= 13,92% R-Sq (adj) = 9,19%					

Fonte: Autor (2021)

Analisando as Tabela 33 a 36 através do método de Tukey, com nível de confiança de 95%, é possível observar que há diferenças significativa entre as médias das argamassas quando comparado o índice de vazios com a taxa de substituição, tipo de tratamento e tempo de tratamento. Sendo que as médias

seguidas pela mesma letra, na coluna de grupo, não se diferenciam estatisticamente, a 5% de probabilidade.

Tabela 33 - Informação de grupo usando método de Tukey para a massa específica x taxa de substituição

Taxa de substituição (%)	n	Média (%)	Grupo
20	25	1,9	A
0	3	1,98	A B
40	24	1,96	B
60	22	1,93	C

Fonte: Autor (2021)

Tabela 34 - Informação de grupo usando método de Tukey para a massa específica x tipo de tratamento

Tipo de tratamento	n	Média (%)	Grupo
Ozônio	24	1,99	A
Nenhum	11	1,95	B
Ar comprimido	24	1,95	B
Peneiramento	9	1,93	B

Fonte: Autor (2021)

Tabela 35 - Informação de grupo usando método de Tukey para a massa específica x tempo de tratamento

Tempo de tratamento (h)	n	Média	Grupo
1	18	1,98	A
5	18	1,97	A B
3	18	1,95	A B
0	20	1,94	B

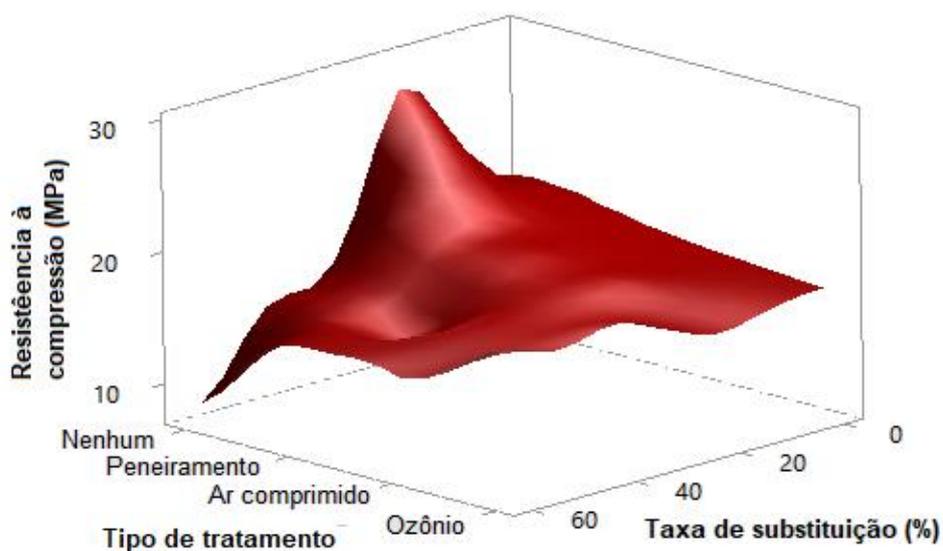
Fonte: Autor (2021)

4.3.6 Análise dos resultados

Para a definição dos melhores resultados obtidos com as variáveis propostas foi criado o gráfico de superfície para a resistência à compressão e absorção de água.

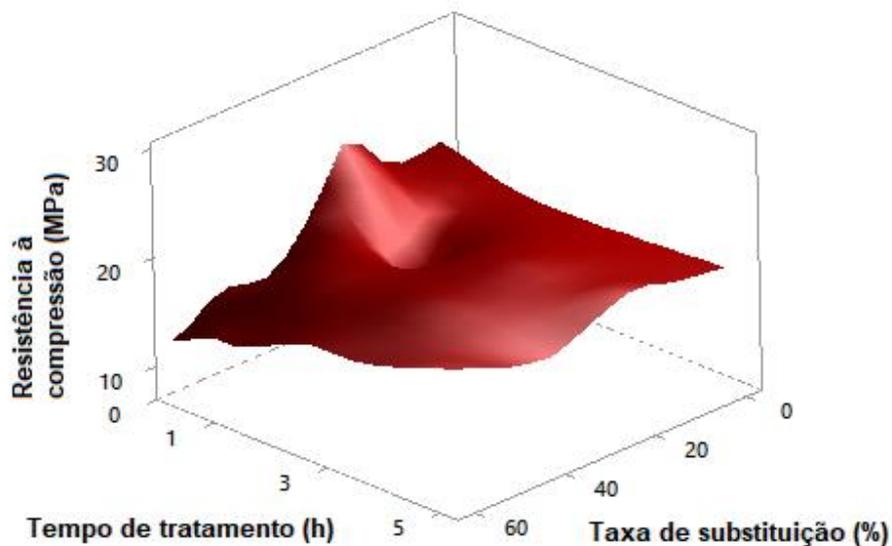
Ao analisar a resistência à compressão na Figura 39 e na Figura 40 é possível observar o pico de resistência que é visto na argamassa com o RAVF para a taxa de substituição de 20%. Para taxas de substituição de 40% e 60% as argamassas que apresentaram o melhor resultado foram as com o resíduo tratado com ar comprimido e com ozônio por 5 horas, sendo que as argamassas com o resíduo tratado com ozônio tiveram uma resistência maior em relação à argamassa com o resíduo tratado com ar comprimido.

Figura 39 – Resistência à compressão x tipo de tratamento e taxa de substituição das argamassas estudadas



Fonte: Autor (2021)

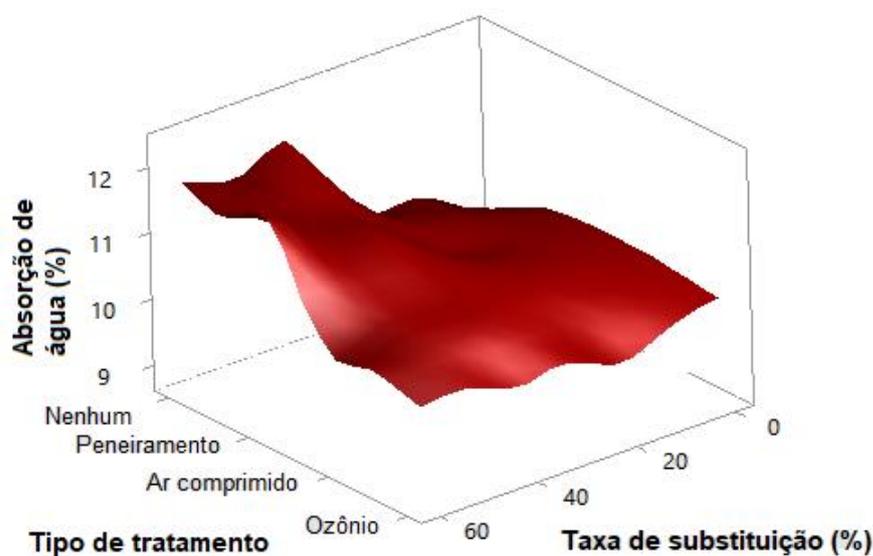
Figura 40 - Resistência à compressão x tempo de tratamento e taxa de substituição das argamassas estudadas



Fonte: Autor (2021)

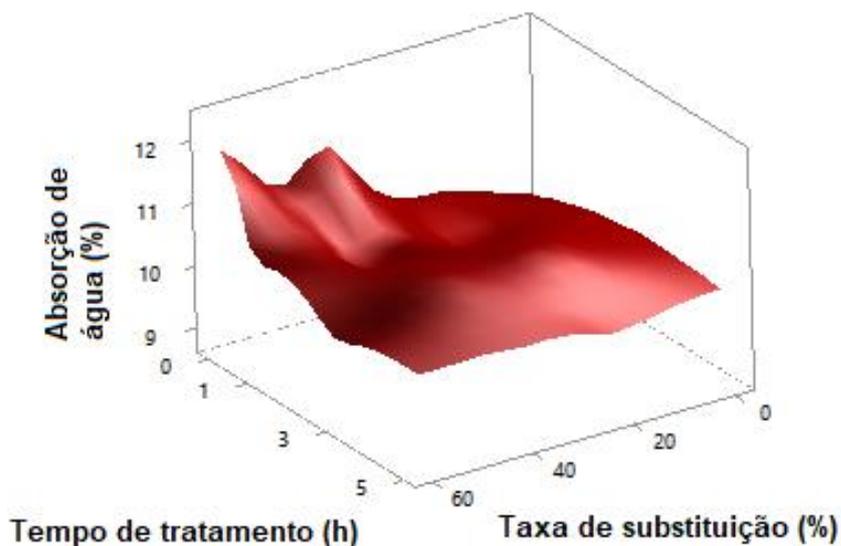
Para a absorção de água, na Figura 41 e na 45, também foi possível observar que as argamassas com os resíduos tratados com ozônio e ar comprimido conseguiram manter os resultados próximos aos da argamassa de referência para substituições de 40% e 60%. Em relação aos tempos de tratamento de 1, 3 e 5 horas os resultados de absorção de água não diferiram muito em relação à taxa de substituição.

Figura 41 – Absorção de água x tipo de tratamento e taxa de substituição das argamassas estudadas



Fonte: Autor (2021)

Figura 42 - Absorção de água x tempo de tratamento e taxa de substituição das argamassas estudadas



Fonte: Autor (2021)

Os resultados apresentados na Tabela 36 e na Tabela 38 na análise de variância das argamassas com os resíduos tratados com ar comprimido e ozônio nas argamassas mostram, com 95% de nível de confiança, que há evidências que

o tipo de tratamento e o tempo de tratamento são variáveis que interferiram na resistência à compressão.

Para a absorção de água, a análise de variância mostra, com 95% de nível de confiança, que há evidências que apenas o tipo de tratamento é a variável que interferiu no resultado.

Tabela 36 – ANOVA: Resistência à compressão x taxa de substituição, tipo de tratamento e tempo de tratamento para as argamassas com os resíduos tratados com ozônio e ar comprimido

Source	DF	SS	MS	F	P
Tipo de tratamento	1	31,575	31,575	4,06	0,048
Taxa de substituição (%)	2	7,753	3,876	0,50	0,610
Tempo de tratamento (h)	2	240,752	120,376	15,47	0,000
Error	66	513,528	7,781		
Total	71	793,608			
S=2,789 R-Sq= 35,29% R-Sq (adj) = 30,39%					

Fonte: Autor (2021)

Tabela 37 - ANOVA: Absorção de água x taxa de substituição, tipo de tratamento e tempo de tratamento para as argamassas com os resíduos tratados com ozônio e ar comprimido

Source	DF	SS	MS	F	P
Taxa de substituição (%)	2	0,0310	0,01548	0,08	0,923
Tipo de tratamento	1	1,8731	1,8731	9,66	0,003
Tempo de tratamento (h)	2	0,9365	0,46826	2,41	0,100
Error	48	9,3079	0,19392		
Total	53	12,1485			
S=0,440 R-Sq= 23,38% R-Sq (adj) = 15,40 %					

Fonte: Autor (2021)

Analisando os testes estatísticos e as figuras apresentadas, para a taxa de substituição de até 60%, o tratamento com ozônio por 5 horas mostrou que as

argamassas apresentaram um comportamento semelhante à argamassa de referência que teve um desempenho melhor para as resistências à compressão e para absorção de água.

Para a substituição de 20%, a argamassa que apresentou o melhor comportamento para a resistência à compressão e absorção de água foi a argamassa com o RAVF que teve sua resistência à compressão substancialmente maior que a argamassa de referência.

4.3.7 Análise ambiental das argamassas

As argamassas também foram analisadas quanto a composição do extrato lixiviado pela metodologia apresentada pela NBR 10004 (ABNT, 2004) e NBR 15702 (ABNT, 2009), para os parâmetros de arsênio, bário, cádmio, cromo total, chumbo, mercúrio e selênio. Os resultados são mostrados na Tabela 38.

Nenhum parâmetro excedeu os limites estabelecido pela NBR 15702 (ABNT, 2009) e da NBR 10004 (ABNT, 2004) no extrato lixiviado para os parâmetros analisados. Sendo que, para esses parâmetros, as argamassas poderiam ser classificadas como resíduo não perigoso (classe II).

Também é possível observar, em comparação à análise feita nos agregados utilizados nas argamassas, que ocorreu uma diminuição para os parâmetros bário e chumbo. O que sugere uma solidificação da matriz, ou seja, os resíduos são encapsulados em um sólido com alta integridade estrutural, onde a migração de contaminantes é restringida pela diminuição de área superficial exposta à lixiviação e/ou pelo isolamento dos resíduos dentro de uma cápsula impermeável na matriz cimentícia (CONNER; HOEFFNER, 1998). O efeito encapsulamento é observado em diversos estudos (CARNIN, 2009; CASALI *et al.*, 2017; PABLOS, 2008; WANG *et al.*, 2020a), em que os teores de contaminantes são minimizados dentro das suas matrizes cimentícias.

Tabela 38 - Análises dos parâmetros do extrato lixiviado das argamassas estudadas

Parâmetro	REF	RAVF/20	RAVFT – P/20	RAVFT - O5/20	RAVFT - A5/20	C.M.*	L.Q.*
Arsênio total	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,5	0,010
Bário Total	< 0,7	< 0,7	< 0,7	< 0,7	< 0,7	10	0,700
Cádmio Total	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,1	0,010
Chumbo total	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,5	0,010
Cromo total	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	0,5	0,050
Mercúrio total	1,20 x 10 ⁻³	< 1 x 10 ⁻³	1,07 x 10 ⁻³	2,35 x 10 ⁻³	1,02 x 10 ⁻³	20 x 10 ⁻³	1,00 x 10 ⁻³
Selênio total	0,037	0,037	0,039	0,045	0,034	0,1	0,010

*C.M. – Concentração máxima no extrato lixiviado da NBR 15702 (ABNT, 2009)

*L.Q. – Limite de quantificação

Fonte: Autor (2021)

5 CONCLUSÕES

As conclusões deste trabalho deram-se a partir dos resultados obtidos, com os materiais e métodos empregados no programa experimental.

Para os tratamentos propostos para a descontaminação do RAVF, o método com aplicação de ozônio e o método por ar comprimido mostraram bom comportamento, uma vez que conseguiram reduzir de 84% a 96% o teor de material pulverulento presente no RAVF, ficando o material com teor de material pulverulento inferior ao da areia natural. No mesmo sentido, foi possível observar uma redução de perda de massa ao fogo de 39% até 61% em relação ao RAVF.

Os resíduos tratados com ar comprimido e ozônio também tiveram um aumento de massa específica, ficando próximos ao de uma areia de rio, indicando ter havido a remoção de impurezas com massas específicas menores nos resíduos. Para essas análises, que indicam a descontaminação do resíduo, o RAVFT – O3 foi o que obteve os melhores resultados.

Na análise ambiental o RAVF, RAVFT – P, RAVFT – O5, RAVFT – A5 foram classificados, nos parâmetros analisados, como resíduo não perigoso (classe II), segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004). Esses resíduos também tiveram, para o ensaio de lixiviação, valores menores que o limite da NBR 15702 (ABNT, 2009).

Quando substituída a areia natural pelo RAVF nas argamassas, para taxa de substituição de 20% os finos presentes nesse resíduo conseguiram preencher os vazios tornando a matriz mais densa, o que levou um acréscimo de 47% de sua resistência à compressão, em relação à argamassa de referência. Para substituições maiores ocorre a saturação dos finos na argamassa, ocasionando um aumento excessivo de área superficial, fazendo com que haja necessidade de mais água para a correta hidratação da argamassa. Esse processo ocasionou uma queda substancial da resistência à compressão para as taxas de substituição de 40% e 60%.

A argamassa com o RAVFT – O5 teve um comportamento, praticamente, constante para as taxas de substituições de 20%, 40% e 60% para os resultados de resistência à compressão, absorção de água, índice de vazios e massa específica, mostrando que o tratamento proposto para o RAVF conseguiu reduzir os elementos que prejudicam o desempenho de materiais cimentícios.

Nas resistências à tração na flexão, todas as argamassas com resíduos tiveram suas resistências decaindo conforme a substituição do agregado natural pelo resíduo, possivelmente, devido ao carvão, que está encobrindo as partículas, prejudicar a aderência na zona de transição entre o agregado e a matriz cimentícia.

A absorção de água e o índice de vazios das argamassas com o RAVF e o RAVT – P, tiveram um acréscimo conforme aumentou a substituição do resíduo pela areia natural. Já para as argamassas com os resíduos tratados com ar comprimido e ozônio a absorção de água e o índice vazios se mostraram, praticamente, constantes com o aumento da taxa de substituição.

A análise ambiental das argamassas mostrou que ocorre um encapsulamento dos contaminantes presentes nos resíduos, podendo as argamassas serem classificadas como resíduo não perigoso pela NBR 10004 (ABNT, 2004) para os parâmetros analisados. As argamassas analisadas também tiveram, para o ensaio de lixiviação, valores menores que o limite da NBR 15702 (ABNT, 2009).

Sendo assim, a partir dos resultados obtidos e das análises realizadas, conclui-se que é possível realizar a substituição de até 20% da areia natural pelo RAVF em matrizes cimentícias. Também é possível utilizar o resíduo tratado com ozônio, com tempo de tratamento de 5 horas para substituição de até 60% do resíduo pela areia natural, sendo essas as substituições que resultaram em argamassas com características semelhantes à argamassa de referência.

REFERÊNCIAS

ABIOYE, A. A.; ATANDA, P. O.; ABIOYE, O. P.; AKINLABI, S. A.; AKINLABI, E. T.; BOLU, C. A.; AFOLALU, S. A.; AJAYI, O. O.; OHIJEAGBON, I. O. A Review on Automotive Industries and Foundries in Nigeria. **Iop Conference Series: Materials Science and Engineering**, [S.L.], v. 413, p. 1-12, 10 set. 2018. IOP Publishing.

ADEGAS, R. G. **PERFIL AMBIENTAL DOS PROCESSOS DE FUNDIÇÃO FERROSA QUE UTILIZAM AREIAS NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL**. 2007. 108 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais Perfil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

ADEGAS, R. G.; BERNARDES, A. M. Avaliação do gerenciamento das areias geradas nas fundições de ferro do estado do Rio Grande do Sul, Brasil. **FEPAM em Revista**, Porto Alegre, v. 2, n. 1, p. 4-10, jan. 2008.

AGBO, P.; AYENI, A. O. Determinants of Sales of Foundry Products in Nigeria: a Discriminant Function Analysis. **International Journal Of Advanced Studies In Economics And Public Sector Management**, [S. L.], v. 5, n. 1, p. 159-171, jan. 2017.

ANDRADE, L. de B.; CARNIN, R. L. P.; PINTO, R. C. de A. Areia descartada de fundição para uso em concreto de cimento Portland: análise do agregado. **Matéria (Rio de Janeiro)**, [S.L.], v. 23, n. 3, p. 1-14, 18 out. 2018. FapUNIFESP (SciELO).

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778** Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005. 4.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004** Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2003. 77p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10005** Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólido. Rio de Janeiro, 2004. 16.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11768** Aditivos químicos para concreto de cimento Portland. Rio de Janeiro, 2019. 27.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005. 9.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15702** Areia Descartada de Fundação – Diretrizes para aplicação em asfalto e aterro sanitário. Rio de Janeiro, 2009. 8.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 18** Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2012. 4.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45** Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006. 8.

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. 6.

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

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

BAETTKER, E.; RANGEL, F.; MACIOSKI, G.; FREIRE, F. B.; CARVALHO, K. Q. de. CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DE CARVÃO ATIVADO, CERÂMICA DE ARGILA, PNEU E PÓ DE SERRAGEM COMO RECHEIO DE FILTROS ANAERÓBIOS. In: SIMPÓSIO ÍTALO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA

E AMBIENTAL, 12., 2014, Natal. **Anais [...]**. Natal: Simpósio Ítalo-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2014. p. 1-7.

BARROS, A.L. *et al.* Decolorizing dye wastewater from the agate industry with Fenton oxidation process. **Minerals Engineering**, [S.L.], v. 19, n. 1, p. 87-90, jan. 2006.

BASAR, H. M.; DEVECI, N. The effect of waste foundry sand (WFS) as partial replacement of sand on the mechanical , leaching and micro-structural characteristics of ready-mixed concrete. **Construction and Building Materials**, v. 35, p. 508–515, 2012.

BHARDWAJ, B.; KUMAR, P. Waste foundry sand in concrete: A review. **Construction and Building Materials**, v. 156, p. 661–674, 2017.

BIOLO, Simone Maríndia. **REÚSO DO RESÍDUO DE FUNDIÇÃO AREIA VERDE NA PRODUÇÃO DE BLOCOS CERÂMICOS**. 2005. 146 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

BRASIL. Lei 12.305/2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos - PNRS**, p. 21, 2010.

BRONDINO, O. C.; SILVA, J. P. G.; BRONDINO, N. C. M. O PROBLEMA DO DESCARTE DA AREIA DE FUNDIÇÃO: ENSINO PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE EDUCAÇÃO EM ENGENHARIA, 43., 2014, Juiz de Fora. **Anais [...]**. Juiz de Fora: Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, 2014. p. 1-12.

CARNIN, R. L. P. **REAPROVEITAMENTO DO RESÍDUO DE AREIA VERDE DE FUNDIÇÃO COMO AGREGADO EM MISTURAS ASFÁLTICAS** Tese. 2008. 131 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós Graduação em Química, Setor de Ciências Exatas, Química, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

CASALI, J. M. *et al.* Caracterização e influência do teor do resíduo de areia de fundição fenólica em argamassas de revestimento. **Ambiente Construído**, v. 18, n. 1, p. 261–279, 2017.

CONNER, J. R.; HOEFFNER, S. L. A Critical Review of Stabilization/Solidification Technology. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 28, n. 4, p. 397–462, out. 1998.

COPPIO, G. J. L. *et al.* Surface electrical resistivity and compressive strength of concrete with the use of waste foundry sand as aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 212, p. 514–521, 2019.

DNPM. Brasília: Departamento Nacional de Produção Mineral, v. 36, 2016.

GROOVER, M. P. **Introdução ao processo de fabricação**. Rio de Janeiro: Ltc, 2014. 737 p.

GUEVANE, Eleutério. População mundial atingiu 7,6 bilhões de habitantes. Disponível em: <https://news.un.org/pt/story/2017/06/1589091-populacao-mundial-atingiu-76-bilhoes-de-habitantes#:~:text=Um%20estudo%20da%20ONU%20revela,Sociais%20das%20Na%C3%A7%C3%B5es%20Unidas%2C%20Desa..> Acesso em: 26 fev. 2021.

GURUMOORTHY, N.; ARUNACHALAM, K. Micro and mechanical behaviour of Treated Used Foundry Sand concrete. **Construction and Building Materials**, v. 123, p. 184–190, 2016.

GURUMOORTHY, N.; ARUNACHALAM, K. Durability Studies on Concrete Containing Treated Used Foundry Sand. **Construction and Building Materials**, v. 201, p. 651–661, 2019.

JANSEN, C. S. **APLICAÇÃO DA PRODUÇÃO MAIS LIMPA COMO FERRAMENTA PARA MELHORIA CONTÍNUA DO SISTEMA DE GESTÃO DE SAÚDE, SEGURANÇA E MEIO AMBIENTE**. 2013. 49 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia de Segurança do Trabalho, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

JOSEPH, M. K.; BANGANAYI, F.; OYOMBO, D. Moulding Sand Recycling and Reuse in Small Foundries. **Procedia Manufacturing**, v. 7, p. 86–91, 2017.

KAUR, G.; SIDDIQUE, R.; RAJOR, A. Micro-structural and metal leachate analysis

of concrete made with fungal treated waste foundry sand. **Construction and Building Materials**, v. 38, p. 94–100, 2013.

KHATIB, J. M.; HERKI, B. A.; KENAI, S. Capillarity of concrete incorporating waste foundry sand. **Construction and Building Materials**, v. 47, p. 867–871, 2013.

KRISHNA, R.s. *et al.* Industrial solid waste management through sustainable green technology: case study insights from steel and mining industry in Keonjhar, India. **Materials Today: Proceedings**, [S.L.], v. 33, p. 5243-5249, 2020.

LENAHAN, M. **Foundry Sand: A Recipe for Beneficial Use**. Chicago: Mike Lenahan, 2002. 28 slides, color.

MACIEL, T. F. **REGENERAÇÃO ÚMIDA DE AREIA DE FUNDIÇÃO: TRATAMENTO EM AREIAS A VERDE**. 2017. 44 f. TCC (Graduação) - Curso de Processos de Fabricação Mecânica, Departamento de Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná Departamento, Ponta Grossa, 2017.

MANOHARAN, T. *et al.* Engineering properties of concrete with partial utilization of used foundry sand. **Waste Management**, v. 71, p. 454–460, 2018.

MAVROULIDOU, M.; LAWRENCE, D. Can waste foundry sand fully replace structural concrete sand? **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 21, n. 3, p. 594–605, 2019.

MORAVIA, W. G.; LANGE, L. C.; AMARAL, M. C. S. Avaliação de processo oxidativo avançado pelo reagente de fenton em condições otimizadas no tratamento de lixiviado de aterro sanitário com ênfase em parâmetros coletivos e caracterização do lodo gerado. **Quimica Nova**, v. 34, n. 8, p. 1370–1377, 2011.

NUNES, Suzete Schneider. **IMPACTOS AMBIENTAIS ASSOCIADOS AO RESÍDUO AREIA FENÓLICA USADA EM UMA FUNDIÇÃO DE PEQUENO PORTE**. 2013. 154 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2013.

OLIVEIRA, F. L.; MELLO, E. F. A mineração de areia e os impactos ambientais na bacia do rio São João, RJ. **Revista Brasileira de Geociências**, [S.L.], v. 37, n. 2, p. 374-389, 1 jun. 2007. Sociedade Brasileira de Geologia.

PABLOS, J. M. **ESTUDO PARA A REUTILIZAÇÃO DO RESÍDUO SÓLIDO CONSTITUÍDO PELAS AREIAS DE FUNDIÇÃO AGLOMERADAS COM ARGILA, ATRAVÉS DA TÉCNICA DE SOLIDIFICAÇÃO/ESTABILIZAÇÃO EM MATRIZES DE CIMENTO PORTLAND, PARA APLICAÇÃO NO SETOR DA CONSTRUÇÃO CIVIL**. 2008. 133 f. Tese (Doutorado) - Curso de Arquitetura e Urbanismo, Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

PASQUALINI, L. N. **Estudo da oxidação de matéria orgânica de lixiviado de aterro sanitário por meio de tratamento com ozônio, peróxido de hidrogênio e radiação ultravioleta**. 2010. 144 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo Escola, São Carlos, 2010.

PARK, C. L.; KIM, B. G.; YU, Y. The regeneration of waste foundry sand and residue stabilization using coal refuse. **Journal of Hazardous Materials**, v. 203–204, p. 176–182, 2012.

PEREIRA, H. R. S.; VALENTINA, L. V. O. D.; WITMISZYN, L. Alternativa para Desenvolvimento Sustentável: Incorporação de Resíduo de Fundição em Argamassas. **Revista Espacios**, [S. L.], v. 35, n. 3, p. 1-14, jan./dez. 2014.

PINTO, Fernando Batista. **O USO DE AREIA DESCARTADA DE FUNDIÇÃO (ADF) NA PRODUÇÃO DE CONCRETO**. 2013. 82 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2013.

PRABHU, G. G.; HYUN, J. H.; KIM, Y. Y. Effects of foundry sand as a fine aggregate in concrete production. **Construction and Building Materials**, v. 70, p. 514–521, 2014.

RAJESWARAN, M. *et al.* Evaluation of tensile and flexural properties of foundry slag reinforced particulate polymer composite. **Materials Today: Proceedings**, [S. L.], v. 33, p. 2014-2016, fev. 2020.

REVISTA DA ABIFA. São Paulo: Abifa, v. 171, ago. 2014.

REVISTA DA ABIFA. São Paulo: Abifa, v. 193, ago. 2016.

REVISTA DA ABIFA. São Paulo: Abifa, v. 218, ago. 2020.

SCHEUNEMANN, R. **REGENERAÇÃO DE AREIA DE FUNDIÇÃO ATRAVÉS DE TRATAMENTO QUÍMICO VIA PROCESSO FENTON**. 2005. 71 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

SHENG, H. L.; CHO, C. L. **Fenton Process for Treatment of Desizing Wastewater**. **Water Research**. vol. 31, n° 8, p.2050 - 2056, 1997.

SIDDIQUE, R. *et al.* Comparative investigation on the influence of spent foundry sand as partial replacement of fine aggregates on the properties of two grades of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 83, p. 216–222, 2015.

SIDDIQUE, R.; SCHUTTER, G. DE; NOUMOWE, A. Effect of used-foundry sand on the mechanical properties of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 2, p. 976–980, 2009.

SIDDIQUE, R.; SINGH, G. Utilization of waste foundry sand (WFS) in concrete manufacturing. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 55, n. 11, p. 885–892, 2011.

SINGH, G.; SIDDIQUE, R. Abrasion resistance and strength properties of concrete containing waste foundry sand (WFS). **Construction and Building Materials**, v. 28, n. 1, p. 421–426, 2012a.

SINGH, G.; SIDDIQUE, R. Effect of waste foundry sand (WFS) as partial replacement of sand on the strength, ultrasonic pulse velocity and permeability of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 26, n. 1, p. 416–422, 2012b.

SOUZA, S. T. de M.; MARTINI, N. C.; FERREIRA, T. V. REUTILIZAÇÃO DE AREIA DESCARTADA DE FUNDIÇÃO NA PRODUÇÃO DE BLOCOS DE CONCRETO ESTRUTURAL Sueli. **Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável** 2, [s. l.], v. 2, n. 28, p. 290-299, jan./dez. 2019.

SPONCHIADO, Murilo José Carvalho *et al.* REVISÃO SOBRE UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE AREIAS DE FUNDIÇÃO RECUPERADAS. **Revista Academus**, [S. L.], v. 6, n. 1, p. 1-10, jan./dez. 2018.

MODERN CASTING, 2015, [S. L.]. **49th Census of World Casting Production Modest Growth in Worldwide Casting Market**. [S. L.]: Modern Casting, 2015.

TÂMEGA, F. **Fundição de processos siderúrgicos**. Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A, 2017. 200 p.

TEIXEIRA, A. S. DO N. M.; SOARES, R. A. L.; TEIXEIRA, P. R. S. Estudo e Avaliação do Uso e Escória Granulada de Fundição na Produção de Cerâmicas Estruturais. **Cerâmica industrial**, v. 23, n. 2, p. 36–40, 2018.

TIECHER, F. *et al.* Avaliação do potencial de utilização da escória granulada de fundição em concreto autoadensável. **Ambiente Construído**, v. 19, n. 1, p. 73–88, 2019.

TORRES, A.; BARTLETT, L.; PILGRIM, C. Effect of foundry waste on the mechanical properties of Portland Cement Concrete. **Construction and Building Materials**, v. 135, p. 674–681, 2017.

TODT, T. *et al.* CARACTERIZAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO CONVENCIONAL COM AREIA DE FUNDIÇÃO Tatiane. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 22., 2016, Natal. **Anais [...]**. Natal: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2016. p. 2265-2276.

WANG, L. *et al.* Solidification and Leaching Behaviors of V and As in a Spent Catalyst-Containing Concrete. **Energy & Fuels**, v. 34, n. 6, p. 7209–7217, 18 jun. 2020a.

WANG, Y. *et al.* Energy saving, GHG abatement and industrial growth in OECD countries: A green productivity approach. **Energy**, v. 194, p. 116833, 2020b.

WASTE Management Hierarchy and Homeland Security Incidents. Disponível em: <https://www.epa.gov/homeland-security-waste/waste-management-hierarchy-and-homeland-security-incident>. Acesso em: 27 fev. 2021.