

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

EDUARDO POLLESELO
ELIAS ROGÉRIO CAMPI XAVIER

**AVALIAÇÃO DO USO DE REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO COMO
AGREGADO MIÚDO EM ARGAMASSAS DE CIMENTO PORTLAND**

Vitória - ES

2025

EDUARDO POLLESELO
ELIAS ROGÉRIO CAMPI XAVIER

**AVALIAÇÃO DO USO DE REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO COMO
AGREGADO MIÚDO EM ARGAMASSAS DE CIMENTO PORTLAND**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido a
Universidade Federal do Espírito Santo como
requisito para a obtenção do título de Bacharel
em Engenharia Civil.

Orientador(a): Prof.(a) Rudiele Aparecida
Schankoski, Dr.(a)

Vitória - ES

2025

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à nossa orientadora Prof.(a) Dr.(a) Rudiele Aparecida Schankoski pelos conhecimentos transmitidos e o apoio durante a construção deste projeto de graduação.

Agradecemos à Prof.(a) Dr.(a) Sayonara Maria de Moraes Pinheiro e ao Mestrando Thiago Almeida Quinquim por aceitarem o nosso convite e comporem a banca avaliadora.

Agradecemos aos técnicos do LEMAC-Ufes pelo auxílio durante a realização dos ensaios.

RESUMO

Este projeto de graduação tem como objetivo avaliar o desempenho no estado fresco e endurecido de argamassas de cimento Portland contendo rejeito de minério de ferro como agregado miúdo. O programa experimental envolveu a produção de seis diferentes composições de argamassas, sendo duas referências, formuladas com 100% de areia natural de cava e dois tipos de cimento: CP V ARI RS e CP III 40 RS. Nas demais misturas, a areia natural foi parcialmente substituída por areia de Rejeito de Minério de Ferro (RMF) nas proporções de 10, 20 e 30% em massa, utilizando o cimento CP V ARI RS, além de uma substituição de 20% com o cimento CP III 40 RS. Os resultados demonstraram que a adição de RMF reduziu o teor de ar incorporado nas misturas, o que levou ao aumento da massa específica das argamassas e da resistência à compressão, com ganhos de até 37% em relação à mistura de referência. No entanto, a presença de RMF resultou na redução do índice de consistência. De maneira geral, os ensaios realizados apontam para a viabilidade técnica do uso de areia de RMF em argamassas de cimento Portland, contribuindo para que seja feita uma melhor destinação destes resíduos.

Palavras-chave: Argamassas, rejeito de minério de ferro (RMF), agregado miúdo.

ABSTRACT

This undergraduate project aims to evaluate the performance of Portland cement mortars in both fresh and hardened states when incorporating iron ore tailings as fine aggregate. The experimental program involved the production of six different mortar compositions, including two reference mixes formulated with 100% natural sand from excavation and two types of cement: CP V ARI RS and CP III 40 RS. In the remaining mixtures, natural sand was partially replaced with Iron Ore Tailings (IOT) at proportions of 10%, 20%, and 30% by mass using CP V ARI RS cement, along with a 20% replacement using CP III 40 RS cement. The results showed that the addition of IOT reduced the incorporated air content in the mixtures, leading to an increase in the specific mass and compressive strength of the mortars, with gains of up to 37% compared to the reference mix. However, the presence of IOT resulted in a decrease in the consistency index. Overall, the tests conducted indicate the technical feasibility of using IOT sand in Portland cement mortars, contributing to a better disposal of these waste materials.

Keywords: Mortars, iron ore tailings (IOT), aggregates.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Produção de minério de ferro dos três maiores produtores mundiais.....	15
Figura 2 - Comportamento de concretos com diferentes traços com incorporação de RMF. ..	16
Figura 3 - Fluxograma do processo de mineração.....	22
Figura 4 - Areia de rejeito de mineração utilizada na pesquisa.	26
Figura 5 - Areia natural utilizada na pesquisa.	26
Figura 6 – Série de peneiras utilizada no ensaio de granulometria.	27
Figura 7 – Curvas granulométricas da areia natural e da areia de RMF.	27
Figura 8 - Recipiente utilizado para realizar o ensaio de Massa Unitária.	28
Figura 9 - Massa unitária das areias.	28
Figura 10 - Leitura da variação de volume no frasco de Chapman.	29
Figura 11 - Massa específica das areias.....	30
Figura 12 - Amostra de areia durante o ensaio.	30
Figura 13 - Material pulverulento das areias.	31
Figura 14 - Amostra de Areia Natural com substâncias nocivas.....	31
Figura 15 – Curva granulométrica da areia natural e calcinada.	32
Figura 16 - Laudo de caracterização do cimento CP V ARI RS.	33
Figura 17 - Laudo de caracterização do cimento CP III 40 RS.	33
Figura 18 - Ensaio de massa específica do cimento com o frasco Chapman.	34
Figura 19 - Aditivo polifuncional utilizado na pesquisa.	35
Figura 20 - Protocolo da revisão sistemática de literatura.	36
Figura 21 - Traços utilizados na pesquisa.	38
Figura 22 - Misturador vertical utilizado para confecção das argamassas.	39
Figura 23 - Recipiente utilizado para realizar o ensaio.	40
Figura 24 - Mesa para realização do ensaio de índice de consistência.....	41
Figura 25 - Molde prismático.	42
Figura 26 - Corpo de prova sendo ensaiado à tração na flexão.	42
Figura 27 - Corpo de prova sendo ensaiado à compressão.....	42
Figura 28 - Massa específica das argamassas.....	43
Figura 29 - Massa específica das argamassas e teor de ar incorporado.	44
Figura 30 - Índice de consistência das argamassas.....	46
Figura 31 - Resistência à tração na flexão das argamassas aos 7 dias de idade.	47
Figura 32 - Resistência à tração na flexão das argamassas aos 28 dias de idade.	48

Figura 33 - Resistência à tração na flexão das argamassas aos 90 dias de idade.	48
Figura 34 - Evolução da resistência à tração na flexão.	49
Figura 35 - Resistência à compressão das argamassas aos 7 dias de idade.	50
Figura 36 - Resistência à compressão das argamassas aos 28 dias de idade.	51
Figura 37 - Resistência à compressão das argamassas aos 90 dias de idade.	51
Figura 38 - Evolução da resistência à compressão.	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Principais composições de diferentes RMF..	15
Tabela 2 - Resultados de ensaio do índice CBR e Expansão de amostras com RMF utilizadas na confecção de subleitos para rodovias.....	16
Tabela 3 - Tipos de cimentos existentes conforme a ABNT NBR 16697:2018.....	22

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	6
1 INTRODUÇÃO.....	12
1.1 OBJETIVOS	13
2 REVISÃO DE LITERATURA	14
2.1 Rejeitos de Minério de Ferro (RMF)	14
2.2 Agregados	20
2.3 Areia de rejeito de mineração	22
2.4 Cimento Portland	23
2.5 Argamassas	23
3 Materiais e Abordagem Metodológica	25
3.1 Materiais	25
3.2 Abordagem Metodológica	35
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	43
4.1 Massa específica das argamassas e Teor de ar incorporado	43
4.2 Índice de consistência	44
4.3 Resistência à tração na flexão	46
4.4 Resistência à compressão.....	49
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	53
5.1 CONCLUSÕES	53
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	53
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54
APÊNDICE A	59

1 INTRODUÇÃO

O setor da construção civil é responsável por uma significativa parcela dos impactos ambientais gerados mundialmente (Silva *et al.*, 2018). Parte desses impactos advém do consumo de materiais naturais não renováveis. Com o intuito de diminuir os impactos ambientais causados em processos da construção civil, o uso de resíduos ou coprodutos tem sido alvo de estudos em vários segmentos, a fim de integrar a economia circular nas obras de engenharia.

Neste sentido, a utilização de Resíduos de Minério de Ferro (RMF) tem se mostrado uma alternativa promissora, visto a quantidade deste material que poderia ser reutilizado na construção civil. De acordo com Carmignano *et al.* (2021), o Brasil gerou de 88 a 176 milhões de toneladas de RMF no ano de 2023, correspondendo a quantia de 20 a 40% da produção mundial de minério de ferro, que foi de 440 milhões de toneladas no mesmo período. Somado a isso, Gomes *et al.* (2021) destacam os problemas associados ao armazenamento desses resíduos, frequentemente depositados em barragens que exigem elevado controle e monitoramento devido aos riscos de rompimentos. Caso ocorram, esses rompimentos podem resultar em grandes desastres, como os registrados no estado de Minas Gerais, em 2015 na cidade de Mariana.

Diante disso, a incorporação de RMF em materiais de construção tem emergido como uma solução sustentável para lidar com os impactos ambientais e econômicos associados à disposição inadequada desses resíduos. Dado a demanda cada vez maior pela redução dos impactos negativos da mineração, o reaproveitamento de rejeitos em aplicações como tijolos cerâmicos, argamassas, concretos convencionais e de alto desempenho, além de pavimentos de cimento, tornou-se uma abordagem amplamente explorada. Esta estratégia possibilita uma mitigação da extração de matérias-primas naturais e contribui para uma gestão mais eficiente dos rejeitos, minimizando os danos ambientais (Wang *et al.*, 2021; SINGH *et al.*, 2019).

Do ponto de vista ambiental, a utilização de RMF (ou iron ore stallings, na sigla em inglês IOT) em substituição parcial de agregados promove a redução da deposição de rejeitos em barragens, mitigando riscos de acidentes ambientais graves, como rupturas de barragens de rejeitos. Além disso, a utilização na fabricação de produtos de construção reduz as emissões de CO₂ e o consumo energético, uma vez que parte das matérias-primas tradicionais é substituída (Li *et al.*, 2020; Jha *et al.*, 2018). Além disso, a prática está alinhada aos objetivos de economia circular, favorecendo o reaproveitamento e a reciclagem de materiais em prol de um desenvolvimento sustentável (Chen *et al.*, 2021).

Do ponto de vista econômico, a substituição de matérias-primas naturais por rejeitos pode trazer reduções significativas nos custos de produção, ao passo que agrega valor a materiais que antes eram vistos apenas como rejeitos (Li *et al.*, 2023). Outrossim, Wu *et al.* (2022) apontam que a inclusão de rejeitos melhorou propriedades mecânicas e de durabilidade dos concretos em estudo, desde que fossem levadas em consideração a composição química e a proporção utilizada.

Por fim, a revisão de literatura feita por Kumar *et al.* (2020) conclui que o uso de rejeitos em cimentos e concretos contribui para uma gestão mais eficiente de resíduos e promove uma indústria mais sustentável,

embora sejam necessários mais estudos para abordar questões como a variabilidade dos rejeitos e os possíveis efeitos a longo prazo no desempenho estrutural.

Diante deste cenário, este trabalho adotou como estratégia a substituição da areia utilizada em argamassas cimentícias, por um subproduto proveniente da indústria de mineração: a areia de mineração.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o desempenho no estado fresco e endurecido de argamassas de cimento Portland contendo rejeito de minério de ferro como agregado miúdo.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar o comportamento no estado fresco das argamassas dosadas com rejeito de minério de ferro.
- Avaliar o desempenho mecânico das argamassas dosadas com rejeito de minério de ferro.
- Comparar o desempenho de argamassas produzidas com areia de mineração em substituição à areia natural, utilizando dois tipos de cimento, CP III 40 RS e CP V ARI RS, a fim de avaliar a influência do tipo de cimento nas propriedades das argamassas.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Rejeitos de Minério de Ferro (RMF)

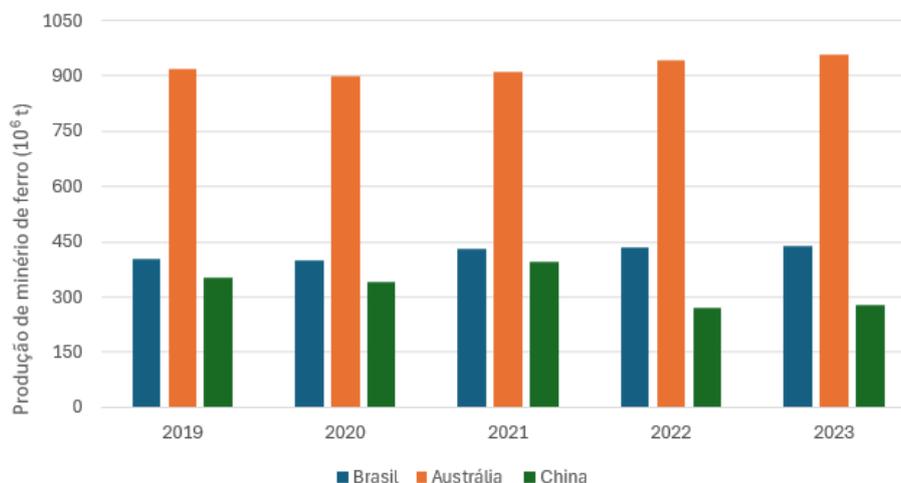
O Brasil tem sido um dos maiores produtores de minério de ferro do mundo, o que o faz enfrentar grandes desafios no que tange ao gerenciamento de resíduos atrelados à essa atividade. No qual a principal estratégia que tem sido utilizada é o estoque dos rejeitos através de barragens. Todavia, isso pode culminar em grandes desastres quando não é feito e monitorado de maneira correta, como o ocorrido na bacia do Rio Doce, em 2015. No qual a Comissão Nacional da Verdade (CNV, 2018, p. 34) aponta que 1,6 milhão de pessoas foram atingidas pelo rompimento da barragem de Fundão ocorrido em 5 de novembro de 2015 no município de Mariana em Minas Gerais. Neste sentido, Lima *et al.* (2016) mostram que os impactos ambientais do rompimento de barragens de rejeitos de minério de ferro sobre a qualidade das águas superficiais são severos, afetando a biodiversidade aquática e comprometendo o abastecimento de água em longo prazo.

De acordo com USGS (2024), no ano de 2023 o Brasil manteve-se como o segundo maior produtor mundial de minério de ferro, alcançando uma produção de aproximadamente 440 milhões de toneladas. O que representa um aumento de aproximadamente 30 milhões de toneladas em relação ao ano anterior. Essa quantidade expressiva e o aumento de produção anual, tem sido motivado pela demanda internacional, principalmente por parte da China, e por investimentos em infraestrutura e práticas de sustentabilidade no setor mineral. Além disso, Carmignano *et al.* (2021) apontam que cerca de 20 a 40% do peso total de minério processado resulta em rejeitos. O que no ano de 2023 representaria de 88 a 176 milhões de toneladas de rejeitos de minério de ferro produzidos.

Nesse cenário, a busca por alternativas para reutilização dos rejeitos de minério de ferro é essencial para a mitigação de riscos e a promoção de práticas de sustentabilidade. A construção civil surge como uma alternativa promissora, onde o uso de rejeitos como agregados em concretos e argamassas tem sido amplamente estudado. A incorporação de rejeitos em concretos, por exemplo, contribui para a redução da demanda de matérias-primas naturais, como areia e brita, além de proporcionar resistência e durabilidade ao produto final (Santos *et al.*, 2021).

A Figura 1 mostra os três maiores produtores mundiais de minérios de ferro e, conseqüentemente, de rejeito de minério de ferro: Austrália, Brasil e China. E é importante salientar que a produção brasileira tem crescido ao longo da série histórica. Até mesmo no ano de 2020, durante a pandemia de COVID-19, quando os outros dois países tiveram uma redução na produção, o Brasil manteve o ritmo de crescimento. Ao aplicar-se a métrica de 20 a 40% sobre o total produzido, conforme Carmignano *et al.* (2021), é possível estimar a quantidade de rejeitos gerados.

Figura 1- Produção de minério de ferro dos três maiores produtores mundiais.



Fonte: Adaptado de USGS (2020, 2021, 2022, 2023).

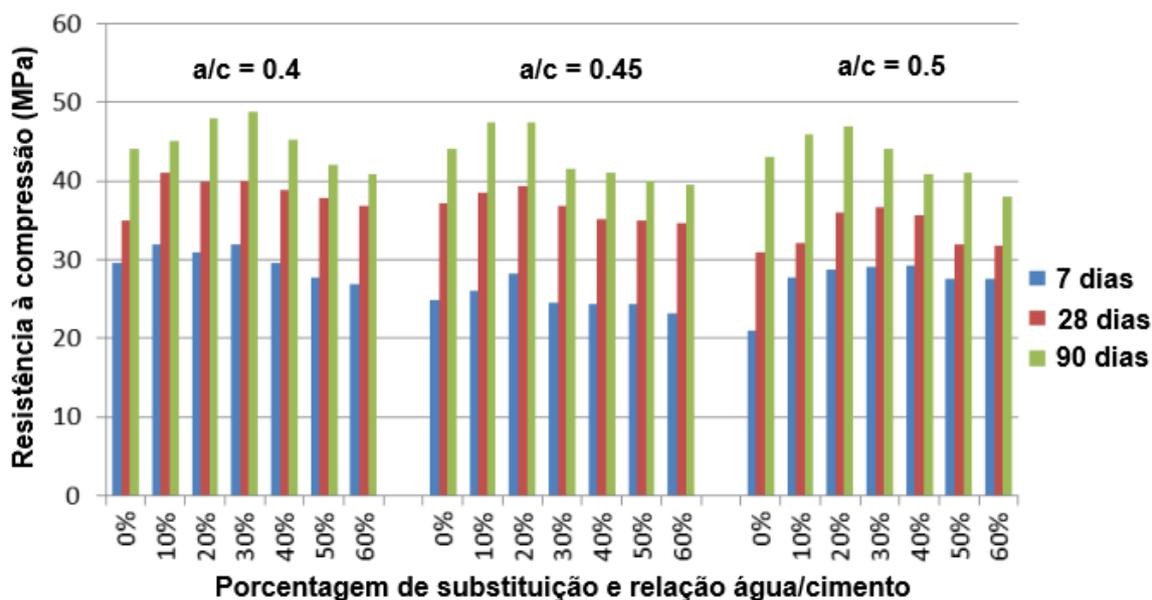
2.1.1 Aplicações

O uso de rejeitos de minério de ferro (RMF) tem se mostrado uma alternativa viável e sustentável para reduzir o impacto ambiental causado pelo armazenamento em barragens. Na construção civil, a sua incorporação como material de construção tem se dado a partir da substituição de frações de agregados finos, tanto de concreto quanto de argamassas. Alguns trabalhos acerca deste uso constataram que esses rejeitos contribuem para a resistência do concreto, tornando-o uma alternativa potencial para aplicações sustentáveis (Chen *et al.*, 2018). Isso foi verificado por Santos *et al.*, (2021), que constataram uma resistência mecânica significativa, além de um perfil de durabilidade adequado para aplicações em estruturas de concreto que demandam maior desempenho, como pontes e edifícios.

Para além dessa aplicação, Liu *et al.* (2019) demonstram que o desenvolvimento de compósitos cimentícios ecológicos reforçados com RMF, têm se mostrado uma estratégia vantajosa tanto no aspecto técnico quanto ambiental, e ainda, promovendo o aumento de resistência e durabilidade. Além de proporcionar maior ductilidade, o que é um benefício em aplicações onde se exige resistência a tração e impacto, como pavimentos e estruturas de suporte.

A Figura 2, adaptada de Thomas *et al.* (2013) apresenta a resistência à compressão de diferentes traços de concretos com substituição da areia por RMF. Nela, é possível perceber que o traço com 20% de substituição apresentou a maior resistência para os traços com relação água cimento de 0,45 e 0,5. E para o traço com relação água cimento de 0,4, o valor atingido é próximo ao traço com 30 %. Diante disso, é possível inferir que 20% seria um teor ótimo de substituição.

Figura 2 - Comportamento de concretos com diferentes traços com incorporação de RMF.



Fonte: Adaptado de Thomas *et al.* (2013).

No que se refere à questão ambiental, a substituição parcial de cimento por pó de RMF tem demonstrado o potencial de redução na pegada de carbono dos concretos. Essa estratégia contribui para a diminuição das emissões de CO₂, considerando que a produção de clínquer no cimento é uma das fontes mais intensivas em carbono da indústria (Zhao *et al.*, 2020). Acrescido a isso, a aplicação como substituto de agregados e cimento contribui diretamente para a economia circular.

2.1.2 Histórico

Historicamente, a mineração de ferro gerou uma quantidade significativa de rejeitos, os quais inicialmente foram considerados apenas como resíduos e tratados como passivos ambientais. Por serem produzidos em grande escala - da ordem de milhões de toneladas por ano - passaram a ser armazenados em barragens e descartados em locais de difícil recuperação. Sendo assim, com o passar dos anos, a necessidade de adotar práticas mais sustentáveis e economicamente viáveis impulsionou a pesquisa para reutilização desses materiais, especialmente no setor da construção civil (Santos *et al.*, 2020).

Nesse sentido, a aplicação de RMF em concretos e outros materiais de construção começou a ganhar força na década de 1990, quando as primeiras pesquisas concluíram que a incorporação destes materiais como substitutos de recursos naturais não renováveis, como a areia, apresentava-se como uma alternativa viável. No cenário internacional, países como China e Estados Unidos passaram a explorá-los como alternativa sustentável e econômica, incentivando a reutilização em concretos e tijolos. Com isso, buscava-se não apenas reduzir a quantidade de resíduos, mas também mitigar o impacto ambiental causado pela extração de recursos naturais (Zhu *et al.*, 2018).

Já no cenário brasileiro, a prática de reutilização de RMF teve um crescimento expressivo a partir do início dos anos 2000, quando o Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais, passou a explorar em larga escala a produção mineral. E sabendo das consequências negativas que isso poderia acarretar, Gomes *et al.* (2021) pesquisaram acerca do potencial de reutilização do RMF no desenvolvimento de concretos sustentáveis e de tijolos ecológicos, o que diminuiria a demanda por áreas de barragens. Sendo assim, puderam mostrar que os rejeitos apresentam uma composição química que possibilita sua incorporação em produtos de construção com bom desempenho técnico e ambiental. Além de mitigar o volume assentado em barragens, que demandam de um constante controle e monitoramento dos riscos envolvidos nesta estratégia.

Além disso, a caracterização dos rejeitos em termos de sua composição química e física possibilitou uma melhor adaptação para aplicações específicas na construção civil. Segundo as pesquisas de Almeida (2019), o uso de RMF contribui para a melhoria de propriedades mecânicas dos materiais e reduz o consumo de matérias-primas não-renováveis, como areia e brita, em concretos e compósitos cimentícios. Quanto à composição, Carmignano *et al.* (2021) concluíram que os principais constituintes dos RMF são o óxido de ferro, sílica e o óxido de alumínio. O que pode ser verificado na Tabela 1, que compila as principais composições de RMF do Brasil e algumas minas no mundo.

Tabela 1 - Principais composições de diferentes RMF.

Componentes químicos principais (%)						Local de Extração
Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Outros compostos	
8.38	90.40	0.43	0.06	< 0.1	0.63	MG, Brazil
11.6	84.20	1.60	–	–	2.6	MG, Brazil
11.31	75.23	2.64	1.47	2.10	7.25	Liaoning, China
12.31	34.72	16.22	7.63	8.92	20.2	Nanjing, China
15.1	84.4	0.45	0.07	< 0.1	0	MG, Brazil
18.58	36.48	11.67	16.85	5.66	10.76	Jiangsu, China
21.2	45.6	12.1	1.79	–	19.31	China
21.4	65.7	0.8	–	–	12.1	MG, Brazil
21.5	71.4	–	–	–	7.1	MG, Brazil
29.35	49.20	1.46	0.12	–	19.87	MG, Brazil
32.0	46.68	3.89	–	–	17.43	MG, Brazil
35.0	63.0	1.20	–	–	0.8	MG, Brazil
38.8	14	2.01	37.5	0.36	44.83	China
42.4	47.9	5.61	0.13	< 0.1	3.86	MG, Brazil
44.52	24.40	10.95	6.20	0.99	12.94	Hubei, China
47.80	30.0	21.2	0.1	0.1	0.8	MG, Brazil
51.37	15.11	3.39	0.23	0.16	29.74	MG, Brazil
55.78	16.58	15.46	1.44	0.13	10.61	Joda-Badbil, Orissa, India
69.21	11.42	2.38	0.49	0.11	16.39	Bosnia and Herzegovina
71.70	20.10	2.30	0.10	–	5.8	MG, Brazil
73.3	8.76	1.49	3.88	0.94	11.63	China

Fonte: Adaptado de Carmignano *et al.* (2021).

Neste contexto, Rahman *et al.* (2019) reforçam que a incorporação de RMF nos materiais utilizados na fabricação de tijolos ecológicos pode ser uma solução viável. Uma vez que esses produtos demandam pouco cimento para serem confeccionados e não exigem alta resistência. Logo, é possível obter tijolos com desempenho comparáveis àqueles nos quais não há o emprego de rejeitos. E isso possibilitou que os autores concluíssem que é possível produzir materiais de construção civil (os tijolos com emprego de RMF)

ecologicamente corretos, do ponto de vista do impacto ambiental, o que atende às crescentes demandas por sustentabilidade na indústria da construção civil.

Portanto, o uso de RMF como material de construção evoluiu de uma estratégia emergencial para se tornar uma prática bem estabelecida, tanto no Brasil quanto no exterior. O que foi possível graças ao desenvolvimento de tecnologias que viabilizam a reutilização desses resíduos com segurança e eficiência. Além de possibilitar a mitigação dos impactos ambientais causados pela mineração e construção civil (Silva *et al.*, 2021).

2.1.3 Aplicações específicas

Em se tratando de aplicações específicas, como no caso dos concretos de ultra-alto desempenho (UHPC), a substituição dos agregados finos pelos RMF contribui para a resistência e a durabilidade do material. Os trabalhos de Góis *et al.* (2020) e Li *et al.* (2021) mostram que esses rejeitos melhoram a resistência à compressão e reduzem a permeabilidade do concreto, aumentando sua aplicabilidade em estruturas que exigem alta durabilidade.

Já nas obras de infraestrutura, os RMF têm sido incorporados na pavimentação, especialmente em micro revestimentos asfálticos e misturas de pavimentação asfáltica a quente. Outrossim, a substituição parcial dos agregados naturais tem originado misturas com bom desempenho mecânico e durabilidade adequada para pavimentos de alto tráfego. Esse uso também contribui para a diminuição da quantidade de rejeitos armazenados em barragens, reduzindo o risco ambiental (Souza; Pereira, 2022; Santos *et al.*, 2019).

Conforme a Tabela 2, de Filho (2017), são apresentadas 3 amostras de RMF utilizadas como subleitos de rodovias. E para cada um dos casos são apresentados os valores de CBR e expansão acima daqueles exigidos pelas normativas do DNIT. O que atesta a viabilidade de uso do material para o fim proposto.

Tabela 2 - Resultados de ensaio do índice CBR e Expansão de amostras com RMF utilizadas na confecção de subleitos para rodovias.

Amostra de Resíduos de Minério de Ferro	Energia de Compactação	CBR (%)	Expansão (%)
1	Proctor Normal	9	0,30
2	Proctor Intermediário	29	0,14
3	Proctor Modificado	53	0,11

Fonte: Filho (2017).

Outro uso interessante do ponto de vista de engenharia tem sido em pavimentação com blocos de concreto intertravados, que representa uma solução eficaz para o setor de infraestrutura. Essa estratégia foi avaliada por Ferreira *et al.*, (2020) e os resultados indicam que o material apresenta propriedades adequadas de resistência à compressão, sendo aplicável em áreas de tráfego leve e moderado. Essa técnica aproveita as propriedades

do rejeito, que proporciona uma boa trabalhabilidade, além de ser uma opção economicamente viável em comparação aos agregados tradicionais.

Mais um campo promissor para o emprego dos RMF é no desenvolvimento de cerâmicas vermelhas, como tijolos e blocos. Essas cerâmicas, que tradicionalmente utilizam argila, podem incorporar os rejeitos, melhorando propriedades como resistência mecânica e durabilidade. Essa aplicação é especialmente vantajosa em regiões onde a disponibilidade de argila é limitada e a presença de rejeitos de minério é abundante (Silva *et al.*, 2021).

No que se refere à produção de geopolímeros, uma alternativa interessante é a substituição do cimento Portland tradicional por um material cimentício ambientalmente sustentável. Geopolímeros à base de RMF foram desenvolvidos com sucesso, mostrando propriedades mecânicas e térmicas interessantes, adequadas para diversas aplicações, incluindo o uso em pavimentos e em estruturas que exigem alta durabilidade e resistência química (Soares *et al.*, 2021).

Por fim, mas ainda sem esgotar os campos de emprego de RMF atualmente em estudo, o uso como agregados sintéticos combinando com materiais reciclados, como o polietileno tereftalato (PET), formando um tipo de cascalho sintético com propriedades adequadas para uso em concretos. Tem propiciado leveza e boa resistência ao agregado resultante, além de apresentar uma solução inovadora para o aproveitamento desses dois tipos de resíduos muito abundantes atualmente (Almeida *et al.*, 2020).

2.2 Agregados

2.2.1 Definição

Os agregados são materiais granulares, sem forma e volume definidos, geralmente inertes, como areia, brita, cascalho, entre outros, que são misturados com cimento e água para formar concreto e outras misturas cimentícias. Segundo a NBR 7211:2022, os agregados são classificados como miúdos e graúdos, que são as areias e as pedras e cascalhos, respectivamente.

Segundo Mehta e Monteiro (2008), os agregados são responsáveis por três propriedades muito importantes do concreto: estabilidade dimensional, módulo de elasticidade e massa unitária. E por serem materiais inertes, a sua composição química não tem tanta influência quanto a física.

2.2.2 Agregados reciclados

Além dos aspectos técnicos, a viabilidade econômica da utilização de agregado reciclados como materiais de construção civil é amplamente abordada na literatura científica. De acordo com Almeida (2021), os custos de produção podem ser reduzidos devido à menor dependência de recursos naturais e à reutilização de materiais que, de outra forma, seriam descartados.

No entanto, a utilização de agregados reciclados pode influenciar as propriedades mecânicas e reológicas das argamassas. Santos e Oliveira (2018), indicam que a absorção de água dos agregados reciclados é superior à dos agregados naturais, podendo impactar a trabalhabilidade e a resistência mecânica das argamassas. Para mitigar esses efeitos, algumas pesquisas sugerem a necessidade de ajustes na proporção água/cimento e no uso de aditivos plastificantes (Mendes *et al.*, 2019).

Existem alguns materiais que têm sido mais estudados e apresentado bom desempenho substituindo totalmente ou parcialmente a areia natural. Segundo Ling e Poon (2017), ao moer o vidro em partículas muito finas e substituir 20% do agregado miúdo de argamassas, melhora-se a durabilidade devido à sua baixa absorção de água e não há perdas significativas na resistência mecânica. De modo análogo, Siddique e Khan (2019) apontam que as cinzas volantes, sub produtos da queima de carvão em termelétricas podem ser utilizadas como material pozolânico. Uma vez que sua adição em argamassas melhora a trabalhabilidade e reduz a permeabilidade, aumentando a resistência a sulfatos e a carbonatação.

Outro exemplo importante de agregado reciclado que tem sido estudado e relatado na literatura é a borracha de pneu triturada. A substituição de 10% do agregado natural por este material, reduz a resistência à compressão de materiais à base de cimento em até 20 %, porém, aumenta a capacidade de absorção de água. Além de proporcionar melhor isolamento térmico e acústico (Gupta *et al.*, 2018, p. 78).

Neste contexto, a utilização de agregados provenientes dos rejeitos de minério de ferro (RMF) apresentam-se como uma alternativa. No item 2.1 desta pesquisa é apresentada uma revisão de literatura sobre este tema.

2.2.3 Caracterização dos agregados

A caracterização dos agregados é essencial para garantir a qualidade do concreto. A NBR 7211:2022 define métodos para determinação da massa específica, massa unitária, análise granulométrica, módulo de finura e teor de substâncias deletérias nos agregados. Tais características influenciam diretamente nas propriedades do concreto, como resistência, durabilidade e trabalhabilidade.

2.2.3.1 Massa Específica Aparente

A massa específica aparente de um agregado é a relação entre a massa do agregado e o volume total que ele ocupa, incluindo os vazios entre as partículas. Essa característica é determinada pelo método de ensaio prescrito na NBR NM 52:2009. A massa específica aparente influencia diretamente na massa do concreto fresco e na dosagem dos materiais, sendo crucial para o controle da qualidade do concreto. Segundo estudos de Gomes *et al.* (2017), a massa específica aparente dos agregados tem influência direta na resistência e na durabilidade do concreto.

2.2.3.2 Massa Unitária

A massa unitária de um agregado é a massa de uma unidade de volume de agregado, considerando os vazios entre as partículas. Este parâmetro é determinado de acordo com a ABNT NBR 16972:2021. A massa unitária é essencial para o cálculo das proporções de agregados na mistura de concreto, influenciando diretamente na trabalhabilidade, resistência e durabilidade do concreto final. Conforme destacado por Silva e Santos (2019), a massa unitária dos agregados é um dos parâmetros fundamentais para garantir a qualidade e as propriedades desejadas do concreto.

2.2.3.3 Análise Granulométrica

A análise granulométrica é um ensaio fundamental para determinar a distribuição das dimensões das partículas do agregado. A NBR NM 248:2001 estabelece o procedimento para esse ensaio. A distribuição granulométrica afeta diretamente as propriedades do concreto, como a trabalhabilidade, a resistência e a durabilidade, sendo crucial para o controle da qualidade dos agregados e do concreto. Estudos de Martins *et al.* (2020) destacam a importância da análise granulométrica na determinação das características dos agregados e no desempenho do concreto.

2.2.3.4 Módulo de Finura

O módulo de finura é um índice que quantifica a distribuição das partículas de um agregado em uma escala granulométrica. Este parâmetro é obtido por meio da soma das porcentagens retidas acumuladas em cada

peneira padronizada, conforme a NBR NM 248:2001. O módulo de finura é uma medida importante para avaliar a adequação dos agregados às especificações do concreto, influenciando na trabalhabilidade, resistência e durabilidade do material. De acordo com Santos e Lima (2018), o módulo de finura é um indicador chave para o controle da qualidade dos agregados e do concreto.

2.2.3.5 Substâncias Deletérias

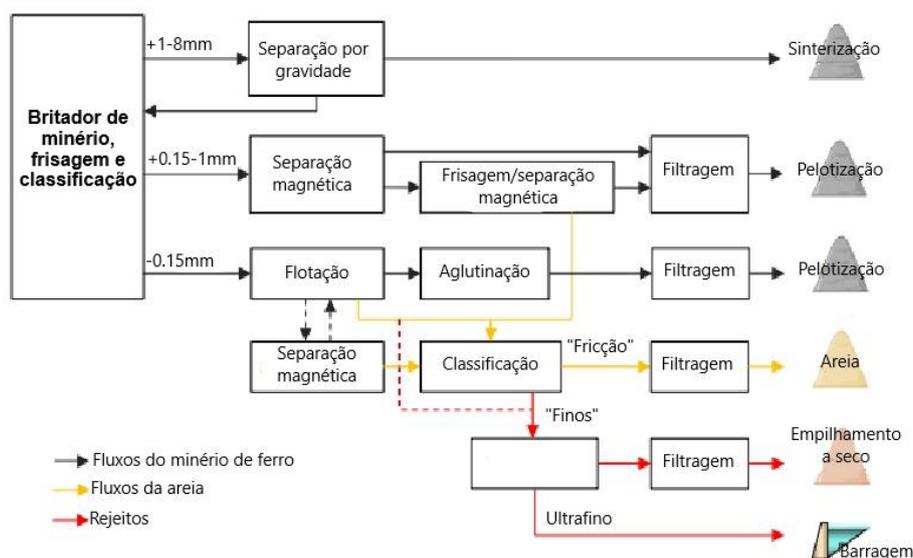
As substâncias deletérias nos agregados são materiais indesejáveis que podem comprometer a qualidade e a durabilidade do concreto. A presença de substâncias como argila, matéria orgânica e sais solúveis em excesso pode afetar negativamente as propriedades do concreto, aumentando sua suscetibilidade à deterioração. A NBR NM 248:2001 estabelece limites para a quantidade dessas substâncias nos agregados, garantindo a qualidade e a durabilidade do concreto produzido. A remoção ou controle dessas substâncias é essencial para garantir a performance e a durabilidade das estruturas de concreto. Segundo Almeida e Oliveira (2016), a presença de substâncias deletérias nos agregados pode comprometer significativamente a qualidade e a durabilidade do concreto em longo prazo.

2.3 Areia de rejeito de mineração

De acordo com a Diretriz 2004/35/CE, a areia de mineração é um dos principais componentes dos rejeitos de mineração. É obtida através de processos de separação dos resíduos sólidos e lamas provenientes das plantas industriais de mineração.

De acordo com Gallagher *et al.* (2022), o processo de mineração, no qual um dos subprodutos é a areia de mineração, pode ser ilustrado pelo fluxograma da Figura 3.

Figura 3 - Fluxograma do processo de mineração.



Fonte: Adaptado de Gallagher *et al.* (2022).

2.4 Cimento Portland

Atualmente, a ABNT NBR 16697:2018 define o cimento Portland como sendo: “Ligante hidráulico obtido pela moagem de clínquer Portland, ao qual se adiciona, durante a fabricação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio e adições minerais nos teores estabelecidos nesta Norma”.

Ainda de acordo com a ABNT NBR 16697:2018, existem 10 tipos diferentes subtipos de cimentos. Divididos em subtipos e com variações em suas composições. Desde aqueles com coloração branca, até aqueles que não têm qualquer tipo de adição em sua composição básica. A tabela 1 da referida norma traz essa classificação, conforme a Tabela 3.

Tabela 3 - Tipos de cimentos existentes conforme a ABNT NBR 16697:2018.

Designação normalizada (tipo)	Subtipo	Sigla	Classe de resistência	Sufixo
Cimento Portland comum	Sem adição	CP I	25, 32 ou 40	RS ou BC
	Com adição	CP I-S		
Cimento Portland composto	Com escória granulada de alto forno	CP II-E		
	Com material carbonático	CP II-F		
	Com material pozolânico	CP II-Z		
Cimento Portland de alto-forno		CP III		
Cimento Portland pozolânico		CP IV		
Cimento Portland de alta resistência inicial		CP V	ARI	
Cimento Portland branco	Estrutural	CPB	25, 32 ou 40	
	Não estrutural	CPB	-	-

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 16697:2018.

Embora exista toda essa quantidade de tipos diferentes de cimentos, ainda há a divisão em classes de resistência, o que cria ainda, alguns outros cimentos diferentes.

2.5 Argamassas

As argamassas em análise neste trabalho são denominadas de argamassas inorgânicas. E são definidas pela ABNT NBR 13281-1:2023 como: “mistura homogênea de um ou mais ligante inorgânicos, agregados miúdos (conforme as ABNT NBR 7211 e ABNT NBR 7221) e água, que pode conter fibras, adições e/ou aditivos, com características específicas de desempenho adequadas à utilização”.

No que se refere às propriedades das argamassas, destacam-se: trabalhabilidade, aderência, resistência mecânica, retenção de água e durabilidade. De acordo com Santos (2020), a trabalhabilidade está relacionada à facilidade com que a argamassa pode ser misturada, manuseada e aplicada. Já a aderência, refere-se à capacidade da argamassa de fixar-se às superfícies em que é aplicada, como blocos, tijolos ou estruturas de concreto, garantindo a estabilidade do conjunto (Ferreira; Lima, 2018). A resistência mecânica é definida como a capacidade de resistir a cargas e tensões ao longo do tempo (Nascimento, 2019). E a retenção de água é a capacidade da argamassa em reter a água de amassamento e não a perder para o substrato ou para o ambiente, permitindo uma cura adequada e prevenindo fissuras (Silva; Pereira, 2017). Por fim, a durabilidade

é a capacidade da argamassa de resistir às condições ambientais, como variações de temperatura, umidade e agentes químicos (Martins, 2021).

Em relação à sua aplicação, as argamassas podem ser utilizadas de quatro maneiras diferentes: No assentamento de alvenaria, promovendo a ligação entre as peças (blocos ou tijolos) e garantindo a estabilidade estrutural (Ferreira; Lima, 2018). Em revestimentos, promovendo o acabamento de paredes, tetos e fachadas e, proporcionando proteção e estética às superfícies (Santos, 2020). Além disso, também são aplicadas para realizar reparos e recuperação estrutural, a fim de corrigir manifestações patológicas em estruturas, tais como fissuras, trincas e deslocamentos (Nascimento, 2019). Por último, as argamassas podem ser aplicadas para impermeabilizar áreas sujeitas à umidade, como piscinas e fundações (Silva; Pereira, 2017).

Em se tratando dos ensaios a serem realizados nas argamassas, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), define os seguintes ensaios a serem realizados de acordo com as suas respectivas normativas: Determinação da consistência (trabalhabilidade) de acordo com a ABNT NBR 13276:2016; Retenção de água, segundo a ABNT NBR 13277:2005; Resistência à compressão, cujo método está descrito na ABNT NBR 13279:2005; Aderência à tração na flexão, conforme o procedimento descrito pela ABNT NBR 13528:2010; Absorção de água por capilaridade, segundo os critérios e procedimentos descritos na ABNT NBR 9779:2012. Densidade de massa no estado fresco, ou ainda, massa específica no estado fresco, cujo método é descrito na ABNT NBR 13278:2005. E por fim, retração por secagem, que é normatizado pela ABNT NBR 15261:2005.

3 Materiais e Abordagem Metodológica

3.1 Materiais

Os materiais utilizados neste estudo incluem o Cimento Portland CP V ARI RS, o Cimento Portland CP III 40 RS, a areia natural de cava, a areia proveniente de rejeito de mineração e aditivo redutor de água. A areia natural de cava foi escolhida como material de referência, por ser amplamente empregada em concretos e argamassas. O trabalho avalia a substituição parcial dessa areia pela areia de rejeito, tanto em misturas com o CP V ARI RS (que contém pouca adição mineral) quanto com o CP III 40 RS, que apresenta uma elevada quantidade de adição (escória de alto-forno), a fim de verificar o impacto dessas variações nos resultados. Além disso, o aditivo redutor de água foi incorporado em algumas misturas para garantir a manutenção da trabalhabilidade. O teor utilizado foi de 0,45% em relação à massa de cimento. Este teor foi escolhido a partir da análise qualitativa da trabalhabilidade apresentada pelas argamassas de teste confeccionadas antes da campanha experimental.

Para avaliar o desempenho de argamassas de cimento Portland com adição de rejeito de minério de ferro como agregado, foram definidos três proporcionamentos com substituição parcial da areia natural pela areia de rejeito de mineração (10, 20 e 30%), além de um traço de referência contendo apenas areia natural, para o cimento CP V ARI RS. No caso do cimento CP III 40 RS, foram formuladas duas argamassas: uma de referência e outra com 20% de substituição da areia natural por areia de rejeito de mineração.

3.1.1 Areias

3.1.1.1 Areia de Rejeito de Mineração

O agregado miúdo obtido pelo beneficiamento dos rejeitos de mineração da empresa Vale (Vale, 2021 apud Cipriano, 2024) pode ser visualizado na Figura 4. Os ensaios realizados para caracterizar este material foram os seguintes: Granulometria, massa unitária, massa específica e material pulverulento. Os quais foram feitos de acordo com as seguintes normas: ABNT NM 248:200, ABNT NBR 16972:2021, ABNT NBR 9776/1987 e ABNT NBR 16973:2021, respectivamente.

Figura 4 - Areia de rejeito de mineração utilizada na pesquisa.



Fonte: Autores (2024).

3.1.1.2 Areia Natural

Agregado miúdo de cava retirado de jazidas do município de Linhares, no norte do estado do Espírito Santo-Brasil (Figura 5). A sua escolha foi devido ao fato de sua qualidade já ser conhecida. Os ensaios realizados para caracterizar este material foram os seguintes: granulometria, massa unitária, massa específica e material pulverulento. Os quais foram feitos de acordo com as seguintes normas: ABNT NM 248:200, ABNT NBR 16972:2021, ABNT NBR 9776/1987 e ABNT NBR 16973:2021, respectivamente. Adicionalmente, este material foi exposto à calcinação para que se investigasse a possível influência de materiais nocivos no comportamento das argamassas, conforme o item 3.1.1.7.

Figura 5 - Areia natural utilizada na pesquisa.



Fonte: Autores (2024).

3.1.1.3 Granulometria

Conforme preconiza a ABNT NM 248:200, foi utilizada a série normal de peneiras para que se efetuasse o ensaio. Adicionalmente, a peneira de abertura 0,075 mm também foi utilizada. Como não havia a possibilidade de utilizar o agitador mecânico, foi feito o peneiramento com agitação manual em cada peneira por um tempo maior que 2 min, conforme o item 5.2.10 da referida norma. A Figura 6 apresenta a série de peneiras utilizadas neste ensaio.

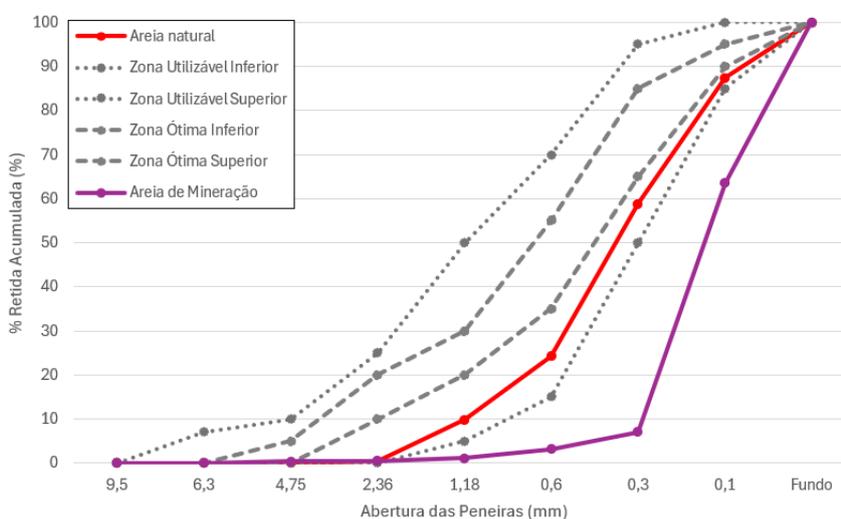
Figura 6 – Série de peneiras utilizada no ensaio de granulometria.



Fonte: Autores (2024).

A Figura 7 apresenta as curvas granulométricas da areia natural e da areia de rejeito de minério de ferro.

Figura 7 – Curvas granulométricas da areia natural e da areia de RMF.

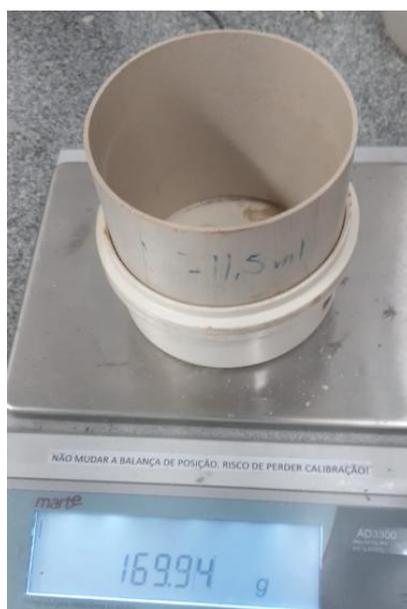


Fonte: Autores (2024).

3.1.1.4 Massa Unitária

Para que fosse possível fazer esta mensuração, foi utilizado o procedimento análogo ao descrito na ABNT NBR 13278:2005. A massa unitária é obtida através da razão entre a massa de material seco pelo volume que ele ocupa. Para tanto, foi utilizado um recipiente com capacidade de 711,50 cm³ e 169,70 g de massa, conforme a Figura 8.

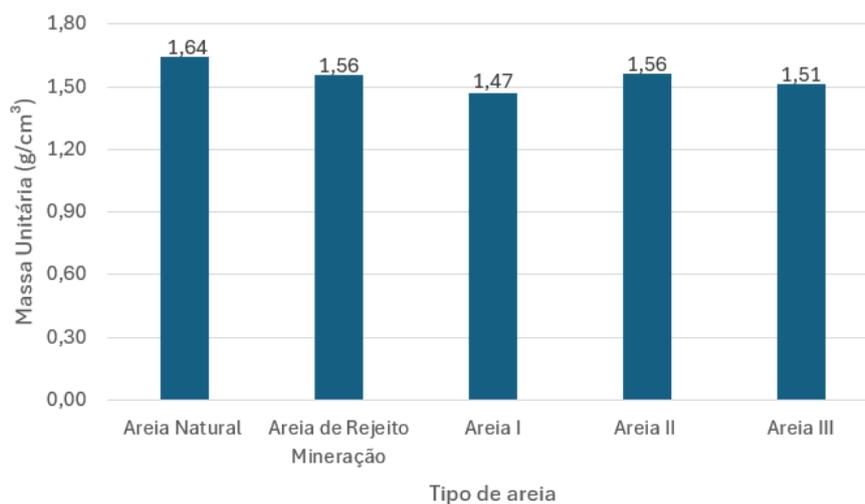
Figura 8 - Recipiente utilizado para realizar o ensaio de Massa Unitária.



Fonte: Autores (2024).

A Figura 9, apresenta o resultado do ensaio de massa unitária das areias. Nela, a areia I corresponde a 10% de areia de RMF e 90% de areia natural; a areia II corresponde a 20% de areia de RMF e 80% de areia natural; a areia III corresponde a 30% de areia de RMF e 70% de areia natural.

Figura 9 - Massa unitária das areias.

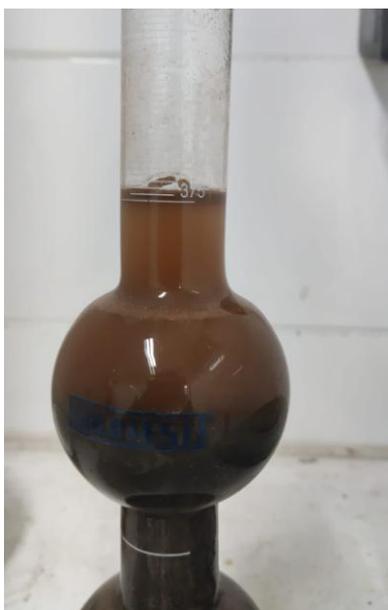


Fonte: Autores (2024).

3.1.1.5 Massa Específica

O ensaio de massa específica foi realizado de acordo com o procedimento descrito na ABNT NBR 9775:2011. E consiste em aferir a variação volumétrica obtida após a inserção de uma massa de areia conhecida (500 g), para isso, utiliza-se um frasco modelo Chapman com 200 ml de água. A Figura 10 exemplifica o volume atingido por uma amostra durante o ensaio.

Figura 10 - Leitura da variação de volume no frasco de Chapman.

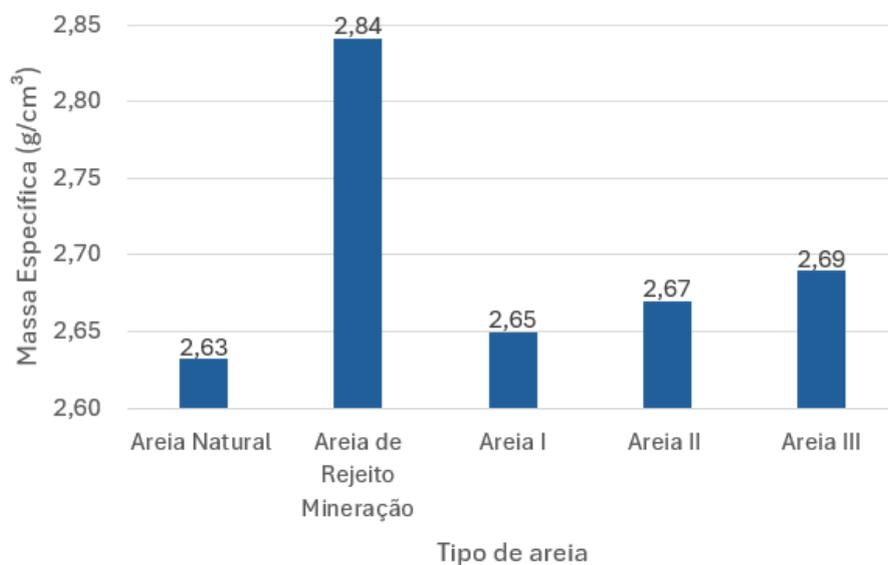


Fonte: Autores (2024).

Para a realização deste ensaio, foram utilizados dois frascos tipo Chapman de fabricantes diferentes, o que por sua vez implicou na utilização de dois fatores de correção diferentes para cada um deles. Este fator foi fornecido pelos técnicos do LEMAC, sendo 0,9928 para o frasco Chapman da empresa Labor Quimi e 1,038 para o outro. Estes fatores são multiplicados pelo valor na respectiva massa específica calculada. A Figura 11 apresenta os resultados de massa específica aparente das areias. Percebe-se que a areia de RMF é mais pesada por conter ferro na sua constituição, o que implica em maior massa específica das areias compostas.

A partir da análise da Figura 11, é possível concluir que a areia natural tem a menor massa específica, cujo valor é de 2,63 g/cm³. Além disso, é possível concluir que a areia de mineração tem a maior massa específica, cujo valor é de 2,84 g/cm³. Já para as areias I, II e III, era esperado que as suas respectivas massas específicas estivessem no intervalo entre 2,63 e 2,81 g/cm³, uma vez que elas são compostas pela areia natural e proporções da areia de mineração. Neste sentido, a massa específica das areias I, II e III são de 2,65; 2,67 e 2,69 g/cm³, respectivamente. O que condiz com o fato de que o aumento do grau de substituição de areia natural pela de mineração, aumentou a massa específica da areia resultante.

Figura 11 - Massa específica das areias.



Fonte: Autores (2024).

3.1.1.6 Material Pulverulento

Para aferir o teor de material pulverulento das areias e misturas utilizadas nesta pesquisa, foi utilizado o procedimento descrito na ABNT NBR 16973:2021. Fazendo passar pela peneira de abertura 0,075 mm toda a quantidade de material com dimensão inferior à abertura, utilizando para isso a água corrente.

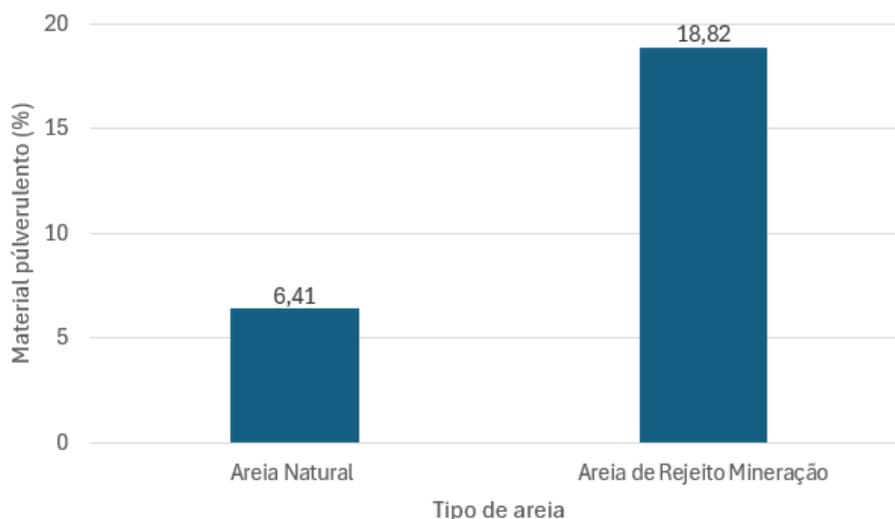
A Figura 12 apresenta um material antes, após ser lavado e após ser secado. A primeira imagem representa a massa de material inicial. A segunda representa a cor límpida da água que passa pela peneira, o que evidencia que não há mais material passante. E por fim, a terceira imagem representa a massa de material após a secagem em estufa. A Figura 13 apresenta o resultado de material pulverulento das areias.

Figura 12 - Amostra de areia durante o ensaio.



Fonte: Autores (2024).

Figura 13 - Material pulverulento das areias.



Fonte: Autores (2024).

A NBR 7211 (2009) estabelece os teores máximos de material pulverulento em agregados miúdos, sendo permitido até 12% em agregados provenientes de britamento de rocha, e 5% para agregados naturais. Percebe-se que ambas as areias apresentam valores altos de partículas abaixo de 0,075 mm.

3.1.1.7 Substância nocivas da Areia Natural

Por ser uma areia natural e proveniente de extração *in locu* este material contém matéria orgânica e/ou materiais carbonosos, o que é visível a olho nu, conforme a Figura 14. Sendo assim, a fim de investigar se haveria alguma interferência em seu comportamento, foi feito um processo de calcinação.

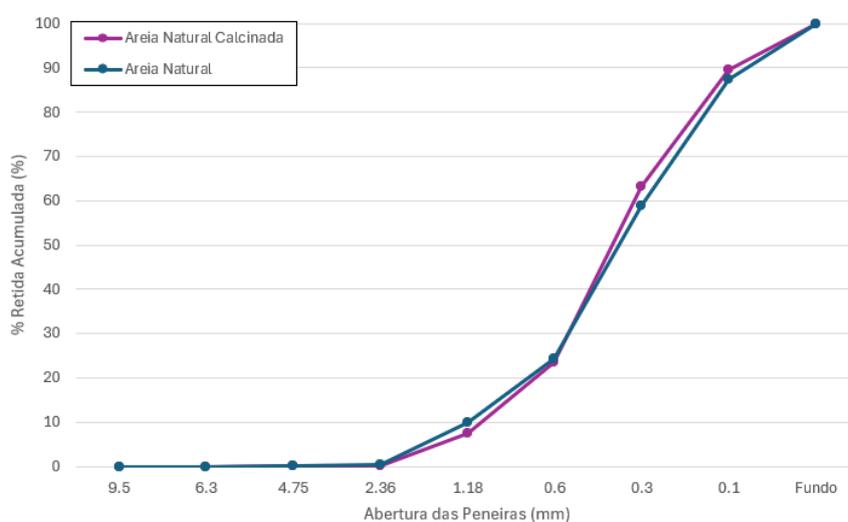
Figura 14 - Amostra de Areia Natural com substâncias nocivas.



Fonte: Autores (2024).

Como o objetivo era calcinar a matéria orgânica sem, no entanto, quantificá-la. Inicialmente procedeu-se de maneira análoga ao prescrito na ABNT NBR 13600:2022, expondo o material por 24 h na mufla sob uma temperatura de 440° C. E após isso, foi realizado o ensaio de peneiramento, o qual não apresentou variação significativa quando comparado com aquele para a areia em seu estado natural. Sendo assim, admitiu-se que para o horizonte de pesquisa deste trabalho, não haveria a necessidade de se trabalhar apenas com o material calcinado e, por conseguinte, quantificar a perda ao fogo. A Figura 15 apresenta a curva granulométrica da areia natural e da mesma após ser calcinada.

Figura 15 – Curva granulométrica da areia natural e calcinada.



Fonte: Autores (2024).

3.1.2 Cimento Portland

Os aglomerantes utilizados neste trabalho para confecção das argamassas são provenientes da CSN cimentos S.A., sendo do tipo CP V ARI RS e CP III 40 RS. Sendo assim, de acordo com a Tabela 1 da ABNT NBR 16697:2018 eles trazem as seguintes informações: “CP V ARI RS: Cimento Portland de alta resistência inicial, apresentando a 1 dia de idade resistência igual ou superior a 14 MPa e, é resistente a sulfatos, apresentando expansão menor ou igual a 0,03% aos 56 dias de idade, conforme método de ensaio da ABNT NBR 13583 (Anexo A).” e “CP III 40 RS: Cimento Portland de alto-forno, que apresenta aos 28 dias de idade o valor mínimo de resistência à compressão igual a 40 MPa, conforme método de ensaio da ABNT NBR 7215.”

As caracterizações dos cimentos foram disponibilizadas pelo fabricante e são apresentados no laudo exposto nas Figuras 16 e 17.

Figura 16 - Laudo de caracterização do cimento CP V ARI RS.

ENSAIOS QUÍMICOS					
ENSAIOS	NBR N°	UNIDADE	Média	ESPECIFICAÇÃO NORMA NBR 16697/18	
PF 950C	NM18/12	%	4.56	<=6.50	
SO3	NBR14656/01	%	2.70	<=4.50	
RI	NM15/12	%	1.87	não aplicável	
MgO	NBR14656/01	%	2.28	não aplicável	

ENSAIOS FÍSICOS					
ENSAIOS	NBR N°	UNIDADE	Média	ESPECIFICAÇÃO NORMA NBR 16697/18	
Blaine	NBR16372/15	cm ² /g	4854	não aplicável	
Ret.38mic	NBR12826/14	%	2.1	não aplicável	
IP	NBR16607/18	min	180	>=60	
FP	NBR16607/18	min	220	não aplicável	

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO					
ENSAIOS	NBR N°	UNIDADE	Desvio	Média	ESPECIFICAÇÃO NORMA NBR 16697/18
Resist.Comp.1D(NBR)	NBR7215/19	MPa	1.28	21.2	>=14.0
Resist.Comp.3D(NBR)	NBR7215/19	MPa	0.95	31.7	>=24.0
Resist.Comp.7D(NBR)	NBR7215/19	MPa	0.58	40.4	>=34.0
Resist.Comp.28D(NBR)	NBR7215/19	MPa	0.57	51.0	não aplicável

Fonte: CSN cimentos S.A.

Figura 17 - Laudo de caracterização do cimento CP III 40 RS.

ENSAIOS QUÍMICOS					
ENSAIOS	NBR N°	UNIDADE	Média	ESPECIFICAÇÃO NORMA NBR 16697/18	
PF 950C	NM18/12	%	0.90	<=6.50	
SO3	NBR14656/01	%	2.26	<=4.50	
MgO	NBR14656/01	%	3.67	não aplicável	

ENSAIOS FÍSICOS					
ENSAIOS	NBR N°	UNIDADE	Média	ESPECIFICAÇÃO NORMA NBR 16697/18	
Blaine	NBR16372/15	cm ² /g	4203	não aplicável	
Ret.75mic	NBR11579/13	%	0.6	<=8.0	
Ret.38mic	NBR12826/14	%	6.4	não aplicável	
IP	NBR16607/18	min	193	>=60	
Expansibilidade Le Chatelier	NBR11582/16	mm		<=5.00	
FP	NBR16607/18	min	234	não aplicável	
A/C	NBR16606/18	%	31	não aplicável	

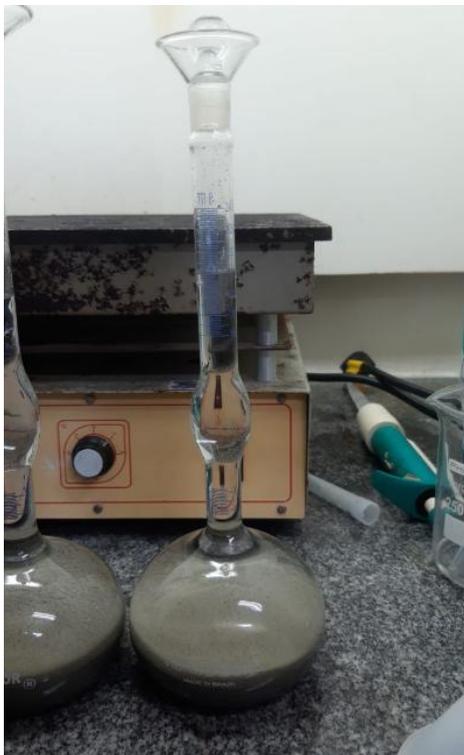
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO					
ENSAIOS	NBR N°	UNIDADE	Desvio	Média	ESPECIFICAÇÃO NORMA NBR 16697/18
Resist.Comp.1D(NBR)	NBR7215/19	MPa	0.40	6.8	não aplicável
Resist.Comp.3D(NBR)	NBR7215/19	MPa	0.25	17.3	>=12.0
Resist.Comp.7D(NBR)	NBR7215/19	MPa	0.50	26.9	>=23.0
Resist.Comp.28D(NBR)	NBR7215/19	MPa	0.30	44.5	>=40.0

Fonte: CSN cimentos S.A.

Outro dado de caracterização e de suma importância para os cimentos é a sua massa específica, a qual foi determinada conforme o procedimento prescrito na ABNT NM 23:2000 sendo o resultado obtido de 3,13

g/cm^3 para o CP V ARI RS e $2,99 \text{ g/cm}^3$ para o CP III RS. A Figura 18 representa o referido ensaio em andamento.

Figura 18 - Ensaio de massa específica do cimento com o frasco Chapman.

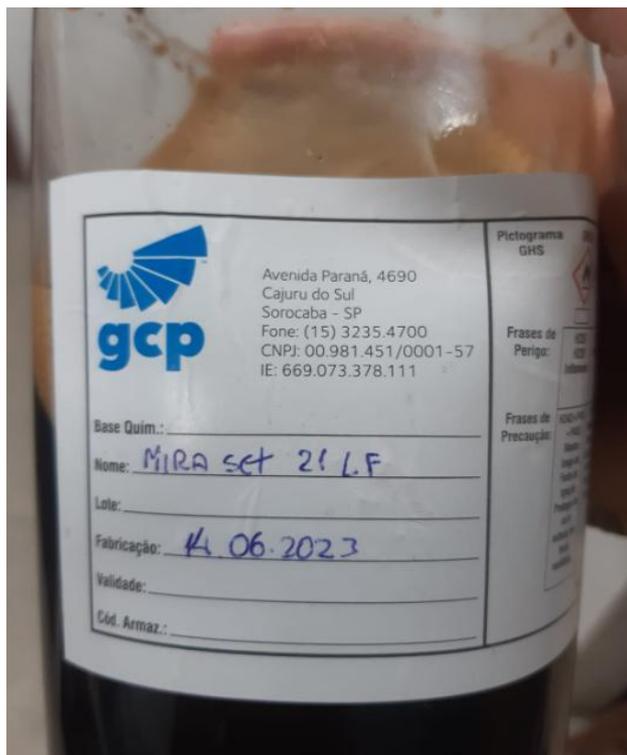


Fonte: Autores (2024).

3.1.3 Aditivo Polifuncional

Com o objetivo de manter a trabalhabilidade constante em todas as argamassas produzidas, foi necessário o uso de aditivo redutor de água. Utilizou-se o MIRA SET 21 LF, produzido pela empresa GCP (Figura 19). Tendo as seguintes características físico-químicas: cor marrom escuro, aspecto líquido e massa específica de $1,100$ a $1,140 \text{ g/cm}^3$. E com dosagem recomendada entre $0,6$ e $1,0\%$ da quantidade total de ligantes (GCP, 2024). De acordo com a ABNT NBR 11768-1:2019, é classificado como um redutor de água do tipo 1/RA1-R.

Figura 19 - Aditivo polifuncional utilizado na pesquisa.



Fonte: Autores (2024).

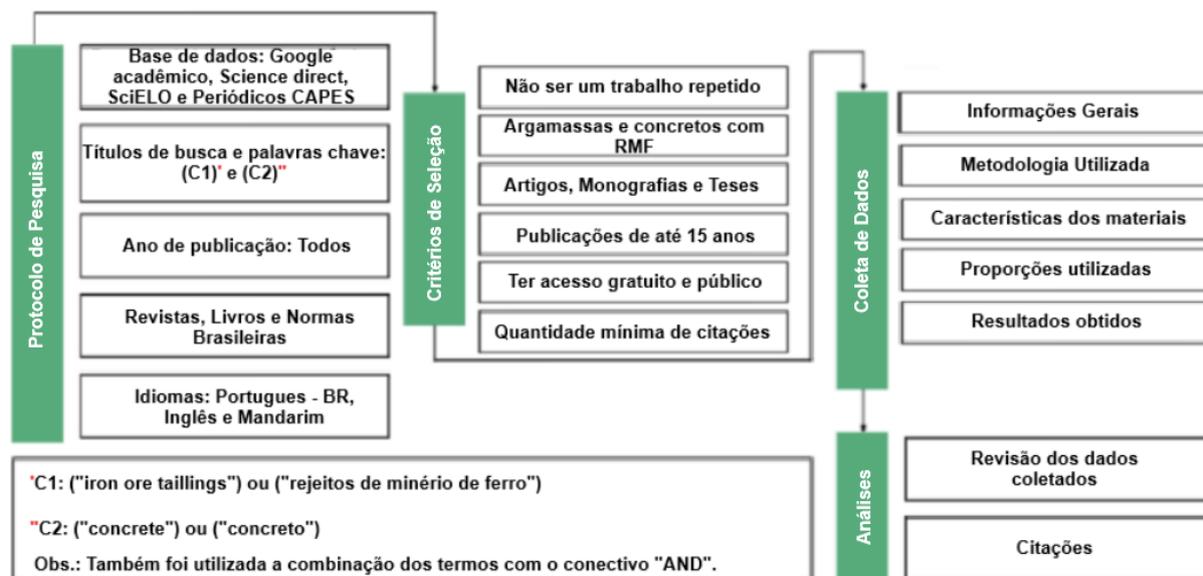
3.2 Abordagem Metodológica

3.2.1 Revisão sistemática de literatura

Tendo como intuito fazer uma pesquisa sólida e com o mínimo de viés possível, optou-se por utilizar a metodologia conhecida como revisão sistemática de literatura. Esta ferramenta possibilita a investigação focada em uma questão bem definida, visando identificar, selecionar, avaliar e sintetizar as evidências relevantes disponíveis. (Galvão; Pereira, 2014). Acrescido a isso, Sampaio e Mancini (2007) concluem que essa metodologia norteia o desenvolvimento de projetos, apontando novos rumos para futuras investigações e identificando quais os métodos de pesquisa que foram utilizados em uma determinada área. Outro ponto importante sobre ela, é que se faz o estabelecimento de critérios de inclusão e exclusão dos artigos e, acima de tudo, uma análise minuciosa da qualidade da literatura selecionada.

Sendo assim, na Figura 20 tem-se um fluxograma da revisão sistemática de literatura a qual foi aplicada neste trabalho.

Figura 20 - Protocolo da revisão sistemática de literatura.



Fonte: Adaptado de Cipriano (2024).

A partir da implementação da metodologia descrita na Figura 20, foi possível coletar 90 trabalhos científicos, os quais estão expostos no Apêndice A.

Todos os trabalhos coletados foram planilhados e organizados conforme as seguintes informações: Tipo de trabalho, Título, Ano de publicação, Endereço eletrônico, Palavras-chave, Base de dados e Citações. Em relação aos critérios de seleção, apenas os trabalhos com data de publicação a partir do ano 2009 foram planilhados. Isso foi feito para explorar o que há de mais recente acerca do tema em discussão, sem perder, no entanto, aqueles trabalhos que investigaram inicialmente a composição e a possível aplicação dos RMF. Quanto às citações, foram planilhadas apenas aquelas pesquisas que já foram citadas no mínimo 5 vezes em outras literaturas, a fim de se ter uma validação da contribuição do referido trabalho.

No que se refere às informações coletadas, foi feito um documento de resumo para os 15 trabalhos selecionados com maior quantidade de citações, a fim de embasar a revisão de literatura sobre o tema. Outrossim, quando foi necessário consultar trabalhos mais específicos sobre algum outro tema dentro do universo dos RMF, outras pesquisas que já estavam selecionadas e planilhadas também foram consultadas.

3.2.2 Programa experimental

3.2.2.1 Argamassas com cimento CP VARI RS:

Argamassa de referência I: O traço utilizado foi 1:3:0,48. Ou seja, para cada 1 kg de cimento Portland são adicionados 3 kg de areia e 480 ml de água.

Argamassa I: Substituição de 10% da massa de areia natural pela areia de rejeito de mineração. O traço utilizado continuou sendo 1:3:0,48. No entanto, para cada 1 kg de cimento Portland são adicionados 3 kg de areia - onde 300 g são de rejeito e 2,7 kg são de areia natural, 480 ml de água e 4,5 g de aditivo polifuncional.

Argamassa II: Substituição de 20% da massa de areia natural pela areia de rejeito de mineração. O traço utilizado continuou sendo 1:3:0,48. No entanto, para cada 1 kg de cimento Portland são adicionados 3 kg de areia - onde 600 g são de rejeito e 2,4 kg são de areia natural, 480 ml de água e 4,5 g de aditivo polifuncional.

Argamassa III: Substituição de 30% da massa de areia natural pela areia de rejeito de mineração. O traço utilizado continuou sendo 1:3:0,48. No entanto, para cada 1 kg de cimento Portland são adicionados 3 kg de areia - onde 900 g são de rejeito e 2,1 kg são de areia natural, 480 ml de água e 4,5 g de aditivo polifuncional.

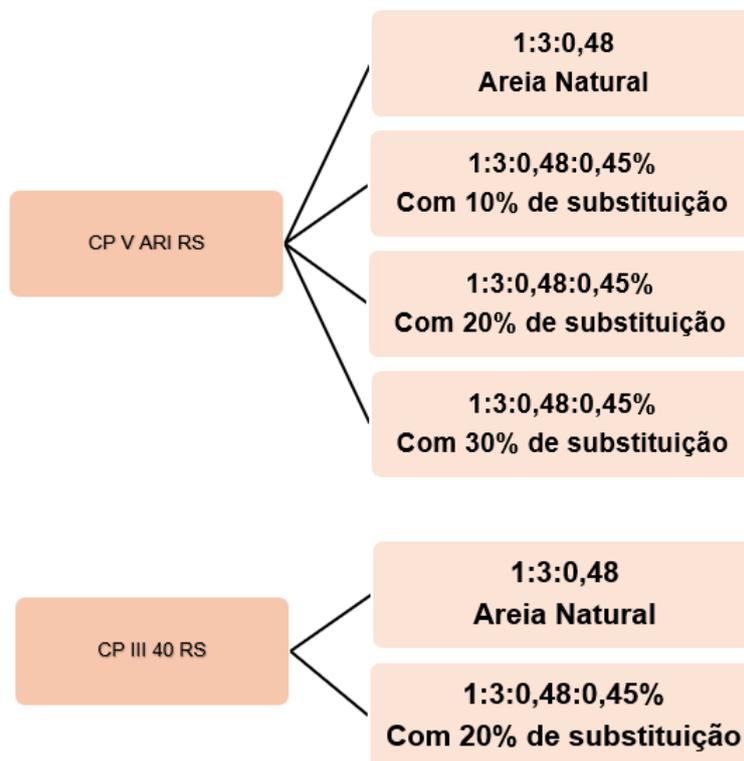
3.2.2.2 Argamassas com cimento CP III 40 RS:

Argamassa de referência II: O traço utilizado foi 1:3:0,48. Ou seja, para cada 1 kg de cimento Portland são adicionados 3 kg de areia e 480 ml de água.

Argamassa IV: Substituição de 20% da massa de areia natural pela areia de rejeito de mineração. O traço utilizado continuou sendo 1:3:0,48. No entanto, para cada 1 kg de cimento Portland são adicionados 3 kg de areia - onde 600 g são de rejeito e 2,4 kg são de areia natural, 480 ml de água e 4,5 g de aditivo polifuncional.

Sendo assim, ao total foram ensaiados 6 traços diferentes de argamassas, conforme a Figura 21.

Figura 21 - Traços utilizados na pesquisa.



Fonte: Autores (2024).

Devido ao fato da areia de RMF conter muitos finos e, conseqüentemente, reduzir a trabalhabilidade. Foi necessário a utilização de aditivo polifuncional para que as argamassas com incorporação de RMF obtivessem uma trabalhabilidade similar à das argamassas de referência. Além disso, o traço utilizado 1:3:0,48 é baseado na ABNT NBR 7215:2019.

3.2.3 Ensaios realizados

3.2.3.1 Preparo das Argamassas

A Figura 22 apresenta o misturador vertical utilizado para realizar a mistura dos componentes das argamassas.

Figura 22 - Misturador vertical utilizado para confecção das argamassas.



Fonte: Autores (2024).

No que se refere ao processo de preparação da argamassa, foram feitos dois procedimentos. Um para as argamassas sem adição de aditivo e outro para aquelas com adição. Sendo o primeiro processo o seguinte:

- 1- Colocar no balde de mistura todo o cimento;
- 2- Depositar toda a água e misturar em velocidade baixa por 30 s;
- 3- Adicionar aos poucos toda a areia durante 30 s;
- 4- Misturar por 30 s na maior velocidade do misturador;
- 5- Raspar as laterais e fundo do balde, assim como as hastes do misturador e esperar por 90 s, após colocar um pano úmido sobre o balde;
- 6- Misturar toda a argamassa por 60 s na maior velocidade do misturador.

Para o segundo processo, em que há a inserção de aditivo no traço, foi feito o seguinte processo:

- 1- Colocar no balde de mistura todo o cimento;
- 2- Depositar parte da água e misturar em velocidade baixa por 30 s;
- 3- Adicionar aos poucos toda a areia durante 30 s;
- 4- Adicionar todo o aditivo, limpando o recipiente com o restante da água durante 30 s;
- 5- Misturar por 30 s na maior velocidade do misturador;
- 6- Raspar as laterais e fundo do balde, assim como as hastes do misturador e esperar por 90 s, após colocar um pano úmido sobre o balde;
- 7- Misturar toda a argamassa por 60 s na maior velocidade do misturador.

Ressalta-se que a utilização de uma balde para mistura, contribuiu para que parte das argamassas ficassem retidas nas laterais do fundo do recipiente, o que tornou essa parte menos hidratada que as demais e, conseqüentemente, influenciou nos resultados de resistência apresentados na argamassa II, por exemplo. Após realizar o procedimento de mistura, era perceptível que a parte menos hidratada se encontrava nas laterais do fundo do balde, ainda que se tenha executado o item 6, descrito acima.

Para realizar todos os ensaios planejados, foi necessário utilizar a parte menos hidratada da argamassa.

3.2.3.2 *Massa Específica*

Para a determinação da massa específica das argamassas no estado fresco, foi adaptado o método descrito no item 5 da ABNT NBR 13278:2005. Neste sentido, o recipiente utilizado neste ensaio tinha uma massa de 179,53 g e capacidade de 730,0 ml, conforme a Figura 23.

Figura 23 - Recipiente utilizado para realizar o ensaio.



Fonte: Autores (2024).

3.2.3.3 *Índice de consistência (Flow table)*

Para a determinação do índice de consistência das argamassas no estado fresco, foi utilizado o método descrito no Anexo A da ABNT NBR 7215:2019. A Figura 24 demonstra o equipamento utilizado para realização do ensaio.

Figura 24 - Mesa para realização do ensaio de índice de consistência.



Fonte: Autores (2024).

Para o cálculo do índice de consistência, foi realizada a média aritmética das medidas tomadas em 3 direções. Duas ortogonais entre si e uma terceira a 45°.

3.2.3.4 Teor de Ar incorporado

Para determinação da retenção de água das argamassas foi utilizado o procedimento descrito no item 6.2.2 da ABNT NBR 13278:2005. Além disso, a fim de evitar valores negativos na apresentação dos resultados foi adotada uma absorção de água total de 3,5% por parte de ambos os agregados utilizados.

3.2.3.5 Resistência à tração na flexão e à compressão

A determinação da resistência à tração na flexão e à compressão dos corpos de prova das argamassas foi realizada de acordo com o procedimento descrito na ABNT NBR 13279:2005. Os corpos de prova utilizados eram prismáticos e com dimensão de 4 cm x 4 cm x 16 cm, conforme o item 4.1 e o anexo A da referida norma. As Figuras 25, 26 e 27 ilustram os equipamentos utilizados.

Figura 25 - Molde prismático.



Fonte: Autores (2024).

Figura 26 - Corpo de prova sendo ensaiado à tração na flexão.



Fonte: Autores (2024).

Figura 27 - Corpo de prova sendo ensaiado à compressão.



Fonte: Autores (2024).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Massa específica das argamassas e Teor de ar incorporado

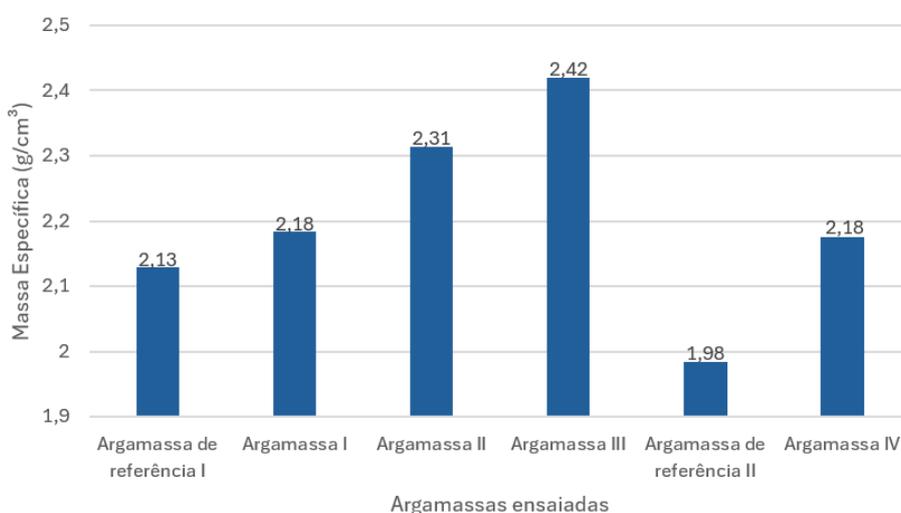
No que se refere às argamassas era esperado que as massas específicas resultantes seguissem o mesmo padrão, ou seja, as argamassas com maior grau de substituição, deveriam apresentar a maior massa específica. De fato, isso foi observado conforme a Figura 28, em concordância com as pesquisas de Thomas *et al.* (2013) que concluíram que concretos com adição de RMF apresentavam maior massa específica. As frações finas que compõem os RMF podem preencher os vazios na matriz cimentícia, aumentando a densidade e, conseqüentemente, a massa específica das argamassas (Kuranchie *et al.*, 2015).

Para as argamassas de referência, tem-se como resultado 2,13 g/cm³ utilizando como ligante o cimento CP V e 1,98 g/cm³ utilizando como ligante o CP III. E isso está relacionado com a massa específica dos cimentos, que é de 3,13 g/cm³ para o CP V ARI RS e 2,99 para o CP II 40 RS. Como o CP V é mais fino, também apresenta uma maior capacidade para o preenchimento dos vazios.

Conforme mostrado na Figura 28. As areias I, II e III utilizando como ligante o CP V apresentaram massas específicas de 2,18; 2,31 e 2,42 g/cm³, respectivamente.

No que se refere às argamassas com o mesmo traço, variando apenas o tipo de ligante, CP V e CP III, conclui-se que a argamassa de referência I, apresenta uma massa específica 7,58% maior que a argamassa de referência II, que pode estar relacionado à finura e a massa específica do CP V. Além disso, a argamassa II apresentou uma massa específica 5,63% maior que a argamassa IV, ou seja, as argamassas empregando como ligante o CP V, têm maior massa específica que aquelas que utilizam o CP III.

Figura 28 - Massa específica das argamassas.

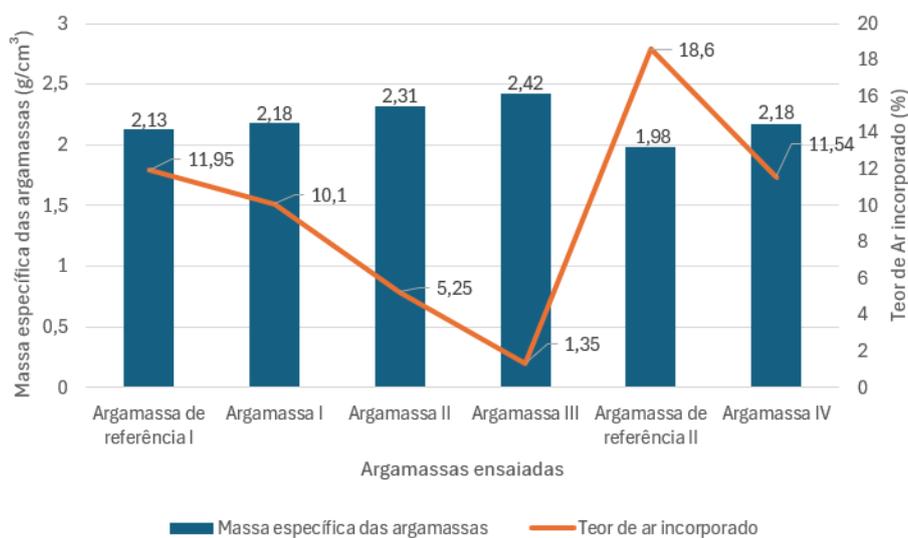


Fonte: Autores (2024).

Em se tratando do teor de ar incorporado em cada uma das argamassas, utilizando-se o procedimento descrito no item 3.2.3.4 desta pesquisa, foi possível observar que a argamassa de referência II apresentou uma incorporação de ar de 55,65% maior que a argamassa de referência I, pois esta é composta pelo cimento CP V que é mais fino e, portanto, confere menor incorporação de ar. Além disso, as argamassas que continham o mesmo tipo de cimento apresentaram um teor de ar incorporado inversamente proporcional ao aumento do grau de substituição da areia natural por RMF, conforme é apresentado na Figura 29.

No que se refere à substituição da areia natural por RMF, o aumento do grau de substituição implicou na redução do teor de ar incorporado das argamassas. E isso também foi observado por Zhang *et al.* (2019) e Silva *et al.* (2020), que em ambos os casos concluem que a presença de RMF em argamassas e concretos reduz a incorporação de ar.

Figura 29 - Massa específica das argamassas e teor de ar incorporado.



Fonte: Autores (2024).

4.2 Índice de consistência

Em relação ao índice de consistência, as argamassas apresentaram uma diminuição do espalhamento conforme aumentava-se o grau de substituição da areia. O que é um fato exposto na literatura por Ugama *et al.* (2014) e Zhao *et al.* (2021), que mostraram que o valor do teste de abatimento (slump, na sigla em inglês) de concretos diminuía à medida que se aumentava o grau de substituição. Neste sentido, duas razões são apontadas: A primeira é que o RMF apresenta maior superfície de contato, o que demanda uma maior quantidade de pasta de cimento para que se obtenha o mesmo abatimento. A segunda, é que os grãos de RMF têm uma forma mais angular e uma superfície menos lisa que os grãos de areia natural, o que aumenta o atrito e dificulta o espalhamento.

Esta tendência foi verificada quando se aumentou o grau de substituição de RMF nos traços com cimento CP III e CP V, conforme a Figura 30. Todavia, a argamassa I apresentou um índice de consistência maior do que a argamassa de referência I. Isso aconteceu porque a argamassa I além de conter RMF, também contém o aditivo polifuncional utilizado nesta pesquisa. O mesmo ocorreu com a argamassa IV comparada à argamassa de referência II. E isto demonstra que a perda de consistência gerada pela substituição de RMF, pode ser compensada com a utilização de aditivos.

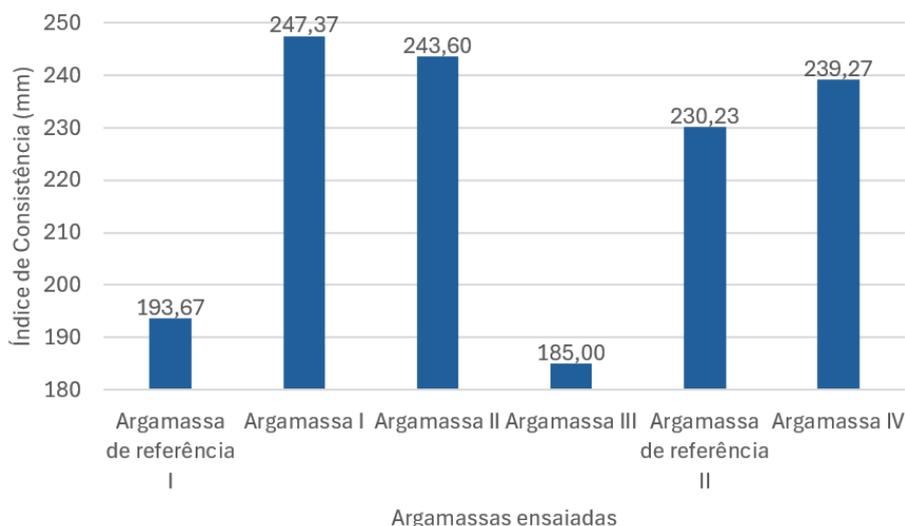
Dessa forma, quando comparadas as argamassas que utilizaram o CP V, foi possível observar que a utilização do aditivo polifuncional foi suficiente para fazer com que as argamassas I e II apresentassem maior índice de consistência que a referência. No entanto, quando o grau de substituição foi de 30%, nem mesmo a utilização do aditivo foi suficiente para que a argamassa III apresentasse um índice de consistência igual ou superior à referência.

Já para as argamassas que utilizaram o CP III, o índice de consistência apresentado pela argamassa IV foi maior que a referência, pelo mesmo motivo que a argamassa I apresentou maior índice de consistência que a sua respectiva referência, conforme a discussão acima.

Por fim, quando comparadas as argamassas de referência e as argamassas II e IV, cujos traços são iguais mudando-se apenas o ligante, foi possível verificar que a argamassa de referência I, que utiliza o cimento CP V em sua composição, apresentou um índice de consistência cerca de 18,88% menor que a argamassa de referência II, que utiliza o cimento CP III em sua composição. Segundo Boukendakdji *et al.* (2009) e Mehta e Monteiro (2014), isso pode ser causado pelas partículas de escória que compõem os cimentos CP III, pois elas geralmente são mais lisas e arredondadas do que as partículas de clínquer, reduzindo o atrito interno e facilitando o fluxo das partículas das argamassas. Além disso, nos laudos dos cimentos (Figuras 16 e 17) pode-se observar que a finura Blaine do CP V é de 4854 cm²/g, enquanto do CP III é 4203 cm²/g.

De maneira contrária, a comparação entre a argamassa II e argamassa IV, que apresentam o mesmo traço e a mesma porcentagem de substituição da areia natural por RMF, variando apenas o tipo de cimento (a argamassa II utiliza o CP V e a argamassa IV o CP III), aponta uma variação ínfima de apenas 1,78% entre o índice de consistência delas. Sendo assim, pressupõe-se que a presença do RMF diminui o efeito causado pela escória.

Figura 30 - Índice de consistência das argamassas.



Fonte: Autores (2024).

4.3 Resistência à tração na flexão

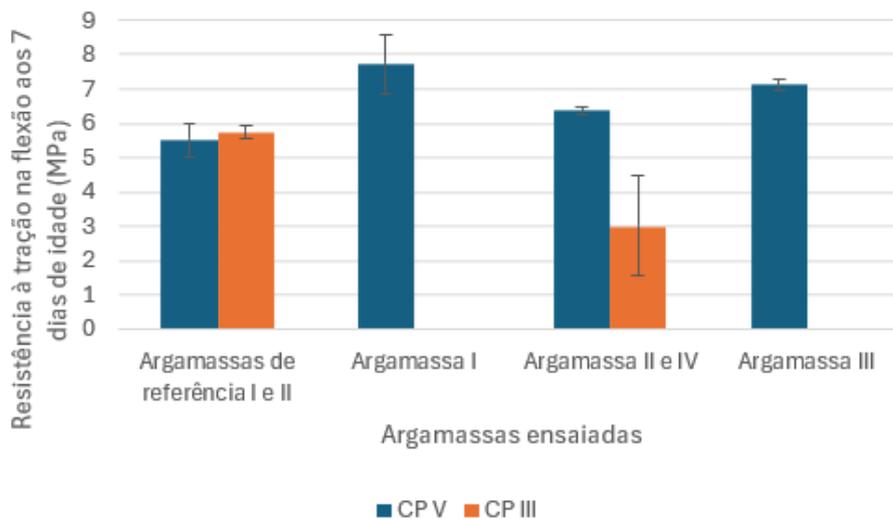
4.3.1 Aos 7 dias de idade

A partir da análise da Figura 31, é possível concluir que a substituição da areia natural por RMF aumentou a resistência à flexão das argamassas com utilização do cimento CP V aos 7 dias de idade. Por outro lado, para o cimento CP III a resistência à tração na flexão aos 7 dias de idade para o traço com substituição foi inferior à argamassa de referência.

Para os traços que utilizaram o CP V, quando comparados com a argamassa de referência os aumentos médios de resistência à tração na flexão foram de 40,22%; 15,28% e 29,11% para as argamassas I, II e III, respectivamente.

Por outro lado, para os traços que utilizaram o CP III, houve uma diminuição da resistência à tração na flexão de 52,23% quando comparado à argamassa de referência. Todavia, cabe ressaltar que o CP III não é um cimento que apresenta altas resistências nas primeiras idades, como o CP V. A escória reage de maneira mais lenta que o clínquer durante o processo de hidratação do cimento (Dinakar *et al.*, 2008). Era esperado que houvesse essa diferença quando comparados os dois aglomerantes. A diminuição da resistência da argamassa IV está relacionada com essa falta de tempo para que as reações de hidratação acontecessem, uma vez que a Figura 32 evidencia como isso é revertido aos 28 dias de idade.

Figura 31 - Resistência à tração na flexão das argamassas aos 7 dias de idade.



Fonte: Autores (2024).

4.3.2 Aos 28 dias de idade

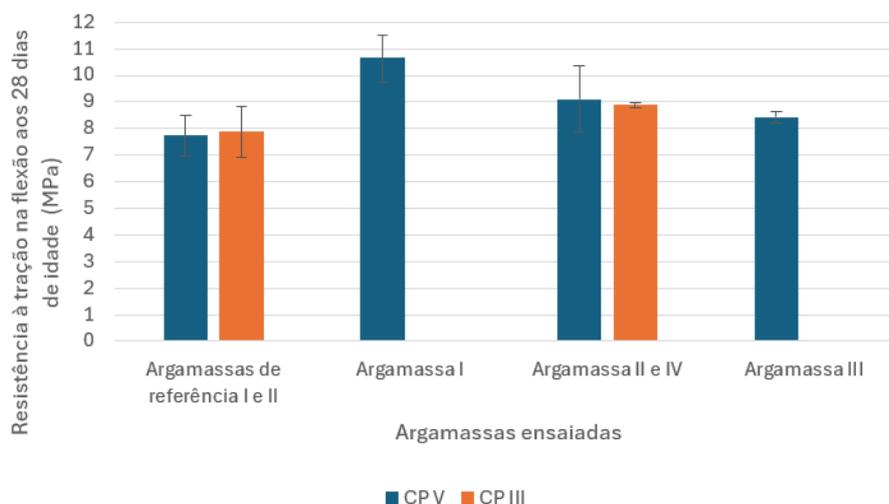
A partir da análise da Figura 32, percebe-se que aos 28 dias de idade a argamassa IV apresentou um aumento de 295,78% em relação à média dos 7 dias de idade. Além disso, quando comparado à referência também aos 28 dias de idade, este aumento foi de 12,59%. Esse comportamento pode ser atribuído ao maior tempo de reação do cimento CP III, que permite um desenvolvimento mais gradual da resistência mecânica. Como mencionado no item 4.3.1. Conseqüentemente, observa-se uma diferença significativa na resistência mecânica das argamassas com CP III entre os primeiros 7 dias e os 28 dias de idade.

Em se tratando do CP V, a mesma tendência observada aos 7 dias de idade era esperada aos 28 dias, uma vez que este cimento apresenta alta velocidade de reação química. E isso de fato ocorreu, e para além de ter ocorrido, houve um aumento em relação aos 7 dias de idade de 40,16%; 37,55%; 43,22% e 18,19% da resistência à tração na flexão para as argamassas de referência, I, II e III, respectivamente.

Nesse sentido, assim como observado nesta pesquisa, Ugama *et al.* (2014) concluíram que concretos com 20% de substituição de RMF obtiveram melhor desempenho mecânico que as argamassas de referência. Por outro lado, Kuranchie *et al.* (2015) observaram que a resistência à tração dos corpos de prova com uso exclusivo de RMF como agregados finos diminuiu em relação à referência. E atribuíram isso à maior quantidade de finos, que conseqüentemente, dificultavam a adesão dos agregados à pasta de cimento.

Quanto ao grau de substituição, de maneira geral, nas argamassas com CP V a substituição de areia natural por RMF aumentou a resistência à tração na flexão. Contudo, quanto maior o grau de substituição menor foi a resistência atingida. Da mesma forma, para o CP III foi observada a mesma tendência.

Figura 32 - Resistência à tração na flexão das argamassas aos 28 dias de idade.

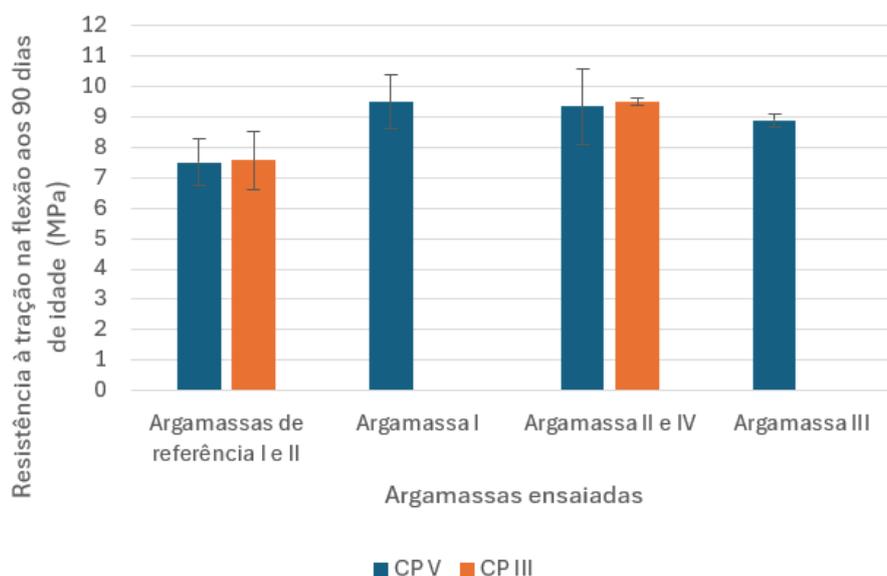


Fonte: Autores (2024).

4.3.3 Aos 90 dias de idade

Por fim, aos 90 dias de idade a resistência à tração na flexão dos corpos de prova manteve-se na tendência observada aos 28 dias de idade, conforme é visto na Figura 33. E, embora a argamassa I tenha apresentado uma redução média de 9%, ao analisar os valores com os respectivos desvios padrões, percebe-se que ocorreu uma estabilização da resistência. Além disso, é possível perceber que a maior variação na média dos valores aos 28 e 90 dias de idade foi de 7%.

Figura 33 - Resistência à tração na flexão das argamassas aos 90 dias de idade.

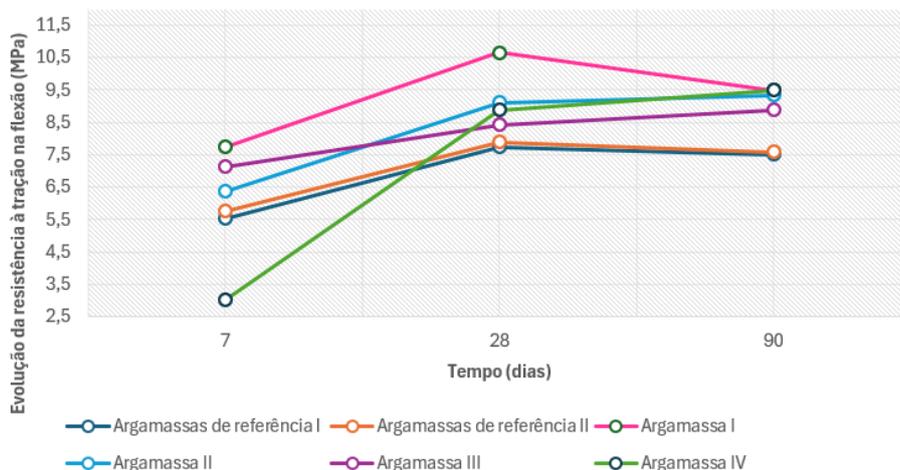


Fonte: Autores (2024).

4.3.4 Evolução da resistência à tração na flexão

Por fim, para entender melhor a evolução da resistência à tração na flexão das argamassas ensaiadas, a Figura 34 exemplifica a curva de resistência de todos os traços estudados. Pode-se dizer que a diminuição ou o aumento dos valores numéricos da média da resistência à flexão dos 28 para os 90 dias pode ser atribuída ao desvio padrão, ou seja, não há variações significativas com 95% de confiabilidade.

Figura 34 - Evolução da resistência à tração na flexão.



Fonte: Autores (2024).

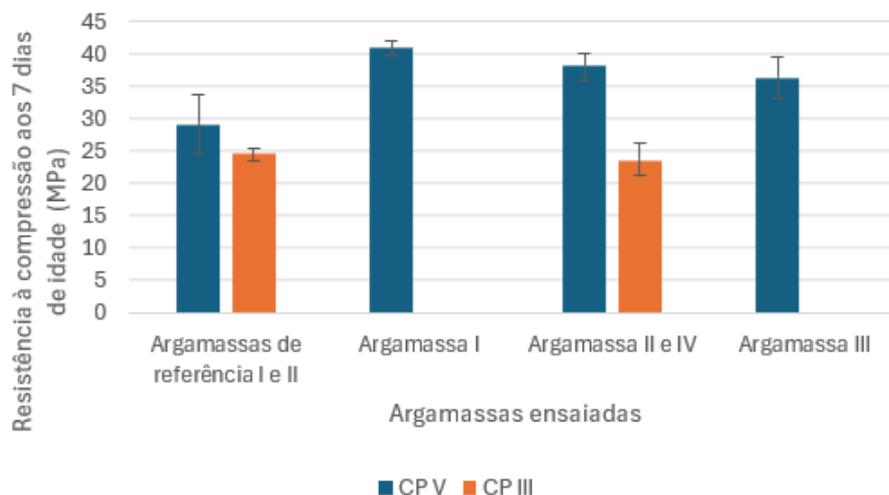
4.4 Resistência à compressão

4.4.1 Aos 7 dias de idade

A partir da análise da Figura 35, é possível concluir que a substituição da areia natural por RMF aumentou a resistência à compressão das argamassas com utilização do cimento CP V aos 7 dias de idade. Por outro lado, as argamassas com utilização do cimento CP III não apresentaram variação significativa aos 7 dias de idade. E isso também é devido à reação mais lenta do RMF em relação ao clínquer, conforme (Dinakar *et al.*, 2008).

Para o caso do CP V, a argamassa I apresentou um aumento de 40,38%, a argamassa II de 30,84% e a argamassa III de 24,70%, em relação à argamassa de referência.

Figura 35 - Resistência à compressão das argamassas aos 7 dias de idade.



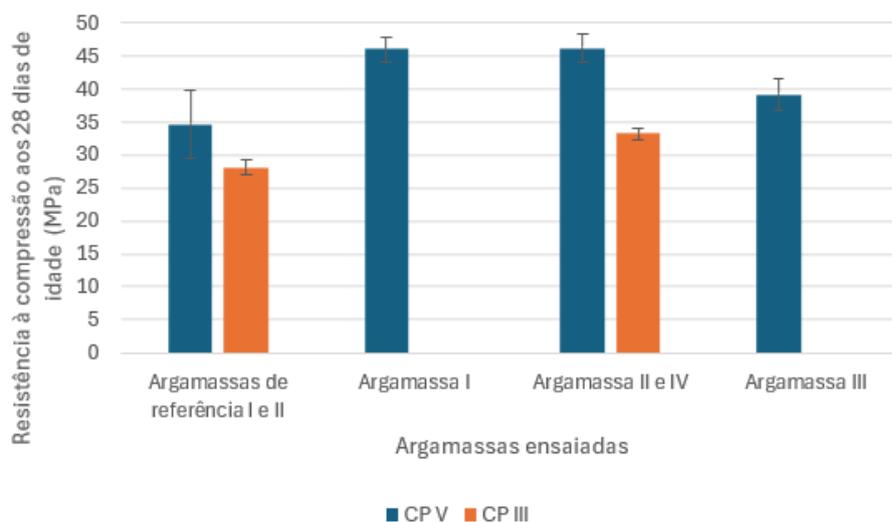
Fonte: Autores (2024).

4.4.2 Aos 28 dias de idade

Por outro lado, aos 28 dias de idade, tanto as argamassas com CP III quanto as com CP V apresentaram aumento de resistência quando comparadas às argamassas de referência. No caso do CP III, a argamassa IV apresentou um aumento de 18,47%. Já as argamassas com utilização do CP V, a argamassa I apresentou um aumento de 37,61%, a argamassa II de 17,79% e a argamassa III de 8,89%, em relação à argamassa de referência I.

Dessa forma, há uma concordância com os resultados obtidos nesta pesquisa e alguns relatados na literatura, tais como: Kuranchie *et al.* (2015), Shettima *et al.* (2016), Carrasco *et al.* (2017) e Zhang *et al.* (2019). Carrasco *et al.* (2017) atribuíram esse aumento de resistência à compressão das misturas e à redução da porosidade causada pela ocupação de vazios por partículas de RMF, o que densificou a estrutura das argamassas. Dessa forma, a Figura 36 apresenta a resistência à compressão das argamassas aos 28 dias de idade.

Figura 36 - Resistência à compressão das argamassas aos 28 dias de idade.

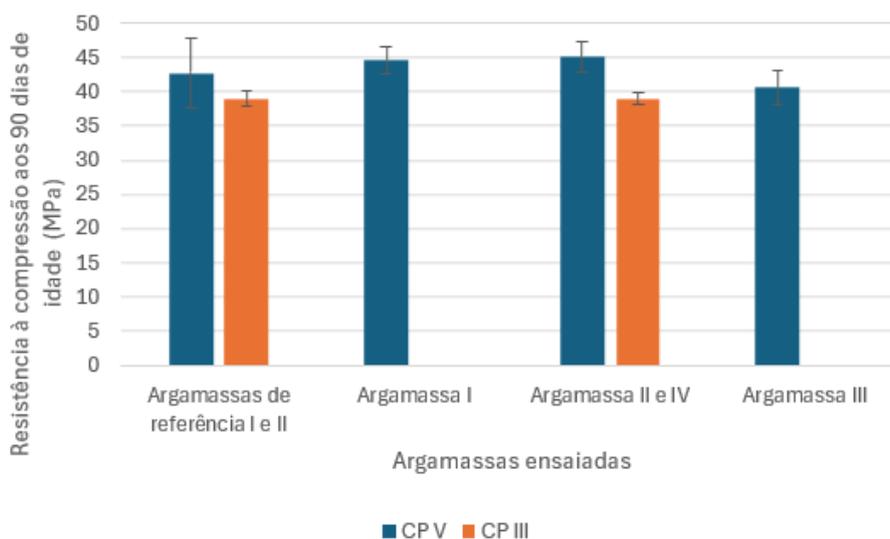


Fonte: Autores (2024).

4.4.3 Aos 90 dias de idade

A partir comparação dos valores apresentados nas Figura 35 e Figura 36, é possível perceber que as argamassas I, II e III apresentaram uma estabilização na média dos valores, considerando-se os respectivos desvios padrões. Por outro lado, a Figura 37 indica que as argamassas de referência I e II apresentaram um incremento de 8,11% e 7,20%, respectivamente. Já a argamassa IV, não apresentou variação significativa em relação à referência. E isso também é um resultado positivo do ponto de vista ambiental, uma vez que essa argamassa contém 20% de areia de RMF substituindo a areia natural.

Figura 37 - Resistência à compressão das argamassas aos 90 dias de idade.



Fonte: Autores (2024).

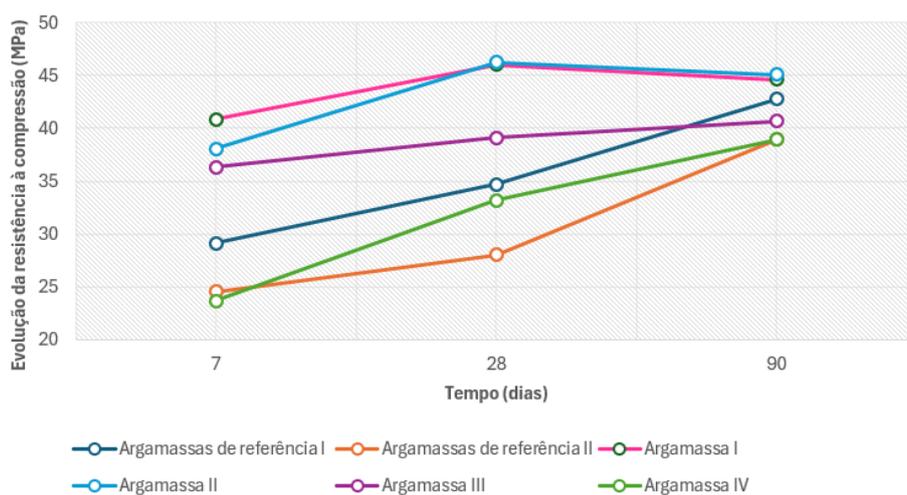
4.4.4 Evolução da resistência à compressão

Por fim, para entender melhor a evolução da resistência à compressão das argamassas ensaiadas, a Figura 38 exemplifica a curva de resistência de todos os traços estudados. É possível perceber que a taxa de evolução da resistência (razão entre o aumento da resistência pela quantidade de dias decorridos) da argamassa de referência I e II é bem próxima. Todavia, é possível perceber que os valores observados nas 3 idades sempre são maiores na argamassa de referência I (que utiliza o cimento CP V), o que é atribuído à diferença de velocidade nas reações de hidratação dos cimentos (Dinakar *et al.*, 2008).

No que se refere às argamassas com substituição, embora a argamassa IV apresentasse maior resistência à compressão aos 28 dias, comparada à referência, aos 90 dias não houve diferença. Dessa forma, do ponto de vista ambiental, a argamassa IV é preterida em relação à referência. Já as argamassas, I, II e III, todas apresentaram maior resistência à compressão aos 28 dias, comparadas à referência. No entanto, aos 90 dias, a argamassa III apresentou uma resistência 3,91% inferior à referência.

Dessa forma, é possível concluir que a partir do desempenho apresentado pelas argamassas com 20% de substituição (argamassa II e IV), essa seria a porcentagem com melhor custo-benefício, uma vez que os resultados de desempenho são próximos aos da argamassa com 10% de substituição. Porém, no primeiro caso, a quantidade de material natural substituído é o dobro.

Figura 38 - Evolução da resistência à compressão.



Fonte: Autores (2024).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES

Com a execução do programa experimental e a revisão sistemática da literatura, foi possível obter as seguintes conclusões neste estudo:

- A substituição parcial da areia da areia natural por RMF aumenta a massa específica das argamassas.
- O aumento do percentual de RMF reduz o teor de ar incorporado nas argamassas.
- As argamassas dosadas com CP V apresentam maior massa específica, menor incorporação de ar e maior índice de consistência em comparação às formulações com CP III.
- A presença de RMF reduz a consistência das misturas; no entanto, esse efeito pode ser corrigido com o uso de aditivos redutores de água.
- As argamassas contendo RMF apresentaram aumento na resistência à tração na flexão e na resistência à compressão em relação às referências, sendo o teor ótimo de substituição de 20%. Para teores mais elevados, o ganho de resistência mecânica, embora ainda superior ao das misturas com 100% de areia natural, torna-se menos expressivo.
- Em relação à resistência mecânica, a presença de RMF, aliada à escória de alto-forno do cimento CP III, retardou as reações de hidratação, resultando em uma resistência inicial inferior (7 dias).

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliação do comportamento a longo prazo: realizar estudos de durabilidade das argamassas com substituição de areia por RMF, investigando aspectos como a resistência à ação de agentes agressivos.
- Otimização do teor de substituição: Realizar experimentos com diferentes proporções de substituição de areia natural por RMF, especialmente entre 10 e 20%, para identificar o ponto ótimo de substituição que balanceie melhor as propriedades mecânicas e a trabalhabilidade das argamassas.
- Investigação do uso de adições minerais alternativas: estudar a utilização de outros tipos de adições minerais, como pozolanas, em combinação com o RMF, para verificar se há melhorias adicionais nas propriedades das argamassas.
- Análise econômica da substituição: desenvolver uma análise econômica que compare o custo de produção de argamassas com RMF e sem RMF, considerando aspectos como a disponibilidade do material, custos de transporte e impacto na produção, para avaliar a viabilidade econômica em larga escala.
- Realizar análise do ciclo de vida das argamassas contendo RMF e sem RMF.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, F. et al. Synthetic gravel for concrete obtained from sandy iron ore tailing and recycled polyethylthrephthalate. *Journal of Cleaner Production*, [S.l.], v. 261, p. 121-134, 2020.

ALMEIDA, J. Sustentabilidade na Construção Civil: Um estudo sobre a viabilidade econômica do uso de agregados reciclados. São Paulo: Editora Engenharia, 2021.

ALMEIDA, S. G., e OLIVEIRA, M. N. Influência das substâncias deletérias nos agregados na durabilidade do concreto. *Revista de Engenharia Ambiental*, 25(4), 560-575, 2016.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 13277: Argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da retenção de água.* Rio de Janeiro: ABNT, 2005a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 13278: Argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa aparente no estado fresco.* Rio de Janeiro: ABNT, 2005c.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 13528: Revestimentos de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Determinação da resistência de aderência à tração.* Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15261: Argamassa para revestimento de paredes e tetos - Determinação da retração por secagem.* Rio de Janeiro: ABNT, 2005d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15310: Gestão de resíduos sólidos em obras.* Rio de Janeiro, 2009.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 9779: Argamassa e concreto - Determinação da absorção de água por capilaridade.* Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR NM 52: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios.* Rio de Janeiro, 2009.

BORGEST et al. Reuse of iron ore tailings in the production of geopolymers mortars. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/remi/a/fBR9ZjcyYJfYnc7NCZK3bSg/?lang=en>. Acesso em: 30 ago. 2024.

BOUKENDAKDJI, O.; KENAI, S.; KADRI, E. H.; ROUIS, F. Influence of slag content on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, v. 23, p. 120-126, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.07.021>. Acesso em: 06 de fev. de 2025.

Boletim da Abifas, 2019. Disponível em: <https://abifa.org.br/site/indices-setoriais/>.

CARMIGNANO, A. et al. Iron Ore Tailings: Characterization and Applications. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 2021.

CARRASCO, E. V. M.; MAGALHÃES, M. C.; SANTOS, W. J. D.; ALVES, R. C.; MANTILLA, J. N. R. Characterization of mortars with iron ore tailings using destructive and nondestructive tests. *Construction and Building Materials*, [S.l.], v. 131, p. 31-38, 2017. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/310494059_Characterization_of_mortars_with_iron_ore_tailings_using_destructive_and_nondestructive_tests. Acesso em: 12 fev. 2025.

CHEN, W. et al. Evaluation of iron ore tailings as replacement for fine aggregate in concrete. *Construction and Building Materials*, [S.l.], v. 149, p. 91-97, 2018.

CHINNAPPA et al. Experimental and Statistical Evaluations of Strength Properties of Concrete with Iron Ore Tailings as Fine Aggregate. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29HZ.2153-5515.0000480>. Acesso em: 30 ago. 2024.

COMISSÃO NACIONAL DA VERDADE (CNV). **Relatório sobre impactos socioambientais do rompimento da barragem de Fundão**. Brasília: CNV, 2018.

Dados da organização mundial de fundição. *The World Foundry Organization*. Disponível em: <https://www.thewfo.com/census/>.

DINAKAR, P.; BABU, K. G.; SANTHANAM, M. Fresh and hardened properties of self-compacting concrete containing metakaolin and slag. *Cement and Concrete Composites*, v. 30, p. 785-791, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.09.003>. Acesso em: 06 de fev. de 2025.

FERREIRA, J. et al. Caracterização e utilização de rejeito de minério de ferro pellet feed em pavimentos de blocos intertravados de concreto. *Revista Engenharia e Construção*, [S.l.], v. 10, n. 2, p. 112-119, 2020.

FERREIRA, J. P.; LIMA, T. C. *Tecnologia das argamassas: Teoria e prática*. 3. ed. Rio de Janeiro: Editora Engenharia, 2018.

FILHO, Joaquim Nery. Estudo do desempenho de argamassas e concretos com substituição parcial de cimento por lama vermelha. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

GALVÃO, T. F.; PEREIRA, M. G. Revisões sistemáticas da literatura: passos para sua elaboração. *Epidemiologia e Serviços de Saúde*, v. 23, n. 1, p. 183–184, mar. 2014. Disponível em: <http://scielo.iec.gov.br/pdf/ess/v23n1/v23n1a18.pdf>. Acesso em: 10 set. de 2024.

GALLAGHER, L.; MAZZINGHY, D. B.; FRIOT, D.; OUTROS, OUTROS. Ore-sand: A potential new solution to the mine tailings and global sand sustainability crises. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/359893861_Ore-sand_A_potential_new_solution_to_the_mine_tailings_and_global_sand_sustainability_crisis_FINAL_REPORT. Acesso em: 30 de ago. de 2024.

- GCP. MIRA®SET 21 LF.** Disponível em: <https://gcpat.com.br/pt-br/solutions/products/mira-mid-range-water-reducers/mira-set-21-lf>. Acesso em: 10 out. de 2024.
- GÓIS, A. et al.** Utilization of iron ore tailings as fine aggregate in ultra-high performance concrete. *Construction and Building Materials*, [S.l.], v. 230, p. 103-116, 2020.
- GOMES, A. B., SILVA, C. D., & SANTOS, E. F.** Influência da massa específica aparente dos agregados nas propriedades do concreto. *Revista de Engenharia Civil*, 25(3), 45-60, 2017.
- GOMES, L. et al.** The Use of Iron Ore Tailings in the Iron Quadrangle of Minas Gerais, Brazil. *Journal of Sustainable Mining*, [S.l.], v. 15, n. 3, p. 34-43, 2021.
- GUPTA, T. et al.** Utilization of waste tire rubber in cement-based materials: A review. *Construction and Building Materials*, v. 155, p. 70-83, 2018.
- KUMAR et al.** Properties of self-compacting concrete modified with m-sand and spent foundry slag. Disponível em: <https://akjournals.com/view/journals/1848/14/3/article-p426.xml>. Acesso em: 30 ago. 2024.
- KURANCHIE, F. A.; SHUKLA, S. K.; HABIBI, D.; MOHYEDDIN, A.** Utilisation of iron ore tailings as aggregates in concrete. *Cogent Engineering*, v. 2, n. 1, p. 1-11, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/23311916.2015.1083137>.
- LABS, A.** 2008. Origem do Cimento - Cimento Itambé. Disponível em: <https://www.cimentoitambe.com.br/origem-do-cimento/>. Acesso em: 4 set. 2024.
- LI, H. et al.** Effects of iron ore tailings on the compressive strength and permeability of ultra-high performance concrete. *Journal of Sustainable Construction*, [S.l.], v. 32, p. 217-227, 2021.
- LIMA, M. A. et al.** Impacto do rompimento de uma barragem de rejeitos de minério de ferro sobre a qualidade das águas superficiais. Estudo de caso: Bacia do rio Doce. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, [S.l.], v. 21, p. 112-120, 2016.
- LIU, J. et al.** Development of green engineered cementitious composites using iron ore tailings as aggregates. *Construction and Building Materials*, [S.l.], v. 209, p. 115-125, 2019.
- MATOS, S. V.; SCHALCH, V.** Alternativas de minimização de resíduos da indústria de fundição. *CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL*, 1997.
- MARTINS, D. F.** *Durabilidade em argamassas: Impactos ambientais e soluções*. Curitiba: Editora Sustentável, 2021.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M.** *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*. São Paulo: Pini, 2008.
- MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M.** *Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais*. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.
- MENDES, P.; LIMA, R.; COSTA, F.** Efeito do uso de aditivos plastificantes em argamassas com agregados reciclados. *Revista Brasileira de Materiais*, v. 8, n. 2, p. 45-60, 2019.
- NASCIMENTO, R. L.** *Ensaio e aplicações das argamassas*. Belo Horizonte: Editora Técnica, 2019.

PARLAMENTO EUROPEU (EUROPA). *DIRETIVA 2006/21/CE DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO de 15 de Março de 2006 relativa à gestão dos resíduos de indústrias extractivas e que altera a Directiva 2004/35/CE.* Jornal Oficial da União Europeia, [S. l.], 15 mar. 2006. 102, p. 15-33. Disponível em: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:c370006a-063e-4dc7-9b05-52c37720740c.0017.02/DOC_1&format=PDF. Acesso em: 30 ago. 2024.

RAHMAN, M. et al. A short review on environmental impacts and application of iron ore tailings in development of sustainable eco-friendly bricks. *Journal of Cleaner Production*, [S.l.], v. 230, p. 123-133, 2019.

RAMOS et al. Iron ore tailings as a new product: A review-based analysis of its potential incorporation capacity by the construction sector. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772912524000095>. Acesso em: 30 ago. 2024.

RF, S.; MANCINI MC, E. ESTUDOS DE REVISÃO SISTEMÁTICA: UM GUIA PARA SÍNTESE CRITERIOSA DA EVIDÊNCIA CIENTÍFICA. *Rev. bras. fisioter*, v. 11, n. 11, p. 83–89, 2007. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbfis/a/79nG9Vk3syHhnSgY7VsB6jG/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 10 set. de 2024.

SANTOS, A.; OLIVEIRA, M. Propriedades mecânicas de argamassas com agregados reciclados de resíduos de construção. *Construção e Sustentabilidade*, v. 12, n. 4, p. 88-102, 2018.

SANTOS, C. et al. The use of iron ore tailings obtained from the Germano dam in the production of a sustainable concrete. *Journal of Cleaner Production*, [S.l.], v. 289, p. 125133, 2021.

SANTOS, F. et al. Aplicação de rejeito de mineração como agregado para a produção de concreto. *Revista Engenharia e Construção*, [S.l.], v. 10, p. 67-75, 2021.

SANTOS, L. M., e LIMA, F. A. Avaliação do módulo de finura dos agregados na resistência do concreto. *Revista de Tecnologia de Materiais*, 25(2), 150-165, 2018.

SANTOS, M. R. *Propriedades fundamentais das argamassas de construção*. São Paulo: Editora Construção, 2020.

SANTOS, R. et al. Estudos de reaproveitamento dos resíduos das barragens de minério de ferro para uso na pavimentação de rodovias e fabricação de blocos intertravados. *Revista Brasileira de Pavimentação*, [S.l.], v. 11, n. 1, p. 56-67, 2019.

SHETTIMA, A. U.; HUSSIN, M. W.; AHMAD, Y.; MIRZA, J. Evaluation of iron ore tailings as replacement for fine aggregate in concrete. *Construction and Building Materials*, [S.l.], v. 120, p. 72-79, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061816305269>. Acesso em: 12 fev. 2025.

SIDDIQUE et al. Strength, durability, and micro-structural properties of concrete made with used-foundry sand (UFS). *Construction and Building Materials*, Volume 25, Issue 4, April 2011, Pages 1916-1925, ISSN 0950-0618.

SIDDIQUE, R.; KHAN, M. I. Supplementary cementing materials in concrete. CRC Press, 2019.

- SILVA, A. C.; PEREIRA, F. M.** *Desempenho das argamassas em obras modernas*. Porto Alegre: Editora Civil, 2017.
- SILVA, J. R., e SANTOS, M. A.** Importância da massa unitária dos agregados na produção de concreto de qualidade. *Revista de Materiais de Construção*, 30(1), 78-92, 2019.
- SILVA, R. V. et al.** Construction and demolition waste as recycled aggregates in concrete production. Springer, 2018.
- SILVA, T. et al.** Aproveitamento de rejeitos oriundos da extração de minério de ferro na fabricação de cerâmicas vermelhas. *Revista Cerâmica Industrial*, [S.l.], v. 27, n. 2, p. 67-73, 2021.
- SILVA, et al.** Influence of iron ore tailings on the properties of concrete and mortar: A review. *Journal of Cleaner Production*, v. 250, p. 119-456, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119456>. Acesso em: 06 de fev. de 2025.
- SOARES, P. et al.** Reuse of iron ore tailings in the production of geopolymer mortars. *Journal of Advanced Materials*, [S.l.], v. 45, p. 231-240, 2021.
- SOUZA, M.; PEREIRA, L.** Estudo sobre a utilização de Resíduo de Minério de Ferro em microrrevestimento asfáltico. *Revista de Engenharia Asfáltica*, [S.l.], v. 18, n. 2, p. 99-108, 2022.
- THOMAS, B. S.; DAMARE, A.; GUPTA, R. C.** Strength and durability characteristics of copper tailing concrete. *Construction and Building Materials*, [S.l.],
- ZHANG, N. et al.** *Properties of concrete with iron ore tailings as fine aggregate*. **Materials**, Basel, v. 12, n. 9, p. 1-17, 2019. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9502883/>. Acesso em: 15 mar. 2025.

APÊNDICE A – Planilha de artigos utilizados na revisão de literatura.

Artigos e Trabalhos Científicos						
Tipo de trabalho	Nome do trabalho	Ano	Endereço	Operador	Base	Citações
Artigo	Utilization of iron ore tailings as fine aggregate in ultra-high performance conc	2014	https://www.sciencedirect.com/scien	iron ore tailings and concrete	Googole Academico	337
Artigo	Evaluation of iron ore tailings as replacement for fine aggregate in concrete	2016	https://www.sciencedirect.com/scien	iron ore tailings and concrete	Googole Academico	306
Artigo	Development of green engineered cementitious composites using iron ore tail	2013	http://acemrl.engin.umich.edu/wp-co	iron ore tailings and concrete	Googole Academico	240
Artigo	Strength and durability characteristics of copper tailing concrete	2022	https://www.bing.com/ck/a?!&p=8a	iron ore tailings and concrete	Googole Academico	222
Artigo	Feasibility study of developing green ECC using iron ore tailings powder as ce	2013	https://www.researchgate.net/profile	iron ore tailings and concrete	Googole Academico	161
Artigo	Effects of iron ore tailings on the compressive strength and permeability of ult	2020	https://ojs.sciencedirectassets.com/	iron ore tailings and concrete	Googole Academico	133
Artigo	Technical and environmental assessment of the incorporation of iron ore tailin	2019	https://www.academia.edu/download	iron ore tailings and concrete	Googole Academico	132
Artigo	Utilization of tailings in cement and concrete: A review	2019	https://www.fenxeter.com/download	iron ore tailings and concrete	Googole Academico	132
Artigo	An evaluation of iron ore tailings characteristics and iron ore tailings concrete	2021	https://www.bing.com/ck/a?!&p=52	iron ore tailings and concrete	Googole Academico	120
Artigo	Characterization of mortars with iron ore tailings using destructive and nondes	2017	file:///C:/Users/Atlas_xvini/Downloads	iron ore tailings and concrete	Googole Academico	89
Artigo	Iron ore tailings: characterization and applications	2021	https://www.scribd.com/document/581234567	iron ore tailings and concrete	Googole Academico	72
Artigo	Stabilization of iron ore tailings with cement and bentonite: a case study on G	2020	https://www.researchgate.net/profile	iron ore tailings and concrete	Googole Academico	64
Artigo	The use of iron ore tailings obtained from the Germano dam in the production	2021	https://www.sciencedirect.com/scien	iron ore tailings and concrete	Googole Academico	63
Artigo	Characterisation and magnetic concentration of an iron ore tailings	2019	https://www.sciencedirect.com/scien	iron ore tailings and concrete	Science Direc	61
Artigo	Synthetic gravel for concrete obtained from sandy iron ore tailing and recycled	2017	http://www.repositorio.cofm.br/80800/	iron ore tailings and concrete	Googole Academico	59
Artigo	Recovering Iron from Iron Ore Tailings and Preparing Concrete Composite Ad	2019	https://sci-hub.st/download/2021-05	iron ore tailings and concrete	Googole Academico	58
Artigo	Behaviour of Compacted Filtered Iron Ore Tailings–Portland Cement Blends:	2022	https://www.mdpi.com/2076-3417/12	iron ore tailings and concrete	Googole Academico	53
Artigo	Cementitious activity optimization studies of iron tailings powder as a concrete	2020	https://www.sciencedirect.com/scien	iron ore tailings and concrete	Googole Academico	52
Artigo	Effect of iron ore tailing on the properties of concrete	2014	https://core.ac.uk/download/pdf/2346	iron ore tailings and concrete	Googole Academico	49
Artigo	Reuse of iron ore tailings in the production of geopolymers mortars	2019	https://www.scribd.com/document/41425869	iron ore tailings and concrete	Googole Academico	46
Artigo	Utilisation of iron ore tailings as aggregates in concrete	2015	https://www.tandfonline.com/doi/full/	iron ore tailings and concrete	Googole Academico	43
Artigo	Utilization of iron ore tailings as replacement to fine aggregates in cement con	2014	https://ccheseerx.ist.psu.edu/document	iron ore tailings and concrete	Googole Academico	42
Artigo	Potential use of mine tailings and fly ash in concrete	2015	https://www.techno-press.org/fulltext	iron ore tailings and concrete	Googole Academico	40
Artigo	Preparation and properties of concrete containing iron tailings/manufactured s	2014	https://ccheseerx.ist.psu.edu/document	iron ore tailings and concrete	Science Direc	39
Artigo	Alkali-activated bricks made with mining waste iron ore tailings	2022	https://www.sciencedirect.com/scien	iron ore tailings and concrete	Science Direc	39
Artigo	Effect of red mud and iron ore tailings on the strength of selfcompacting conc	2014	https://core.ac.uk/download/pdf/3280	iron ore tailings and concrete	Googole Academico	39
Artigo	Utilization of iron tailings sand as an environmentally friendly alternative to nat	2020	https://www.mdpi.com/1996-1944/13	iron ore tailings and concrete	Googole Academico	39
Artigo	A feasibility study on the mechanical properties of concrete with iron ore tailing	2019	https://www.academia.edu/41425869	iron ore tailings and concrete	Googole Academico	38
doutorado	Caracterização de rejeitos de mineração de ferro, in natura e segregados, par	2014	https://ojs.ufrj.br/items/a01aeb2f-a	iron ore tailings and concrete	Googole Academico	37
Artigo	Iron ore tailings in the production of cement tiles: a value analysis on building s	2018	https://www.scribd.com/document/41425869	iron ore tailings and concrete	Googole Academico	34
Artigo	Iron ore tailings in the production of cement tiles: a value analysis on building	2018	https://www.scribd.com/document/41425869	iron ore tailings and concrete	Googole Academico	34
Artigo	Experimental study on the properties of concrete mixed with iron ore tailings	2016	https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full	iron ore tailings and concrete	Googole Academico	33
Artigo	Utilization of iron ore tailings with high volume in green concrete	2023	https://www.sciencedirect.com/scien	iron ore tailings and concrete	Googole Academico	32
Artigo	Evaluation of the hydraulic, physical, and mechanical properties of pervious co	2020	https://www.mdpi.com/2076-3417/10	iron ore tailings and concrete	Googole Academico	31
Artigo	Evaluation of the Iron Ore Tailings from Itakpe in Nigeria as Concrete Material	2014	http://surgeonj.org/article/10.11648/j.s	iron ore tailings and concrete	Googole Academico	30
Artigo	A short review on environmental impacts and application of iron ore tailings in	2022	https://www.researchgate.net/profile	iron ore tailings and concrete	Googole Academico	30
Artigo	Iron ore tailing as fine aggregate in mortar used for masonry	2014	https://ccheseerx.ist.psu.edu/document	iron ore tailings and concrete	Googole Academico	28
Artigo	Utilizing iron ore tailing as cementitious material for eco-friendly design of ultra	2021	https://www.mdpi.com/1996-1944/14	iron ore tailings and concrete	Googole Academico	25
Artigo	Alkaline activation of high-calcium ash and iron ore tailings and their recycling	2019	https://www.scribd.com/document/41425869	iron ore tailings and concrete	Googole Academico	24
Artigo	Experimental and statistical evaluations of strength properties of concrete with	2020	https://scielibrary.org/doi/abs/10.109	iron ore tailings and concrete	Googole Academico	23
Artigo	Strength and microstructure of concrete with iron ore tailings as replacement f	2018	https://www.e3s-conferences.org/arti	iron ore tailings and concrete	Googole Academico	23

Artigo	Experimental study on the concrete with compound admixture of iron tailings and concrete	2018	https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full	iron ore tailings and concrete	Google Academico	21
Artigo	Effect of iron ore tailings industrial by-product as eco-friendly aggregate on me	2022	https://www.sciencedirect.com/scien	iron ore tailings and concrete	Science Direc	21
Artigo	Concrete made with iron ore tailings as a fine aggregate: A step towards susta	2022	https://www.mdpi.com/1996-1944/15	iron ore tailings and concrete	Google Academico	21
Artigo	Experimental study on the performances of cement stabilized iron ore tailing g	2011	https://ojs.euseex.ist.osu.edu/documen	iron ore tailings and concrete	Google Academico	20
Artigo	Study on the utilization of iron tailings in ultra-high-performance concrete: fres	2021	https://www.mdpi.com/1996-1944/14	iron ore tailings and concrete	Google Academico	20
Artigo	Relationships between compressive strength and microstructure in mortars w	2012	https://ojs.euseex.ist.osu.edu/documen	iron ore tailings and concrete	Google Academico	19
Artigo	Use of iron ore tailings as a construction material	2015	https://scholar.google.com.br/schola	iron ore tailings and concrete	Google Academico	19
Artigo	Effect of iron tailings and slag powders on workability and mechanical properti	2021	https://www.frontiersin.org/articles/10	iron ore tailings and concrete	Google Academico	19
Artigo	Effects of HPMC on workability and mechanical properties of concrete using i	2021	https://www.mdpi.com/1996-1944/14	iron ore tailings and concrete	Google Academico	18
Artigo	Characterisation and applications of iron ore tailings in building and construct	2015	https://ro.ecu.edu.au/theses/1623/	iron ore tailings and concrete	Google Academico	18
Artigo	Study of mechanical, durability and microstructural properties of cementitious	2022	https://www.sciencedirect.com/scien	iron ore tailings and concrete	Science Direc	17
Artigo	Application of Iron Ore Tailings and Phosphogypsum to Create Artificial Rock	2022	https://www.mdpi.com/2075-5309/12	iron ore tailings and concrete	Google Academico	17
Artigo	The Influences of Iron Ore Tailings as Fine Aggregate on the Strength of Ultra	2015	https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full	iron ore tailings and concrete	Google Academico	16
Artigo	Effects of iron ore tailing on performance of hot-mix asphalt	2022	https://www.researchgate.net/profile	iron ore tailings and concrete	Google Academico	15
Artigo	A study on suitability of iron ore overburden waste rock for partial replacement	2018	https://iopscience.iop.org/article/10.1	iron ore tailings and concrete	Science Direc	15
Artigo	Influence of iron ore tailings by-product on the mechanical and electrical prop	2022	https://www.sciencedirect.com/scien	iron ore tailings and concrete	Google Academico	15
Artigo	Utilization of iron tailings as fine aggregates in low-grade cement concrete pav	2019	https://iopscience.iop.org/article/10.1	iron ore tailings and concrete	Google Academico	14
Artigo	Aplicação de rejeito de mineração como agregado para a produção de concre	2014	http://casazero.cz/wp-content/upload	iron ore tailings and concrete	Google Academico	14
Dissertação Mestrado	Aproveitamento de rejeitos oriundos da extração de minério de ferro na fabric	2011	https://repositorio.unesp.br/bitstream	iron ore tailings and concrete	Google Academico	14
Artigo	Preparation and phase characteristics of autoclaved aerated concrete using i	2018	https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.03.038	iron ore tailings and concrete	Google Academico	13
Artigo	Research on Carbonation Characteristics and Frost Resistance of Iron Tailing	2020	https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full	iron ore tailings and concrete	Google Academico	12
Artigo	Recycling of Concentration Tailings of Iron Ore for the Production of Concrete	2014	https://www.researchgate.net/public	iron ore tailings and concrete	Google Academico	11
Artigo	POTENTIAL USE OF IRON ORE TAILINGS IN SANDCRETE BLOCKMAKING	2015	https://www.academia.edu/download	iron ore tailings and concrete	Google Academico	11
Artigo	Use of red mud and iron tailings in self compacting concrete	2014	https://www.academia.edu/download	iron ore tailings and concrete	Google Academico	11
Artigo	Experimental study on autoclaved aerated concrete from coal gangue and iron	2014	https://www.inventaconnect.com/doc	iron ore tailings and concrete	Google Academico	11
Artigo	Study on the preparation of high performance concrete using steel slag and i	2019	https://www.researchgate.net/profile	iron ore tailings and concrete	Google Academico	11
Dissertação Mestrado	Caracterização do rejeito de minério de ferro (IOT) e avaliação da sua influên	2017	https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1	iron ore tailings and concrete	Google Academico	11
Dissertação Mestrado	Caracterização de resíduos oriundos do beneficiamento do minério de ferro p	2015	https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1	iron ore tailings and concrete	Google Academico	11
Artigo	Development of engineered cementitious composites containing iron ore tail	2015	http://ie.usfb.edu.cn/en/article/1071	iron ore tailings and concrete	Google Academico	10
Artigo	Application of iron tailings-based composite supplementary cementitious mate	2022	https://www.mdpi.com/1996-1944/15	iron ore tailings and concrete	Google Academico	10
Artigo	Mechanical properties and microstructure analysis of cement mortar mixed w	2023	https://www.mdpi.com/2075-5309/13	iron ore tailings and concrete	Google Academico	10
Artigo	Aplicação de lama de minério de ferro em forma de pó na presença de ciment	2012	https://www.scielo.br/nriem/a/b/c/v/c	iron ore tailings and concrete	Google Academico	10
Artigo	Estudo sobre a utilização de Resíduo de Minério de Ferro em micromestura	2018	https://www.revistatransportes.org.br	iron ore tailings and concrete	Google Academico	10
Artigo	Perspectivas para o reaproveitamento de rejeitos da mineração de ferro como	2016	https://periodicos.ufmg.br/index.php/	iron ore tailings and concrete	Google Academico	9
Artigo	Perspectivas para o reaproveitamento de rejeitos da mineração de ferro como	2017	https://periodicos.ufmg.br/index.php/	iron ore tailings and concrete	Periódicos capes	9
Dissertação Mestrado	Caracterização e utilização de rejeito de minério de ferro pellet feed em pavim	2014	https://repositorio.ufmg.br/bitstream/	iron ore tailings and concrete	Google Academico	9
Tese de doutorado	Comportamento mecânico de um rejeito de minério de ferro estabilizado com	2020	http://cts.unb.br/jspui/handle/10482/	iron ore tailings and concrete	Google Academico	9
Artigo	Study on preparation of eco-friendly autoclaved aerated concrete from low sil	2019	https://www.ieta.org/sites/default/file	iron ore tailings and concrete	Google Academico	8
Dissertação Mestrado	Impacto do rompimento de uma barragem de rejeitos de minério de ferro sob	2018	https://repositorio.ufmg.br/bitstream/	iron ore tailings and concrete	Google Academico	8
Monografia	Utilização de resíduos de mineração na construção civil	2015	https://repositorio.ufmg.br/bitstream/	iron ore tailings and concrete	Google Academico	7
Artigo	Análises de argamassas de revestimento produzidas com rejeito de minério d	2018	https://eventos.anlac.org.br/index.ph	iron ore tailings and concrete	Google Academico	6
Artigo	Experimental Study and Microscopic Analysis on Frost Resistance of Iron Ore	2022	https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full	iron ore tailings and concrete	Google Academico	5
Artigo	The Use of Iron Ore Tailings in the Iron Quadrangle of Minas Gerais, Brazil	2020	https://kneopen.com/KnE-Engineer	iron ore tailings and concrete	Google Academico	5

Artigo	Basic characteristics and environmental impact of Iron ore tailings	2023	https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmats.2023.1121111/full	iron ore tailings and concrete	Googlego Academico	5
Artigo	Produção e avaliação de microconcretos com rejeito de minério de ferro para	2022	https://www.scielo.br/rmat/v43Wp54F	iron ore tailings and concrete	Googlego Academico	5
Artigo	Resistência ao ataque ácido de cimento Portland com adição de rejeito de mi	2017	https://www.researchgate.net/profile/Ana-Cristina-Carvalho	iron ore tailings and concrete	Googlego Academico	5
Artigo	Estudos do aproveitamento de rejeitos de um minério de ferro itabirítico da re	2016	https://core.ac.uk/download/pdf/19071111.pdf	iron ore tailings and concrete	Googlego Academico	5
Dissertação Mestrado	Influência da heterogeneidade de rejeitos de minério de ferro utilizados como	2021	https://repositorio.ufmg.br/bitstream/handle/1802/52441/1/19071111.pdf	iron ore tailings and concrete	Googlego Academico	5
Dissertação Mestrado	Aplicação do ground penetrating radar em estudos para disposição de rejeito	2014	https://www.researchgate.net/profile/Ana-Cristina-Carvalho	iron ore tailings and concrete	Googlego Academico	5
Dissertação Mestrado	Estudos de reaproveitamento dos resíduos das barragens de minério de ferro	2013	https://www.cosmat.ufmg.br/wp-c	iron ore tailings and concrete	Googlego Academico	5