

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

ESCOLA DE ENGENHARIA

Programa de Pós-Graduação Em Construção Civil

Abner Araújo Fajardo

**ESTUDO DA ADIÇÃO DE REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO PARA
PRODUÇÃO DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS DE ALTO DESEMPENHO**

Belo Horizonte

2023

Abner Araújo Fajardo

**ESTUDO DA ADIÇÃO DE REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO PARA
PRODUÇÃO DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS DE ALTO DESEMPENHO**

Dissertação apresentada a Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Construção Civil. Área de concentração: Tecnologia na Construção Civil. Linha de pesquisa: Materiais de Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. White José dos Santos

Co-orientadora: Prof. Dra. Maria Teresa Gomes Barbosa

Co-orientadora: Prof. Dra. Dayana Cristina Silva Garcia

Belo Horizonte

2023

F119e Fajardo, Abner Araújo.
Estudo da adição de rejeito de minério de ferro para produção de compósitos cimentícios de alto desempenho [recurso eletrônico] / Abner Araújo Fajardo. – 2023.
1 recurso online (100 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: White José dos Santos.
Coorientadoras: Maria Teresa Gomes Barbosa, Dayana Cristina Silva Garcia

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 86-100.
Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Construção civil - Teses. 2. Materiais de construção - Teses. 3. Durabilidade (Engenharia) - Teses. 4. Reaproveitamento (Sobras, refugos, etc) - Teses. 5. Resíduos de mineração - Teses. 6. Minérios de ferro - Teses. I. Santos, White José dos. II. Barbosa, Maria Teresa Gomes. III. Garcia, Dayana Cristina Silva. IV. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. V. Título.

CDU: 691(043)

Ficha catalográfica elaborada pelo bibliotecário Reginaldo César Vital dos Santos CRB/6 2165

Biblioteca Prof. Mário Werneck, Escola de Engenharia da UFMG



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CONSTRUÇÃO CIVIL
MESTRADO EM CONSTRUÇÃO CIVIL**



FOLHA DE APROVAÇÃO

ESTUDO DA ADIÇÃO DE REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO PARA PRODUÇÃO DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS DE ALTO DESEMPENHO

ABNER ARAÚJO FAJARDO

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Curso de Mestrado em Construção Civil, como requisito para obtenção do grau de MESTRE EM CONSTRUÇÃO CIVIL, área de concentração Tecnologia na Construção Civil.

Aprovada em 13 de dezembro de 2023, pela banca constituída pelos membros:



Documento assinado digitalmente

WHITE JOSÉ DOS SANTOS

Data: 14/12/2023 09:38:31-0300

Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. White José dos Santos (Orientador) – UFMG



Documento assinado digitalmente

DAYANA CRISTINA SILVA GARCIA

Data: 16/12/2023 12:56:41-0300

Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Profª. Dayana Cristina Silva Garcia (Coorientadora) – UFMG



Documento assinado digitalmente

MARIA TERESA GOMES BARBOSA

Data: 16/12/2023 15:58:37-0300

Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Profª. Maria Teresa Gomes Barbosa (Coorientadora) – UFJF



Documento assinado digitalmente

JOSE MARIA FRANCO DE CARVALHO

Data: 16/12/2023 18:54:45-0300

Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. José Maria Franco de Carvalho – UFV



Documento assinado digitalmente

FERNANDO DO COUTO ROSA ALMEIDA

Data: 18/12/2023 08:32:23-0300

Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Fernando do Couto Rosa Almeida - UFMG

Belo Horizonte, 13 de dezembro de 2023.

Dedico a Deus primeiramente, ao único que é digno de receber a honra e a glória. Pois, até aqui o SENHOR tem cuidado de nós. Devido às turbulências, como: a crise econômica que assola o mundo, pandemia, guerras e em meio a essas crises, ter me sustentado, dado forças, sabedoria e me dar a oportunidade de estudar e adquirir novos aprendizados.

Dedico aos meus pais que sempre estiveram presentes, me apoiando e incentivando a estudar para adquirir novos conhecimentos, para que a cada dia me torne uma pessoa melhor.

Dedico aos meus irmãos por sempre me apoiarem e também estarem presentes durante a minha vida.

Dedico a minha namorada, Tatá, por sempre me apoiar em meus planos de estudos e incentivar na vida acadêmica. Por me ajudar nos momentos tristes, alegres e também por fazer com que os meus dias fossem mais leves.

Dedico aos meus amigos, tio, tias e primos/primas que me incentivaram a buscar por novos conhecimentos e para contribuir com a sociedade.

“Se o SENHOR não edificar a casa, em vão trabalham os que a edificam”.

Rendei graças ao SENHOR, porque Ele é bom, e a sua misericórdia dura para sempre. - Salmos 107:1

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Professor White, por ser um brilhante professor e uma excelente pessoa. Por ser um professor humilde, que busca sempre orientar, informar os alunos da melhor forma possível. Sempre busca compartilhar os seus conhecimentos com os alunos, está sempre buscando ajudá-los.

Agradeço às Professoras Dayana e Teresa Barbosa, minhas coorientadoras por ajudarem este aluno a ter um olhar mais crítico no meio acadêmico e profissional. Por auxiliar nas análises dos resultados, e também orientar na presente pesquisa.

Gostaria de agradecer também as minhas grandes amigas Doutoranda Bruna e Mestre Silvia, por me ajudar e me mostrar como ser um aluno cientista e pesquisador. Aprendendo a ser mais crítico na sociedade.

Gostaria de agradecer aos alunos de iniciação científica, Zharry, Jordana e Vinicius pelas ajudas nos laboratórios e na pesquisa. Tornando-se uma boa equipe e um ambiente agradável e divertido de se conviver. Desejo que todos sejam prósperos em suas vidas.

Gostaria de agradecer aos alunos que participaram do laboratório de materiais (Professora Teresa) que me ajudaram, auxiliaram, incentivaram e me motivaram a sempre continuar. Sendo eles: Adriano, Lucas, Edinéia, Felipe, Dayana, Paulo, Fabiana.

Agradecer também ao meu amigo Sr. Alberto por ter ajudado nas preparações das amostras, na parte de caracterização. Tendo a paciência para ensinar e pela atenção por ajudar este estudante.

Parafraseando o Sr. Isaac Newton: “Se cheguei até aqui foi porque me apoiei nos ombros de gigantes”

Gostaria de agradecer ao Programa de Apoio à Pós-Graduação (PAPG) da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pela bolsa de estudos oferecida a este estudante.

Corra atrás dos seus sonhos. Se te fecharem uma porta, corra para a próxima. Se todas as portas estiverem fechadas, comece a procurar janelas. Mas se te fecharem todas as janelas, procure o telhado, pois toda edificação tem, e mesmo sendo em um lugar alto, nunca estará completamente fechado. A persistência é um ato lindo, portanto não desista dos seus sonhos. No mundo existem diversas linguagens e línguas, mas o sorriso é universal. Sorria sempre!

RESUMO

O minério de ferro tem uma grande importância para o Brasil, sendo o segundo maior país produtor do mundo. Contudo, a mineração gera um elevado volume de rejeito, causando grandes riscos a população local e também, diversos impactos ambientais. Sendo assim, o setor da construção civil apresenta-se como uma alternativa para a destinação do Rejeito de Minério de Ferro (Iron Ore Tailings - IOT), onde pode reduzir os impactos sócios econômicos, ambientais. Em razão disto, este trabalho tem como objetivo produzir argamassas estruturais de alto desempenho, com uso de adição mineral dos rejeitos de mineração de ferro in natura, sendo adotado os conceitos de empacotamento de partículas. Analisar os compostos hidratados, suas propriedades mecânicas e indicadores de durabilidade ao longo do tempo, aos 7, 28 e 112 dias. Executou-se análises de caracterização dos materiais, a saber: composição química, características físicas e mineralógica. Estudou-se as propriedades mecânicas, indicadores de durabilidade e compostos hidratados. Constatou-se a granulometria fina do rejeito de 4,7 μm ; a sua área superficial de 35,133 m^2/g ; sua densidade de 3,85 g/cm^3 ; sua composição química de 48% de Fe_2O_3 e 21,20% de SiO_2 . Para a idade de 112 dias, a argamassa de rejeito de minério de ferro obteve os seguintes resultados: porosidade 1,64%; 1,51% quantitativo de porosidade por meio de análise de imagens de MEV; 0,68% de absorção de água por imersão; 0,04% do coeficiente de capilaridade; 95,42 MPa para resistência à compressão; 8,26 MPa para a resistência à tração na flexão; 833 $\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$ na resistividade elétrica superficial; 1.973 $\Omega\cdot\text{m}$. para resistividade elétrica volumétrica; 1,38mg de perda de massa de hidróxido de cálcio; 1,32 mg de perda de massa de carbonato de cálcio. Portanto, ao longo da idade, a argamassa de rejeito de minério de ferro teve uma tendência de melhorar as suas propriedades mecânicas e de indicadores de durabilidade. Podendo ser utilizado como adição mineral, por meio de empacotamento de partículas para produzir argamassa de alto desempenho estrutural.

Palavras-chave: rejeito de minério de ferro; aproveitamento de rejeitos; adição mineral; argamassa estrutural. compostos de hidratação.

ABSTRACT

Iron ore is of great importance to Brazil, being the second largest producing country in the world. However, mining generates a high volume of waste, causing great risks to the local population and also various environmental impacts. Therefore, the civil construction sector presents itself as an alternative for the disposal of Iron Ore Tailings (Iron Ore Tailings - IOT), which can reduce socio-economic and environmental impacts. Because of this, this work aims to produce high-performance structural mortars, using mineral admixture from raw iron mining tailings, adopting the concepts of particle packaging. Analyze the hydrated compounds, their mechanical properties and durability indicators over time, at 7, 28 and 112 days. Material characterization analyzes were carried out, namely: chemical composition, physical and mineralogical characteristics. Mechanical properties, durability indicators and hydrated compounds were studied. The fine grain size of the waste was found to be 4.7 μm ; its surface area of 35.133 m^2/g ; its density is 3.85 g/cm^3 ; its chemical composition of 48% Fe_2O_3 and 21.20% SiO_2 . For the age of 112 days, the iron ore tailing mortar obtained the following results: porosity 1.64%; 1.51% quantitative porosity through SEM image analysis; 0.68% water absorption by immersion; 0.04% of the capillarity coefficient; 95.42 MPa for compressive strength; 8.26 MPa for flexural tensile strength; 833 $\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$ in surface electrical resistivity; 1,973 $\Omega\cdot\text{m}$. for volumetric electrical resistivity; 1.38mg of calcium hydroxide mass loss; 1.32 mg of calcium carbonate mass loss. Therefore, over time, iron ore waste mortar has tended to improve its mechanical properties and durability indicators. It can be used as a mineral admixture, through particle packaging to produce high structural performance mortar.

Keywords: iron ore tailings; use of waste; microconcrete; mineral addition; structural mortar. hydration compounds.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Fluxograma do beneficiamento do minério de ferro.....	22
Figura 3.2 – Quantidade de pesquisas científicas por países.....	24
Figura 3.3 Porcentagem dos tipos de utilizações do IOT- Referente as 74 pesquisas científicas analisadas.....	30
Figura 3.4 – Composição química dos IOT de origem brasileira.....	31
Figura 3.5 – Composição química dos IOT de origem chinesa.....	31
Figura 3.6 - Localização e limites do Quadrilátero Ferrífero	32
Figura 3.7 - Quantidade de estudos científicos por faixa de teor de Fe_2O_3	35
Figura 3.8 - Quantidade de trabalhos científicos por faixa de densidade do rejeito de minério de ferro	45
Figura 3.9 Gráfico da resistência à compressão em relação à amostra sem resíduo, com cura aos 7 dias,.....	50
Figura 3.10 Gráfico da resistência à compressão em relação à amostra sem resíduo, com cura aos 28 dias,.....	51
Figura 3.11 Gráfico da resistência à flexão em relação à amostra sem resíduo, com cura aos 28 dia,	55
Figura 3.12 Gráfico da porosidade em relação à amostra sem resíduo, com cura aos 28 dia.....	57
Figura 3.13 Gráfico de absorção de água em relação à amostra sem resíduo, com cura aos 28 dia.....	59
Figura 4.1 – Fluxograma do programa experimental	63
Figura 5.1 Distribuição granulométrica acumulada dos materiais IOT, cimento, sílica ativa, gnaiss e da areia do IPT.....	72
Figura 5.2 - Mapeamento químico (EDS) da argamassa de IOT.....	75
Figura 5.3 - Mapeamento químico (EDS) da argamassa de REF	75
Figura 5.4 - Mapeamento químico (EDS) da argamassa de GN	75
Figura 5.5 – DRX do material rejeito de minério de ferro	76
Figura 5.6 – DRX do material pó de pedra (Gnaiss)	76
Figura 5.7 – Resultados dos MMQ da relação de cimento/areia em relação a sílica ativa.	77
Figura 5.8 – Resultados dos MMQ da relação sílica ativa em relação aos teores de IOT.	78

Figura 5.9 - Resultados da porosidade das amostras ao longo da idade	79
Figura 5.10 - Quantitativo da porcentagem dos poros das argamassas das amostras (REF, IOT e GN).....	81
Figura 5.11 – Imagens de MEV-BSE e poros em imagem binária das amostras com idade de 28 dias (a) referência, (b) com IOT e (c) com gnaíse.....	82
Figura 5.12 - Resultados de absorção de água por imersão das amostras ao longo da idade	83
Figura 5.13 - Resultados do coeficiente de capilaridade das amostras ao longo da idade	86
Figura 5.14 - Resultados da resistência à compressão das amostras ao longo da idade .	87
Figura 5.15 - Resultados da resistência à flexão na tração das amostras ao longo da idade	90
Figura 5.16 - Resultados da resistividade elétrica superficial das amostras ao longo da idade.....	92
Figura 5.17 Resultados da resistividade elétrica volumétrica das amostras ao longo da idade.....	95
Figura 5.18 – Quantitativo da porcentagem das fases anidras das amostras (REF, IOT e GN)	96
Figura 5.19 – (a) imagem MEV (b) imagem tratada com ênfase na identificação da fase anidra das argamassas com REF, IOT e GN aos 112 dias.....	97
Figura 5.20 - Resultado da termogravimetria (TG/DTA) das argamassas (REF, IOT e GN) sobre a perda de massa ao longo do tempo.....	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 Tipos de tratamentos do IOT no exterior compilado a partir de ROY, NAYAK, RATH (2020).....	23
Tabela 3.2 - Propriedades química e física dos IOT's da literatura científica.	25
Tabela 3.3 - Propriedades química e física dos IOT's da literatura científica.	26
Tabela 3.4 - Propriedades química e física dos IOT's da literatura científica.	27
Tabela 3.5 - Propriedades química e física dos IOT's da literatura científica.	28
Tabela 3.6 - Propriedades química e física dos IOT's da literatura científica.	29
Tabela 3.7 - Diversidade da mineralogia do IOT de autores brasileiros.	36
Tabela 3.8 - Diversidade da mineralogia do IOT de autores chineses.	37
Tabela 3.9 - Diâmetros característicos dos rejeitos de mineração de ferro de autores brasileiros em relação o tipo de rejeito e tratamento feitos em laboratório para adequação as condições de uso.....	40
Tabela 3.10 - Diâmetros característicos dos rejeitos de mineração de ferro de autores chineses em relação o tipo de rejeito e tratamento feitos em laboratório para adequação as condições de uso.....	41
Tabela 3.11 - Densidade característica dos rejeitos de mineração de ferro de autores brasileiros em relação o tipo de rejeito e tratamento feitos em laboratório para adequação as condições de uso.....	42
Tabela 3.12 - Densidade característicos dos rejeitos de mineração de ferro de autores chineses em relação o tipo de rejeito e tratamento feitos em laboratório para adequação as condições de uso.....	43
Tabela 3.13 Uso do IOT como substituição do agregado.....	46
Tabela 3.14 Uso do IOT como substituição/adição do aglomerante	46
Tabela 3.15 Uso do IOT como adição mineral em concretos e argamassas.....	47
Tabela 3.16 Correlação da resistência a compressão dos IOT's da literatura científica.	47
Tabela 3.17 Correlação da resistência a compressão dos IOT's da literatura científica em relação com a referência.	48
Tabela 3.18 - Correlação da resistência a compressão dos IOT's da literatura científica em relação com a referência.	49
Tabela 3.19 – Correlação da resistência à flexão dos IOT's da literatura científica em relação com a referência.	53

Tabela 3.20 Correlação da porosidade dos IOT's da literatura científica em relação com a referência.	57
Tabela 3.21 Correlação da absorção de água dos IOT's da literatura científica em relação com a referência.	58
Tabela 5.1 - Parâmetros granulométricos dos materiais.	73
Tabela 5.2 Área superficial específica e porosidade dos materiais.	73
Tabela 5.3 Massa específica dos materiais.	74
Tabela 5.4 - Composição química dos materiais.	74
Tabela 5.5- Traços das amostras em volume	78
Tabela 5.6 - Resultados do método ANOVA para porosidade aberta (Pa) das amostras	80
Tabela 5.7 - Teste de Tukey para porosidade aberta (Pa) das amostras	80
Tabela 5.8 – Resultados do método ANOVA para absorção de água por imersão (Ai) das amostras	84
Tabela 5.9 – Teste de Tukey para absorção de água por imersão (Ai) das amostras	84
Tabela 5.10 - Resultados do método ANOVA para coeficiente de capilaridade (Cc) das amostras	86
Tabela 5.11 - Teste de Tukey para coeficiente de capilaridade (Cc) das amostras	87
Tabela 5.12 - Resultados do método ANOVA para resistência à compressão das amostras	88
Tabela 5.13 - Teste de Tukey para resistência à compressão das amostras.....	88
Tabela 5.14 - Resultados do método ANOVA para resistência à tração na flexão das amostras	91
Tabela 5.15 - Teste de Tukey para resistência à tração na flexão das amostras	91
Tabela 5.16 - Resultados do método ANOVA para a resistividade elétrica superficial das amostras	93
Tabela 5.17 - Teste de Tukey para a resistividade elétrica superficial das amostras.....	93

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a/c	Relação água-cimento
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANM	Agência Nacional de Mineração
ASE	Área Superficial Específica
BET	Brunauer, Emmett e Taller
BS	Rejeito do Beneficiamento Simples
BC	Rejeito do Beneficiamento Complexo
CH	Hidróxido de Cálcio - Portlandita
CPI	Cimento Portland tipo I
C-S-H	Silicato de Cálcio Hidratado
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
DRX	Difração de Raios-X
EDS	Espectrometria de Energia Dispersiva
FRX	Fluorescência de Raios-X
IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração
IPT	Instituto de Pesquisa Tecnológica
LOI	<i>Lost of Ignition</i> – Perda ao Fogo
MEV	Microscopia de Varredura por Elétrons
MME	Ministério de Minas e Energia
IOT	Rejeito de minério de ferro
ROM	<i>Run-of-mine</i>
SF	Rejeito de <i>Sínter Feed</i>
SNIC	Sindicato Nacional da Indústria do Cimento
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
USGS	United State Geological Survey
ZTI	Zona de Transição Interna

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	OBJETIVOS	19
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
3.1	O minério de ferro no Brasil e no mundo.....	20
3.2	Processos de beneficiamento do minério de ferro.....	21
3.3	Caracterização do rejeito de minério de ferro	24
3.3.1	Composição química do IOT.....	30
3.4	Aproveitamento de rejeito de minério de ferro	45
3.4.1	Utilização de IOT em materiais de construção.....	45
3.4.2	Propriedades mecânicas de compósitos com IOT	47
3.4.3	Parâmetros de durabilidade e índices físicos dos compósitos com IOT.....	55
3.4.4	Propriedades microestruturais em relação a cura em compósitos cimentício com IOT.....	59
4	METODOLOGIA.....	63
4.1	Materiais.....	64
4.2	Caracterização dos materiais	64
4.3	Dosagem das argamassas	66
4.4	Caracterização das argamassas.....	67
4.5	Estudos da hidratação dos compósitos com adição de IOT.....	69
4.6	Análise estatística dos dados.....	71
5	RESULTADOS E ANÁLISES	72
5.1	Caracterização dos materiais	72
5.2	Compósitos cimentícios	77
5.2.1	Determinação do traço.....	77
5.2.2	Porosidade aberta.....	78
5.2.3	Absorção de água por imersão.....	82
5.2.4	Coeficiente de capilaridade	85
5.2.5	Resistência à compressão	86
5.2.6	Resistência à tração na flexão.....	89
5.2.7	Resistividade elétrica superficial	92
5.2.8	Resistividade elétrica volumétrica.....	94

5.2.9	Análise das fases hidratadas	96
6	CONCLUSÕES.....	99
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	101

1 INTRODUÇÃO

O minério de ferro tem uma grande importância econômica para o Brasil, sendo o segundo maior país produtor do mundo, ficando atrás apenas da Austrália. No ano de 2022 foram 410 milhões de toneladas em todo o território brasileiro (USGS, 2023). Este produto representou 61,40% das substâncias produzidas na mineração nacional em 2022, sendo o mineral mais produzido no setor (IBRAM, 2022a). No ano de 2022, as exportações do minério de ferro foram de 344,10 milhões de toneladas, o que representou US\$ 28,9 bilhões.

O setor de mineração, foi responsável pela criação de 204 mil empregos diretos e 2,25 milhões de empregos ao longo da cadeia e do mercado (IBRAM, 2022a) e, segundo a Agência Nacional de Mineração (ANM, 2020), os estados de Minas Gerais e Pará foram responsáveis por 89,4% da produção de minério de ferro no ano de 2019.

Um subproduto do beneficiamento do minério de ferro é o rejeito de minério de ferro (*Iron Ore Tailings* - IOT), e seu descarte causa grandes riscos a população local e, também, diversos impactos ambientais (CORDEIRO, 2014). Toneladas de IOT são depositados em barragens e/ ou empilhadas, causando: processo de lixiviação, poluição das águas superficiais, subterrâneas e do solo, devido aos metais pesados presentes no IOT (LUO *et al.*, 2020; CANCIO *et al.*, 2018). Recentemente, o Brasil teve duas tragédias envolvendo rompimentos de barragens nas cidades de Mariana (no ano 2015) e Brumadinho (no ano 2019), ambas localizadas no Estado de Minas Gerais, que ocasionaram severos danos a população, como óbitos e devastações ao meio ambiente (CHÁCARA, 2020; CANCIO *et al.*, 2018).

Apenas o rompimento da barragem de Mariana foi responsável por 19 mortes e aproximadamente 50 milhões de metros cúbicos de rejeito foram lançados no leito do rio Doce (DUARTE *et al.*, 2021), danificando cerca 650 km do ecossistema dos corpos hídricos (FERREIRA, 2020) e, também, devastando aproximadamente 1469 hectares de vegetação natural (COUTO *et al.*, 2021). Na barragem de Brumadinho, o volume de lama de rejeito despejados no rio Paraobepa foi de 12 milhões de metros cúbicos (SOUZA *et al.*, 2021; TERAMOTO *et al.*, 2021; THOMPSON *et al.*, 2020), que resultou na destruição de cerca de 133,27 hectares de vegetação nativa da Mata Atlântica e gerou 250 óbitos de pessoas daquela região (THOMPSON *et al.*, 2020),

Entretanto, a construção civil apresenta-se como uma alternativa para a destinação do IOT, possibilitando a redução dos impactos sócios econômicos, ambientais e, também, prevenir rompimentos de barragens, evitando tragédias. Diversos estudos nacionais sobre a aplicação do rejeito de minério de ferro tem sido realizado para a produção de vários subprodutos a serem empregados na construção civil como, por exemplo, utilização em asfalto ou *pavers* (APAZA *et al.*, 2021; MANTILLA *et al.*, 2017; SANT'ANA FILHO *et al.*, 2017; BASTOS *et al.*, 2016), tintas e matérias coloridos (MORAIS *et al.*, 2021; GALVÃO *et al.*, 2018; PEREIRA; BERNARDIN, 2012), cimentos álcali-ativados (DEFÁVERI *et al.*, 2019; DUAN *et al.*, 2016; LI *et al.*, 2014), em substituição do agregado (CARRASCO *et al.*, 2017; LING *et al.*, 2021; LIU *et al.*, 2019; KURANCHIE *et al.*, 2015), compósitos cimentícios (CASTRO *et al.*, 2021; ZHAO *et al.*, 2021; ALMADA *et al.*, 2022, ALMADA *et al.*, 2023; DUARTE *et al.*, 2022; SILVA, 2014a; ZHAO; FAN; SUN, 2014), em matérias cerâmicos (CARVALHO EUGÊNIO *et al.*, 2021; ZHANG; TANG; LIU, 2021; MENDES *et al.*, 2019; SILVA *et al.*, 2014).

As pesquisas de CANCIO *et al.* (2018), que substituíram parcialmente o cimento pelo rejeito de minério de ferro, resultou num aumento na resistência à compressão nas pastas igual a 22% em relação as amostras controle. ALMADA *et al.* (2022) e ALMADA *et al.* (2023) utilizaram o IOT como adição mineral e conseguiu um aumento de resistência à compressão na argamassa igual a 22,8% e para o módulo de elasticidade igual a 21,41%. YI *et al.* (2009) utilizaram o IOT em argamassa e conseguiu aumentar a resistência à compressão. Zhao; Fan; Sun (2014) ao utilizar o rejeito como agregado em concretos de alto desempenho, também obtiveram um aumento na resistência à compressão, chegando ao valor de 139,20 MPa com cura de 28 dias. Kuranchie *et al.* (2015), ao utilizarem o rejeito como agregado em concretos, obtiveram um ganho na resistência a flexão. Os materiais que utilizaram o rejeito também apresentaram desvantagens, como a perda na consistência e na trabalhabilidade (ALMADA *et al.*, 2019; KURANCHIE *et al.*, 2015) e aumento na porosidade (CANCIO *et al.*, 2018; ZHAO; FAN; SUN, 2014).

Os rejeitos oriundos da China apresentam teor de óxido de ferro inferior a 26% (LING *et al.*, 2021; DONG *et al.*, 2020; HAN *et al.*, 2020; LUO *et al.*, 2020; ZHANG *et al.*, 2020; LIU *et al.*, 2019; WEISHI *et al.* 2018; ZHANG; LI, 2018; YAO *et al.*, 2015; YANG *et al.*, 2014; YANG; DENG; WANG, 2014; LIU *et al.*, 2010), enquanto no Brasil o teor de óxido de ferro do rejeito pode ser superior variando na faixa entre 60% a 75% c; MORAIS *et al.*, 2021; ELÓI, 2020; BORGES *et al.*, 2019; CUNHA, 2018;

MAGALHÃES *et al.*, 2018) ou entre 20% a 35% (CARRASCO *et al.*, 2017; ANDRADE, 2014) e inferior a 20% (ALMADA *et al.*, 2022, ALMADA *et al.*, 2023; APAZA *et al.*, 2021; SILVA, 2014a; GUERRA, 2014).

Assim, em virtude da necessidade do aperfeiçoamento do processo de beneficiamento e para o melhor aproveitamento do minério, processos de desmagnetização começaram a ser estudados e implantados (DUARTE *et al.*, 2022; PASCOAL *et al.*, 2018; ROCHA, 2018). Tal procedimento tende a maximizar o reaproveitamento de rejeitos do minério de ferro, resultando em maiores níveis de recuperação do elemento de interesse, o ferro (Fe) (ROCHA, 2018), e geração de um IOT mais rico em sílica e mais homogêneo.

Diante do exposto, constata-se que o IOT é muito complexo, sua caracterização não tem um padrão específico, apresenta diversidades físicas e químicas (ALMADA *et al.*, 2022; ALMADA *et al.*, 2023). Assim sendo, as jazidas e o tipo de beneficiamento do IOT exercem grande influência na sua heterogeneidade (ALMADA *et al.*, 2022; ALMADA *et al.*, 2023; FAJARDO, 2020).

O emprego desse rejeito como adição às misturas cimentícias tende a favorecer a sociedade, ambientalmente, uma vez que a produção do cimento Portland é responsável pela emissão de CO₂, (ALMADA *et al.*, 2022; ALMADA *et al.*, 2023; CASTRO *et al.*, 2021; ANDRADE, 2019; SUPINO *et al.*, 2016; BORGES, 2014). Deste modo, evidencia-se a possibilidade de estudo das características físicas e químicas do rejeito de ferro *in natura*, e sua inserção para produção de argamassas. Onde torna-se necessário efetuar um minucioso estudo do seu comportamento, ao longo do tempo, dos compostos cimentícios hidratados em argamassas de alto desempenho, já que trata de um emprego com poucos estudos. Aliado a isto, Almada *et al.* (2022), Almada *et al.* (2023) e Castro *et al.* (2021) destacam que os estudos de empacotamento de partículas pode promover a maximização do uso deste material sem a necessidade de tratamento onerosos; uma vez que é difícil a sua ativação pozolânica, mesmo após o processo de moagem e de separação magnética (DUARTE *et al.*, 2022).

2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é produzir argamassas estruturais de alto desempenho, com uso de adição mineral dos rejeitos de minério de ferro *in natura*, via conceitos de empacotamento de partículas.

Para alcançar o objetivo geral são propostos como objetivos específicos analisar e comparar:

- Analisar as características físicas, químicas, fases cristalinas e microestrutural dos rejeitos de minério de ferro *in natura*, do cimento e do pó de gnaiss;
- Interpretar o efeito da dosagem por empacotamento de partículas na definição do teor de IOT e microestrutura dos compósitos cimentícios
- Avaliar as possíveis alterações ao longo do tempo nas propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade de argamassas com diferentes adições minerais (Sílica ativa, IOT *in natura* e pó de gnaiss).
- Analisar as possíveis alterações ao longo do tempo nos compostos hidratados e anidros a partir das diferentes adições minerais (Sílica ativa, IOT *in natura* e pó de gnaiss) nas argamassas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentadas informações sobre a produção, reservas e o tipo de minério de ferro explorado no Brasil e na China, uma vez que 68,9% das exportações de ferro brasileira são destinadas à China (IBRAM, 2022). Um outro fator importante é sobre a quantidade de artigos, cujos autores são chineses, conforme se verifica em consulta ao *Science Direct*, Google Acadêmico e dentre outros. Além disso, são descritos os tipos de beneficiamentos existentes, como estes rejeitos são gerados, as suas principais características e, também, estudos atuais.

3.1 O minério de ferro no Brasil e no mundo

O segundo maior produtor de minério de ferro no mundo é o Brasil, sendo que a Austrália ocupa a primeira posição e a China a terceira. As reservas brasileiras têm aproximadamente 17,65% de toda a reserva mundial (USGS, 2023).

O setor da mineração faturou aproximadamente 250 bilhões de dólares no ano de 2022. Este ramo foi responsável pela criação de 204 mil postos de trabalho e, também, gerou 2,25 milhões de empregos de forma direta e indireta no ano de 2022, sendo que a mineração representa de 2,3% a 2,5% do PIB brasileiro (BRASIL, 2021; IBRAM, 2022^a; IBRAM, 2023). As exportações do minério de ferro foram de 344,10 milhões de toneladas e totalizando em 28,9 bilhões de dólares no ano de 2022, sendo a China o principal consumidor, representando 72% de toda a exportação deste minério (IBRAM, 2022^a; IBRAM, 2023).

As principais fases minerais presentes no minério de ferro no mundo são: a hematita, magnetita e a goethita, sendo que o mais abundante no Brasil a hematita (Fe_2O_3) (CARVALHO, 2017). O ferro encontrado na natureza, em rochas em forma de minério de ferro, são óxidos como magnetita e hematita, e é a matéria-prima para a produção de aço (CORDEIRO, 2014; SILVA, 2014a).

O quadrilátero ferrífero, localizado na região de Minas Gerais, apresenta uma área aproximada de 7.000 Km^2 de depósitos de minério de ferro e outros minerais (GENTIL, 2020). Ao mesmo tempo, a serra dos Carajás, localizada no estado do Pará tem reservas de aproximadamente 16 bilhões de toneladas de minério de ferro, com capacidade de

produção de 100 milhões de toneladas por ano (SOUZA, 2018; FERREIRA, 2009). Essa reserva se destaca como sendo a maior a céu aberto do mundo (VALE, 2018).

O Brasil no ano de 2021, produziu aproximadamente 567 milhões de toneladas de minério de ferro, sendo que Minas Gerais foi o estado que mais produziu, cerca de 363 de milhões de toneladas e o estado do Pará, em torno de 192 milhões de toneladas. Estes dois estados representaram 97,87% de toda produção nacional de minério de ferro em 2021 (ANM, 2022; IBRAM, 2022a). A quantidade de beneficiamento foi perto de 430 milhões de toneladas apenas no território brasileiro. O teor de ferro após as etapas de tratamento foi cerca 61,92% para Minas Gerais e 64,93% no Pará (ANM, 2020; IBRAM, 2020a), o restante são os rejeitos, depositados nas barragens.

3.2 Processos de beneficiamento do minério de ferro

3.2.1 Beneficiamento e tratamentos dos minérios

Nos diversos tipos de tratamento, tem-se que para cada fase do beneficiamento (Figura 3.1) são gerados (simultaneamente e paralelamente) um tipo de rejeito com características distintas (APAZA *et al.*, 2018; FERRANTE, 2014). Dentre estes, pode-se elencar dois tipos: a lama gerada no processo de deslamagem, possuindo partículas muito finas e a presença de outros contaminantes e, o rejeito da flotação, com características arenosa e composto basicamente por sílica (OLIVEIRA, 2019). Para Braga (2016) o rejeito é uma mistura de água, reagentes e partículas sólidas compostas por areia, silte e argila. Tem-se ainda, os materiais sem valores econômicos, oriundos das atividades de lavra que não passaram pelo beneficiamento e são chamados de estéreis (BASTOS, 2013).

Existem diversos tipos de tratamentos para o minério de ferro que dependem da logística de cada empresa e das características do produto. No beneficiamento, conjunto de atividades relacionadas ao tratamento desse material (BOCCAMINO, 2017), é muito importante realizar uma detalhada caracterização mineralógica do minério de ferro, para escolher o tipo mais adequado (DAUCE, 2017).



Figura 3.1 - Fluxograma do beneficiamento do minério de ferro.

Fonte: Elaborado a partir de (BOCCAMINO, 2017).

Na etapa de cominuição, a moagem é responsável pela redução do tamanho das partículas e pode ser realizada por impactos, compressão e abrasão, fazendo com que estas partículas tenham seus tamanhos reduzidos e sejam levadas para as próximas etapas (REIS, 2018), a saber:

- Na etapa de concentrado é para onde se destina as partículas com valores econômicos e com interesse comercial (BRAGA, 2016), logo ricas em materiais metálicos.
- Na etapa de flotação, a polpa do minério tem diferentes componentes que são separados com ar e água. O isolamento destes elementos é feito em meio aquoso com a adição de reagentes, fazendo com que o ferro e a sílica aumentem as suas afinidades com a água e o ar (GOMES, 2020). Basicamente, a flotação pode ser realizada de quatro formas: flotação de minerais oxidados de ferro, flotação de sílica, flotação catiônica e flotação catiônica de quartzo (MENDES, 2018).
- Na etapa de deslamagem, tem como a finalidade de adequar a granulometria e a eliminação das partículas finas do rejeito, para estes materiais finos não prejudicarem o processo de flotação (MENDES, 2018).

As etapas e processos mais comuns no beneficiamento de minério de ferro (Figura 3.1) são (LUZ e LINS, 2010; LUZ, SAMPAIO, FRANÇA, 2010):

- (i) cominuição: britagem e moagem;
- (ii) peneiramento (separação por tamanhos) e classificação (ciclonagem, classificação em espiral);
- (iii) concentração: gravítica, magnética, eletrostática, flotação etc;
- (iv) desaguamento: espessamento e filtração;
- (v) secagem: secador rotativo, spray dryer, secador de leito fluidizado;
- (vi) disposição de rejeito;

(vii)recirculação de água.

Para Carmignano *et al.*, (2021), os tipos de beneficiamentos mais comuns no Brasil, são: separação magnética, flotação, flotação reversa, separação eletrostática, métodos de gravidade e floculação. Na Tabela 3.1 estão apresentados alguns tipos de tratamentos utilizados no exterior, sendo que certos tipos de tratamento são para a recuperação do ferro.

Tabela 3.1 Tipos de tratamentos do IOT no exterior compilado a partir de ROY, NAYAK, RATH (2020)

Autor	Beneficiamento	Resultado
Uwadiale, 1990	Magnetização, aglomeração de óleo, flotação, floculação seletiva, coagulação eletrolítica e lixiviação ácida.	Após a análise de diferentes tipos de beneficiamentos e comparar as suas eficácias, o processo de magnetização foi superior para o aprimoramento de finos de minério de ferro. A torrefação por redução, foi considerada a mais econômica.
LI <i>et al.</i> , 2010	Torrefação, seguido de separação magnética	Para o IOT, onde a maioria das fases eram Fe ₂ O ₃ , CaO, alumina, quartzo. Sendo que a maior parte da hematita e quartzo foram finamente dispersos. Recuperou-se 88,2% de ferro, por meio da torrefação de redução a uma temperatura de 800° C por 30 mins. O grau da fração magnética foi de 61,3% de Fe.
JANG <i>et al.</i> , 2014	Desidroxilação, seguida de torrefação e separação magnética	Utilizaram a desidroxilação seguida por torrefação de redução e separação magnética para melhorar a goethita da mina. Nas temperaturas entre 650°C e 700°C, a torrefação foi ideal para transformar goethita em magnetita.
YU <i>et al.</i> , 2018	Fluidização – Gás	Utilizaram o gás redutor CO 4m ³ /h e fluido de fluidização N ₂ 1m ³ /h para tratar o IOT com 33,19% de Fe. Em uma temperatura de 540°C, a maior parte da hematita e siderita foram transformadas em magnetita.
YU <i>et al.</i> , 2017	Torrefação de 800° C	Utilizaram a torrefação para amostra com partículas inferiores a 74 µm e com teor de Fe de 34,60%. A hematita e a siderita, foram convertidas em magnetita em uma temperatura de 800°C por um tempo de 8 minutos. O magnético concentrado com teor de 65,4% de Fe e com uma recuperação de 92,7% de ferro.
LI <i>et al.</i> , 2019	Separação magnética com baixa e alta intensidade, seguida de torrefação magnetizante fluidizada	Para o rejeito com concentração de 10,60% de Fe, utilizaram a combinação de separação magnética de baixa intensidade e alta intensidade e também torrefação (600°C) magnetizante fluidizada. Após esses processos o ferro ficou com um teor de 65,30% e com uma recuperação de 85,85%.

Fonte: Adaptado de Uwadiale, 1990; LI *et al.*, 2010; JANG *et al.*, 2014; YU *et al.*, 2018; YU *et al.*, 2017; LI *et al.*, 2019.

Conforme Tabela 3.1, existem diversos tipos de beneficiamentos, a torrefação foi considerada mais econômico dentre outros tipos analisados por Uwadiale, (1990). A separação magnética também apresentou bons resultados para a recuperação de ferro, quando estes apresentavam baixo teor inicialmente (UWADIALE, 1990; LI *et al.*, 2010; JANG *et al.*, 2014; LI *et al.*, 2019).

3.3 Caracterização do rejeito de minério de ferro

Após realizar pesquisas nos principais repositórios acadêmicos (*Science Direct*, Google Acadêmico e *Web of Science*), foi possível encontrar 74 pesquisas científicas que estudaram o rejeito de minério de ferro (IOT) distribuídos como segue: 35 na China, 30 no Brasil, 5 na Índia, 2 na Nigéria, 1 na Malásia e 1 na Austrália (Figura 3.2).

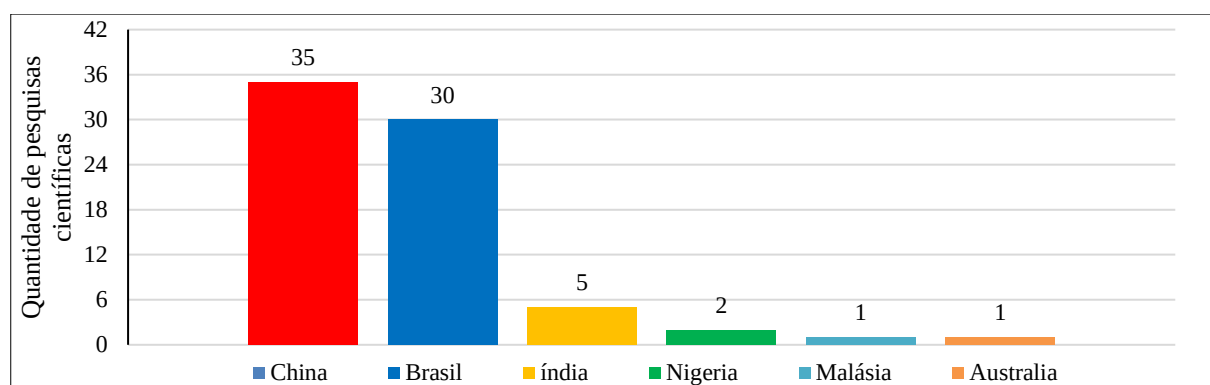


Figura 3.2 – Quantidade de pesquisas científicas por países

As Tabela 3.2, Tabela 3.3, Tabela 3.4, Tabela 3.5, Tabela 3.6 apresentam, resumidamente, as informações encontradas relativas a utilização, tipo de beneficiamento ou tratamento para a caracterização do rejeito de minério de ferro obtidas nos estudos já efetuados com emprego do IOT. Relacionou-se as propriedades químicas, como: teor de ferro, sílica e mineralogia; propriedades físicas como: granulometria e a sua massa específica.

Diante do exposto as Tabela 3.2, Tabela 3.3, Tabela 3.4, Tabela 3.5, Tabela 3.6 apresentam quais os tipos de utilizações são mais aplicados o IOT (Figura 3.3). Na maioria dos estudos realizados, o rejeito de minério de ferro foi utilizado como substituição do agregado. Outra parcela considerável de estudos utilizou o IOT como uma substituição parcial do aglomerante. Assim sendo, somando estes dois tipos de utilizações, tem aproximadamente 54,05% das pesquisas. Além disso, existem diferentes tipos de aplicações, e algumas ainda tiveram poucos estudos. Mas pode ser devido ao fato de serem mais recentes, como os estudos do IOT na impressão 3D (LI *et al.* 2020), agregado em polipropileno (PIFFER; SOARES; GADINO, 2021), ativador em geopolímeros (FERREIRA, 2021), adição mineral (ALMADA, 2021).

Tabela 3.2 - Propriedades química e física dos IOT's da literatura científica.

Autor	Utilização	Beneficiamento/ tratamento	Propriedade química			Propriedade física	
			Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Mineralogia	Granulometria	Massa específica (g/cm ³)
ALMADA, 2021	Adição mineral	Rejeito arenoso	17,31	79,14	Q- H- G	<71,16µm	2,807
APAZA <i>et al.</i> , 2021	Substituição do agregado	Britagem, peneiramento, flotação	9,46	88,68	Q-H	0,60mm	2,830
CASTRO <i>et al.</i> , 2021	Adição mineral	Britagem, lavagem e peneiramento	63,27	27,41	Q-H-G	22µm	4,04
MORAIS <i>et al.</i> , 2021	Substituição do aglomerante	Calcinado, secagem e triturado	65,78	22,30	Q-G-H	36,31µm	-
ELÓI, 2020	Produção de geopolímeros	Moagem	67,40	21,50	G-H-Q	40µm	2,12
BORGES <i>et al.</i> , 2019	Substituição do agregado	Espiral, lavagem, gravidade	51,90	46,02	H-Q	92µm	3,05
CUNHA, 2018	Outros	Homogeneização e quarteamento	73,05	11,31	H-Q	<149µm	4,502
MAGALHÃES <i>et al.</i> , 2018	Substituição do aglomerante	Triagem e filtragem de desaguamento	66,98	23,00	Q-H-G	14,13µm	-
CARRASCO <i>et al.</i> , 2017	Substituição do agregado	Rejeito Grosso	21,99	67,97	-	0,01mm e 0,1mm	3,14
ANDRADE, 2014	Outros	Homogeneização e quarteamento	33,92	59,96	Q-H-G	1,10mm	-
SILVA, 2014a	Aditivo em cerâmicas	Grosso magnética	8,36	90,40	Q-H	149µm e 53µm	2,76
GUERRA, 2014	Adição em cimento	Não magnético do WHIMS	9,34	84,66	Q-H	75 µm	2,27
LING <i>et al.</i> , 2021	Substituição do aglomerante	Moagem	10,11	33,26	-	10µm - 100µm	-
DONG <i>et al.</i> , 2020	Remoção de corantes	Bruto	8,56	67,48	Q	<74µm	-
HAN <i>et al.</i> , 2020	Fabricação de cerâmicas	Moagem e peneiramento	13,39	30,09	Q	9,899µm	-
LUO <i>et al.</i> , 2020	Fabricação de cerâmicas	Moagem e secagem	8,22	51,59	Q	<74µm	2,95

Legenda: Q:quartzo, H:hematita, G:Goethita, A: Albite, AN: Anortita, C: Calcita, E: Eastonite

Fonte: ALMADA, 2021; APAZA *et al.*, 2021; CASTRO *et al.*, 2021; MORAIS *et al.*, 2021; ELÓI, 2020; BORGES *et al.*, 2019; CUNHA, 2018; MAGALHÃES *et al.*, 2018; CARRASCO *et al.*, 2017; ANDRADE, 2014; SILVA, 2014^a; GUERRA, 2014; LING *et al.*, 2021; DONG *et al.*, 2020; HAN *et al.*, 2020; LUO *et al.*, 2020.

Tabela 3.3 - Propriedades química e física dos IOT's da literatura científica.

Autor	Utilização	Beneficiamento/ tratamento	Propriedade química			Propriedade física	
			Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Mineralogia	Granulometria	Massa específica (g/cm ³)
ZHANG <i>et al.</i> , 2020	Substituição do agregado	Concentrado e flotação	8,8	72,84	Q	166,20µm	2,70
LIU <i>et al.</i> , 2019	Substituição do agregado	Bruto e peneiramento	8.58	58.94	Q	5µm - 10µm	-
WEISHI <i>et al.</i> 2018	Fabricação de cerâmicas	Rejeito fino	34,5	11,23	Q	38,5µm - 88µm	-
ZHANG; LI, 2018	Ativador	Moagem	7.42	67.58	Q-A-An	<74µm	-
YAO <i>et al.</i> , 2015	Fabricação de cerâmicas	Secadas em estufas e moídas	9.95	44,47	Q-C-E	Malha #60	-
YANG <i>et al.</i> , 2014	Fabricação de cerâmicas	Secos a 105°C, triturados e moídos	18,58	36,48	Q-C	6,98µm	3,11
YANG; DENG; WANG, 2014	Outros	Coletado e seco a temperatura ambiente	25,18	50,88	Q-H-C	2,76µm	-
LIU <i>et al.</i> , 2010	Fabricação de cerâmicas	Coleta e secagem	17,31	79,77	Q-H	<150µm	-
FONTES <i>et al.</i> , 2021	Substituição do agregado- Pigmentação	segregação por gravidade / separação magnética	16,80	79,20	Q-H-G	<300µm	3,03
SANT'ANA FILHO <i>et al.</i> , 2017	Substituição do agregado	costa de barragem	35,00	63,00	Q-H	< 37 µm	3,74
BASTOS <i>et al.</i> , 2016	Agregado em pavimentos	costa de barragem	68,05	20,40	Q-H-K	> 85% passante na #200	3,55
FONTES <i>et al.</i> , 2016	Substituição do aglomerante	Trituragem e moagem	45,92	24,20	Q-H	<75µm	3,88
KURANCHIE <i>et al.</i> , 2015	Substituição do agregado	-	25,00	57,00	-	75µm	2,65
SHETTIMA <i>et al.</i> , 2016	Substituição do agregado	-	8,00	56,00	Q-G	< 1mm	2,6

Legenda: Q:quartzo, H:hematita, G:Goethita, A: Albite, AN: Anortita, C: Calcita, E: Eastonite

Fonte: ZHANG *et al.*, 2020; LIU *et al.*, 2019; WEISHI *et al.* 2018; ZHANG; LI, 2018; YAO *et al.*, 2015; YANG *et al.*, 2014; YANG; DENG; WANG, 2014; LIU *et al.*, 2010; FONTES *et al.*, 2021; KURANCHIE *et al.*, 2015; SHETTIMA *et al.*, 2016.

Tabela 3.4 - Propriedades química e física dos IOT's da literatura científica.

Autor	Utilização	Beneficiamento/ tratamento	Propriedade química			Propriedade física	
			Fe ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	Mineralogia	Granulometria	Massa específica (g/cm ³)
MANTILLA <i>et al.</i> , 2017	Substituição do agregado	-	34,26	45,72	-	0,18mm	3,35
GALVÃO <i>et al.</i> , 2018	Pigmentos para tintas	-	47,80	30,00	-	90% < 46µm	3,53
PEREIRA; BERNARDIN, 2012	Corante cerâmico	Proveniente de lama	71,70	20,10	H-G-Q	90% < 30µm	1,80
DEFÁVERI <i>et al.</i> , 2019	Produção de geopolímeros	Barragem	48,90	40,00	Q-H-G	D ₁₀ : 2,2µm	2,92
DUAN <i>et al.</i> , 2016	Produção de geopolímeros	Barragem	12,31	34,72	Q-H-D	90% < 20µm	5,258
MENDES <i>et al.</i> , 2019	Fabricação de cerâmicas	Barragem	12,31	63,09	Gi-H-G	Silte arenoso	2,93
CANCIO <i>et al.</i> , 2018	Substituição do aglomerante	Barragem de lama	59,10	25,60	H-Q	D ₅₀ : 5,18µm	3,30
YI <i>et al.</i> , 2009	Argamassa	-	13,82	63,07	Q-M	-	-
XIAOXIN <i>et al.</i> 2011	Substituição do agregado	-	-	-	-	Módulo de finura 2,5	2,78
ARISTIMUNHO; BERTOCINI 2012	Substituição do agregado	Lama	-	-	-	> 50% passante na #200	3,79
LIU <i>et al.</i> 2012	Substituição do agregado	-	14,00	69,00	-	75 µm e 4,75 mm	1,45
YU <i>et al.</i> 2012	Substituição do agregado	-	9,00	73,00	-	Módulo de finura ~1,0	2,8
GUODONG <i>et al.</i> 2014	Substituição do agregado	-	13,00	45,00	-	Módulo de finura 1,3	-
COSTA <i>et al.</i> 2014	Substituição do agregado	Sinter feed	56,00	15,00	H-Q-G	Módulo de finura 3,1	3,76
GOYAL <i>et al.</i> 2015	Substituição do agregado	Barragem (pó)	-	-	-	Módulo de finura 2,5	3,21

Legenda: Q:quartzo, H:hematita, G:Goethita, A: Albite, AN: Anortita, C: Calcita, E: Eastonite, K: Caulinita, D: Dolomita, Gi: Gibbsita, AB: Anfibólio, F: Feldspato, M: magnetita

Fonte: MANTILLA *et al.*, 2017; GALVÃO *et al.*, 2018; PEREIRA; BERNARDIN, 2012; DEFÁVERI *et al.*, 2019; DUAN *et al.*, 2016; MENDES *et al.*, 2019; (CANCIO *et al.*, 2018); YI *et al.*, 2009; XIAOXIN *et al.* 2011; ARISTIMUNHO; BERTOCINI 2012; LIU *et al.* 2012; YU *et al.* 2012; GUODONG *et al.* 2014; COSTA *et al.* 2014; GOYAL *et al.* 2015.

Tabela 3.5 - Propriedades química e física dos IOT's da literatura científica.

Autor	Utilização	Beneficiamento/ tratamento	Propriedade química			Propriedade física	
			Fe ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	Mineralogia	Granulometria	Massa específica (g/cm ³)
HUANG <i>et al.</i> 2013	Substituição do aglomerante	moagem	8,13	69,52	Q-Ab-F	90% < 100µm	-
YUNHONG <i>et al.</i> 2016	Substituição do aglomerante	-	11,31	75,23	Q-H	10 - 20 µm	-
HAN <i>et al.</i> 2017	Substituição do aglomerante	Pó de ferro	8,95	67,29	Q-C-M	90% < 45 µm	-
ZHOU <i>et al.</i> 2017	Substituição do aglomerante	-	11,08	65,27	Q-F-M	50% < 12,6 – 8,1µm	-
XIONG <i>et al.</i> 2017	Substituição do aglomerante	-	13,45	51,89	-	90% < 45µm	2,95
UGAMA; EJA; AMARTEY, 2014	Substituição do agregado		47,70	45,64			2,85
LI <i>et al.</i> 2010	Recuperação de ferro	Barragem	24,82	47,39	Q-H-C	14,40µm	-
KUMAR; RAMACHANDRARAO, 2000	Fabricação de cerâmicas	Barragem	44,36	51,12	Q-H-K	80% < 1mm – 106µm	-
SAKTHIVEL, 2010	Outros	Separação química e decantação magnética	15,98	83,36	Q-H	52µm	-
GIRI; DAS; PRADHAN, 2011	Outros	Bacia de rejeitos	55,78	16,58	G-H-M	D ₁₀ : 4,81µm	-
XU, 2020	Substituição do agregado	Lagoa de rejeitos	-	-	-	-	2,74
PROTASIO <i>et al.</i> 2020	Substituição do agregado	Barragem	-	-	Q-H	< 10µm	2,89
CARVALHO <i>et al.</i> 2020	Adição mineral em argamassas	Barragem	56,90	35,50	Q-G-H	D ₅₀ : 3,406µm	3,54
CHINNAPPA; KARRA, 2020	Substituição do agregado	Lagoa de rejeitos	27,03	49,75	-	56,47% < D ₅₀ :0,6mm	1,81
LI <i>et al.</i> 2020	Impressão 3D	-	15,50	42,06	Q-C-A	D ₅₀ : 76,65µm	-

Legenda: Q:quartzo, H:hematita, G:Goethita, A: Albite, AN: Anortita, C: Calcita, E: Eastonite, K: Caulinita, D: Dolomita, Gi: Gibbsita, AB: Anfibólio, F: Feldspato,

M: magnetita.

Fonte: HUANG *et al.* 2013; YUNHONG *et al.* 2016; HAN *et al.* 2017; ZHOU *et al.* 2017; XIONG *et al.* 2017; UGAMA; EJA; AMARTEY; LI *et al.* 2010;

KUMAR, AMACHANDRARAO, 2000; SAKTHIVEL, 2010; GIRI; DAS; PRADHAN, 2011; XU, 2020; PROTASIO *et al.* 2020; CARVALHO *et al.* 2020;

HINNAPPA; KARRA, 2020; LI *et al.* 2020.

Tabela 3.6 - Propriedades química e física dos IOT's da literatura científica.

Autor	Utilização	Beneficiamento/ tratamento	Propriedade química			Propriedade física	
			Fe ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	Mineralogia	Granulometria	Massa específica (g/cm ³)
BEZERRA <i>et al.</i> 2021	Substituição do aglomerante	Underflow	50,96	35,96	H-Q-K	D ₅₀ : 12,84µm	3,67
PFIFFER; SOARES; GADINO, 2021	Agregado em polipropileno	Barragem (areia fina)	31,40	75,60	H-G-Q	13,38µm	-
TANG <i>et al.</i> 2019	Substituição do aglomerante	Separação Magnética	42,83	41,71	Q-M-H	38µm	-
FIGUEIREDO <i>et al.</i> 2021	Ativador de geopolímeros	Moinho de disco	13,80	84,70	H-Q	32,1µm – 83,4µm	-
LV <i>et al.</i> 2021	Substituição do agregado	Barragem de empilhamento	15,80	38,80	-	0mm-0,5mm	3,12
YOUNG; YANG, 2019	Substituição da argila/clínquer	-	17,01	29,14	D-S-M	74µm	-
WANG <i>et al.</i> 2016	Substituição do aglomerante	-	2,32	68,96	Q-M	-	-
FENG <i>et al.</i> 2021	Substituição do agregado	Mina de rejeito	4,62	60,00	Q-Ft-Cl	-	-
MA <i>et al.</i> 2016	Substituição do agregado	Mina de rejeito	7,51	42,90	Gi-Mo-Q	59,86µm	2,79
OSINUBI; YOHANNA; EBEREMU, 2015	Efeito na argila de cimento	Mina de rejeito	47,70	45,64	-	75µm	3,29
KRISHNA <i>et al.</i> 2021	Outros	Mina de rejeito	77,11	9,91	H-Q	10µm	-
FERREIRA, 2021	Ativador de geopolímeros	Lama de rejeitos	54,40	21,80	Q>K>G>Gi	Médio: 11µm	3,7
QUAN <i>et al.</i> 2022	Substituição do agregado	-	13,75	70,26	Q>H>NA>W		3,22
GU <i>et al.</i> 2022	Substituição do aglomerante	-	6,38	75,24	-	D ₅₀ : 154µm	-

Legenda: Q:quartzo, H:hematita, G:Goethita, A: Albite, AN: Anortita, C: Calcita, E: Eastonite, K: Caulinita, D: Dolomita, Gi: Gibbsita, AB: Anfibólio, F: Feldspato, M: magnetita; S: Serpentina; FT: Ferro tschermakite. CL: Clinocloro; GI:Gesso; MO: Moscovita, W: mica branca.

Fonte: BEZERRA *et al.* 2021; PFIFFER; SOARES; GADINO, 2021; TANG *et al.* 2019; FIGUEIREDO *et al.* 2021; LV *et al.* 2021; YOUNG; YANG, 2019; WANG *et al.* 2016; FENG *et al.* 2021; MA *et al.* 2016; OSINUBI; YOHANNA; EBEREMU, 2015; KRISHNA *et al.* 2021; FERREIRA, 2021; QUAN *et al.* 2022; GU *et al.*

2022.

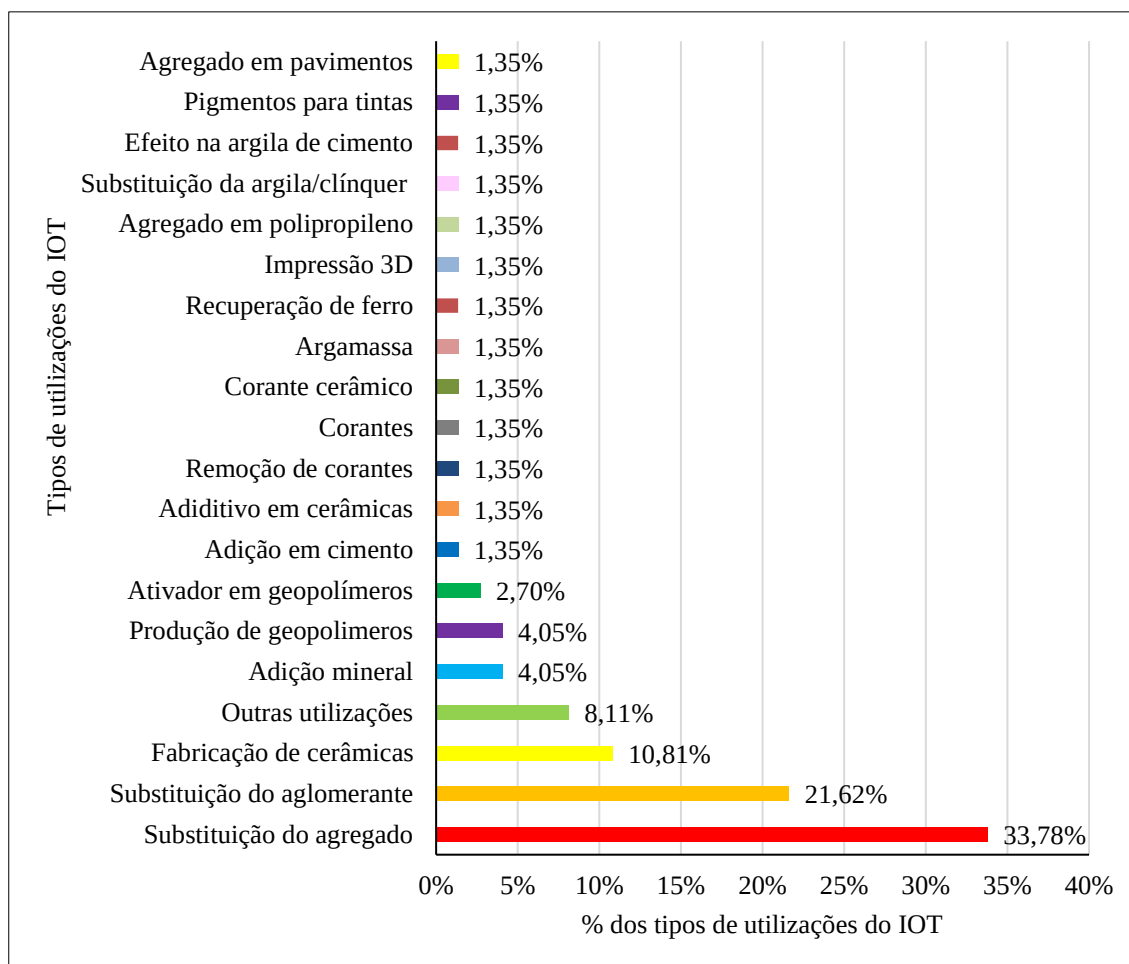


Figura 3.3 Porcentagem dos tipos de utilizações do IOT- Referente as 74 pesquisas científicas analisadas.
 Fonte: Elaborado a partir das fontes contidas nas Tabela 3.2, Tabela 3.3, Tabela 3.4, Tabela 3.5 e Tabela 3.6

3.3.1 Composição química do IOT

A análise da composição química do rejeito de minério de ferro e dos materiais estudados nas pesquisa são realizada geralmente segundo o método de Fluorescência de Raios-X (FRX) (ALMADA, 2020; ALMADA, 2019; SANT'ANA FILHO *et al.*, 2017; FONTES *et al.*, 2016; BASTOS *et al.*, 2016; ZHENG *et al.*, 2016; CUNHA, 2015; KURANCHIE *et al.*, 2015; LIU *et al.*, 2015; GUERRA, 2014) e pelo método Espectrofotômetro de Emissão Atômica com Fonte de Plasma (ICP-OES) (RODRIGUES, 2016; SILVA, 2014^a) tendo os resultados expressos nas Figura 3.4 e Figura 3.5

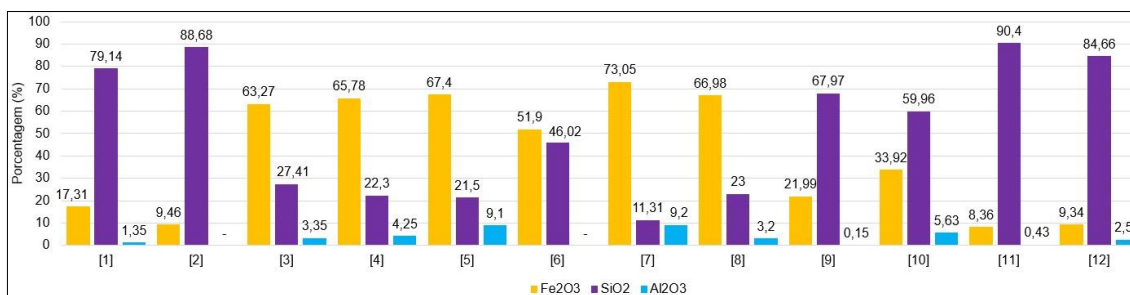


Figura 3.4 – Composição química dos IOT de origem brasileira

Fonte: [1]ALMADA, 2021; [2]APAZA *et al*, 2021; [3] CASTRO *et al.*, 2021; [4]MORAIS *et al*, 2021; [5]ELÓI, 2020; [6]BORGES *et al*, 2019; [7]CUNHA, 2018; [8]MAGALHÃES *et al*, 2018; [9] CARRASCO *et al.*, 2017; [10]ANDRADE, 2014; [11] SILVA, 2014^a; [12]GUERRA, 2014.

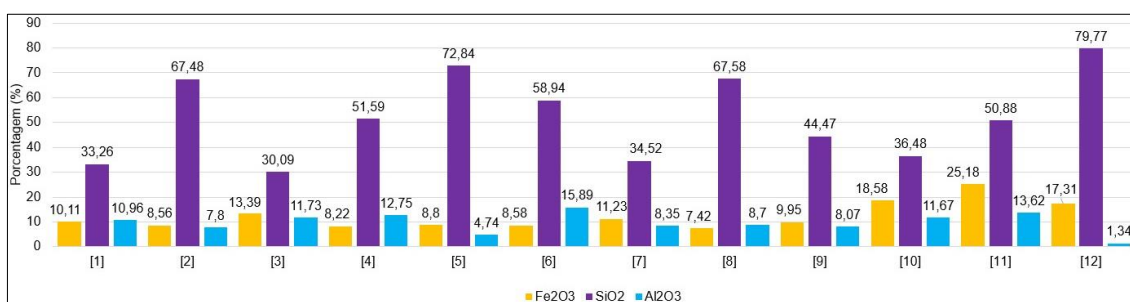


Figura 3.5 – Composição química dos IOT de origem chinesa

Fonte: [1] LING *et al.*, 2021; [2] (DONG *et al.*, 2020); [3] HAN *et al.*, 2020; [4] LUO *et al.*, 2020; [5] ZHANG *et al.*, 2020; [6] LIU *et al.*, 2019; [7] WEISHI *et al.* 2018; [8] ZHANG; LI, 2018; [9] YAO *et al*, 2015; [10] YANG *et al*, 2014; [11] YANG; DENG; WANG, 2014; [12] LIU *et al*, 2010.

Analisando a composição química dos rejeitos de minério de ferro, após o processo de beneficiamento e de alguns tipos de tratamento após a coleta, como secagem, moagem e trituração, foi possível observar que as amostras de IOT da China apresentaram concentrações de Fe₂O₃ bem menores do que as amostras brasileiras. É importante destacar que alguns autores que tiveram mais de um método de tratamento do rejeito, assim utilizou-se nas análises sempre a amostra que apresentou a menor concentração de Fe₂O₃ para a elaboração das Figura 3.4 e Figura 3.5.

O IOT analisado pela Almada (2021) foi coletado em minas que se localizam no estado de Minas Gerais, em cidades pertencentes ao Quadrilátero Ferrífero, conforme mostra a Figura 3.6. O principal tipo de minério de ferro beneficiado, foi o itabirito. O rejeito utilizado nesta pesquisa, que apresentou menor concentração de Fe₂O₃ foi o arenoso, cujo processo de beneficiamento incluem as etapas de cominuição, separação gravimétrica, concentração e desaguamento. A sua concentração de Fe₂O₃ foi de 17,31%, menor do que os rejeitos oriundos de outros tipos de beneficiamentos, como: *sínter feed*

(71,09%), simples (69,40%), e complexo (33,87%). O valor reduzido de ferro aumentou a concentração de SiO_2 (79,14%).

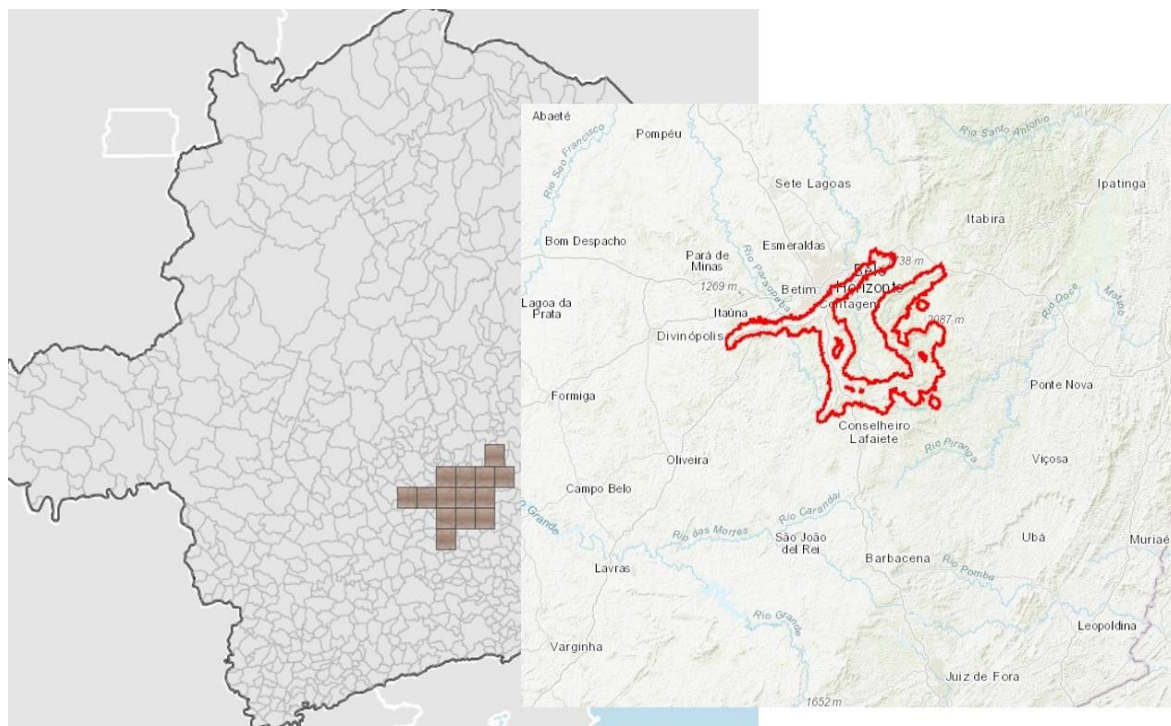


Figura 3.6 - Localização e limites do Quadrilátero Ferrífero

Fonte: Adaptado de Portal Geologia (2022) e Instituto Pristino (2022).

No trabalho de Apaza *et al.*, (2021) teve o seu IOT fornecido por uma empresa, na qual a sua mina fica localizada na cidade de Alegria, também no estado de Minas Gerais. O minério foi extraído em sua forma bruta e depois passou pelos processos de britagem, peneiramento e flotação. Com estes processos, o rejeito apresentou as concentrações de 9,46% de Fe_2O_3 e a concentração de 88,68% de SiO_2 .

Em Minas Gerais, os processos de beneficiamento de britagem, lavagem e peneiramento gerou óxidos de ferro (Fe_2O_3) em concentração de 63,27% e de sílica (SiO_2) de 27,41% na pesquisa de Castro *et al.*, (2021), cujo rejeito era proveniente de barragem de lama, localizada na cidade de Sarzedo. Resultado similar (Fe_2O_3 de 67,4% e SiO_2 de 21,5%) ao de Elói (2020) que coletou o IOT na barragem de Maravilhas, localizada na cidade de Itabirito. Outro valor semelhante (65,78% de Fe_2O_3 e 22,30% de SiO_2) foi obtido por Moraes *et al.* (2021), que teve o seu IOT bruto fornecido por uma empresa, localizado no estado. O IOT coletado na cidade de Brumadinho, no qual processo de beneficiamento foi: sistema de triagem e filtragem de desaguamento. Também teve uma

concentração de Fe_2O_3 foi de 66,98% e para a SiO_2 o valor foi de 23,00% de acordo com a pesquisa de Magalhães *et al* (2018). Cunha (2018) coletou o rejeito de minério de ferro em uma usina do quadrilátero ferrífero. A concentração do Fe_2O_3 foi de 73,05% e para a SiO_2 o valor foi de 11,31%. Observa-se que os rejeitos brasileiros que tiveram os beneficiamentos, como: cominuição, separação gravimétrica, concentração e desaguamento; *sinter feed* simples ; britagem; peneiramento e rejeito bruto, apresentaram um teor de óxido de ferro entre 63,27% (Castro *et al.*, 2021) e 73,05% (Cunha, 2018).

Para Borges *et al*, (2019), o IOT coletado, foi nas minas localizadas na cidade de Rio Piracicaba, os rejeitos passaram por dois tipos de processo de beneficiamento. Sendo um deles os concentradores de gabarito, que separa as partículas dentro do corpo de minério, na qual a concentração de Fe_2O_3 foi de 56,75% e para a SiO_2 o valor foi de 37,83%. E o outro método foram os classificadores espirais, que separa a areia mineral e a lama fina na concentração por gravidade. A concentração de Fe_2O_3 foi de 51,90% e para a SiO_2 o valor foi de 46,02%. Semelhantemente com o resultado de Andrade, (2014) que coletou o IOT na bacia do córrego Vargem Grande e, sua amostra, mostrou a concentração do Fe_2O_3 de 59,04% e para a SiO_2 o valor foi de 36,10%.

Embora, Andrade (2014) tenha coletado um outro tipo de rejeito em outra localização, na bacia do Rio das Velhas, o teor foi bem próximo, apresentou a concentração de 49,49% Fe_2O_3 e 44,76% de SiO_2 . Por outro lado, Andrade (2014) coletou mais dois rejeitos na bacia do Rio das Velhas. Contudo, os rejeitos apresentaram teores diferentes, sendo as concentrações de 33,92% Fe_2O_3 e 59,96% de SiO_2 para um tipo e 36,27% de Fe_2O_3 e 58,13% de SiO_2 para outro tipo de IOT. Um resultado semelhante (42,40% para Fe_2O_3 e 47,90% para SiO_2 .) obtido por Silva, (2014^a), por meio do beneficiamento de separação magnética e deslamagem de rejeitos finos.

Para o IOT estudado por Carrasco *et al.*, (2017), fornecido por uma empresa, que está situada na cidade de Belo Horizonte, o rejeito “fino” apresentou as concentrações de 34,26% de Fe_2O_3 e a concentração de 45,72% de SiO_2 . Valores semelhantes, (26,51% de Fe_2O_3 e 67,85% de SiO_2), para rejeito bruto e 26,51% de Fe_2O_3 e 68,28% de SiO_2 para beneficiamento não magnético do LIMS, foram encontrados por Guerra (2014). Foram obtidos de uma planta piloto, na qual o seu tipo de beneficiamento tinha como destino o *pellet feed*, localizado na cidade de Conceição do Mato Dentro. Por outro lado, Carrasco *et al.*, (2017) também teve um rejeito com uma concentração de Fe_2O_3 de 21,99% e de 67,97% para o SiO_2 .

Silva, (2014a) ao coletar o IOT, no qual o seu processo de beneficiamento foi o de flotação, as concentrações de 15,10% de Fe_2O_3 e 84,40% para SiO_2 . Um valor próximo (9,34% de Fe_2O_3 e 84,66% de SiO_2) foi obtido por meio do beneficiamento não magnético de WHIMS, por Guerra (2014). O menor teor de óxido de ferro encontrado, nos rejeitos brasileiros, foi por meio do beneficiamento separação magnética de rejeitos grossos, concentração de Fe_2O_3 , 8,38% e 90,40% para SiO_2 , por Silva, (2014a). Por outro lado, Guerra (2014) teve o despojo no qual passou pelo tratamento magnético de WHIMS, que apresentou a maior concentração de óxido de ferro 89,91% e 6,44% de SiO_2 .

Portanto, dos rejeitos brasileiros que apresentaram as menores concentrações de óxido de ferro foram gerados pelos seguintes beneficiamentos: separação grosso magnética (SILVA, 2014a); não magnético de alta intensidade (GUERRA, 2014) e o flotação (SILVA, 2014a). Fazendo com que estes tipos de tratamento sejam mais eficientes, pois há indícios que após estes processos de beneficiamento o rejeito de minério de ferro apresenta um baixo teor de ferro.

Analisando os rejeitos de origem chinesa, observou-se que muitos autores, não relatam os tipos de beneficiamentos que o IOT teve, apenas informando os teores da composição química. O IOT analisado por Yang; Deng; Wang (2014) foi coletado nos reservatórios de rejeitos de indústria em Maanshan (China), as suas concentrações foram de 25,18% para Fe_2O_3 e 50,88% para SiO_2 . Resultado aproximado (18,58% para o Fe_2O_3 e 36,48% para a SiO_2) ao de Yang *et al.*, (2014), coletado na planta da Zhenjiang. Outro resultado similar (17,31% para Fe_2O_3 e 79,77% para SiO_2) foi obtido por Liu *et al* (2010), recolhido da lagoa de rejeitos de Fengshuigou. Estes autores não relataram o tipo de beneficiamento de seus rejeitos.

O IOT analisado por Han *et al.*, (2020), foi coletado na província de Hebei, China. As suas concentrações foram de 13,39% para Fe_2O_3 e 30,09% para SiO_2 . Um valor semelhante (11,23% para Fe_2O_3 e 34,52% para SiO_2) foi obtido por Weishi *et al* (2018) que coletou o rejeito na usina de Jinshandian. Outro resultado próximo (10,11% para Fe_2O_3 e 33,26% para SiO_2) de Ling *et al.*, (2021), cujo o seu rejeito foi coletado na mina Daye. Um outro resultado próximo (de 9,95% para Fe_2O_3 e 44,47% para SiO_2) de Yao *et al* (2015) que coletou em uma reserva de rejeitos em Qingyuan. Ambos os autores também não relataram os tipos de beneficiamentos destes rejeitos.

Para Zhang *et al.*, (2020), o IOT coletado, foi nas minas localizadas na província de Liaoning, China e, tiveram dois tipos de processo de beneficiamento, o concentrador

e a flotação, assim sendo a sua concentração de Fe_2O_3 foi de 8,80% e para a SiO_2 o valor foi de 72,84%. Resultado similar (Fe_2O_3 foi de 8,58% e para a SiO_2 o valor foi de 58,94%) de Liu *et al.*, (2019) teve o seu rejeito, forma bruta, coletado na planta de acumulação de rochas residuais de Miyun. Outro valor semelhante (8,56% para Fe_2O_3 e 67,48% para SiO_2) de (DONG *et al.*, 2020), recolhido em sua forma bruta, no reservatório de Chengde. Um outro com resultado próximo (8,22% para Fe_2O_3 e 51,59% para SiO_2 .) de Luo *et al.*, (2020) teve o seu rejeito coletado na mina Wolong. O IOT analisado por Zhang e Li (2018), foi coletado na mina abandonada de Kuancheng e apresentou a menor concentração, de 7,42% para Fe_2O_3 e 67,58% para SiO_2 .

Assim sendo, após o levantamento das 12 pesquisa científicas brasileiras e 12 estudos científicos chineses, os rejeitos de minério de ferro provenientes da China, apresentam uma menor concentração de teor de ferro. Entretanto, os autores chineses, não relataram os tipos de beneficiamentos de seus materiais, o que seria de extrema importância. Pois, assim poderia identificar se os tratamentos na China são mais eficientes, ou se o rejeito em seu estado natural, já apresenta um baixo teor de óxido de ferro.

Também analisando os 74 trabalhos científicos, conforme mostra a Figura 3.7, foi possível observar que em sua grande maioria (38 estudos) as suas concentrações de óxido de ferro ficam em torno da faixa de 0% a 20%; destes 38 rejeitos de minérios de ferro estudados, 29 são de origem chinesa, 7 brasileiros, e apenas um originário da Malásia. Assim sendo, mais um indício de que o rejeito proveniente da China, apresenta um teor de óxido de ferro bem menor do que o Brasil.

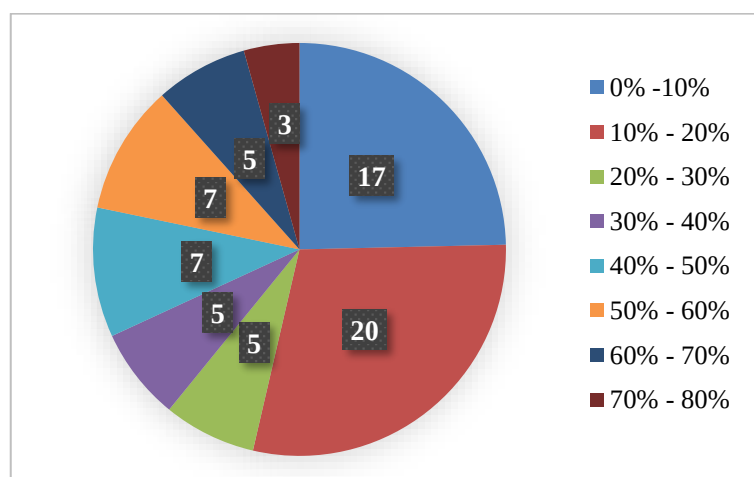


Figura 3.7 - Quantidade de estudos científicos por faixa de teor de Fe_2O_3 .

Analisando as concentrações de 50% a 80% de óxido de ferro, sendo no total 15 pesquisas onde 13 IOT de origem brasileira e 2 provenientes da Índia. Assim sendo, o IOT brasileiro apresenta uma maior concentração que os demais países, conforme pode ser visualizado na Figura 3.7. Entretanto, o rejeito que apresentou o maior teor, foi o Krishna *et al.* (2021), da Índia, cujo a concentração foi de 77,11% de Fe_2O_3 .

3.3.2 Mineralogia do IOT

Os ensaios mais comuns para a caracterização da mineralogia do IOT, são: a Difração de Raios-X (DRX) (ALMADA, 2019; BASTOS, 2016; FONTES, 2016; SHETTIMA *et al.*, 2016; GUERRA, 2014; LIU, 2010) e o utilizando o microscópio óptico para a mineralogia (SILVA, 2014a). É possível visualizar nas Tabela 3.7 e Tabela 3.8 que o IOT apresenta mineralogias distintas e heterogêneas.

Tabela 3.7 - Diversidade da mineralogia do IOT de autores brasileiros.

Autor	Tipo de rejeito e/ou Beneficiamento	Mineralogia
ALMADA, 2021	-Rejeito arenoso -Beneficiamento Complexo -Sinter feed -Beneficiamento Simples	Quartzo > Hematita > Goethita Quartzo > Hematita > Goethita Hematita > Goethita > Quartzo Hematita > Quartzo > Goethita
APAZA <i>et al.</i> , 2021	Britagem, peneiramento, flotação	Quartzo > Hematita
CASTRO <i>et al.</i> , 2021	Britagem, lavagem e peneiramento	Quartzo > Hematita > Goethita
MORAIS <i>et al.</i> , 2021	Calcinado, secagem e triturado	Quartzo > Goethita > Hematita
ELÓI, 2020		Goethita > Hematita > Quartzo
BORGES <i>et al.</i> , 2019	Espiral, lavagem, gravidade -Concentradores	Hematita > Quartzo Hematita > Quartzo
CUNHA, 2018	Homogeneização e quarteamento	Hematita > Quartzo
MAGALHÃES <i>et al.</i> , 2018	Triagem e filtragem de desaguamento	Quartzo > Hematita > Goethita
CARRASCO <i>et al.</i> , 2017	Rejeito Grosso	-
ANDRADE, 2014	Homogeneização e quarteamento	Quartzo > Hematita > Goethita
SILVA, 2014a	Grosso magnética Flotação Fino magnético	Quartzo > Hematita Quartzo > Hematita Quartzo > Hematita
GUERRA, 2014	-Pellet feed	Quartzo > Hematita

Fonte: ALMADA, 2021; APAZA *et al.*, 2021; CASTRO *et al.*, 2021; MORAIS *et al.*, 2021; ELÓI, 2020; BORGES *et al.*, 2019; CUNHA, 2018; MAGALHÃES *et al.*, 2018; CARRASCO *et al.*, 2017; ANDRADE, 2014; SILVA, 2014^a; GUERRA, 2014.

No Brasil, as grandes reservas de minério de ferro, se concentram no quadrilátero ferrífero, Minas Gerais, e são compostas pela formação Cauê do grupo Itabira (COSTA,

2013). As principais formações ferríferas metamórficas desta região, são compostas por: itabiritos, dolomitos ferruginosos e filitos hematíticos (ROSIERE, CHEMALE, 2000).

Tabela 3.8 - Diversidade da mineralogia do IOT de autores chineses.

Autor	Tipo de rejeito e/ou Beneficiamento	Mineralogia
LING <i>et al.</i> , 2021	Moagem	Quartzo > Ankerite > Albita
(DONG <i>et al.</i> , 2020))	Bruto	Quartzo > Anortita > Microclina
HAN <i>et al.</i> , 2020	Moagem e peneiramento	Quartzo
LUO <i>et al.</i> , 2020	Moagem e secagem	Quartzo > Albita > Ilina
ZHANG <i>et al.</i> , 2020	Concentrado e flotação	Quartzo
Liu <i>et al.</i> , (2019)	Bruto e peneiramento	Quartzo
WEISHI <i>et al.</i> 2018	Rejeito fino	Quartzo > Calcita > Plagioclase
ZHANG; LI, 2018	Moagem	Quartzo > Albite > Anortita
YAO <i>et al.</i> , 2015	Secadas em estufas e moídas	Quartzo > Calcita > Eastonite
YANG <i>et al.</i> , 2014	Secos a 105°C, triturados e moidos	Quartzo > Calcita
YANG; DENG; WANG, 2014	Coletado e seco a temperatura ambiente	Quartzo > Hematita > Caulinita
LIU <i>et al.</i> , 2010	Coleta e secagem	Quartzo > Hematita

Fonte: LING *et al.*, 2021; (DONG *et al.*, 2020)); HAN *et al.*, 2020; LUO *et al.*, 2020; ZHANG *et al.*, 2020; Liu *et al.*, (2019); WEISHI *et al.* 2018; ZHANG; LI, 2018; YAO *et al.*, 2015; YANG *et al.*, 2014; YANG; DENG; WANG, 2014; LIU *et al.*, 2010.

Por outro lado, na China a geologia é bem mais complexa quando comparada ao Brasil (FERREIRA; FURTADO, 2009). Os tipos de mineralizações ferríferas chineses podem ser divididos em 5 grupos, de acordo com Ferreira; Furtado, (2009), a saber: as formações ferríferas bandadas do tipo lago superior, lavradas a céu aberto, com a concentração de óxido de ferro de 28,01%; formações ferríferas do tipo Algoma, lavrada a céu aberto, com teores de 28,79 % a 31,79% de Fe; escarnitos, geralmente composto por rochas carbonáticas, como: calcários e dolomitos. Assim sendo, a maioria dos depósitos contendo Fe (45,31%), estão associados a outros tipos de metais, na China.

Também tem a formação Poligênico de Terras-raras-Fe-Nb, onde contém o maior depósito de nióbio da China. A mina é lavrada a céu-aberto e o teor médio do Fe é de 33,5%. Outro tipo de formação é o Vulcanogênico-hidrotermal-sedimentar polimetálico, que contém Fe e Cu, lavrado a céu aberto, com teores entre 25% à 50% de Fe. Assim sendo Ferreira; Furtado, (2009) relata que as jazidas de minério de ferro são dispersas na Chinas, com teor médio de 33% de Fe e mineralogicamente complexos.

Para os autores brasileiros, percebeu-se que a mineralogia predominante fica dividida entre quartzo e hematita, seguido por goethita. Assim sendo, estando de acordo

com Rosiere *et al.*, (2001) o Quadrilátero Ferrífero, com a formação dos itabiritos, é composto por hematita, o óxido predominante. E a formação ferrífera do itabirito comum, tem como minerais principais, a hematita e o quartzo (ROSIERE *et al.*, 2001). Mesmo com diferentes tipos de beneficiamentos, as mineralogias dos rejeitos brasileiros mostraram a sua maioria de quartzo.

No caso da Almada *et al.*, (2023) os rejeitos da mesma mineradora, entretanto com diferentes tipos de beneficiamento, podem indicar que dependendo do tipo de tratamento, o resultado da mineralogia possa mudar. Uma vez que os rejeitos de rejeito arenoso e com beneficiamento complexo, apresentaram o quartzo como predominante, seguido de hematita. Para os IOTs de *sinter feed* e beneficiamento simples, apresentaram a hematita como predominante, entretanto, o segundo mineral de ambos, foram diferentes, sendo goethita para o *sinter feed*, e quartzo para o beneficiamento simples.

Todavia, Silva, (2014a) que utilizou beneficiamentos diferentes, apresentou os três rejeitos com quartzo como predominante, seguido de hematita, o que ressalta o elevado teor de materiais metálicos ainda presentes no rejeitos de mineração de ferro. Faz-se necessários maiores estudos de modo a maximizar o beneficiamento e retirar a maior quantidade possível dos materiais metálicos que possuem grande valor agregado. Duarte (2021) em seu estudo, observou que o produto proveniente de separação magnética do IOT, quando passou pelo processo de flotação, foi possível produzir um aumento no teor de ferro, fazendo com que esta recuperação dos metais seja interessante economicamente.

Para os autores chineses, percebeu-se que a mineralogia predominante é o quartzo. Encontrou-se outros tipos de minerais, como: Albita, Anortita, Calcita, Caulinita e Eastonite. O mineral Albita, pertence ao grupo dos feldspatos (AARÃO, 2015), assim como a Anortita (BARRETO, 2020). A Calcita sendo proveniente de rochas metamórficas, a Caulinita de rochas sedimentares (ICG, 2022). A Eastonite pertence ao grupo dos biotites (TELHADO, 2018), sendo que estes pertencem as rochas ígneas (ICG, 2022). Sendo que estes não foram encontrados, nos autores brasileiros.

As jazidas minerais Chinesas apresentam baixo teor de materiais metálicos (FERREIRA; FURTADO, 2009), assim sendo, necessitando de muitas pesquisas e projetos para aproveitar a enorme reserva de rejeitos de baixa qualidade (FERREIRA; FURTADO, 2009). Novos equipamentos foram produzidos, como: separador magnético

vertical de alto gradiente e separado magnético de coluna (FERREIRA; FURTADO, 2009).

Analisando os minerais predominantes dos 74 estudos científicos, foi possível observar que em sua grande maioria, 43 dos rejeitos estudados, apresentaram o mineral quartzo. Para o mineral hematita, foi predominante em apenas 9 pesquisas. O mineral Goethita, apenas 2 estudos, sendo que um é de origem indiana (GIRI; DAS; PRADHAN, 2011) e de origem brasileira (ELÓI, 2020). Os dois rejeitos que tiveram a gibbsita, um é de origem brasileira (MENDES *et al.*, 2019) e outro de origem chinesa (MA *et al.* 2016). O mineral Dolomita foi predominante em apenas um rejeito de minério de ferro (YOUNG; YANG, 2019). Portanto, fica delimitado que a mineralogia do rejeito de minério de ferro depende da formação geológica, do tipo de beneficiamento e até mesmo o ensaio realizado para detectar a mineralogia.

3.3.2 Granulometria do IOT

Analisando a granulometria de 12 estudos brasileiro e 12 estudos chineses, é possível visualizar que as granulometrias são diversificadas, conforme mostra as Tabela 3.9 e Tabela 3.10.

Observa-se que apenas em Almada (2021) se obteve o valor D_{10} em contraposição a todos os demais autores mencionados nas Tabela 3.9 e Tabela 3.10, assim sendo, o seu rejeito arenoso apresentando a granulometria de 15,98 μ m após o processo de moagem. Para as análises de granulometria de D_{50} tanto autores brasileiros (ALMADA, 2021; CASTRO *et al.*, 2021; CUNHA, 2018) quanto autores chineses (HAN *et al.*, 2020; ZHANG *et al.*, 2020; YANG *et al.*, 2014) realizaram. Vale destacar que estes autores chineses não relataram o tipo de rejeito, assim como também os autores brasileiros: Castro *et al.*, (2021) e Cunha, (2018). Apenas informaram os tratamentos feitos em laboratórios para adequação e condições de uso do material. Apenas Almada, (2021) informou que era arenoso. Zhang *et al.*, (2020) obteve a granulometria de 166,20 μ m após o processo de concentrado e flotação sendo a maior dos D_{50} analisados. O rejeito arenoso de Almada, (2021) teve 71,16 μ m após o processo de moagem. Cunha, (2018) obteve o valor de 40 μ m após os processos de homogeneização e quarteamento,

sendo um valor bem próximo (22 μ m) de Castro *et al.*, (2021) após os processos de britagem, lavagem e peneiramento. Os menores resultados de D₅₀ foram dos chineses Han *et al.*, (2020) e Yang *et al.*, (2014), que foram respectivamente (9,899 μ m e 6,98 μ m) e bem próximos.

Tabela 3.9 - Diâmetros característicos dos rejeitos de mineração de ferro de autores brasileiros em relação o tipo de rejeito e tratamento feitos em laboratório para adequação as condições de uso.

Autor	Tipo de rejeito e/ou Beneficiamento	D₁₀	D₅₀	D₉₀	Dmédio ou Dmáximo
ALMADA, 2021	Rejeito arenoso / pós moagem	15,98 μ m	71,16 μ m	152,1 μ m	150 μ m
APAZA <i>et al.</i> , 2021	Britagem, peneiramento, flotação	-	-	-	0,6mm
CASTRO <i>et al.</i> , 2021	Britagem, lavagem e peneiramento	-	22 μ m	78 μ m	-
MORAIS <i>et al.</i> , 2021	Calcinado, secagem e triturado	-	-	-	90% $\leq$ 36,31 μ m
ELÓI, 2020	Moagem	-	-	40 μ m	-
BORGES <i>et al.</i> , 2019	Espiral, lavagem, gravidade	-	-	-	0,6 – 0,075 mm
CUNHA, 2018	Homogeneização e quarteamento	-	40 μ m	-	<149 μ m
MAGALHÃES <i>et al.</i> , 2018	Triagem e filtragem de desaguamento	-	-	-	14,13 μ m
CARRASCO <i>et al.</i> , 2017	Rejeito Grosso	-	-	-	0,01 – 0,1mm
ANDRADE, 2014	Homogeneização e quarteamento	-	-	-	Max= 1,10m m
SILVA, 2014a	Grosso magnética	-	-	-	105 μ m
GUERRA, 2014	Não magnético do WHIMS	-	-	-	-

Fonte: ALMADA, 2021; APAZA *et al.*, 2021; CASTRO *et al.*, 2021; MORAIS *et al.*, 2021; ELÓI, 2020; BORGES *et al.*, 2019; CUNHA, 2018; MAGALHÃES *et al.*, 2018; CARRASCO *et al.*, 2017; ANDRADE, 2014; SILVA, 2014a; GUERRA, 2014.

Na análise de D₉₀ apenas os autores brasileiros (ALMADA, 2021; CASTRO *et al.*, 2021; ELÓI, 2020) realizaram este estudo. Almada, (2021) teve o maior valor, sendo de 152,1 μ m, seguido por Castro *et al.*, (2021) que obteve um valor 78 μ m. Elói, (2020) teve o menor valor de D₉₀ sendo este 40 μ m, após o processo de moagem.

Analizando o diâmetro médio e/ou o máximo de cada autor, que constam nas Tabela 3.9 e Tabela 3.10 é possível observar que os rejeitos chineses apresentam uma média menor do que os brasileiros. Yang; Deng; Wang, (2014) tiveram o menor valor médio, sendo o de 2,76 μ m, entretanto, não informa o tipo de rejeito, apenas que foi

coletado e secado em temperatura ambiente. Um valor médio semelhante ($5\mu\text{m}$ - $10\mu\text{m}$) de Liu *et al.*, (2019), que apenas informa que seu rejeito é bruto. Por outro lado, o autor brasileiro que teve o seu menor valor ($14,13\mu\text{m}$), foi Magalhães *et al.*, (2018), apenas informando que seu rejeito passou pelos processos de triagem e filtragem de desaguamento. Moraes *et al.*, (2021) também teve uma granulometria média relativamente baixa, sendo 90% menor que $36,31\mu\text{m}$.

Tabela 3.10 - Diâmetros característicos dos rejeitos de mineração de ferro de autores chineses em relação o tipo de rejeito e tratamento feitos em laboratório para adequação as condições de uso.

Autor	Tipo de rejeito e/ou Beneficiamento	D ₁₀	D ₅₀	D ₉₀	Dmédio Ou Dmáximo
LING <i>et al.</i> , 2021	Moagem				$10\mu\text{m}$ - $100\mu\text{m}$
DONG <i>et al.</i> , 2020	Bruto	-	-	-	$<74\mu\text{m}$
HAN <i>et al.</i> , 2020	Moagem e peneiramento	-	$9,899\mu\text{m}$	-	-
LUO <i>et al.</i> , 2020	Moagem e secagem	-	-	-	$15,64\%$ $<74\mu\text{m}$
ZHANG <i>et al.</i> , 2020	Concentrado e flotação	-	$166,20\mu\text{m}$	-	-
LIU <i>et al.</i> , 2019	Bruto e peneiramento	-	-	-	$5\mu\text{m}$ - $10\mu\text{m}$
WEISHI <i>et al.</i> 2018	Rejeito fino	-	-	-	$61,9\%$ $<38,5\mu\text{m}$
ZHANG; LI, 2018	Moagem	-	-	-	$<74\mu\text{m}$
YAO <i>et al.</i> , 2015	Secadas em estufas e moídas	-	-	-	$<\text{Malha \#60}$
YANG <i>et al.</i> , 2014	Secos a 105°C , triturados e moídos	-	$6,98\mu\text{m}$	-	96% $<50\mu\text{m}$
YANG; DENG; WANG, 2014	Coletado e seco a temperatura ambiente	-	-	-	$2,76\mu\text{m}$
LIU <i>et al.</i> , 2010	Coleta e secagem	-	-	-	$<150\mu\text{m}$

Fonte: LING *et al.*, 2021; DONG *et al.*, 2020; HAN *et al.*, 2020; LUO *et al.*, 2020; ZHANG *et al.*, 2020; LIU *et al.*, 2019; WEISHI *et al.* 2018; ZHANG; LI, 2018; YAO *et al.*, 2015; YANG *et al.*, 2014; YANG; DENG; WANG, 2014; LIU *et al.*, 2010.

3.3.3 Densidade do IOT

Avaliando a densidade de 12 pesquisas científicas brasileira e 12 estudos chineses, é possível visualizar que as densidades são diversificadas, conforme mostra as Tabela 3.11 e Tabela 3.12. Comparando as densidades com os respectivos processos de beneficiamento, percebe-se que os processos na qual tiveram a menor valores foram: concentrado e flotação ($2,70 \text{ g/cm}^3$) de Zhang *et al.*, (2020); separação grosso magnético ($2,757 \text{ g/cm}^3$) de Silva, (2014a); flotação ($2,875 \text{ g/cm}^3$) de Silva, (2014). É possível observar que nos autores (ALMADA *et al.*, 2022; ALMADA *et al.*, 2023; BORGES *et al.*, 2019; CARRASCO *et al.*, 2017; SILVA, 2014a) que tiveram mais de uma densidade,

a menor sempre foi a que teve menor concentração de óxido de ferro. Para os autores brasileiros, o rejeito que apresentou a maior densidade, $4,502\text{g/cm}^3$, também apresentou a maior concentração de óxido de ferro 73,05% (CUNHA, 2018). Isto é corroborado por Silva, (2014), Carrasco *et al.*, (2017), Borges *et al.*, (2019), que demonstraram a mesma tendência.

Tabela 3.11 - Densidade característica dos rejeitos de mineração de ferro de autores brasileiros em relação o tipo de rejeito e tratamento feitos em laboratório para adequação as condições de uso.

Autor	Tipo de Rejeito	Beneficiamento/Tratamento	Densidade (g/cm^3)
ALMADA, 2021	-Rejeito arenoso	Secagem em forno ($105\text{ }^{\circ}\text{C}$)	-2,807
	-Beneficiamento Complexo	Moagem de baixa energia	-3,489
	- <i>Sinter feed</i>		-4,234
	-Beneficiamento Simples		-4,359
APAZA <i>et al.</i> , 2021	-	Britagem, peneiramento, flotação	2,830
CASTRO <i>et al.</i> , 2021	-	Britagem, lavagem e peneiramento	4,04
MORAIS <i>et al.</i> , 2021	-	Calcinado, secagem e triturado	-
ELÓI, 2020	-	Moagem	-
BORGES <i>et al.</i> , 2019	Espiral, lavagem, gravidade	-	-3,05
	Espiral Concentradores		-3,10
CUNHA, 2018	-	Homogeneização e quarteamento	4,502
MAGALHÃES <i>et al.</i> , 2018	-	Triagem e filtragem de desaguamento	-
CARRASCO <i>et al.</i> , 2017	Rejeito Grosso	-	-3,14
	Rejeito Fino		3,47
ANDRADE, 2014		Homogeneização e quarteamento	-
SILVA, 2014a	Grosso magnética	-	-2,757
	Flotação		-2,875
	Fino magnético		-3,325
GUERRA, 2014	<i>Pellet feed</i>	-	2,27

Fonte: ALMADA, 2021; APAZA *et al.*, 2021; CASTRO *et al.*, 2021; MORAIS *et al.*, 2021; ELÓI, 2020; BORGES *et al.*, 2019; CUNHA, 2018; MAGALHÃES *et al.*, 2018; CARRASCO *et al.*, 2017; ANDRADE, 2014; SILVA, 2014^a; GUERRA, 2014.

Entretanto, Guerra, (2014) cujo rejeito era *pellet feed* que apresentou a menor densidade, $2,27\text{ g/cm}^3$, mas não apresentou o menor teor de óxido de ferro. Assim sendo, apresentou um teor de óxido de ferro de 9,34% sendo superior ao da Silva, (2014), 8,36%. Isto também foi verificado por Almada (2021), no qual os quatro rejeitos estudados pela autora o rejeito que teve a maior densidade, Beneficiamento Simples, teve a segunda maior concentração de ferro. O IOT que apresentou o maior teor de ferro, *Sinter feed*, teve a segunda maior densidade. Assim sendo, que ter a maior concentração de ferro, não

implica necessariamente na maior densidade, mas pode ter uma grande influência. Analisando a alumina, o sinter feed teve um maior teor (6,88%) em relação a rejeito de beneficiamento simples (4,24%), fazendo com que a alumina não seja o fator responsável pela influência na densidade do rejeito.

Tabela 3.12 - Densidade característicos dos rejeitos de mineração de ferro de autores chineses em relação o tipo de rejeito e tratamento feitos em laboratório para adequação as condições de uso.

Autor	Tipo de rejeito	Beneficiamento/Tratamento	Densidade (g/cm ³)
LING <i>et al.</i> , 2021	-	Moagem	-
DONG <i>et al.</i> , 2020	Bruto	-	-
HAN <i>et al.</i> , 2020	-	Moagem e peneiramento	-
LUO <i>et al.</i> , 2020	-	Secos a 105°C, Moagem	2,95
ZHANG <i>et al.</i> , 2020	Concentrado e flotação	-	2,70
LIU <i>et al.</i> , 2019	Bruto	peneiramento	-
WEISHI <i>et al.</i> , 2018	Rejeito fino	-	-
ZHANG; LI, 2018	-	Moagem	-
YAO <i>et al.</i> , 2015	-	Secos a 105°C, Moagem	-
YANG <i>et al.</i> , 2014	-	Secos a 105°C, Moagem	3,11
YANG; DENG; WANG, 2014	-	Seco a temperatura ambiente	-
LIU <i>et al.</i> , 2010	-	Secagem	-

Fonte: LING *et al.*, 2021; DONG *et al.*, 2020; HAN *et al.*, 2020; LUO *et al.*, 2020; ZHANG *et al.*, 2020; LIU *et al.*, 2019; WEISHI *et al.*, 2018; ZHANG; LI, 2018; YAO *et al.*, 2015; YANG *et al.*, 2014; YANG; DENG; WANG, 2014; LIU *et al.*, 2010.

No caso dos autores chineses, Zhang *et al.*, (2020) tiveram o rejeito que apresentou a menor densidade, 2,70g/cm³, em seguida Luo *et al.*, (2020) com a densidade de 2,95g/cm³. Entretanto, ao analisar o teor de óxido de ferro, de Zhang *et al.*, (2020) no qual apresentou o valor de 8,80%, foi superior a concentração de óxido de ferro de Luo *et al.*, (2020), cujo o valor é de 8,22%. Assim sendo, que o teor de concentração de óxido de ferro pode não ser o único fator que influencia na densidade do rejeito de minério de ferro.

Entretanto, analisando a alumina, Zhang *et al.*, (2020) teve um teor (4,74%) e Luo *et al.*, (2020) uma concentração bem maior (12,75%). Assim sendo, um maior teor expressivo de alumina (12,75%), de Luo *et al.*, (2020) pode ter influenciado na densidade, fazendo com que esta seja maior do que de Zhang *et al.*, (2020). Uma vez que os teores de óxido de ferro (8,22%) de Luo *et al.*, (2020) foi bem próximo (8,80%) do Zhang *et al.*, (2020).

Analisando os rejeitos das 74 pesquisas científicas (Figura 3.8), observa-se que a maioria dos rejeitos apresentaram a densidade nas faixas de 2 a 3g/cm³ e de 3 a 4 g/cm³. O rejeito que apresentou a menor densidade, foi: 1,45g/ cm³ e (LIU *et al.* 2012).

Yu *et al.* (2012) obteve uma densidade de 2,80 g/cm³, sendo superior a densidade de Liu *et al.*, (2012) e Fontes *et al.*, (2021). Todavia, o teor de óxido de ferro de Yu *et al.* (2012) foi de 9,00%, sendo inferior que os de Liu *et al.*, (2012) e Fontes *et al.*, (2021). Mendes *et al.*, (2019) também teve um teor de óxido de ferro de 12,31%, sendo menor do que Liu *et al.*, (2012), no qual era de 14,00%. E mesmo assim apresentou uma densidade de 2,93g/cm³ maior que a de Liu *et al.*, (2012). Duan *et al.*, (2016) teve a maior densidade dos 74 estudos analisados, sendo no valor de 5,258g/cm³, entretanto, o óxido de ferro foi de 12,31%. Portanto, pode-se afirmar que existe um indício de que a concentração de óxido de ferro não ser o fator determinante para a densidade do rejeito.

Contudo, analisando o teor de alumina juntamente com o óxido de ferro e densidade, observa-se que, (DUAN *et al.*, 2016) teve uma concentração de Al₂O₃ (16,22%), Fe₂O₃ (12,31%) e densidade (5,258g/cm³), assim sendo, tendo um teor de alumina bem superior ao de (3,1%) de Fontes *et al.*, (2021), que também teve a sua densidade inferior (3,03g/cm³). Por outro lado o teor de ferro (16,80%) de Fontes *et al.*, (2021) foi superior ao de (12,31%) de Duan *et al.*, (2016). Fontes *et al.*, (2021) teve uma densidade superior (3,03g/cm³) a (2,93g/cm³) de Mendes *et al.*, (2019) e também a de (2,80g/cm³) de Yu *et al.* (2012).

Embora, o teor de óxido de ferro (16,80%) de Fontes *et al.*, (2021) ser maior do que de (12,31%) Mendes *et al.*, (2019) e de (10,27%) de Yu *et al.*, (2012), em contrapartida, o teor de alumínio de Fontes *et al.*, (2021) foi inferior (3,1%) ao de (7,169%) de Mendes *et al.*, (2019) e de (7,34%) de Yu *et al.*, (2012). Assim sendo, que o óxido de ferro não é o fator determinante da densidade, assim como também apenas a alumina não é o fator determinante da densidade. Possivelmente, analisando os dois em conjunto, pode ter uma maior influência na densidade, demandando maiores estudos e análises.

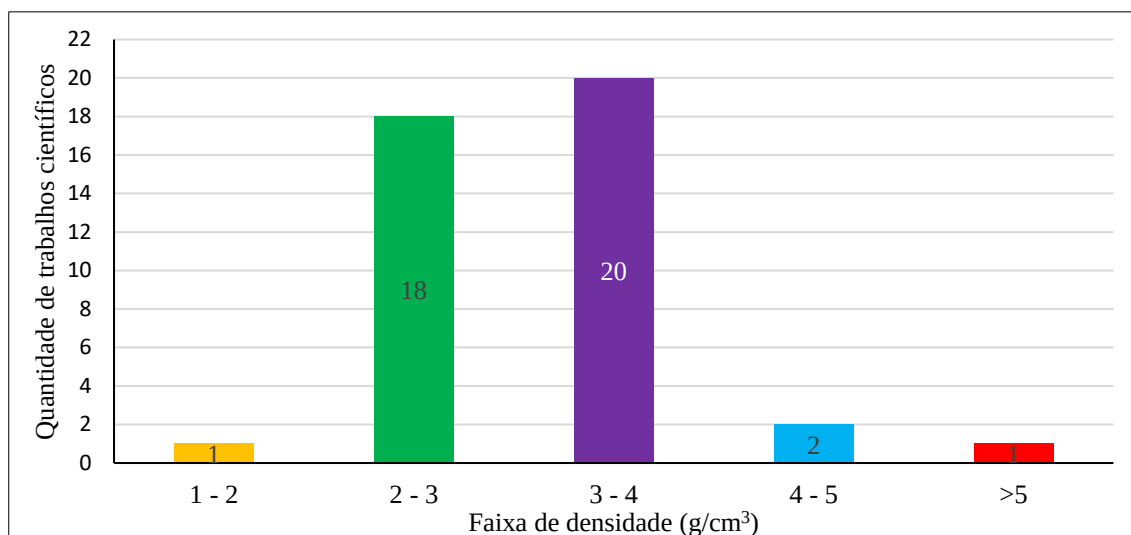


Figura 3.8 - Quantidade de trabalhos científicos por faixa de densidade do rejeito de minério de ferro

3.4 Aproveitamento de rejeito de minério de ferro

Este tópico é destinado as principais formas de reaproveitamento dos rejeitos de minério de ferro na construção civil. Sendo estruturado de acordo com os principais materiais encontrados na literatura técnica, nos quais o IOT foi incorporado.

3.4.1 Utilização de IOT em materiais de construção

Ao todo foram encontradas 74 pesquisas no portal de Periódicos CAPES, *Science Direct* e Google Acadêmico, sobre uso de IOT em materiais de construção. Adotou-se considerar nas análises o rejeito de minério de ferro que apresentava o menor teor de Fe_2O_3 . Encontrou-se outras aplicações, como: fabricação de cerâmicas (ladrilhos, tijolos) (FONTES *et al.*, 2021; HAN *et al.*, 2020; LUO *et al.*, 2020; WEISHI *et al.* 2018; YAO *et al.*, 2015; SILVA, 2014a; YANG *et al.*, 2014; LIU *et al.*, 2010; KUMAR; RAMACHANDRARAO, 2000), como ativador e produção para cimentos geopoliméricos (FERREIRA, 2021; FIGUEIREDO *et al.* 2021; DEFÁVERI *et al.*, 2019; DUAN *et al.*, 2016), para pigmentação e corante de cerâmicos (DONG *et al.*, 2020); GALVÃO *et al.*, 2018; PEREIRA; BERNARDIN, 2012), impressão 3D (LI *et al.* 2020), agregado em polipropileno, recuperação magnética (LI *et al.* 2010) e outras aplicações (KRISHNA *et al.* 2021; CUNHA, 2018; ANDRADE, 2014; YANG; DENG; WANG,

2014; GIRI; DAS; PRADHAN, 2011; SAKTHIVEL, 2010). Entretanto, os esforços foram concentrados nos usos em compósitos cimentícios (substituição do agregado ou do aglomerante ou adição mineral) e partir disto, pode-se estruturar os Tabela 3.13, Tabela 3.15 e Tabela 3.14.

Tabela 3.13 Uso do IOT como substituição do agregado

Fonte	Tipo de Rejeito	Tratamento
APAZA <i>et al.</i> , 2021	-	Britagem, peneiramento, flotação
MORAIS <i>et al.</i> , 2021	-	Calcinado, secagem e triturado
BORGES <i>et al.</i> , 2019	-	Espiral, lavagem, gravidade
CARRASCO <i>et al.</i> , 2017	Rejeito Grosso e Rejeito Fino	-
ZHANG <i>et al.</i> , 2020	-	Concentrado e flotação
LIU <i>et al.</i> , 2019	Bruto	Peneiramento
FONTES <i>et al.</i> , 2021	-	Seco ao ar, triturado, peneiramento, moagem a seco, segregação por gravidade (ciclones e filtros) e separação magnética
SANT'ANA FILHO <i>et al.</i> , 2017	costa de barragem	-
ARISTIMUNHO; BERTOCINI 2012	Lama	-
COSTA <i>et al.</i> 2014	<i>Sinter feed</i>	-
GOYAL <i>et al.</i> 2015	Barragem (pó)	-
UGAMA; EJA; AMARTEY, 2014	-	-
XU, 2020	Lagoa de rejeitos	-
PROTASIO <i>et al.</i> 2020	Barragem	-
CHINNAPPA; KARRA, 2020	Lagoa de rejeitos	-
LV <i>et al.</i> 2021	Barragem de empilhamento	-
FENG <i>et al.</i> 2021	Mina de Rejeito	-
MA <i>et al.</i> 2016	Mina de Rejeito	-
QUAN <i>et al.</i> 2022	-	-

Tabela 3.14 Uso do IOT como substituição/adição do aglomerante

Fonte	Tipo de Rejeito	Tratamento
MORAIS <i>et al.</i> , 2021	-	Calcinado, secagem e triturado
MAGALHÃES <i>et al.</i> , 2018	-	Triagem e filtragem de desaguamento
LING <i>et al.</i> , 2021	-	Moagem
FONTES <i>et al.</i> , 2016	-	Trituragem e moagem
CANCIO <i>et al.</i> , 2018	Barragem de lama	-
GUERRA, 2014	Pellet Feed-Bruto Pellet Feed-Não-LIMS Pellet Feed-Não-WHIMS Pellet Feed-WHIMS	Não magnético do WHIMS
HUANG <i>et al.</i> 2013	-	moagem
HAN <i>et al.</i> 2017	Pó de ferro	-
BEZERRA <i>et al.</i> 2021	-	<i>Underflow</i>
TANG <i>et al.</i> 2019	-	Separação Magnética
OSINUBI; YOHANNA; EBEREMU, 2015	Mina de rejeito	-

Tabela 3.15 Uso do IOT como adição mineral em concretos e argamassas

Fonte	Tipo de Rejeito	Tratamento
ALMADA, 2021	Rejeito arenoso Beneficiamento Complexo <i>Sinter feed</i> Beneficiamento Simples	Secagem em forno (105 °C) Moagem de baixa energia
CASTRO <i>et al.</i> , 2021		Britagem, lavagem e peneiramento
CARVALHO <i>et al.</i> 2020	Barragem	-

3.4.2 Propriedades mecânicas de compósitos com IOT

Percebe-se ao analisar os estudos de compostos cimentícios, nas Tabela 3.13 a 3.15 totalizando em 39 pesquisas, que somente os 3 trabalhos (ALMADA, 2021; CASTRO *et al.*, 2021; CARVALHO *et al.* 2020) estudaram a adição mineral com resultados que demonstram um aumento nas propriedades mecânicas com o tempo de cura de 28 dias (ALMADA, 2021; CASTRO *et al.*, 2021). Entretanto, Carvalho *et al.* (2020) teve uma pequena redução (4,67%) na resistência a compressão, com a cura de 28 dias.

Tabela 3.16 Correlação da resistência a compressão dos IOT's da literatura científica.

Fontes:	Teor de IOT (%)	Tipo de IOT/ Beneficiamento/ Tratamento	7 dias Ref. (%)	7 dias (MPa)	28 dias Ref. (%)	28 dias (MPa)
[1] ALMADA, 2021 ^B	40	Arenoso	-	-	-2,10	38,47
	40	Beneficiamento Complexo	-	-	17,80	46,30
	40	<i>Sinter feed</i>	-	-	11,80	43,94
	40	Beneficiamento Simples	-	-	22,90	48,30
[2] Castro <i>et al.</i> , (2021) ^B	10	-	-2,65	33	10,00	41,80
	20	-	-5,60	32	7,89	41,00
	30	-	5,90	35,9	15,79	44,00
	40	-	6,19	36	14,21	43,40
[3] Morais <i>et al.</i> (2021) ^B	10	In Natura	-	-	-38,78	1,5
	20	In Natura	-	-	-36,33	1,56
	40	In Natura	-	-	-48,98	1,25
	60	In Natura	-	-	-52,24	1,17
[4] Morais <i>et al.</i> (2021) ^B	10	500°	-	-	-4,49	2,34
	20	500°	-	-	-12,65	2,14
	40	500°	-	-	-32,65	1,65
	60	500°	-	-	-34,29	1,61

Origem das pesquisas: ^C Chinês e ^B Brasileiro

Tabela 3.17 Correlação da resistência a compressão dos IOT's da literatura científica em relação com a referência.

Fontes:	Teor de IOT (%)	Tipo de IOT/ Beneficiamento/ Tratamento	7 dias Ref. (%)	7 dias (MPa)	28 dias Ref. (%)	28 dias (MPa)
[5] Morais <i>et al.</i> (2021) ^B	10	750°	-	-	-26,53	1,8
	20	750°	-	-	-24,49	1,85
	40	750°	-	-	-45,71	1,33
	60	750°	-	-	-57,55	1,04
[6] Morais <i>et al.</i> (2021) ^B	10	In Natura	-	-	-16,37	3,27
	20	In Natura	-	-	-32,74	2,63
	40	In Natura	-	-	-46,04	2,11
	60	In Natura	-	-	-62,92	1,45
[7] Morais <i>et al.</i> (2021) ^B	10	500°	-	-	-10,49	3,5
	20	500°	-	-	-26,34	2,88
	40	500°	-	-	-37,08	2,46
	60	500°	-	-	-58,57	1,62
[8] Morais <i>et al.</i> (2021) ^B	10	750°	-	-	-21,99	3,05
	20	750°	-	-	-19,69	3,14
	40	750°	-	-	-39,13	2,38
	60	750°	-	-	-48,34	2,02
[9] Magalhães <i>et al.</i> (2020) ^B	10	In Natura	-9,37	37,7	-7,84	48,2
	20	In Natura	-12,74	36,3	-20,46	41,6
	30	In Natura	-23,80	31,7	-34,99	34
[10] Magalhães <i>et al.</i> (2020) ^B	10	500°	-8,65	38	-5,54	49,4
	20	500°	-11,54	36,8	-19,50	42,1
	30	500°	-24,76	31,3	-33,46	34,8
[11] Magalhães <i>et al.</i> (2020) ^B	10	750°	-6,49	38,9	-4,02	50,2
	20	750°	-8,89	37,9	-17,02	43,4
	30	750°	-24,76	31,3	-32,12	35,5
[12] Guerra, 2014 ^B	5	-	-	-	3,67	31,11
	10	-	-	-	-1,67	29,51
[13] Ling <i>et al.</i> , 2021 ^C	10	-	0,00	96,8	16,30	141,5
	20	-	-13,02	84,2	1,42	123,4
	30	-	-20,97	76,5	-4,91	115,7
[14] CANCIO <i>et al.</i> , 2018 ^B	50	a/c 22,08	-	-	22,00	-
[15] CANCIO <i>et al.</i> , 2018 ^B	50	a/c 31,00	-	-	-26,00	-
[16] HUANG <i>et al.</i> 2013 ^C	40	-	-	-	-22,67	58
	80	-	-	-	-33,33	50
[17] XIONG <i>et al.</i> 2017 ^C	15	-	-	-	-9,00	-
	30	-	-	-	-25,00	-
[18] XIONG <i>et al.</i> 2017 ^C	15	5% BaCO ₃	-	-	2,50	-
[19] XIONG <i>et al.</i> 2017 ^C	30	10% BaCO ₃	-	-	-16,00	-
[20] CARVALHO <i>et al.</i> 2020 ^B	25	High	-	-	-4,68	36,7
[21] CARVALHO <i>et al.</i> 2020 ^B	25	Low	-	-	-32,21	26,1

Origem das pesquisas: ^C Chinês e ^B Brasileiro

Tabela 3.18 - Correlação da resistência a compressão dos IOT's da literatura científica em relação com a referência.

Fontes:	Teor de IOT (%)	Tipo de IOT/ Beneficiament o/ Tratamento	7 dias Ref. (%)	7 dias (MPa)	28 dias Ref. (%)	28 dias (MPa)
[22] BEZERRA <i>et al.</i> 2021 ^B	5		-5,96	44,2	-5,37	56,4
	10		-3,83	45,2	-15,44	50,4
	15		-12,55	41,1	-15,44	50,4
[23] BEZERRA <i>et al.</i> 2021 ^B	10	DRY	-13,83	40,5	-12,25	52,3
[24] TANG <i>et al.</i> 2019 ^C	10		-12,75	32,5	4,86	48,5
	20		-11,11	33,11	8,11	50,00
	30		-19,46	30	-1,62	45,5
	40		-24,83	28	-5,41	43,75
	50		-32,89	25	-11,89	40,75
[25] YOUNG; YANG, 2019 ^C	10		-	-	3,36	52,3
	20		-	-	-24,11	38,4
[26] GU <i>et al.</i> 2022 ^B	10		1,95	104,67	1,58	121,9
	20		-2,00	101,5	-2,00	-
	30		-8,00	91,33	-8,00	-

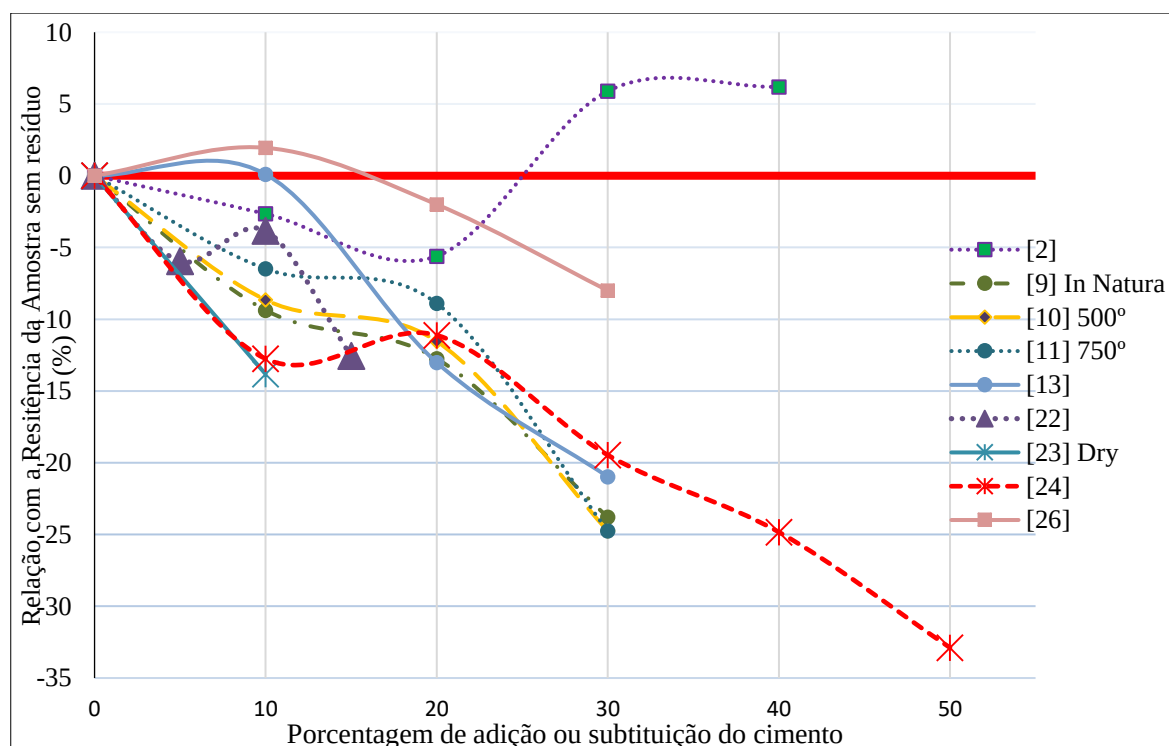
Origem das pesquisas: ^C Chinês e ^B Brasileiro

Assim sendo, utilizar o IOT como adição mineral em concretos e argamassas pode ser um estudo promissor, que pode depender do tipo de rejeito, tipo de beneficiamento e do teor do IOT. A maioria das pesquisa (APAZA *et al.*, 2021; MORAIS *et al.*, 2021; BORGES *et al.*, 2019; CARRASCO *et al.*, 2017; ZHANG *et al.*, 2020; LIU *et al.*, 2019; FONTES *et al.*, 2021; SANT'ANA FILHO *et al.*, 2017; KURANCHIE *et al.*, 2015; SHETTIMA *et al.*, 2016; MANTILLA *et al.*, 2017; XIAOXIN *et al.* 2011; ARISTIMUNHO; BERTOCINI 2012; LIU *et al.* 2012; YU *et al.* 2012; GUODONG *et al.* 2014; COSTA *et al.* 2014; GOYAL *et al.* 2015; UGAMA; EJA; AMARTEY, 2014; XU, 2020; PROTASIO *et al.* 2020; CHINNAPPA; KARRA, 2020; LV *et al.* 2021; FENG *et al.* 2021; MA *et al.* 2016; QUAN *et al.* 2022) ainda continuam estudando os IOT em substituição ao agregado com resultados satisfatórios. Devido ao uso do IOT como encontrado (*in natura*) devendo-se fazer somente destorroamento e peneiramento para separação de frações granulométricas (ALMADA, 2021; LIU *et al.*, 2019).

Encontrou-se ainda estudos como adição/substituição do cimento, sendo neste caso empregado os rejeitos após moagem (LING *et al.*, 2021; HUANG *et al.* 2013), onde apenas Ling *et al.*, (2021) apresentou um aumento na resistência a compressão a 28 dias de cura. Também passando por processo de tratamento térmico (Moraes *et al.* 2021;

Magalhães *et al.* 2020) demonstraram uma redução na resistência a compressão com a cura de 28 dias.

Analisando os autores da Tabela 3.16, Tabela 3.17 e Tabela 3.18 é possível observar os 14 estudos que utilizaram o IOT como adição e substituição do cimento e também como adição mineral. Por meio destas tabelas, foi possível elaborar os gráficos (Figura 3.9 e Figura 3.10) de resistência a compressão, para as idades de 7 e 28 dias de cura.

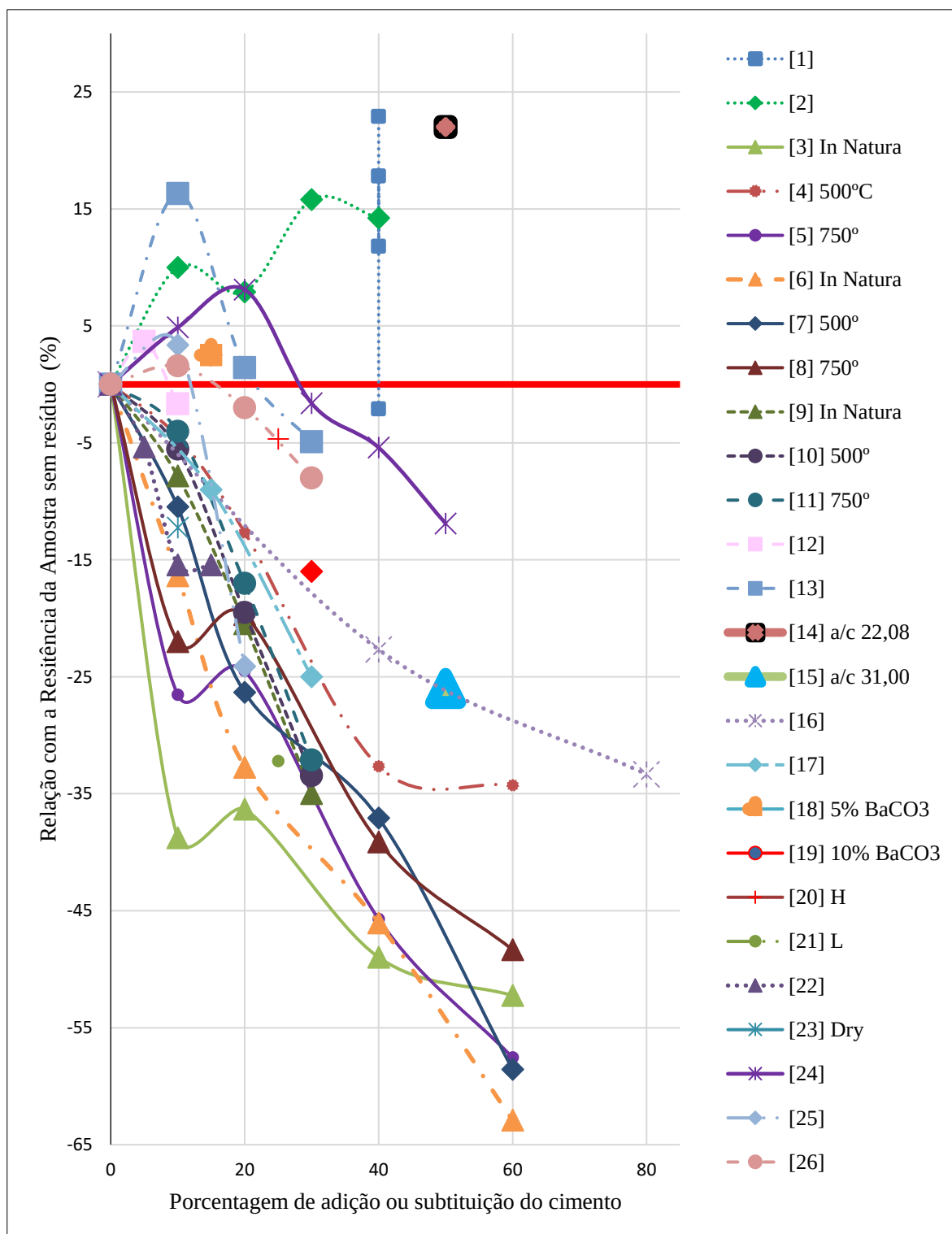


Legenda: adição mineral [2]; substituição do cimento [9-11,13, 22-24,26]

Figura 3.9 Gráfico da resistência à compressão em relação à amostra sem resíduo, com cura aos 7 dias,

Fonte: Elaborado a partir de [2] Castro *et al.*, (2021); [9-11] Magalhães *et al.* (2020); [13] Ling *et al.*, 2021; [22-23] BEZERRA *et al.* 2021; [24] TANG *et al.* 2019; [26] GU *et al.* 2022.

Analisando os estudos sobre a resistência à compressão com 7 dias de cura, apenas 6 estudos realizaram (CASTRO *et al.*, 2021; MAGALHÃES *et al.* 2020; LING *et al.*, 2021; BEZERRA *et al.* 2021; TANG *et al.* 2019; GU *et al.* 2022) sendo possível perceber que no gráfico (Figura 3.9), que a grande maioria dos resultados foram inferiores a amostra controle, mesmo variando o teor do IOT. Praticamente, todos os pesquisadores que aumentavam o teor de rejeito, a resistência tendeu a reduzir.



Legenda: adição mineral [1-2]; substituição do cimento [3-11,13-26]; adição ao cimento [12]

Figura 3.10 Gráfico da resistência à compressão em relação à amostra sem resíduo, com cura aos 28 dias, Fonte: Elaborado a partir de [1] ALMADA, 2021; [2] Castro *et al.*, (2021); [3-8] Morais *et al.* (2021); [9-11] Magalhães *et al.* (2020); [12] Guerra, (2014); [13] Ling *et al.*, 2021; [14-15] CANCIO *et al.*, 2018; [16] HUANG *et al.* 2013; [17-19] XIONG *et al.* 2017; [20-21] CARVALHO *et al.* 2020; [22-23] BEZERRA *et al.* 2021; [24] TANG *et al.* 2019; [25] YOUNG; YANG, 2019; [26] GU *et al.* 2022.

Contudo, Castro *et al.*, (2021) obteve um aumento na resistência (6,19% e 5,90%), com os teores de 30% e 40% de IOT e os teores de 10% e 20% de rejeito tiveram uma redução na resistência. Por outro lado, GU *et al.* (2022) com o teor de 10%, teve um aumento de apenas de 1,95%, mas seguiu o padrão dos demais, à medida que aumentava o teor de IOT, ocorria uma redução na resistência à compressão. A utilização do IOT como adição mineral (CASTRO *et al.*, 2021), na idade de 7 dias, apresentou um melhor resultado quando utilizado como adição ou substituição do cimento.

Para o tempo de cura de 28 dias, apenas 14 estudos que realizaram esta análise, ao utilizarem o IOT como adição ou substituição do cimento e como adição mineral. Analisando o gráfico da Figura 3.10, a grande maioria dos estudos tiveram uma redução na resistência à compressão ao incorporar o IOT em seus materiais (BEZERRA *et al.* 2021; MORAIS *et al.* 2021; CARVALHO *et al.* 2020; MAGALHÃES *et al.* 2020; HUANG *et al.* 2013).

Por outro lado, alguns estudos tiveram resultados positivos com baixos teores de IOT, 5% (GUERRA, 2014) e 10% (GU *et al.* 2022; LING *et al.*, 2021; YOUNG; YANG, 2019), todavia, a medida que aumentava o teor de IOT, a resistência a compressão começava a reduzir. Tang *et al.* (2019) ao aumentar o teor de IOT de 10% para 20%, teve um ganho na sua resistência (4,86% para 8,11%), mas começou a reduzir com o acréscimo de teor de IOT. Para os estudos realizados por Castro *et al.*, (2021) o comportamento foi diferente já que com o teor de 10%, o seu material teve um aumento de resistência de aproximadamente 10%, todavia, para o teor de 20%, ocorreu um ganho na resistência de apenas 7,89% aproximadamente, assim sendo, reduzindo com o aumento do teor.

De outra forma, os melhores resultados de Castro *et al.*, (2021) foram com os teores de 30% e 40%, com os ganhos de (15,79% e 14,21%) na resistência. Assim sendo, as amostras de Castro *et al.*, (2021) tiveram um comportamento bem diferente dos demais autores. Almada, (2021) ao manter o teor de IOT em 40%, mas para diferentes tipos de rejeitos, tipos de tratamento, apresentou um ganho de resistência (11,80% para *Sinter feed*, 17,80% para beneficiamento complexo e 22,90% para beneficiamento simples). Valor semelhante (22,00%) ao Cancio *et al.*, (2018) que com duas amostras com teores iguais de 50% de IOT, mas com fator água/cimento (a/c) distintos (22,08 e 31,00). Sendo que a amostra com fator a/c igual a 31,00 teve uma redução da resistência de aproximadamente 26%, indicando que este pode ter uma grande influência no desempenho de resistência.

Analisando os autores das Tabelas 3.16 a 3.18 foi possível observar os 14 estudos que utilizaram o IOT como adição e substituição do cimento e como adição mineral. Por meio destas tabelas, foi possível elaborar uma nova Tabela 3.19 de resistência à flexão, para as idades de 7 e 28 dias de cura. E assim criar um gráfico (Figura 3.11) para a idade igual a 28 dias. Foi possível observar que apenas 3 pesquisas (CASTRO *et al.*, 2021; MORAIS *et al.* 2021; YOUNG; YANG, 2019) analisaram a resistência a flexão a 28 dias e apenas 1 estudou (CASTRO *et al.*, 2021) com 7 dias de cura. Sendo que para as análises de 7 dias, todas as amostras apresentaram redução dessa propriedade mecânica.

Tabela 3.19 – Correlação da resistência à flexão dos IOT's da literatura científica em relação com a referência.

Fontes:	Teor de IOT (%)	Tipo de IOT/ Beneficiamento/ Tratamento	7 dias Ref. (%)	7 dias (MPa)	28 dias Ref. (%)	28 dias (MPa)
[2] CASTRO <i>et al.</i> , 2021	10	-	-4,26	4,5	10,00	6,16
	20	-	-7,45	4,35	-1,79	5,5
	30	-	-18,09	3,85	-2,68	5,45
	40	-	-5,32	4,45	-0,89	5,55
[3] Morais <i>et al.</i> (2021) ^B	10	In Natura	-	-	-26,88	0,68
	20	In Natura	-	-	-37,63	0,58
	40	In Natura	-	-	-46,24	0,5
	60	In Natura	-	-	-62,37	0,35
[4] Morais <i>et al.</i> (2021) ^B	10	500°	-	-	-1,08	0,92
	20	500°	-	-	-9,68	0,84
	40	500°	-	-	-30,11	0,65
	60	500°	-	-	-32,26	0,63
[5] Morais <i>et al.</i> (2021) ^B	10	750°	-	-	-23,66	0,71
	20	750°	-	-	-27,96	0,67
	40	750°	-	-	-45,16	0,51
	60	750°	-	-	-52,69	0,44
[6] Morais <i>et al.</i> (2021) ^B	10	In Natura	-	-	-17,93	1,19
	20	In Natura	-	-	-39,31	0,88
	40	In Natura	-	-	-47,59	0,76
	60	In Natura	-	-	-54,48	0,66
[7] Morais <i>et al.</i> (2021) ^B	10	500°	-	-	-12,41	1,27
	20	500°	-	-	-29,66	1,02
	40	500°	-	-	-47,59	0,76
	60	500°	-	-	-57,93	0,61
[8] Morais <i>et al.</i> (2021) ^B	10	750°	-	-	-23,45	1,11
	20	750°	-	-	-19,31	1,17
	40	750°	-	-	-45,52	0,79
	60	750°	-	-	-58,62	0,6
[25] YOUNG; YANG, 2019 ^C	5	-	-	-	2,96	8,00
	10	-	-	-	6,95	8,31
	15	-	-	-	-11,45	6,88
	20	-	-	-	-17,89	6,38

Origem das pesquisas: ^C Chinês e ^B Brasileiro

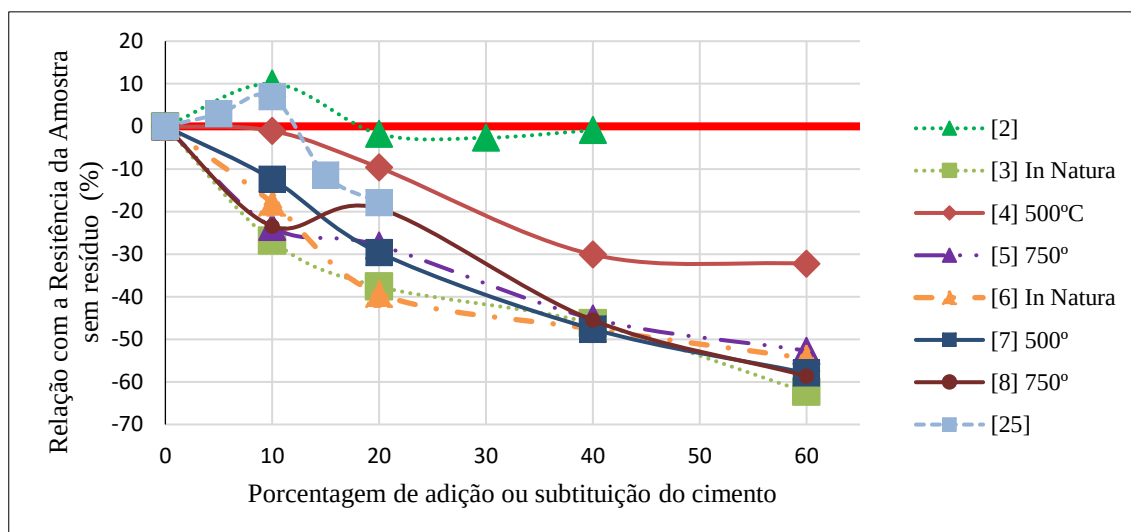
Para as amostras com 28 dias de cura, Morais *et al.* (2021) ao variar o teor de suas amostras, como também variar como tipo de tratamento do IOT: *in natura* e

calcinado com as temperaturas de 500°C e 750°C constatou uma redução na resistência à flexão e teores de adição entre 40% e 60% de IOT, tiveram os piores resultados, uma redução de aproximadamente de 47% a 62%.

É importante destacar que nos estudos de Moraes *et al.* (2021) e Young e Yang, (2019), que a partir de 20% de teor de IOT, as resistências a flexão somente reduziram. Por outro lado, Castro *et al.*, (2021) ao mudar o teor de IOT de 30% para 40%, teve um aumento na sua resistência a tração na flexão, sendo de aproximadamente de (0,89%) em relação a amostra controle. Para o teor de 20% de IOT, os rejeitos *in natura*, tiveram os piores resultados (MORAIS *et al.* 2021), reduzindo aproximadamente 39% a sua resistência, e o melhor resultado foi de Castro *et al.*, (2021), obtendo 1,79%, apresentando uma pequena variação. A melhor amostra de Moraes *et al.* 2021, foi o IOT com tratamento térmico a 500°C e com o traço de (1: cimento; 2: cal hidratada; 9: areia) com o teor de 10%. Também com o teor de 10% de IOT, Castro *et al.*, (2021) obteve o melhor resultados, dentre os autores, assim sendo, a sua amostra aumentou em 10% em relação a amostra controle. O fato da amostra ter apresentado um bom desempenho, pode ser devido ao fato dos envoltimentos das partículas de rejeito para os produtos de hidratação do cimento Castro *et al.*, (2021). Valor semelhante (6,95%) obtido por Young; Yang, (2019), também foi o melhor valor de suas amostras, e com o teor de 10% de IOT.

Para a análise de módulo de elasticidade, dos autores que utilizaram o IOT como adição ou substituição do cimento e como adição mineral (Tabela 3.15 e

Tabela 3.14), apenas Almada, (2021) realizou este estudo. O seu estudo foi para o tempo de cura de 28 dias, como adição mineral e com teor de 40% de IOT. O rejeito de *sínter feed* apresentou um aumento de 11,67% e o rejeito oriundo de beneficiamento simples, um ganho de 17,97%. Os outros rejeitos, como de origem de beneficiamento complexo e arenoso, também apresentaram um ganho no modulo de elasticidade (10,55% e 8,22%). O módulo de elasticidade está relacionado com a resistência a compressão, porosidade e ligação entre os agregados e a pasta das misturas, conforme corroborado por Almada *et al.*, (2022); Almada *et al.*, (2023); Shettima *et al.* (2016), sendo que quanto maior a massa específica do rejeito e menor a porosidade do compósito, maior tende a ser módulo de elasticidade.



Legenda: adição mineral [2]; substituição do cimento [3-8,25]

Figura 3.11 Gráfico da resistência à flexão em relação à amostra sem resíduo, com cura aos 28 dia,

Fonte: Elaborado a partir de [2] Castro *et al.*, (2021); [3-8] Morais *et al.* (2021); [25] YOUNG; YANG, 2019.

3.4.3 Parâmetros de durabilidade e índices físicos dos compósitos com IOT

Dos estudos sobre adição e substituição do IOT como cimento e como adição mineral (Tabela 3.15 e Tabela

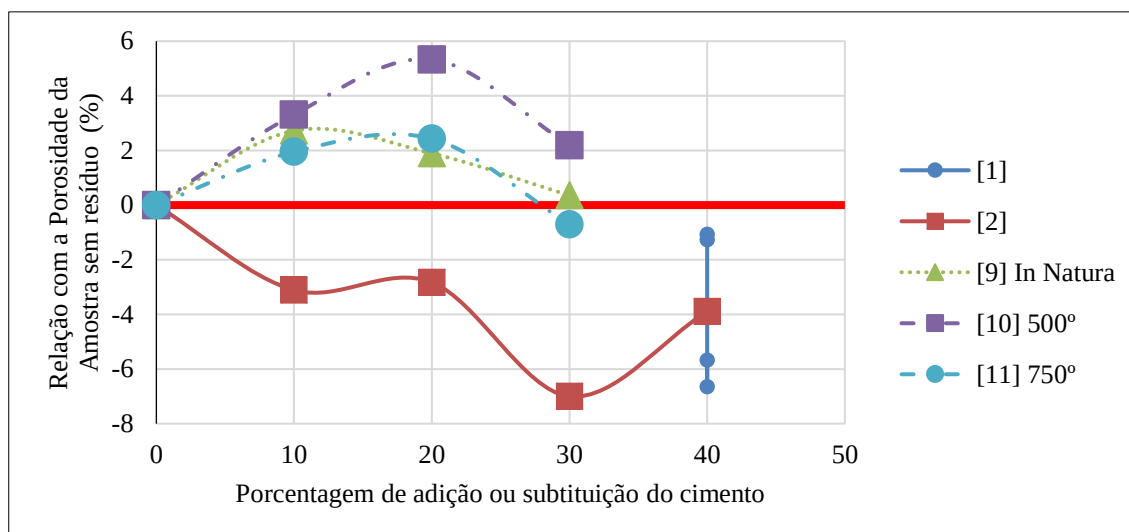
Tabela 3.14), apenas Almada (2021) analisou a resistividade elétrica, mesmo assim com o tempo de cura de 28 dias. Todos os IOT estudados tiveram as mesmas concentrações, 40% de adição mineral. O rejeito arenoso apresentou uma redução aproximadamente de 6,78% em relação a amostra controle, sendo assim o IOT que apresentou o melhor resultado. O IOT de beneficiamento simples, apresentou o segundo melhor resultado, contudo com uma redução de aproximadamente 10,73%. Os outros dois rejeitos também tiveram uma redução em comparação a amostra controle, apresentaram valores próximos, o de beneficiamento complexo (14,69%) e *sínter feed* (15,25%).

Na análise de porosidade, apenas 3 estudos (ALMADA, 2021; CASTRO *et al.*, 2021; MAGALHÃES *et al.* 2020) realizaram este ensaio com 28 dias de cura. Nas pesquisas do IOT com adição mineral (ALMADA, 2021; CASTRO *et al.*, 2021) tiveram uma redução da porosidade, na grande maioria das amostras. Para Almada, (2021) o rejeito oriundo de beneficiamento complexo obteve a menor redução de porosidade,

aproximadamente 6,65% e semelhantemente ao do arenoso, com aproximadamente 5,67%. Nas amostras de *sinter feed* (1,07%) e beneficiamento simples (1,27%) tiveram reduções próximas. Todas as amostras tiveram o mesmo teor de IOT, sendo de 40%. Por outro lado, Castro *et al.*, (2021) utilizou o mesmo tipo de rejeito, mas variando as suas concentrações. Para o teor de 30% de IOT, foi a amostra que teve a maior redução da porosidade, de 7,00%, e não seguindo um comportamento padrão, quando se aumenta o teor de IOT pois, para os teores de 10% a redução foi de (3,11%) e próxima ao do teor de 20% que teve a redução de (2,83%). Com o teor de 30% de rejeito, a redução chegou a 7,00% e com o teor de 40% teve uma redução menor, sendo de aproximadamente de 3,89%.

Como substituição de cimento, Magalhães *et al.* (2020) teve em sua grande maioria das amostras, um aumento na porosidade, exceto na amostra com tratamento térmico de 750°C e com 30% de teor de IOT, que obteve uma leve redução (0,71%). Para as suas amostras, com o rejeito *in natura*, à medida que aumentava o teor de IOT, a porosidade seguia um padrão, ou seja, ocorria a redução da porosidade, mesmo ainda sendo maior do que a amostra referência. Por outro lado, para as amostras com o tratamento térmico a 500°C, não seguiu um padrão de comportamento. Com o aumento do teor de 10% e 20% de rejeito, teve um aumento de porosidade (3,31% e 5,33%) respectivamente, contudo, com o teor de 30%, o aumento da porosidade foi inferior (2,19%). Assim sendo, um aumento de porosidade menor do que a amostra com 10% de rejeito. Nas amostras com tratamento térmico com 750°C, também teve um aumento de porosidade com o aumento do teor de IOT, mas apenas até 20% de IOT. Quando o teor foi de 30% de rejeito, a sua amostra teve uma redução na porosidade. Os resultados podem ser visualizados na Tabela 3.20 e na Figura 3.12.

Na análise de absorção de água, apenas 4 pesquisas (ALMADA, 2021; CASTRO *et al.*, 2021; MAGALHÃES *et al.* 2020; GUERRA, 2014), conforme mostra a Tabela 3.21, realizaram este ensaio, e mesmo assim com 28 dias de cura. Nas pesquisas do IOT com adição mineral (ALMADA, 2021; CASTRO *et al.*, 2021) tiveram uma redução da absorção de água, em todas as amostras.



Legenda: adição mineral [1-2]; substituição do cimento [9-11]

Figura 3.12 Gráfico da porosidade em relação à amostra sem resíduo, com cura aos 28 dia

Fonte: Elaborado a partir de [1] Almada *et al.*, (2021); [2] Castro *et al.*, (2021); [9-11] Magalhães *et al.* (2020).

Tabela 3.20 Correlação da porosidade dos IOT's da literatura científica em relação com a referência.

Fontes:	Teor de IOT (%)	Tipo de IOT/ Beneficiamento/ Tratamento	28 dias Ref. (%)	28 dias (Valor absoluto)
[1] ALMADA, 2021 ^B	40	Arenoso	-5,67	24,6
	40	Beneficiamento Complexo	-6,65	24,34
	40	Sinter Feed	-1,07	25,8
	40	Beneficiamento Simples	-1,27	25,75
[2] Castro <i>et al.</i> (2021) ^B	10,00	-	-3,11	13,62
	20,00	-	-2,83	13,66
	30,00	-	-7,00	13,21
	40,00	-	-3,89	13,51
[9] Magalhães <i>et al.</i> (2020) ^B	10,00	In Natura	2,72	17,36
	20,00	In Natura	1,89	17,22
	30,00	In Natura	0,36	16,96
[10] Magalhães <i>et al.</i> (2020) ^B	10,00	500°	3,31	17,46
	20,00	500°	5,33	17,8
	30,00	500°	2,19	17,27
[11] Magalhães <i>et al.</i> (2020) ^B	10,00	750°	1,95	17,23
	20,00	750°	2,43	17,31
	30,00	750°	-0,71	16,78

Origem das pesquisas: ^B Brasileiro

Tabela 3.21 Correlação da absorção de água dos IOT's da literatura científica em relação com a referência.

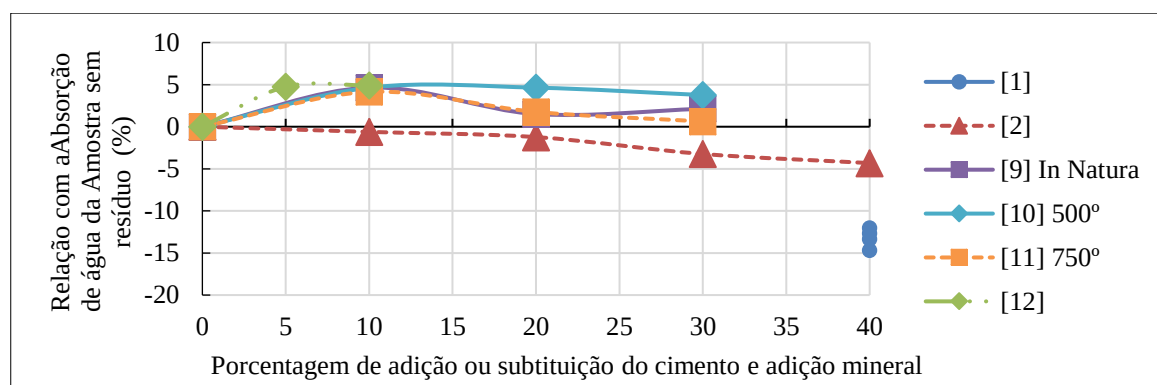
Fontes:	Teor de IOT (%)	Tipo de IOT/ Beneficiamento/ Tratamento	28 dias Ref. (%)	28 dias (Valor absoluto)
[1] Almada, 2021 ^B	40	Arenoso	-14,67	6,4
	40	Beneficiamento Complexo	-12,00	6,6
	40	Sinter Feed	-13,33	6,5
	40	Beneficiamento Simples	-12,67	6,55
[2] Castro <i>et al.</i> , (2021) ^B	10,00	-	-0,62	6,44
	20,00	-	-1,23	6,4
	30,00	-	-3,24	6,27
	40,00	-	-4,32	6,2
[9] Magalhães <i>et al.</i> (2020) ^B	10,00	In Natura	4,64	8,35
	20,00	In Natura	1,50	8,1
	30,00	In Natura	2,13	8,15
[10] Magalhães <i>et al.</i> (2020) ^B	10,00	500°	4,64	8,35
	20,00	500°	4,64	8,35
	30,00	500°	3,76	8,28
[11] Magalhães <i>et al.</i> (2020) ^B	10,00	750°	4,14	8,31
	20,00	750°	1,75	8,12
	30,00	750°	0,63	8,03
[12] Guerra, 2014 ^B	5,00	<i>Pellet feed</i>	4,75	6,83
	10,00	<i>Pellet feed</i>	4,91	6,84

Origem das pesquisas: ^B Brasileiro

Para Almada (2021) o rejeito arenoso, obteve a menor absorção de água, aproximadamente 14,67% e semelhantemente ao do *sínter feed*, com aproximadamente 13,33%. Nas amostras de beneficiamento complexo (12,00%) e beneficiamento simples (12,67 %) tiveram reduções próximas. Todas as amostras da Almada, (2021) tiveram o mesmo teor de IOT, sendo de 40%. Castro *et al.*, (2021) utilizou o mesmo tipo de rejeito, mas variando as suas concentrações (10%, 20%, 30% e 40%) e constatou que à medida que aumentava o teor de rejeito, há redução da absorção de água das amostras. Diferentemente do que ocorreu para as mesmas amostras, quando se analisou a porosidade. Para a amostra com teor de 40% de IOT a absorção de água reduziu 4,32%. O que pode ser um indicativo que ao utilizar o IOT como adição mineral, possa reduzir a absorção de água.

Como substituição de cimento, Magalhães *et al.* (2020) obteve em todas as suas amostras um aumento na absorção de água. Para as suas amostras, com o rejeito *in natura*, não seguiram um padrão de comportamento, pois à medida que aumentava o teor, tinha variações. Assim sendo, para os teores de 10%, 20% e 30%, as absorções foram (4,64%, 1,50% e 2,13%); por outro lado, quando as amostras passaram por tratamento térmico a

500°C, as amostras com teores de 10% e 20% apresentaram o mesmo aumento de absorção de água, 4,64%. Para a amostra com 30%, teve uma redução na absorção de água (3,76%) em relação as amostras com 10% e 20%, mas ainda sendo superior a amostra controle. Nas amostras que passaram por tratamento térmico a 750°C, observou-se que à medida que aumentava o teor de IOT (10%, 20% e 30%), reduzia a absorção de água (4,14%, 1,75% e 0,63%), mesmo estando superior a amostra controle. Na pesquisa de Guerra, (2014) ao utilizar o rejeito de *pellet feed*, à medida que aumentava o teor de IOT (5% e 10%) também aumentava a absorção de água.



Legenda: adição mineral [1-2]; substituição do cimento [9-11]; adição ao cimento [12].

Figura 3.13 Gráfico de absorção de água em relação à amostra sem resíduo, com cura aos 28 dias

Fonte: Elaborado a partir de [1] Almada, 2021; [2] Castro *et al.*, (2021); [9-11] Magalhães *et al.* (2020); [12] Guerra, 2014

3.4.4 Propriedades microestruturais em relação a cura em compósitos cimentício com IOT

Os principais produtos de hidratação do cimento Portland são: o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), a Portlandita (Ca(OH)_2) e sulfoaluminatos de cálcio hidratados (etringita). O gel de C-S-H tem uma grande influência nas propriedades dos materiais cimentícios, melhorando propriedades mecânicas e físicas. A elevada alcalinidade na matriz cimentícia, é devida a Portlandita, sendo que este não contribui para a resistência da pasta após o processo de endurecimento (METHA E MONTEIRO, 2014).

Algumas das análises mais comuns para propriedades microestruturais, são: a microscopia eletrônica de varredura (MEV); difração de raios-X (DRX) e

termogravimetria (TG). Os estudos que analisaram as propriedades microestruturais em compósitos cimentícios com IOT, foram:

- i) para o MEV GU *et al.* 2022; ALMADA, 2021; BEZERRA *et al.* 2021; CASTRO *et al.*, 2021; LING *et al.*, 2021; CARVALHO *et al.* 2020; MAGALHÃES *et al.*, 2020; YOUNG; YANG, 2019; HAN *et al.* 2017; XIONG *et al.* 2017; ZHOU *et al.* 2017; FONTES *et al.*, 2016; WANG *et al.* 2016; YUNHONG *et al.* 2016);
- ii) para o DRX (GU *et al.* 2022; ALMADA, 2021; BEZERRA *et al.* 2021; CASTRO *et al.*, 2021; LING *et al.*, 2021; MORAIS *et al.*, 2021; CARVALHO *et al.* 2020; MAGALHÃES *et al.*, 2020; TANG *et al.* 2019; YOUNG; YANG, 2019; CANCIO *et al.*, 2018; HAN *et al.* 2017; ZHOU *et al.* 2017; XIONG *et al.* 2017 FONTES *et al.*, 2016; WANG *et al.* 2016; YUNHONG *et al.* 2016; GUERRA, 2014; HUANG *et al.* 2013);
- iii) para o TG (GU *et al.* 2022; BEZERRA *et al.* 2021; CARVALHO *et al.* 2020; MAGALHÃES *et al.*, 2020; WANG *et al.* 2016; YUNHONG *et al.* 2016).

De acordo com Almada (2021), a utilização do rejeito como adição mineral em compósitos cimentícios pode melhorar as propriedades mecânicas e de durabilidade. Isso, pois, as amostras que utilizaram o rejeito de minério de ferro como adição mineral apresentaram maior formação de Portlandita. Corroborando com o estudo elaborado por Castro *et al.*, (2021) ao analisar as suas amostras por meio do MEV, foi possível observar que ao utilizar o rejeito de minério de ferro como adição mineral, observou-se a presença de Portlandita nos poros maiores.

Almada, (2021) com a análise de MEV observou-se que a suas amostras de microconcretas, com adição mineral de IOT preencheram os poros, uma menor formação de CH na zona de transição (ZTI) e uma quantidade menor de partículas anidras de cimento. Sugerindo um aumento de nucleação dos produtos de hidratação.

Castro *et al.*, (2021) na amostra de referência, constatou-se a formação de etringita, nos poros com 30 µm de diâmetro. Contudo, nas amostras contendo IOT, a presença de etringita foi observada em apenas poros com diâmetros menores, aproximadamente 8 µm. Nos poros com diâmetro de 2 µm foi possível verificar a presença de C-S-H em ambas as amostras.

Bezerra *et al.* (2021) analisaram o ensaio de TG em diferentes tempos de cura e com diferentes concentrações de rejeito. Nas temperaturas iniciais, entre 35 °C e 200 °C,

observa-se uma perda de massa devido a evaporação da água e a desidratação do C-S-H e etringita. A desidratação da etringita ocorreu aproximadamente na temperatura de 60°C e a desidratação do monocarbonato a aproximadamente a 140 °C.

Por outro lado, Magalhães *et al.* (2020) ao realizar a análise de TG das suas amostras com (rejeito sem tratamento térmico, rejeito com tratamento térmico a 500°C e rejeito com tratamento térmico a 750 °C), observou-se que nas temperaturas entre 200°C e 300°C não ocorreram perdas de massas expressivas para as amostras que passaram por tratamento térmicos.

Para Bezerra *et al.* (2021) nas temperaturas, entre 360 °C e 460 °C, ocorreu a segunda maior perda de massa, devido a desidroxilação do hidróxido de cálcio. Na temperatura de 600°C ocorre o início do processo de descarbonatação do carbonato de cálcio. Magalhães *et al.*, (2020) Todavia, na amostra que não teve tratamento térmico, teve uma perda de massa mais expressiva que as outras. Nas temperaturas acima de 700 °C, constata-se a perda de um pouco de massas nas amostras, que pode ser devido ao fato da desidroxilação da caulinita.

Nas amostras de Bezerra *et al.* (2021), todos os carbonatos estavam presentes nas pastas, principalmente no cimento, pelo fato de possuir calcário. No tempo de cura de 28 dias, observou-se que na temperatura de 200°C ocorre uma perda de massa, para as amostras que contém o rejeito como substituição do cimento, em até 30%. Este fenômeno ocorreu em todas as amostras que continham IOT, assim sendo, sendo uma perda maior de massa do que em relação a amostra de referência. Entretanto, essas reações hidratadas são de aluminatos e não de silicatos. Para o estudo de Magalhães *et al.* (2020) Comparando as amostras, o rejeito sem tratamento térmico tem uma perda de massa de 1%, o rejeito com tratamento térmico a 500°C de 0,8%, o que pode ser que grande parte da caulinita foi afetada pelas altas temperaturas. O rejeito que teve 750°C de tratamento, teve apenas 0,2% de perda de massa, indicando que a caulinita já se transformou em metacaulinita.

Gu *et al.* (2022) analisaram pastas com substituição do cimento pelo IOT, com teor de 10%, e também a amostra sem substituição. Na análise de DRX, em ambas as amostras, foi possível visualizar um pico da fase de C-S-H durante a hidratação da pasta. A amostra com IOT, reduz o pico de Portlandita com o passar do tempo de cura, podendo ser devido ao consumo de Ca(OH)_2 e em razão da reação pozolânica. Após os 28 dias de cura, a Portlandita ainda estava presente na amostra. Os minerais cristalinos, quartzo e cordierita,

foram observados na amostra com rejeito. No estudo elaborado por Gu *et al.* (2022), o rejeito apresentou um potencial pozolânico, que pode induzir formação de sílica ativa para produzir o C-S-H amorfo. De acordo com Gu *et al.* (2022), após o processo de moagem do IOT, estes resíduos podem participarem da hidratação secundária para gerar mais C-S-H e assim gerando uma maior resistência no material.

Gu *et al.* (2022) realizou a análise de TG, nas temperaturas entre 100 °C e 200 °C foi possível observar a desidratação do gel de C-S-H. Na amostra com rejeito (10%) verificou-se um aumento na quantidade de gel de C-S-H em 28 dias, e favorecendo um aumento na resistência à compressão, resultante do crescimento dos produtos de hidratação. Segundo os autores, o tempo de moagem do rejeito, pode reduzir o tamanho das partículas, fazendo com que alguns tenham atividades pozolânicas, podendo reagir com o Ca(OH)_2 e produzindo mais produtos de hidratação. A combinação dos resultados de DRX e TG, a intensidade do pico de quartzo reduz e promove uma reação de hidratação, secundária, ocorrendo um maior consumo de Ca(OH)_2 e produzindo mais produtos de hidratação e gerando um favorecimento para o aumento da resistência a compressão.

No estudo elaborado por Gu *et al.* (2022), após 28 dias de cura, pode-se observar que a interface da IZT entre o IOT e a pasta, torna-se mais denso. Indicando um melhor processo de hidratação da pasta. Também é possível observar uma boa quantidade de C-S-H aos 28 dias, fazendo com que continuamente preencha os poros. De acordo com Gu *et al.* (2022) por meios dos resultados obtidos pelo MEV, a moagem pode melhorar a atividade pozolonica do IOT e o produto primário do processo de hidratação, gel C-S-H amorfo.

4 METODOLOGIA

O programa experimental deste trabalho é dividido em quatro etapas: (i) preparação das amostras, (ii) caracterização dos materiais, (iii) produção das argamassas com adição de rejeito de minério de ferro *in natura* e (iv) análise das propriedades das argamassas. Os ensaios foram realizados conforme o apresentado no fluxograma da Figura 4.1

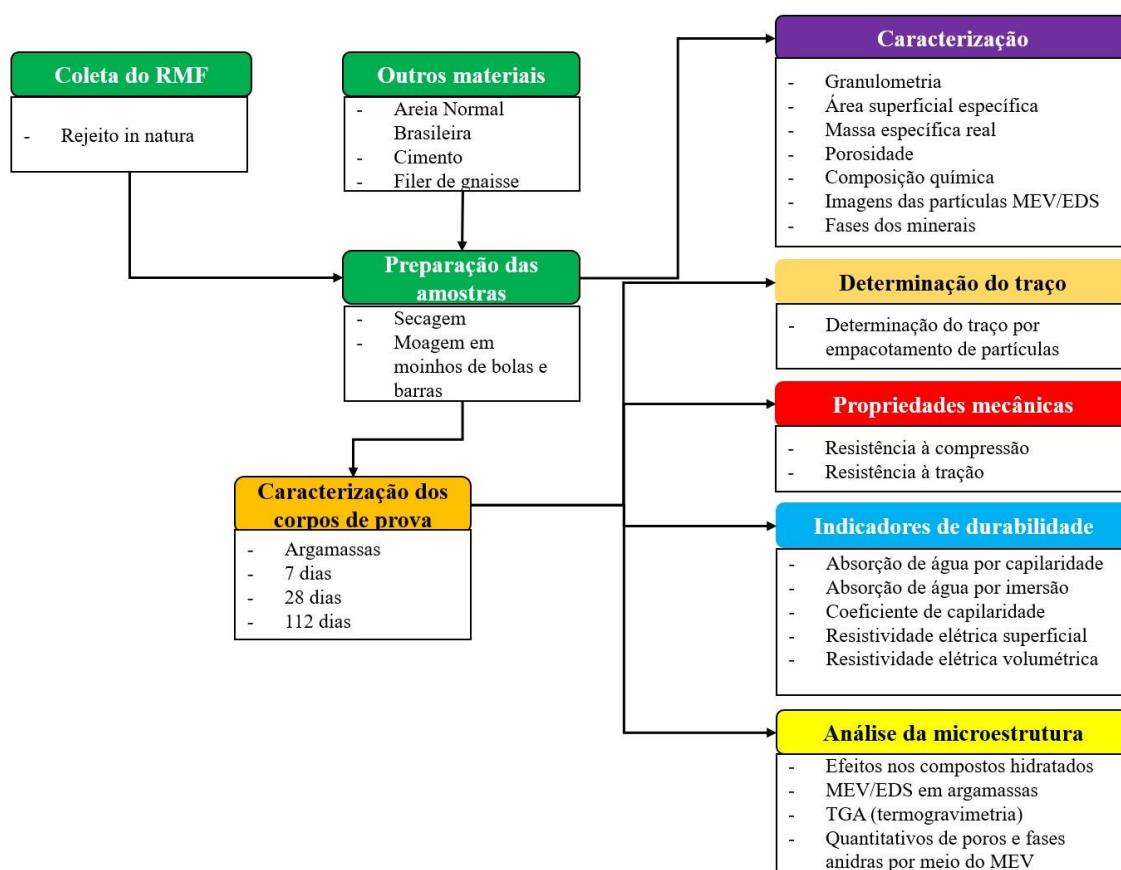


Figura 4.1 – Fluxograma do programa experimental

Foram utilizados o Laboratório de Caracterização de Materiais de Construção Civil e Mecânica, o Laboratório de Concreto e Argamassa e o Laboratório de Metalurgia da Universidade Federal de Minas Gerais. Os laboratórios na Universidade Federal de Ouro Preto e do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, além dos Laboratórios da empresa GEOSOL, localizada em Vespasiano/MG.

4.1 Materiais

Para a preparação das amostras, utilizou-se areia normal brasileira, fornecida pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), sendo composta por quatro frações (nº 16, 30, 50 e 100); água potável proveniente da rede de abastecimento público; e cimento Portland CPV-ARI da marca HOLCIM, por ser um cimento com baixo teor de adições minerais e facilmente encontrado no mercado.

Na presente pesquisa, utilizaram-se dois tipos de rejeitos de minério de ferro, a saber: IOT no estado *in natura* (bruto), e a sílica ativa proveniente do processo de fabricação do silício metálico e ferro silício captada em filtros manga. De acordo com as informações concedidas pela empresa que forneceu o rejeito de minério de ferro, as coletas dos rejeitos foram realizadas pelos seus próprios funcionários, no período de 2016 e 2018, de forma representativa em conformidade com a norma NBR 10007 (ABNT, 2004).

O IOT foi retirado em uma mina que se localiza no quadrilátero ferrífero, no estado de Minas Gerais. A sílica ativa foi armazenada em silos adequados e embalada em sacos de papel Craft, que foram repassados a pesquisa.

Como parâmetro de comparação, também foi utilizado um fíler de gnaiss. Este foi fornecido pela empresa Mineração Santiago, localizada no bairro Céu Azul, na cidade de Belo Horizonte, estado de Minas Gerais. Foram doados aproximadamente 35 kg de gnaiss no estado *in natura*. Antes da moldagem das amostras, o fíler foi seco em estufa na temperatura de 105 °C durante um período de 24 horas. Após este processo, este material foi moído por 3 hora, por meio do moinho de bolas por via seca e mais 3 horas por via úmida e, em seguida, passou o material moído pela peneira de 150µm.

4.2 Caracterização dos materiais

Os materiais (rejeito de minério de ferro; cimento; sílica ativa e fíler de gnaiss) foram caracterizados quanto às suas características físicas, químicas e mineralógicas, conforme procedimentos descritos nos itens a seguir:

- i) **Caracterização química:** foi determinada pela análise de fluorescência de raios-X (FRX), fusão de tetraborato de lítio e perda ao fogo (LOI) por calcinação da amostra à 1000°C. Utilizou-se o equipamento *PANalytical Epsilon3x*.
- ii) **Caracterização mineral:** foram identificadas pelo método da difração de raios-X (DRX), com o equipamento *Philips PW 1710*, por meio de radiação $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda=1,54 \text{ \AA}$, $V=50 \text{ kV}$), cuja tensão foi de 50 kV e passo de 0,02°/s.
- iii) **Distribuição do tamanho das partículas:** a granulometria do fíler de gnaiss e os rejeitos (rejeito de ferro *in natura* e sílica ativa) foi realizada em um analisador de tamanho de partículas (granulômetro) por difração a laser, da marca Sympatec, modelo Helos 12LA, computadorizado, na lente de 50 mm, por via úmida. O agente dispersante foi o Hexametáfosfato de sódio (0,05%). Para a análise do cimento, utilizou-se o meio da via úmida, em álcool isopropílico, com auxílio de um granulômetro CILAS 1064. O menor diâmetro analisado foi 0,03 μm e houve agitação em ultrassom da amostra durante a análise, e antes, por 60 segundos. As areias do IPT foram analisadas por peneiramento segundo a Norma NBR 7214 (ABNT, 2015) para verificação da granulometria da areia fornecida.
- iv) **Área Superficial específica (ASE) e porosidade:** para a análise de porosidade, aplicou-se o modelo de *Non Local Density Functional Theory* (NLDFT) e para ASE o modelo Brunauer, Emmett e Teller (BET). Utilizou-se o equipamento Quantachrome Nova 1120e, e o software Quantachrome NovaWin versão 11.02 para encontrar a ASE e a distribuição dos poros dos rejeitos, do fíler de gnaiss e do cimento. Cada amostra analisada foi previamente aquecida sob vácuo à 150 °C por 48 h para limpeza da superfície. O nitrogênio (N_2) foi o adsorvato empregado, e para cálculo da isoterma completa, o tempo de análise de cada amostra foi de 24 horas. A área superficial específica foi calculada pelo método multiponto na isoterma de adsorção de BET, e o método NLDFT através da isoterma de dessorção para cálculo da porosidade.
- v) **Morfologia e microestrutura:** utilizou-se a técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV), equipamento *MEV-VEGA3 Quorum Q150R ES*, detector de elétrons secundários e tensão de 20 kV para análise morfológica das partículas. As amostras foram metalizadas com ouro. Aplicou-se o espectrômetro de energia dispersiva (EDS) *INCA X-act da Oxford – Instruments* acoplado ao MEV, para fazer um mapeamento elementar dos materiais e identificação dos elementos presentes nas partículas dos materiais.

- vi) **Massa específica:** aplicou-se a técnica de picnometria em gás hélio para determinar a massa específica real dos materiais, sendo utilizado o picnômetro *Quantachrome Multi Pycnometer MVP-1*. As amostras ficaram na estufa durante 12 horas em uma temperatura de 70°C.
- vii) **Análise termogravimétrica:** foi realizada no equipamento Shimadzu, modelo TGA-51). A análise termogravimétrica foi realizada em atmosfera de nitrogênio, com fluxo de 50 mL/min e temperatura de 25°C até 1000°C, com taxa de aquecimento de 10°C/min.

4.3 Dosagem das argamassas

Para a dosagem das argamassas pelo método de empacotamento de partículas foi utilizado o software *Elkem Materiais Mixture Analyzer* (EMMA). O procedimento metodológico analisa tanto o diâmetro da menor partícula como o diâmetro da maior partícula (MELO; MONTEIRO; GOMES, 2018). Por meio do EMMA foi possível elaborar os cálculos para encontrar as curvas de empacotamento experimentais. Na presente pesquisa, baseou-se o $D_{\text{máx}} = 2,4 \text{ mm}$, na dimensão máxima da areia e $D_{\text{mín}} = 0,1 \text{ }\mu\text{m}$, na dimensão mínima dos rejeitos e do cimento, considerando limite de detecção do granulômetro.

Foi utilizado o modelo de Andreasen e Andersen Modificado por Funk e Dinger (1994), que também foi escolhido por Almada *et al.* (2022), Pinto *et al.* (2021) e Raul *et al.* (2021), usando módulo de distribuição $q = 0,30$. Para valores de q menores do que 0,25 são utilizados para concretos auto-adensáveis e para valores próximos de 0,30 são para concretos adensados sob vibrações (CASTRO e PANDOLFELLI, 2009). Portanto, utilizou-se o mesmo valor de Almada *et al.* (2022), $q = 0,30$, uma vez que em sua pesquisa utilizou materiais semelhantes. A proximidade entre as curvas foi realizada comparando os valores da soma residual dos quadrados pelo Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) (Equação 1).

$$RSS = \sum_{i=1}^n [P(D_i) - P_{\text{mod}}(D_i)]^2 \quad (1)$$

Onde: RSS = soma residual dos quadrados

$P(D_i)$ = fração de sólidos menores que o diâmetro D_i da mistura

$P_{\text{mod}}(D_i)$ = fração de sólidos menores que o diâmetro D_i , do modelo de Andreasen, obtida pela eq.

4.2.

4.4 Caracterização das argamassas

Denominou-se as argamassas da seguinte forma: IOT para a argamassa com rejeito de minério de ferro; REF para a argamassa de cimento, sendo a de referência; GN para a argamassa de filer de gnaiss.

Após a definição do traço, realizou-se as análises das características das argamassas conforme a seguir:

- i) **Consistência:** para as argamassas, utilizou-se o método da mesa de espalhamento (*Flow table*), baseado na norma brasileira NBR 13276 (ABNT, 2016). Na realização do ensaio, primeiramente a mesa e o molde tronco cônico foram umedecidos com água, e logo em seguida o molde foi centralizado sobre a mesa. Com o auxílio de uma espátula, preencheu-se o molde com argamassa em três camadas sucessivas, com aplicação de 15, 10 e 5 golpes uniformes e homogêneos, respectivamente. O molde foi retirado e foram efetuados 30 quedas na mesa, com tempo de 1 segundo entre quedas. O espalhamento foi determinado como média de três medidas de diâmetros.
- ii) **Resistência à compressão:** a análise de resistência à compressão baseou-se na norma NBR 5739 (ABNT, 2018), sendo utilizados 5 corpos de prova cúbicos (4x4x4 cm³), segundo recomendações da norma Europeia EN 12390-3 (CEN, 2009). Moldaram-se os corpos de prova para as idades de 7, 28 e 112 dias, por tipo de rejeito: IOT *in natura* e sílica ativa, e mais duas condições de referência (uma com adição mineral somete de sílica ativa e uma com adição de filer de gnaiss e sílica ativa). A escolha da idade de 112 dias, foi devido ao fato do levantamento bibliográfico ter encontrado a idade mais avançada de 91 dias. Para o processo de cura, as amostras foram armazenadas em processo de cura submersos até a idade do respectivo ensaio. Os corpos de prova foram rompidos em uma máquina universal de ensaios EMIC, modelo DL20000, com velocidade de carregamento de (0,45 ± 0,15) MPa/s.
- iii) **Resistência à flexão:** a análise de resistência à tração na flexão baseou-se na norma NBR 12142 (ABNT, 2010), sendo utilizados 3 corpos de prova prismáticos (4x4x16cm), para cada argamassa, IOT, REF, GN. Moldou-se os corpos de prova para as idades de 7, 28 e 112 dias, por tipo de rejeito: IOT *in natura* e sílica ativa e mais duas condições de referência (uma com adição mineral somete de sílica ativa e uma adição de filer de gnaiss e sílica ativa). Para o processo de cura, as amostras foram

armazenadas em processo de cura submersos até a idade do respectivo ensaio. Os corpos de prova foram rompidos em uma máquina universal de ensaios EMIC, modelo DL20000, com velocidade de carregamento de $(1,00 \pm 0,15)$ MPa/s.

- iv) **Absorção de água por capilaridade:** com base na NBR 9779 (ABNT, 2012), confeccionaram-se 4 corpos de prova cilíndricos ($\varnothing 5 \times 10$ cm²), por tipo de amostra, porém sem o rompimento diametral dos corpos de prova, procedimento previsto em norma. Colocou-se os corpos de prova sobre um suporte dentro de um recipiente que foi preenchido com água até o nível de 5 mm acima de sua face inferior. A massa saturada foi determinada a 3, 6, 24, 48 e 72 horas após a colocação dos corpos de prova em contato com a água. Assim sendo, por meio da Equação 2, foi calculada a absorção de água por capilaridade.

$$C = \frac{m_{\text{sat}} - m_s}{S} \quad (2)$$

- v) **Absorção de água por imersão, porosidade e massa específica:** utilizou-se a norma brasileira NBR 9778 (ABNT, 2009) para determinar a absorção de água, porosidade e massa específica das argamassas no estado endurecido. Reaproveitaram-se os mesmos corpos de prova do ensaio de absorção de água por capilaridade. Após o ensaio de capilaridade, colocou-se as amostras em uma estufa a 105°C por 72 horas. Posteriormente, as amostras foram imersas em água com temperatura de 21 a 25°C por mais 72 horas. Os resultados foram expressos conforme equações de 3 a 7.

$$A = \frac{m_{\text{sat}} - m_s}{m_s} \times 100 \quad (3)$$

$$P = \frac{m_{\text{sat}} - m_s}{m_{\text{sat}} - m_i} \times 100 \quad (4)$$

$$\rho_s = \rho_w \cdot \frac{m_s}{m_{\text{sat}} - m_i} \quad (5)$$

$$\rho_{\text{sat}} = \rho_w \cdot \frac{m_{\text{sat}}}{m_{\text{sat}} - m_i} \quad (6)$$

$$\rho_r = \rho_w \cdot \frac{m_s}{m_s - m_i} \quad (7)$$

Onde: A é a absorção de água por imersão (%);

P é o Porosidade (%);

ρ_w é a massa específica da água (≈ 1 g/cm³);

ρ_s é a massa específica da amostra seca (g/cm³);

ρ_{sat} é a massa específica da amostra saturada (g/cm³);

ρ_r é a massa específica real (g/cm³);

m_{sat} é a amostra saturada em água após imersão e fervura (g);

m_s é a massa da amostra seca em estufa (g);

m_i é massa da amostra saturada imersa após fervura (g).

vi) **Resistividade Elétrica Volumétrica:** moldou-se 1 corpo de prova cilíndrico de ($\varnothing 10 \times 20$ cm) por amostra e para as idades de 28 e 112 dias de cura. Para o processo de saturação, ficaram imersos em água por 24 horas. Utilizou-se o equipamento Resipod, que exibe os valores em $k\Omega\text{cm}$. O valor obtido do display do aparelho deve ser dividido por $2\pi a$ (onde “a” é o espaçamento das sondas, ou 3.8 cm, ou 5.0 cm). Para espaçamento das sondas de 38mm, resistividade volumétrica foi definida pela Equação 7:

$$\rho = K \times R_{\text{cilindro}}, \quad (7)$$

Onde: R_{cilindro} = resistividade elétrica no display do Resipod ($k\Omega\text{cm}$)

$2\pi a$ = espaçamento das sondas (cm^2)

A = área do cilindro (cm^2)

L = Comprimento do corpo de prova (cm^2)

A/L = área da seção transversal (cm)

$K = A/L$

vii) **Resistividade elétrica superficial:** baseou-se no método de quatro pontos, também conhecido como método Wenner (WOSNIACK *et al.*, 2021; MEDEIROS-JUNIOR *et al.*, 2014). O equipamento possui 4 pinos que entram em contato com a superfície do corpo de prova. Uma corrente é aplicada entre os dois contatos externos, e a diferença de potencial resultante é fornecida pelos dois contatos internos (WOSNIACK *et al.*, 2021; MEDEIROS-JUNIOR *et al.*, 2014). O corpo de prova ficou submerso em água por um período de 72 horas antes da realização do ensaio. O equipamento utilizado foi o Resipod da PROCEQ, cuja precisão é de ($\pm 0,2$ a $\pm 2,0$ $k\Omega\text{cm}$).

4.5 Estudos da hidratação dos compósitos com adição de IOT

Para a avaliação da hidratação dos compósitos, moldaram-se corpos de prova cúbicos ($4 \times 4 \times 4$ cm^3) de argamassas e pastas, nas mesmas condições de adensamento daqueles utilizados no ensaio de compressão, com o objetivo de manter as características das argamassas. Após a cura, os corpos de prova foram cortados em serra de disco diamantado, extraíndo-se da região interna amostras de dimensões aproximadamente $1 \times 1 \times 1$ cm^3 , para fazer as imagens de MEV-EDS.

Nos procedimentos durante o MEV-EDS e também na análise da zona de transição da matriz e quantificação dos elementos, utilizou-se o *software* ImageJ para segmentação binária, para a análise de distribuição das fases. Por meio deste software, foi possível realizar um mapeamento químico com detector EDS, para avaliar a distribuição dos elementos nas amostras e auxiliar a identificação das fases (cimento anidro, produtos hidratados e poros).

Foram realizadas também DRX e TG/DTA de amostras pulverizadas. Para os ensaios térmicos, as amostras passaram por um pré-aquecimento de 40°C por 24 horas em estufa. Realizou-se pela TGA (*Thermogravimetric Analysis*) e pela DTA (*Differential Thermal Analysis*), no equipamento DTG60H Shimadzu, com cadinho de Alumina e atmosfera de nitrogênio 50 [ml/min]. A taxa de aquecimento foi 10 °C/min; variando entre 10 a 1000 °C. Realizou-se ainda a diferenciação calorimétrica (*Differential Scanning Calorimetry* DSC) utilizando o equipamento DSC60Plus Shimadzu, com o acessório de refrigeração RCS. Para a análise termogravimétrica as amostras foram analisadas pelo Analisador térmico Shimadzu, modelo TGA-51. A análise termogravimétrica foi realizada em atmosfera de nitrogênio, com fluxo de 50 mL/min e temperatura de 25°C até 1000°C, com taxa de aquecimento de 10°C/min.

As fases minerais e hidratadas foram identificadas pelo método da difração de raios-X (DRX), com o equipamento Philips PW 1710, radiação CuK α ($\lambda=1,54$ Å, V=50 kV), tensão de 50 kV e passo de 0,02°/s. Na constatação das fases e seus teores, utilizou-se a base de dados Crystallography Open Database (COD), no software HighScore Plus.

Foram realizadas a quantificação das fases anidras por meio de imagens de MEV. Para cada tipo de argamassa, foram coletados três fragmentos em diferentes pontos, totalizando 20 imagens por argamassa. As imagens foram obtidas em diferentes idades (7, 28 e 112), sendo também 20 imagens por argamassa. Para identificar as fases anidras, utilizou-se o mapa químico (EDS) das argamassas e fez o tratamento pelo software Image J por meio da escala de cinza. Sendo que esta escala varia de 0 a 255, sendo que mais próximo de 0, a cor preta e mais próximo de 255 a cor branca. Considerou-se a imagem como um todo, levando em conta o agregado para a porcentagem.

Para a quantificação dos poros por meio de imagens de MEV. Para cada tipo de argamassa, foram coletados três fragmentos em diferentes pontos, totalizando 20 imagens por argamassa. As imagens foram obtidas em diferentes idades (7, 28 e 112), sendo também 20 imagens por argamassa. Realizou o tratamento pelo software Image J por

meio da escala de cinza. Sendo que esta escala varia de 0 a 255, sendo que mais próximo de 0, a cor preta e mais próximo de 255 a cor branca. Para a determinação dos poros, quanto mais perto da faixa de 0 considerou-se como poros. Considerou-se a imagem como um todo, levando em conta o agregado para a porcentagem.

4.6 Análise estatística dos dados

Foi realizado o teste de Análise de Variância (ANOVA) com fator único para determinar se as diferenças entre as amostras são estatisticamente significativas ou não-significativas. Nesse teste, os valores são considerados iguais se o valor da estatística F calculado for inferior ao valor F-crítico. O valor F-crítico é tabelado com base no nível de significância da análise e nos graus de liberdade de um conjunto amostral em uma distribuição F (MONTGOMERY E RUNGER, 2014). Também foi utilizado o teste de Tukey para mostrar quais amostras são significativas ou não-significativas (PIMENTEL GOMES, 2000). A análise foi realizada usando dados dos softwares Excel e do Past, com um nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$).

5 RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo, apresentam-se os resultados de caracterização dos rejeitos de minério de ferro (IOT), sílica ativa, pó de pedra (gnaisse) e cimento. São apresentados ainda, as propriedades mecânicas, índices de durabilidade e os resultados dos produtos de hidratação dos compósitos com as adições minerais dosadas por empacotamento de partículas.

5.1 Caracterização dos materiais

5.1.1 Caracterização física

As curvas granulométricas dos materiais: rejeito de minério de ferro (IOT), sílica ativa, filer de gnaisse e cimento Portland CP-V, são apresentadas na Figura 5.1. Observa-se que o rejeito apresenta uma granulometria mais fina, até mesmo do que o cimento e sílica ativa. O tamanho médio do IOT foi de $4,7 \mu\text{m}$, ao passo que o gnaisse, cimento e sílica ativa apresentaram valores de $39,9 \mu\text{m}$, $11,8 \mu\text{m}$ e $13,92 \mu\text{m}$, respectivamente (Tabela 5.1).

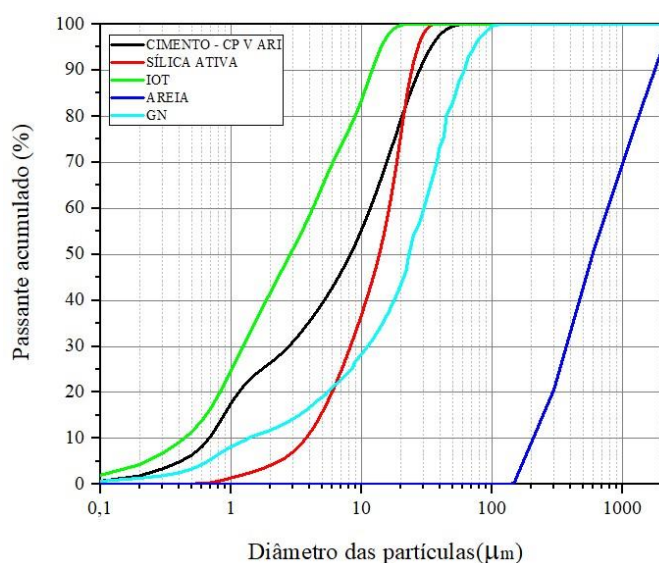


Figura 5.1 Distribuição granulométrica acumulada dos materiais IOT, cimento, sílica ativa, gnaisse e da areia do IPT.

Analisando a granulometria dos materiais, observa-se que o rejeito da presente pesquisa apresenta tamanhos próximos aos valores de autores chineses, como: o rejeito bruto (5 μm – 10 μm) de Liu *et al.*, (2019); o rejeito (5 μm) de Huang *et al.*, (2013); o rejeito (2,76 μm) de Yang; Deng; Wang, (2014). Analisando o D_{10} do rejeito (0,44 μm) deste trabalho, observou que ficou próximo de alguns autores brasileiros, como: o D_{10} (0,61 μm) do rejeito de Cancio *et al.*, (2018); o D_{10} (0,859 μm) do rejeito de origem de barragem de Carvalho *et al.* (2020). Assim sendo, o rejeito deste presente trabalho apresentou uma das menores granulometrias em relação aos autores brasileiros e chineses.

Tabela 5.1 - Parâmetros granulométricos dos materiais.

Decil	Amostra			
	IOT	CP-V	Gnaisse	Sílica Ativa
D_{90}	12,1	28,7	64,9	24,41
D_{50}	2,9	8,3	25,7	13,74
D_{10}	0,4	0,7	1,62	3,76
Médio	4,7	11,8	39,90	13,92

Os resultados de área superficial específica estão na Tabela 5.2. É possível observar que o rejeito de minério de ferro apresentou o maior valor (35.113 m^2/g), seguido pela sílica ativa (22.010 m^2/g), gnaisse (2.240 m^2/g) e cimento (1.743 m^2/g). Assim sendo, o rejeito da presente pesquisa apresentou uma área superficial específica bem maior do que outras pesquisas. Carvalho *et al.*, (2020) obtiveram uma área superficial de 29.547 m^2/g , Almada *et al.*, (2023) alcançaram 10.107 m^2/g , Castro *et al.*, (2023) atingiram 6.020 m^2/g , Yunhog *et al.* (2016) conseguiram 2.030 m^2/g . Além disso, observa-se que o rejeito apresentou o menor volume total de poros (0,5712 $10^{-3} \text{ cm}^3/\text{g}$), seguido pela sílica ativa (1,901 $10^{-3} \text{ cm}^3/\text{g}$), cimento (5,896 $10^{-3} \text{ cm}^3/\text{g}$) e filer de gnaisse (6,725 $10^{-3} \text{ cm}^3/\text{g}$). O raio médio dos poros foi menor no rejeito (Tabela 5.2). Percebe-se que, possivelmente, existe uma faixa granulométrica mais fina presente no rejeito que não foi capturada pelo equipamento utilizado na granulometria e que está aumentando a ASE.

Tabela 5.2 Área superficial específica e porosidade dos materiais.

Amostra	ASE (m^2/g)	Volume total de poros ($10^{-3} \text{ cm}^3/\text{g}$)	Raio médio de poros (Å)
IOT	35.113	0,5712	35,540
Gnaisse	2.240	6,725	60,040
Cimento CP-V	1.743	5,896	67,640
Sílica ativa	22.010	1,901	172,700

IOT: Rejeito *in natura*

Na Tabela 5.3 estão as massas específicas dos materiais. Os resultados obtidos demonstram que o rejeito apresenta massa específica ($3,85\text{g/cm}^3$) similar à de outros autores brasileiros. Costa *et al.* (2014) obtiveram o *sinter feed* $3,76\text{ g/cm}^3$, Aristimunho; Bertocini, (2012) alcançaram $3,79\text{ g/cm}^3$; Fontes *et al.*, (2016) encontraram $3,88\text{ g/cm}^3$ e Castro *et al.*, (2021) atingiram $4,04\text{ g/cm}^3$. O cimento CP-V obtido, teve uma massa específica ($3,12\text{ g/cm}^3$).

Tabela 5.3 Massa específica dos materiais.

Amostra	IOT	Gnaisse	Cimento CP-V	Sílica ativa
Massa específica (g/cm^3)	3,85	2,74	3,12	2,20

5.1.2 Caracterização química e mineralógica

A análise química dos materiais está apresentada na Tabela 5.4 . O IOT é composto predominantemente por óxido de ferro (48%) e sílica (21,20%). Por outro lado, o pó de gnaisse é composto por sílica (70,50%) e óxido de alumínio (14,30%). A sílica ativa é composta predominantemente por sílica (61%) e por óxido de ferro (13,60%), enquanto o cimento é composto por óxido de cálcio (60,90%) e sílica (18,20%).

Tabela 5.4 - Composição química dos materiais.

Compostos químicos	Materiais			
	IOT	Gnaisse	CP-V	Sílica Ativa
Fe₂O₃	48,00	3,72	3,08	13,60
SiO₂	21,20	70,50	18,20	61,00
Al₂O₃	3,93	14,30	4,37	11,30
CaO	0,22	3,18	60,90	3,44
K₂O	0,07	2,85	0,68	2,31
MgO	< 0,10	1,60	0,60	-
MnO	-	0,05	0,07	0,26
P₂O₅	-	0,14	0,25	0,36
Na₂O	0,10	3,85	0,15	0,70
SO₃	-	-	2,83	0,13
TiO₂	0,11	0,39	0,24	0,91
LOI	6,28	0,89	7,81	5,25

Nas Figura 5.2, Figura 5.3 e Figura 5.4 é possível verificar o mapeamento químico (EDS) das argamassas das amostras. Na argamassa com IOT, o elemento ferro (Fe) é predominante, seguido por silício (Si) e por alumínio (Al). Para a argamassa da amostra de REF (referência), Figura 5.3, visualiza-se que o elemento mais abundante é o

cálcio (Ca), seguido por silício (Si) e alumínio (Al). A argamassa da amostra GN (fíler de gnaíse), Figura 5.4, teve o silício (Si) como elemento predominante, seguido por alumínio (Al) e ferro (Fe). Assim sendo, os resultados obtidos por meio do EDS corroboram com a análise química (FRX) dos materiais.

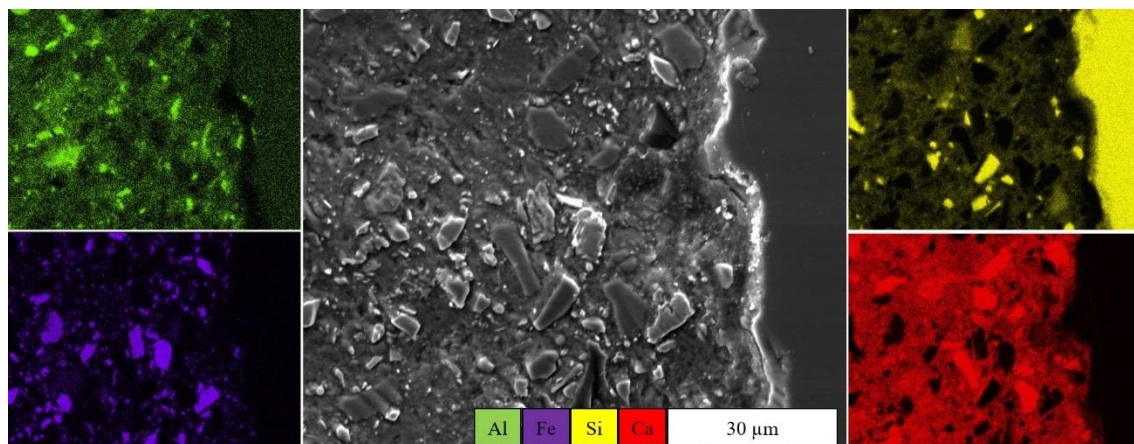


Figura 5.2 - Mapeamento químico (EDS) da argamassa de IOT

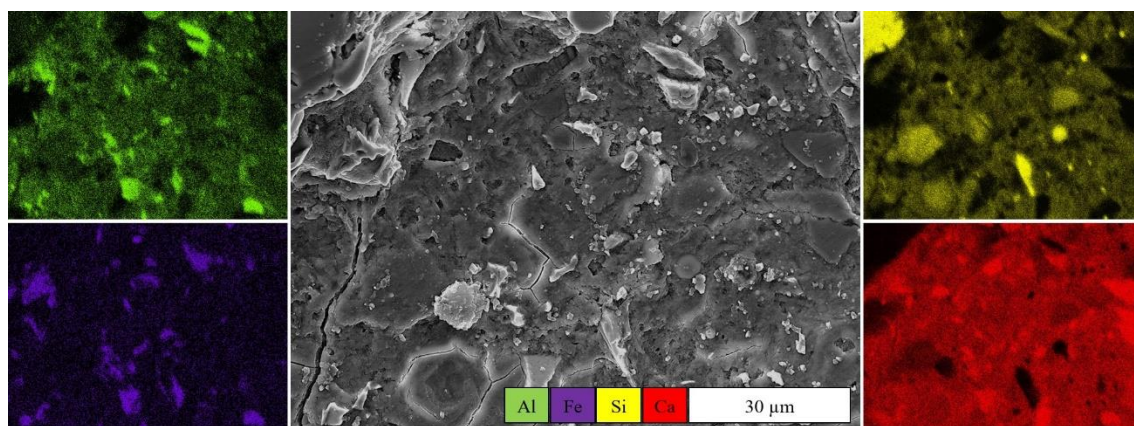


Figura 5.3 - Mapeamento químico (EDS) da argamassa de REF

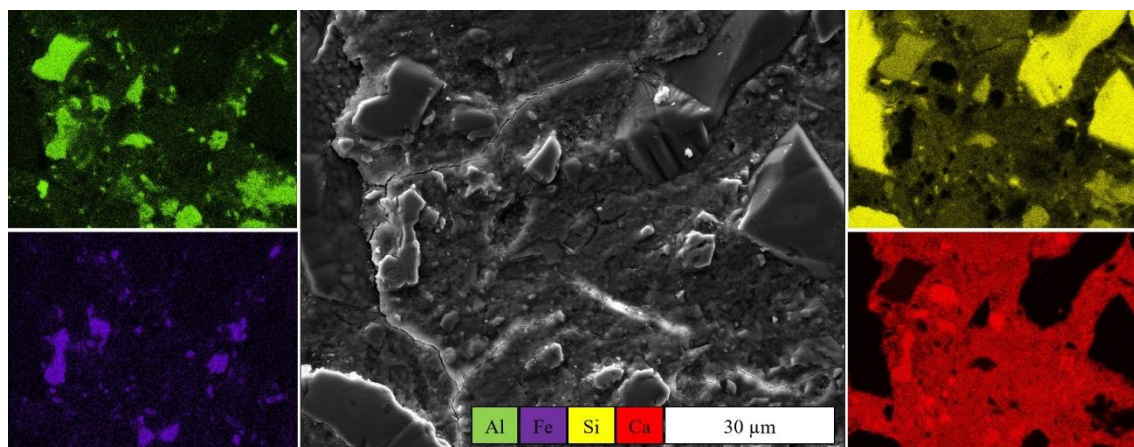


Figura 5.4 - Mapeamento químico (EDS) da argamassa de GN

As fases cristalinas do IOT e do gnaiss e estão apresentadas nas Figura 5.5 e Figura 5.6, respectivamente. O IOT apresenta caulinita, quartzo, goethita, hematita e magnetita. Por outro lado, o gnaiss e apresenta caulinita, albita, biotita e quartzo.

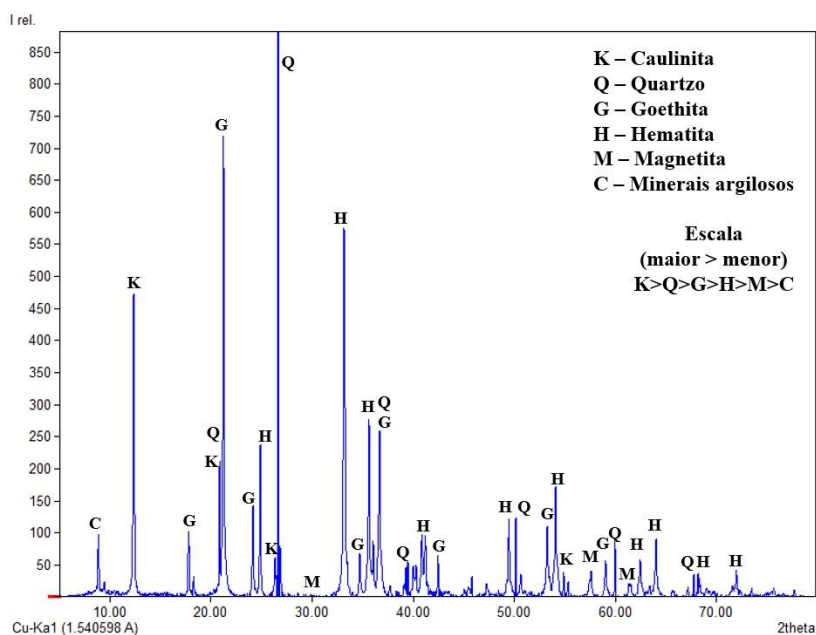


Figura 5.5 – DRX do material rejeito de minério de ferro

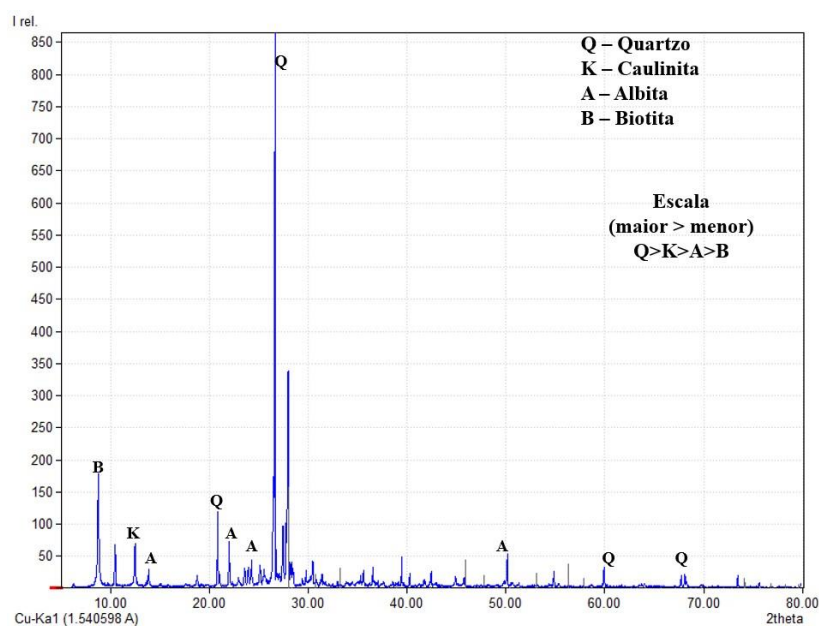


Figura 5.6 – DRX do material pó de pedra (Gnaiss)

5.2 Compósitos cimentícios

5.2.1 Determinação do traço

Na Figura 5.7 estão apresentados os resultados do método dos mínimos quadrados (MMQ) para diferentes proporções cimento/areia. A metodologia utilizada foi semelhantemente a pesquisa de Garcia, (2019). O traço com a curva mais ajustada, que apresentou os melhores resultados, foi o traço de 1:3 (cimento/areia), uma vez que apresentou os menores valores de MMQ. Vale destacar que para a areia, estabeleceu 0:75 para cada granulometria (Nº 16, Nº 30, Nº 50, Nº 100) da areia. Isso mostra que este traço apresenta curva de distribuição de tamanhos de partículas mais próximo à curva teórica de máximo empacotamento. O próximo passo foi determinar os teores de sílica ativa e de IOT (Figura 5.8). Observa-se que a utilização de 40% de IOT apresentou um dos valores mais baixos de MMQ, independente do teor de sílica ativa utilizado. Como a sílica ativa afeta a trabalhabilidade, decidiu-se adotar o valor de 25%. Assim sendo, o traço que apresentou a melhor curva e que se aproximou da curva ótima de Andreassen, foi em volume 1:0,25:0,4:3 (cimento: sílica ativa: IOT: areia). O teor de 40% de IOT foi o que obteve os melhores resultados nos trabalhos de Almada *et al.*, (2022) e CASTRO *et al.*, (2021).

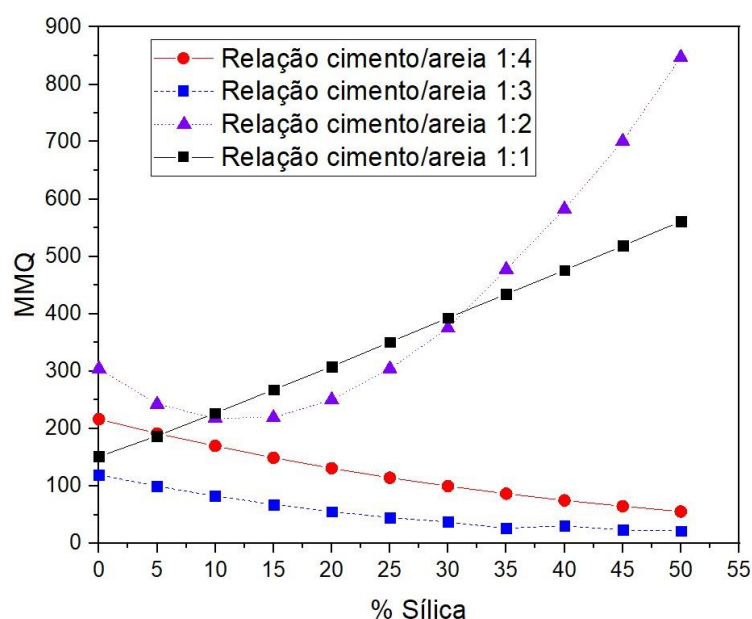


Figura 5.7 – Resultados dos MMQ da relação de cimento/areia em relação a sílica ativa.

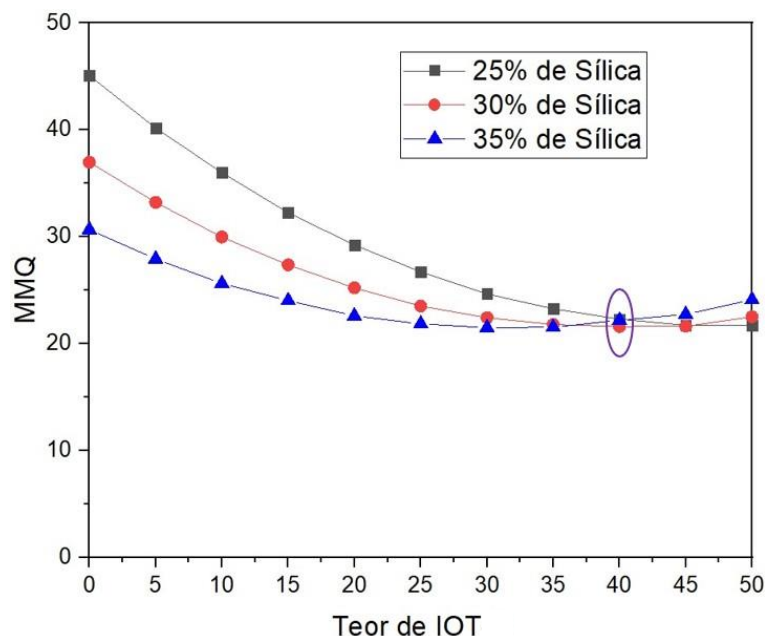


Figura 5.8 – Resultados dos MMQ da relação sílica ativa em relação aos teores de IOT.

Posteriormente, foi determinada a quantidade de aditivo superplastificante para obtenção de abatimento de 230 ± 10 mm com um fator água/cimento de 0,375. Testou-se outros fatores água/cimento como o de 0,35 e 0,40. Entretanto, o que apresentou o melhor abatimento, trabalhabilidade e consistência foi o de 0,375 a/c. Assim, a quantidade de cada material está apresentada na Tabela 5.5.

Tabela 5.5- Traços das amostras em volume

Amostra	Cimento	Areia	Sílica Ativa	IOT	Gnaise	Água (a/c)	Superplastificante
REF	1	3	25%	0%	0%	0,375	2%
GN	1	3	25%	0%	40%	0,375	3%
IOT	1	3	25%	40%	0%	0,375	3%
Consumo por m ³							
REF	515	1545	129	0	0	193	10
GN	479	1437	120	0	192	180	14
IOT	489	1467	122	196	0	183	15

5.2.2 Porosidade aberta

Os resultados da porosidade aberta para as argamassas podem ser visualizados na Figura 5.9. Verifica-se que os valores de porosidade foram parecidos aos 7 dias, IOT (3,42%), REF (3,28%) e GN (3,15%). Aos 28 dias, a amostra de IOT foi a que teve a

maior porosidade aberta (2,54%), sendo que a amostra REF teve o segundo maior valor (2,18%) e o menor foi a amostra GN (1,86% menor). Contudo, é possível observar que para o tempo de cura de 28 dias, o resultado da amostra com IOT foi bem inferior, a pesquisa de Almada *et al.*, (2022) obtiveram 13%. Esse baixo teor de porosidade pode ser devido a uma maior densificação da matriz da argamassa. Em relação ao tempo de cura de 112 dias, a amostra de REF teve o maior valor (2,12%) para porosidade aberta, seguido por IOT (1,64%) e GN (1,41% menor) com valores similares. Portanto, observa-se uma tendência ao longo da idade, que a amostra de IOT com 112 dias, tenha uma porosidade aberta menor do que a amostra de REF e fique próxima da amostra de GN.

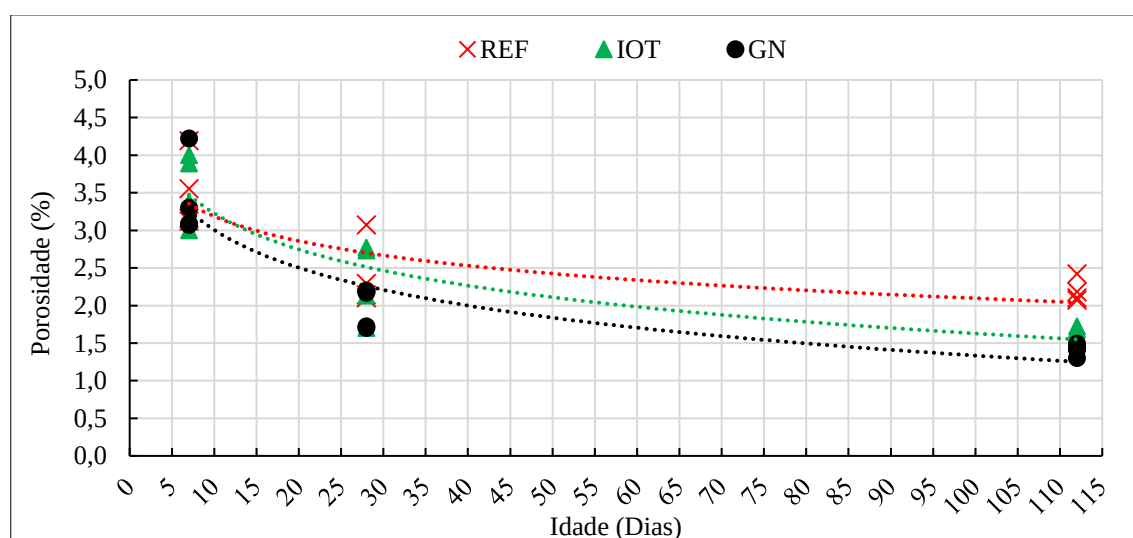


Figura 5.9 - Resultados da porosidade das amostras ao longo da idade

Na análise de variância estatística (ANOVA) e pelo teste de Tukey, as amostras nas idades de 7 e 28 dias são equivalentes estatisticamente para porosidade, conforme pode ser visualizado pelas Tabela 5.6 e Tabela 5.7 e também na Figura 5.9. Constata-se que o processo de empacotamento gerou uma argamassa com alta densificação e reduzida porosidade. Além disto, sugere-se que a presença das adições IOT e GN geram pontos de nucleação e efeito filler que aceleraram as reações químicas de hidratação do cimento e as pozolânicas da sílica ativa, com o passar do tempo. Consequentemente, isso provoca refino de poros e reduz a porosidade em idades avançadas (ALMADA *et al.*, 2022; ALMADA *et al.*, 2023). Contudo, na idade de 112 dias, a amostra de referência (REF) é diferente estatisticamente das amostras de rejeito (IOT) e de gnaiss (GN), assim como também a amostra de IOT é diferente estatisticamente da amostra de GN.

Constata-se que o processo de empacotamento gerou uma argamassa com alta densificação e reduzida porosidade. Além disto, sugere-se que a presença das adições IOT e GN geram pontos de nucleação e efeito *filler* que aceleraram as reações químicas de hidratação do cimento e as pozolânicas da sílica ativa, com o passar do tempo. Consequentemente, isso provoca refino de poros e reduz a porosidade em idades avançadas (ALMADA *et al.*, 2022; ALMADA *et al.*, 2023).

Tabela 5.6 - Resultados do método ANOVA para porosidade aberta (Pa) das amostras

Idade – 7 dias						
Fonte da Variação	SQ	GL	MQ	F	Valor-P	F-Crítico
Entre os grupos	0,042467	2	0,021233	0,083948	0,92019	4,256495
Dentro dos grupos	2,2764	9	0,252933			
Total	2,318867	11				
Idade – 28 dias						
Fonte da Variação	SQ	GL	MQ	F	Valor-P	F-Crítico
Entre os grupos	0,476717	2	0,238358	1,311783	0,316274	4,256495
Dentro dos grupos	1,63535	9	0,181706			
Total	2,112067	11				
Idade – 112 dias						
Fonte da Variação	SQ	GL	MQ	F	Valor-P	F-Crítico
Entre os grupos	1,300717	2	0,650358	53,33235	1,02E-05	4,256495
Dentro dos grupos	0,10975	9	0,012194			
Total	1,410467	11				

Tabela 5.7 - Teste de Tukey para porosidade aberta (Pa) das amostras

Idade – 7 dias			
	REF	IOT	GN
REF	-	Não - Significativo	Não - Significativo
IOT	Não - Significativo	-	Não - Significativo
GN	Não - Significativo	Não - Significativo	-
Idade – 28 dias			
	REF	IOT	GN
REF	-	Não - Significativo	Não - Significativo
IOT	Não - Significativo	-	Não - Significativo
GN	Não - Significativo	Não - Significativo	-
Idade – 112 dias			
	REF	IOT	GN
REF	-	Significativo	Significativo
IOT	Não - Significativo	-	Significativo
GN	Não - Significativo	Não - Significativo	-

Foi realizado também o quantitativo de poros das argamassas por meio de análise de imagens (Figura. 10). É possível observar que ambas as amostras com 7 dias (GN (6,54%), IOT (3,55%) e REF (2,98%)), apresentaram valores maiores do que os demais dias 28, 112. Para a idade de 28 dias, ambas as argamassas apresentaram uma porcentagem de poros semelhantes, REF (1,46%), IOT (1,49%) e GN (1,70%). O mesmo

ocorreu para as argamassas após 28 dias, no qual aumentaram a sua quantidade de poros, REF (1,68%) e GN (2,67%). Os dados encontrados por análise de imagens seguiram a mesma tendência dos valores obtidos pela porosidade aberta. Isso indica que a análise de imagens pode ser uma técnica alternativa para determinar poros em amostras cimentícias.

Essa redução da quantidade de poros do rejeito pode ser devido ao suas partículas finas, fazendo com que o empacotamento de partículas tenha ocorrido de forma mais densa e fazendo com que as partículas atuam como pontos de nucleação das partículas de rejeito de minério de ferro para precipitação e crescimento dos cristais no processo de cimentação. Corroborando com a análise de porosidade aberta, a granulometria e a área superficial das partículas de rejeito. Um motivo para o aumento do quantitativo de poros na argamassa de 112 dias de GN, pode ser devido ao erro de análises das imagens e tratamentos pelo software Image J. Uma vez que tem a escala de cinza, variando de 0 a 255, sendo que para próximo de 0, a cor preto e para próximo de 255 a cor branca. Considerou-se na escala de cinza, a faixa mais próxima de 0 para ser considerado poros. E pela quantidade de imagens tratadas, e como cada imagem tem a sua particularidade. Também outro fator pode ter influenciado, ser devido a mudança de aparelho do MEV. Imagens ilustrativas utilizadas para os cálculos da porosidade na idade de 28 dias estão apresentadas na Figura 5.11.

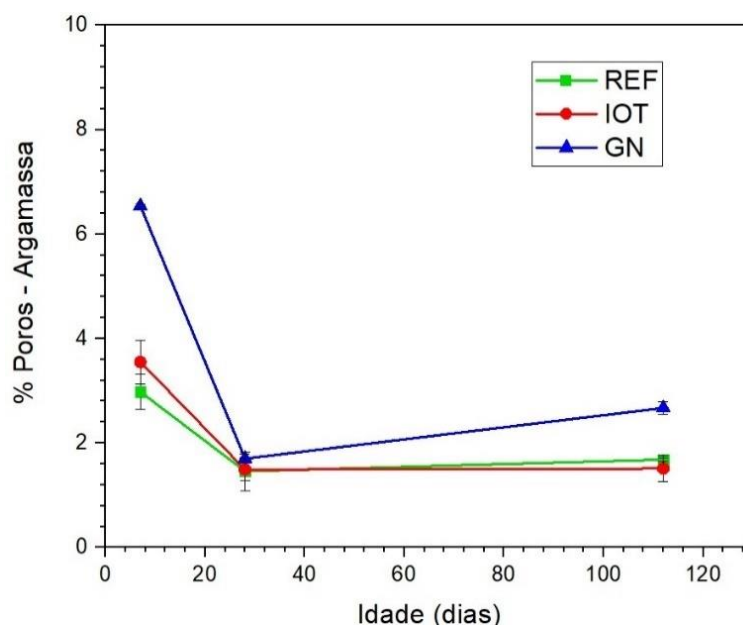


Figura 5.10 - Quantitativo da porcentagem dos poros das argamassas das amostras (REF, IOT e GN)

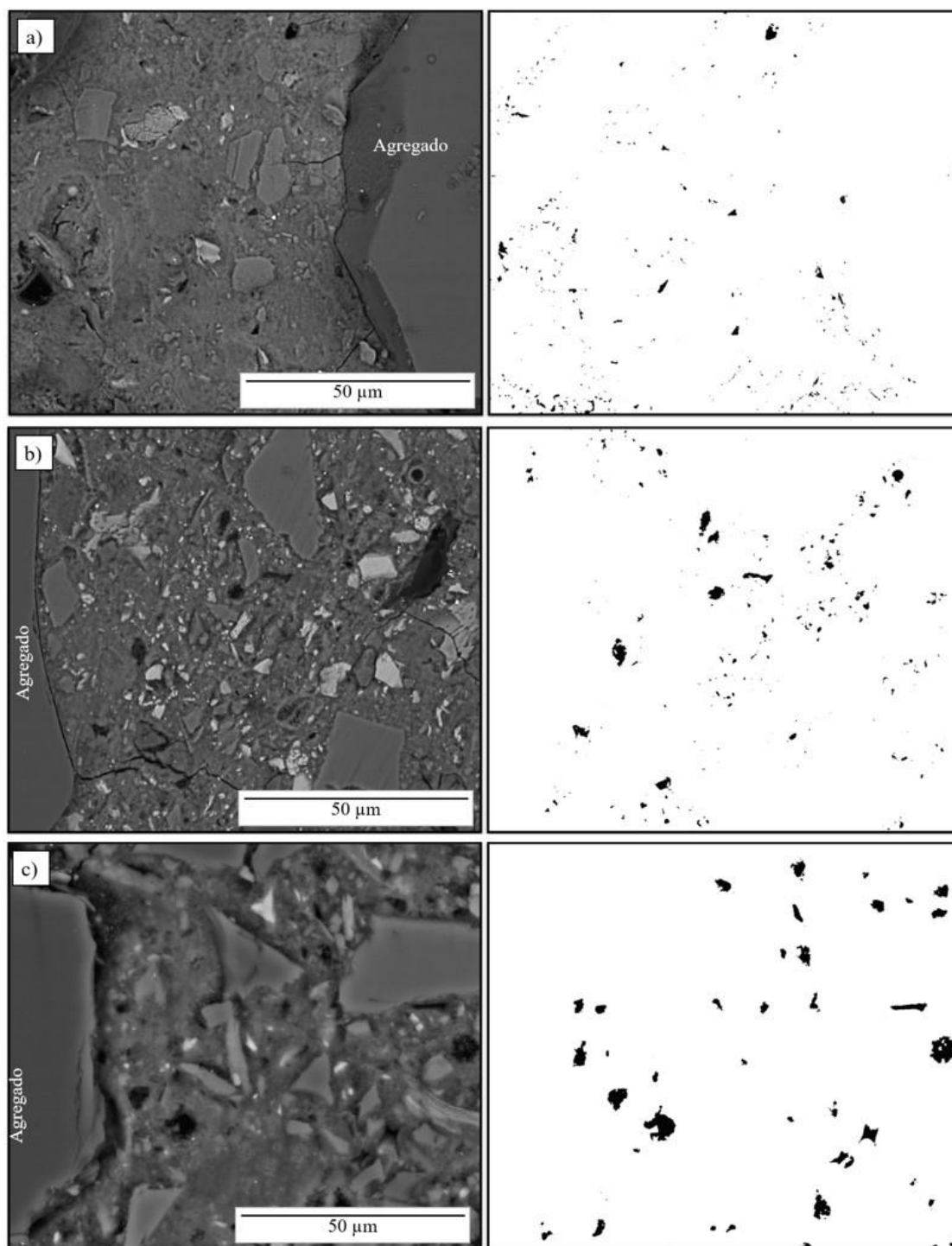


Figura 5.11 – Imagens de MEV-BSE e poros em imagem binária das amostras com idade de 28 dias (a) referência, (b) com IOT e (c) com gnaiss

5.2.3 Absorção de água por imersão

Os resultados de absorção de água por imersão estão apresentados na Figura 5.12. Para o tempo de cura de 7 dias, observa-se que os resultados obtidos de ambas as amostras

ficaram sobrepostos em alguns pontos, mas considerando a média delas, a amostra de REF teve o maior valor, sendo de 1,69%, seguido pela amostra de IOT (6,66% menor) e GN (9,47% menor). Para o tempo de cura de 28 dias, é possível observar que as três amostras apresentaram redução de absorção de água por imersão. Analisando o tempo de cura de 112 dias as amostras IOT e GN apresentaram redução da absorção de 33,01% 40,00% em comparação com a amostra REF, respectivamente. Percebe-se que a amostra de referência teve uma tendência de ter absorção maior, demonstrando o efeito benéfico da redução da porosidade devido as adições utilizadas.

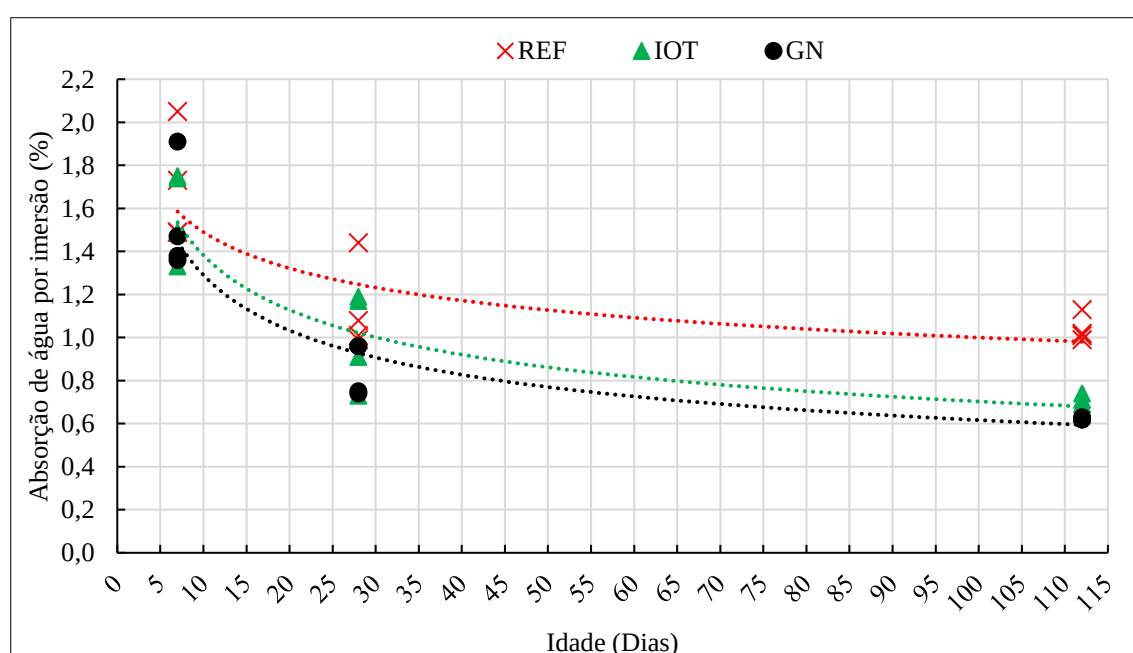


Figura 5.12 - Resultados de absorção de água por imersão das amostras ao longo da idade

Na análise de variância estatística (ANOVA) e pelo teste de Tukey, as amostras nas idades de 7 e 28 dias são equivalentes para absorção de água por imersão. Conforme pode ser visualizado pelas Tabelas 5.8 e Tabelas 5.9 e também na Figura 5.12. Contudo, na idade de 112 dias, para a absorção de água por imersão, a amostra de referência (REF) é diferente das amostras de rejeito de minério de ferro (IOT) e de gnaiss (GN), de acordo com a análise ANOVA. Ambas as amostras tiveram um comportamento similar ao longo da idade - reduzindo a absorção de água por imersão ao longo do tempo. Assim sendo, todas as amostras apresentaram bons resultados, sendo inferiores aos resultados de 24,34% (ALMADA *et al.*, 2022), 13,21% (CASTRO *et al.*, 2021) e 16,78% (MAGALHÃES *et al.*, 2020). Nos resultados de absorção de água por imersão tanto para

7, 28 e 112 dias de cura, todas as amostras apresentaram valores inferiores a 1,70%, sendo considerado um bom indicador de durabilidade, uma vez que é menor do que 10% (NEVILLE, 2016) e estando com um valor considerado bom, uma vez que é menor que 2% (COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON, 1989).

Tabela 5.8 – Resultados do método ANOVA para absorção de água por imersão (Ai) das amostras

Idade – 7 dias						
Fonte da Variação	SQ	GL	MQ	F	Valor-P	F-Crítico
Entre os grupos	0,054017	2	0,027008	0,453773	0,648999	4,256495
Dentro dos grupos	0,535675	9	0,059519			
Total	0,589692	11				
Idade – 28 dias						
Fonte da Variação	SQ	GL	MQ	F	Valor-P	F-Crítico
Entre os grupos	0,154217	2	0,077108	2,136129	0,174116	4,256495
Dentro dos grupos	0,324875	9	0,036097			
Total	0,479092	11				
Idade – 112 dias						
Fonte da Variação	SQ	GL	MQ	F	Valor-P	F-Crítico
Entre os grupos	0,39305	2	0,196525	102,5348	6,41E-07	4,256495
Dentro dos grupos	0,01725	9	0,001917			
Total	0,4103	11				

Legenda: SQ: soma dos quadrados, GL: grau de liberdade, MQ: quadrados médios, F: fator de tratamento,

Valor-P:

Tabela 5.9 – Teste de Tukey para absorção de água por imersão (Ai) das amostras

Idade – 7 dias			
	REF	IOT	GN
REF	-	Não - Significativo	Não - Significativo
IOT	Não - Significativo	-	Não - Significativo
GN	Não - Significativo	Não - Significativo	-
Idade – 28 dias			
	REF	IOT	GN
REF	-	Não - Significativo	Não - Significativo
IOT	Não - Significativo	-	Não - Significativo
GN	Não - Significativo	Não - Significativo	-
Idade – 112 dias			
	REF	IOT	GN
REF	-	Significativo	Significativo
IOT	Não - Significativo	-	Não - Significativo
GN	Não - Significativo	Não - Significativo	-

Ao comparar as misturas, tem-se que no tempo de cura de 7, 28 e 112 dias, a argamassa de rejeito com IOT teve uma redução da absorção de água por imersão de 6,66, 11,50 e 33,01%, respectivamente, em relação a amostra de referência. Percebe-se que a adição do IOT aumento a densificação da matriz e reduziu a conectividade dos poros (40,00% para IOT e 76,00% para GN em relação ao REF).

Comparando-se a amostras de GN e IOT, pode-se observar que com as idades de 7, 28, 112 dias, a amostra GN teve uma redução na sua absorção de água de 3,01; 14,75 e 10,79%, respectivamente. Observam-se valores bem semelhantes com o IOT, demonstrando que ambos podem atuar como filler com propriedades adequadas em relação a esta propriedade (ALMADA *et al.*, 2021; ALMADA *et al.*, 2023).

Analisando as variações entre as amostras GN e REF, pode-se observar que com o tempo de cura de 7, 28 e 112 dias, houve uma redução de 9,47%, 24,56% e 40,24% respectivamente, fazendo com que a amostras de gnaïsse absorvesse menor quantidade de água por imersão, logo serem as amostras com maior tendência de durabilidade.

5.2.4 Coeficiente de capilaridade

Os resultados do coeficiente de capilaridade das argamassas estão apresentados na Figura 5.13. Na análise de variância estatística (ANOVA) e pelo teste de Tukey, as amostras nas idades de 28 e 112 dias são equivalentes estatisticamente para coeficiente de capilaridade, conforme visualizado pelas Tabela 5.10 e Tabela 5.11 e na Figura 5.13. Contudo, na idade de 7 dias, para a coeficiente de capilaridade, a amostra de referência (REF) é diferente da amostra de gnaïsse (GN) e equivalente estatisticamente da amostra de rejeito (IOT), de acordo com a análise ANOVA (Tabela 5.10) e pelo teste de Tukey (Tabela 5.11).

Verifica-se que a argamassa de referência teve o maior coeficiente de capilaridade (0,10%) para 7 dias de cura, seguidos pela argamassa com IOT (0,06%) e gnaïsse (0,02%). Em relação a 28 dias, a amostra de IOT teve o maior coeficiente de capilaridade (0,07%), seguida pela GN (0,06%) e REF (0,05%). Ressalta-se que para o tempo de cura de 28 dias, os resultados de todas as amostras foram bem próximos entre si e com a bibliografia (ALMADA *et al.*, 2022; ALMADA *et al.*, 2022).

Já para o tempo de cura de 112 dias, as amostras de REF e IOT tiveram o mesmo resultado (0,04%) e a amostra de GN apresentou o maior resultado de 0,06%. Assim sendo, o aumento da capilaridade pode ter acontecido por causa do refinamento dos poros. O coeficiente de capilaridade é um indicativo para compreender e prever a durabilidade das argamassas (MARVILA *et al.*, 2017). Todos os resultados apresentaram valores

baixos, indicando que a conectividade dos poros é baixa, aumentando a durabilidade das amostras.

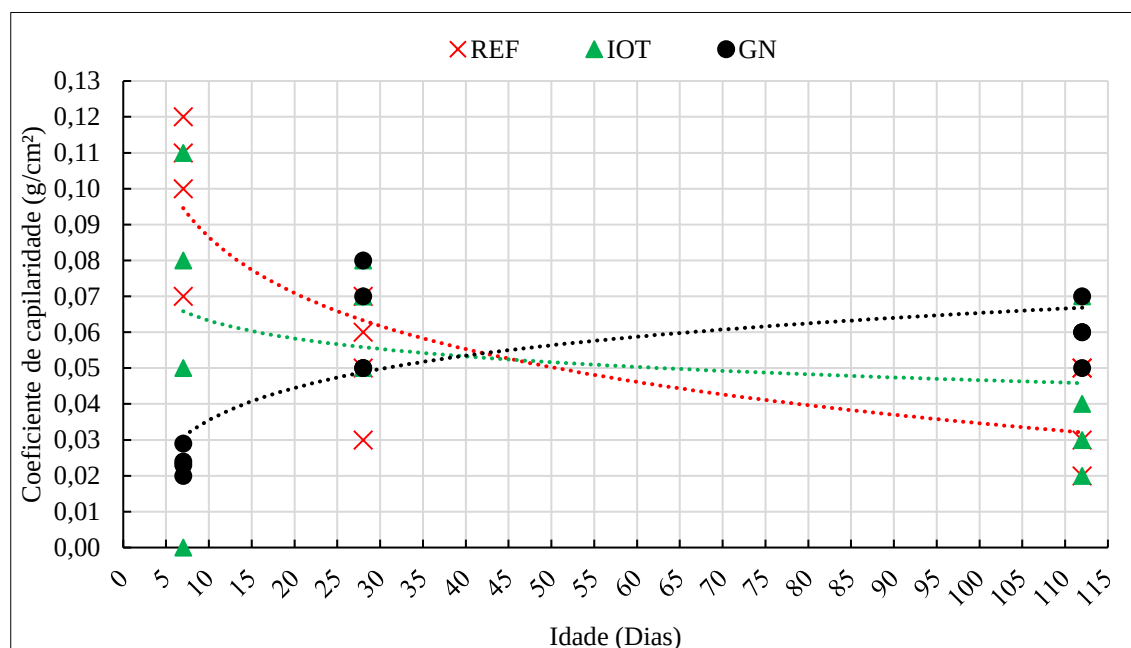


Figura 5.13 - Resultados do coeficiente de capilaridade das amostras ao longo da idade

Tabela 5.10 - Resultados do método ANOVA para coeficiente de capilaridade (C_c) das amostras

Idade – 7 dias						
Fonte da Variação	SQ	GL	MQ	F	Valor-P	F-Crítico
Entre os grupos	0,011563	2	0,005781	6,470032	0,018135	4,256495
Dentro dos grupos	0,008042	9	0,000894			
Total	0,019605	11				
Idade – 28 dias						
Fonte da Variação	SQ	GL	MQ	F	Valor-P	F-Crítico
Entre os grupos	0,000467	2	0,000233	1,037037	0,393285	4,256495
Dentro dos grupos	0,002025	9	0,000225			
Total	0,002492	11				
Idade – 112 dias						
Fonte da Variação	SQ	GL	MQ	F	Valor-P	F-Crítico
Entre os grupos	0,001217	2	0,000608	2,406593	0,145468	4,256495
Dentro dos grupos	0,002275	9	0,000253			
Total	0,003492	11				

5.2.5 Resistência à compressão

Os resultados da resistência à compressão das argamassas podem ser visualizados na Figura 5.14.

Tabela 5.11 - Teste de Tukey para coeficiente de capilaridade (Cc) das amostras

Idade – 7 dias			
	REF	IOT	GN
REF	-	Não - Significativo	Significativo
IOT	Não - Significativo	-	Não - Significativo
GN	Não - Significativo	Não - Significativo	-
Idade – 28 dias			
	REF	IOT	GN
REF	-	Não - Significativo	Não - Significativo
IOT	Não - Significativo	-	Não - Significativo
GN	Não - Significativo	Não - Significativo	-
Idade – 112 dias			
	REF	IOT	GN
REF	-	Não - Significativo	Não - Significativo
IOT	Não - Significativo	-	Não - Significativo
GN	Não - Significativo	Não - Significativo	-

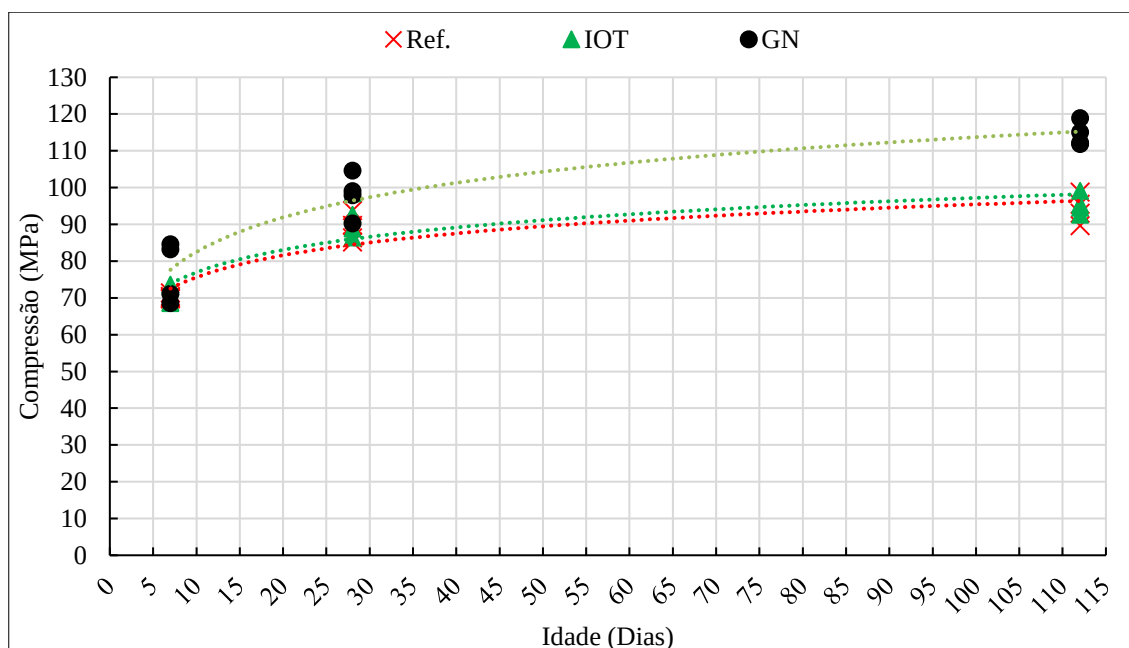


Figura 5.14 - Resultados da resistência à compressão das amostras ao longo da idade

Na análise de variância estatística (ANOVA) e pelo teste de Tukey, as amostras nas idades de 7 e 28 dias são equivalentes estatisticamente para resistência à compressão, conforme pode ser visualizado pelas Tabela 5.12 e Tabela 5.13 e na Figura 5.14. Contudo, na idade de 112 dias, para resistência à compressão, a amostra de referência (REF) é equivalente estatisticamente da amostra de rejeito (IOT). Também na idade de 112 dias, a amostra de gnaiss (GN) é diferente estatisticamente das amostras referência (REF) e de rejeito (IOT), de acordo com a análise ANOVA (Tabela 5.12) e pelo teste de Tukey (Tabela 5.13).

Tabela 5.12 - Resultados do método ANOVA para resistência à compressão das amostras

Idade – 7 dias						
Fonte da Variação	SQ	GL	MQ	F	Valor-P	F-Crítico
Entre os grupos	102,552	2	51,27601	2,022415	0,188199	4,256495
Dentro dos grupos	228,1847	9	25,35385			
Total	330,7367	11				
Idade – 28 dias						
Fonte da Variação	SQ	GL	MQ	F	Valor-P	F-Crítico
Entre os grupos	171,4658	2	85,73291	2,72117	0,119048	4,256495
Dentro dos grupos	283,5531	9	31,5059			
Total	455,0189	11				
Idade – 112 dias						
Fonte da Variação	SQ	GL	MQ	F	Valor-P	F-Crítico
Entre os grupos	1033,446	2	516,723	46,53425	1,8E-05	4,256495
Dentro dos grupos	99,9373	9	11,10414			
Total	1133,383	11				

Tabela 5.13 - Teste de Tukey para resistência à compressão das amostras

Idade – 7 dias			
	REF	IOT	GN
REF	-	Não - Significativo	Não - Significativo
IOT	Não - Significativo	-	Não - Significativo
GN	Não - Significativo	Não - Significativo	-
Idade – 28 dias			
	REF	IOT	GN
REF	-	Não - Significativo	Não - Significativo
IOT	Não - Significativo	-	Não - Significativo
GN	Não - Significativo	Não - Significativo	-
Idade – 112 dias			
	REF	IOT	GN
REF	-	Não - Significativo	Significativo
IOT	Não - Significativo	-	Significativo
GN	Não - Significativo	Não - Significativo	-

Pode-se verificar que a argamassa de gnaiss (GN) teve o melhor resultado para 7 dias de cura (76,88 MPa), sendo superior a amostra de rejeito de minério de ferro (8,27%) e a de referência (9,21%). O valor encontrado para 7 dias de cura, foi bem superior aos maiores valores encontrados por diversos autores, em suas pesquisas, como: 36,00 MPa de CASTRO *et al.* (2021); 38,90 MPa de MAGHALÃES *et al.*, (2021); 45,20 MPa de BEZERRA *et al.*, (2021); 33,11 MPa de TANG *et al.*, (2019), demonstrando a obtenção de argamassa de alta resistência já com 7 dias de idade.

Ao analisar as amostras com o tempo de 28 dias de cura, a amostra GN continua com o maior resultado (97,96 MPa) seguido pela argamassa com IOT com valor bem próximo (6,93%) e se distanciando de REF (10,37%). Assim sendo a amostra de IOT teve um aumento de seu desempenho de 3,22% em relação a amostra REF, e a amostra de GN

teve um aumento de 10,37% em relação a amostra de REF. Comparando as amostras de GN e IOT, a amostra de gnaïsse teve um ganho de sua resistência superior em 6,93% em relação a amostra de rejeito de minério de ferro, podendo considerar que com o tempo de cura de 28 dias, as três amostras apresentaram bons resultados. Corroborando com o resultado de Carvalho *et al.*, (2019) que obtiveram o valor 96,56 MPa. Comparando o resultado da amostra de IOT com 28 dias de cura, seu resultado de 91,62 MPa foi superior aos demais autores, como: 48,30 MPa de Almada *et al.*, (2022); 44,00 MPa de Castro *et al.*, (2021); 3,50 MPa de Morais *et al.*, (2021); 50,20 MPa de Magalhães *et al.*, (2021); 31,11 MPa de Guerra, (2014); 58,00 MPa de Huang *et al.*, (2013); 36,70 MPa de Carvalho *et al.*, (2020); 56,40 MPa de Bezerra *et al.*, (2021); 50,00 MPa de Tang *et al.*, (2019) e 52,30 MPa de Young; Yang (2019).

Ao avaliar as amostras com o tempo de 112 dias de cura, a amostra GN continua com o maior resultado (114,50 MPa) seguido pela argamassa com IOT com valor bem distante (19,99%) e se distanciando de REF (21,48%). Assim sendo a amostra de IOT teve um aumento de seu desempenho de 3,22% em relação a amostra REF, e a amostra de GN teve um aumento bem próximo de 1,24%. Comparando as amostras de GN e IOT, a amostra de gnaïsse teve um ganho de sua resistência bem superior, 19,99% em relação a amostra de rejeito de minério de ferro. Podendo considerar que com o tempo de cura de 112 dias, as três amostras, apresentaram excelentes resultados. Comparando o resultado da amostra de IOT com 112 dias de cura, e seu resultado de 95,42 MPa foi superior aos demais autores, que analisam com 91 dias, como: 66,00 MPa de Bezerra *et al.*, (2021) e 62,00 MPa de Xiong *et al.* (2017). Um dos motivos para o aumento da resistência a compressão da amostra de IOT da presente pesquisa pode ser devido ao empacotamento de partículas, e também a granulometria fina do rejeito de minério de ferro que pode ter atuado para geração de pontos de nucleação e promoção das reações da sílica ativa e do cimento.

5.2.6 Resistência à tração na flexão

Os resultados da resistência à tração na flexão dos materiais (REF, IOT e GN) e as variações em relação ao tempo e entre as misturas podem ser visualizados na Figura 5.15. Verifica-se que a argamassa com adição mineral de rejeito de minério de ferro (5,50 MPa)

teve o melhor resultado para 7 dias de cura, sendo superior a amostra de referência (18,71%) e do gnaíse (3,64%). Por outro lado, ao analisar as amostras com o tempo de 28 dias de cura, a amostra GN teve o maior resultado (6,56MPa), sendo que a amostra de IOT e REF tiveram um resultado próximo (7,43% e 10,32 menores, respectivamente). Pode-se considerar que com o tempo de cura de 28 dias, as três amostras, apresentaram resultados semelhantes. Todavia, ao analisar as amostras com tempo de cura de 112 dias, pode-se observar que a amostra GN teve um grande aumento (10,03 MPa) na resistência a tração na flexão, em comparação aos demais, que só chegaram a 8,26 MPa (21,42% menor) com IOT e 6,21MPa (61,43 menor) em REF. Este aumento das amostras com o tempo de cura de 112 dias, podem ser devido a reação da sílica ativa e da hidratação dos compósitos cimentícios promovidas pelos pontos de nucleação gerados pelos filers de GN e IOT (ALMADA *et al.*, 2023; DUARTE *et al.*, 2022).

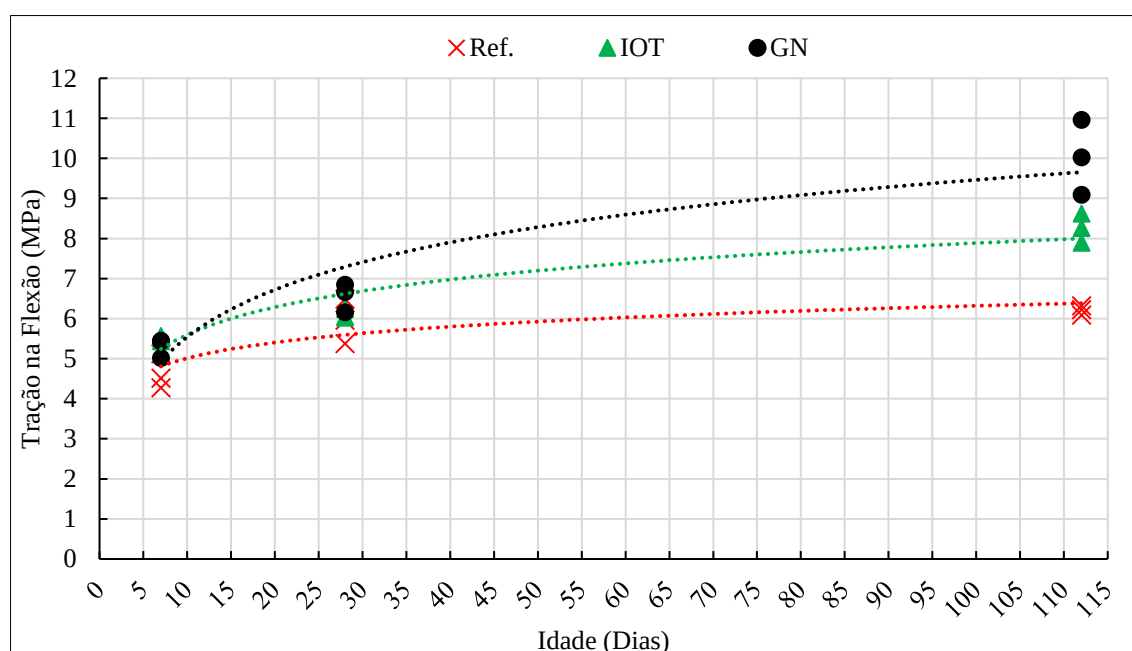


Figura 5.15 - Resultados da resistência à flexão na tração das amostras ao longo da idade

Na análise de variância estatística (ANOVA) e pelo teste de Tukey, a amostra nas idades de 28 dias são equivalentes estatisticamente para resistência à tração na flexão, conforme pode ser visualizado pelas Tabela 5.14 e Tabela 5.15 e na Figura 5.15. Contudo, na idade de 7 dias, a amostra de referência (REF) é diferente estatisticamente da amostra de rejeito (IOT). Também na idade de 112 dias, a amostra de referência (REF) é diferente

estatisticamente das amostras de rejeito (IOT) e gnaise (GN), assim como a amostra de rejeito (IOT) é diferente estatisticamente da amostra de gnaise (GN).

Tabela 5.14 - Resultados do método ANOVA para resistência à tração na flexão das amostras

Idade – 7 dias						
Fonte da Variação	SQ	GL	MQ	F	Valor-P	F-Crítico
Entre os grupos	1,23556	2	0,617778	7,244	0,02511	5,143253
Dentro dos grupos	0,511667	6	0,0852778			
Total	1,74722	8				
Idade – 28 dias						
Fonte da Variação	SQ	GL	MQ	F	Valor-P	F-Crítico
Entre os grupos	0,607289	2	0,303644	2,026548	0,212596	5,143253
Dentro dos grupos	0,899	6	0,149833			
Total	1,506289	8				
Idade – 112 dias						
Fonte da Variação	SQ	GL	MQ	F	Valor-P	F-Crítico
Entre os grupos	21,87007	2	10,93504	32,13798	0,000622	5,143253
Dentro dos grupos	2,041517	6	0,340253			
Total	23,91159	8				

Tabela 5.15 - Teste de Tukey para resistência à tração na flexão das amostras

Idade – 7 dias			
	REF	IOT	GN
REF	-	Significativo	Não - Significativo
IOT	Não - Significativo	-	Não - Significativo
GN	Não - Significativo	Não - Significativo	-
Idade – 28 dias			
	REF	IOT	GN
REF	-	Não - Significativo	Não - Significativo
IOT	Não - Significativo	-	Não - Significativo
GN	Não - Significativo	Não - Significativo	-
Idade – 112 dias			
	REF	IOT	GN
REF	-	Significativo	Significativo
IOT	Não - Significativo	-	Significativo
GN	Não - Significativo	Não - Significativo	-

Ao comparar com a pesquisa de Castro *et al.*, (2021), que também utilizaram o IOT como adição mineral, com 40% de rejeito de minério de ferro, com 7 dias, o seu resultado foi de 4,45 MPa. Assim sendo, o resultado da amostra de IOT da presente pesquisa teve o valor maior, 5,50 MPa, do que a pesquisa de Castro *et al.*, (2021).

Correlacionando o resultado obtido na presente pesquisa com 28 dias de cura com outros autores, considerando o maior valor de cada autor, a amostra com rejeito da presente pesquisa (6,10 MPa) foi superior de Moraes *et al.* (2021) (1,27 MPa) e similar aos de Castro *et al.* (2016) (16 MPa) e menor do que o de Young; Yang (2019) (8,31 MPa). O que pode estar associado, a melhor ancoragem das partículas as pastas de

cimento devido ao efeito da sílica ativa atuando com material pozolânico e a nucleação promovida pela adição de IOT que pode estar melhorando a hidratação dos compósitos cimentícios. Pode estar relacionado ainda, ao melhor empacotamento de partículas do rejeito de minério de ferro associado a um baixo fator a/c (0,375).

5.2.7 Resistividade elétrica superficial

Os resultados das misturas (REF, IOT, GN) obtidos da resistividade elétrica superficial e as variações em relação ao tempo e entre as misturas, podem ser visualizados na Figura 5.16 -. Para o tempo de cura de 7 dias, observa-se que os resultados obtidos das três amostras ficaram próximos (REF - 52,37 k Ω .cm, IOT - 44,70 k Ω .cm e GN - 36,83 k Ω .cm). Analisando as amostras com idade de cura de 28 dias, percebe-se um grande aumento da resistividade elétrica superficial (REF - 472,88 %, IOT - 363,09% e GN - 462,90%). Por outro lado, quando se analisa em relação ao tempo de cura de 112 dias, observa-se que a amostra GN teve o aumento de 441,80% (123 k Ω .cm) em relação aos 28 dias, seguido pela amostra IOT com aumento de 302,58 % (33 k Ω .cm). Já a argamassa REF apresentando o menor ganho neste período (126,67%) chegando ao valor 680 k Ω .cm.

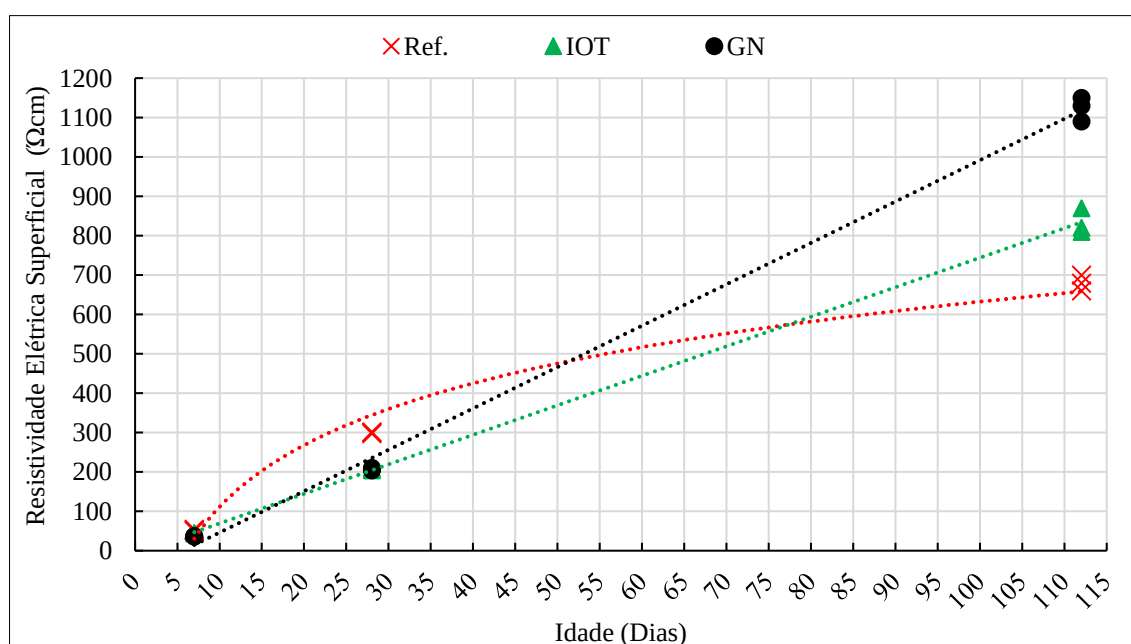


Figura 5.16 - Resultados da resistividade elétrica superficial das amostras ao longo da idade

Na análise de variância estatística (ANOVA) e pelo teste de Tukey, as amostras nas idades de 7 e 112 dias são todas estatisticamente diferentes entre si para resistividade elétrica superficial, conforme pode ser visualizado pelas Tabela 5.16 e Tabela 5.17 e Figura 5.16 - Contudo, na idade de 28 dias, a amostra de referência (REF) é diferente estatisticamente das amostras de rejeito (IOT) e gnaiss (GN), de acordo com a análise ANOVA (Tabela 5.16) e pelo teste de Tukey (Tabela 5.17).

Tabela 5.16 - Resultados do método ANOVA para a resistividade elétrica superficial das amostras

Idade – 7 dias						
Fonte da Variação	SQ	GL	MQ	F	Valor-P	F-Crítico
Entre os grupos	361,9467	2	180,9733	130,9293	1,12E-05	5,143253
Dentro dos grupos	8,293333	6	1,382222			
Total	370,24	8				
Idade – 28 dias						
Fonte da Variação	SQ	GL	MQ	F	Valor-P	F-Crítico
Entre os grupos	17236,22	2	8618,111	1020,566	2,52E-08	5,143253
Dentro dos grupos	50,66667	6	8,444444			
Total	17286,89	8				
Idade – 112 dias						
Fonte da Variação	SQ	GL	MQ	F	Valor-P	F-Crítico
Entre os grupos	304155,6	2	152077,8	192,7746	3,6E-06	5,143253
Dentro dos grupos	4733,333	6	788,8889			
Total	308888,9	8				

Tabela 5.17 - Teste de Tukey para a resistividade elétrica superficial das amostras

Idade – 7 dias			
	REF	IOT	GN
REF	-	Sginificativo	Sginificativo
IOT	Não - Significativo	-	Sginificativo
GN	Não - Significativo	Não - Significativo	-
Idade – 28 dias			
	REF	IOT	GN
REF	-	Sginificativo	Sginificativo
IOT	Não - Significativo	-	Não - Significativo
GN	Não - Significativo	Não - Significativo	-
Idade – 112 dias			
	REF	IOT	GN
REF	-	Sginificativo	Sginificativo
IOT	Não - Significativo	-	Sginificativo
GN	Não - Significativo	Não - Significativo	-

A microestrutura do concreto, está diretamente relacionada com a sua durabilidade (AGUIAR, 2018), uma vez que a resistividade elétrica é um ensaio não destrutivo e pode ser um método para avaliar a sua qualidade e durabilidade (LAYSSI *et al.*, 2015). Assim sendo, pode-se avaliar a durabilidade de estruturas feitas com estas argamassas (ou

concretos com estas adições) a partir do resultado da resistividade elétrica. Balestra *et al.*, (2020) estipulam uma faixa para o potencial de corrosão do concreto por meio da resistividade elétrica superficial, sendo estas faixas: muito alto, para valores menores do que 5 k Ω .cm; alto para valores entre 5 k Ω .cm e 9 k Ω .cm; moderada entre 9 k Ω .cm e 17 k Ω .cm; baixo entre 17 k Ω .cm e 41 k Ω .cm; muito baixo 41 k Ω .cm e 220 k Ω .cm e insignificante para valores maiores do que 220 k Ω .cm. Assim sendo, os resultados da presente pesquisa tiveram bons resultados para a resistividade elétrica superficial, a amostra de IOT teve o valor de 44,70 k Ω .cm para 7 dias e 207 k Ω .cm para 28 dias, estando na faixa de potencial de corrosão muito baixa, de acordo com Balestra *et al.*, (2020). Para o tempo de cura de 112 dias, o valor foi de 833 k Ω .cm, estando na faixa de potencial de corrosão insignificante, de acordo com Balestra *et al.*, (2020).

Em relação a comparação das amostras de GN e IOT, é possível observar que para o tempo de cura de 7 dias, a amostra de GN teve um valor menor, -17,60% em comparação a amostra de IOT. Com o tempo de cura de 28 dias, ambas as amostras GN e IOT tiveram uma variação desprezível, 0,16%. Contudo, com o tempo de cura de 112 dias, a amostra GN teve um ganho na sua resistividade elétrica, superando a amostra IOT, em 34,80%. Tal resultado demonstra que a conectividade dos poros (Figura 5.16) foi bem menor na amostra com GN, impedindo a passagem da água por onde a corrente elétrica tenderia a passar. Quando as amostras GN e REF são comparadas, é possível observar que a argamassa com gnaïsse teve um melhor desempenho, com aumento de 65,20%.

5.2.8 Resistividade elétrica volumétrica

A Figura 5.17 mostra os resultados das argamassas (REF, IOT, GN) obtidos da resistividade elétrica volumétrica em relação ao tempo. Para o tempo de cura de 28 dias, observa-se que a argamassa REF apresentou o maior resultado (1.360 Ω .m), seguido por IOT (1.077 Ω .m) e GN (1.024 Ω .m). Assim sendo, as argamassas de IOT e GN apresentaram resultados parecidos. Para a análise de 112 dias, todas as argamassas atingiram o máximo que o aparelho consegue medir 1.973 Ω .m. Não podemos saber qual argamassa apresentou o maior valor e qual seria este valor. Entretanto, como os valores de resistividade elétrica volumétrica são analisados por faixas de níveis de penetração de cloretos, e este valor de 1.973 Ω .m se encontra na faixa de muito baixa para penetração

de cloretos. Ambas as argamassas apresentaram uma boa durabilidade, se tratando de resistividade elétrica volumétrica.

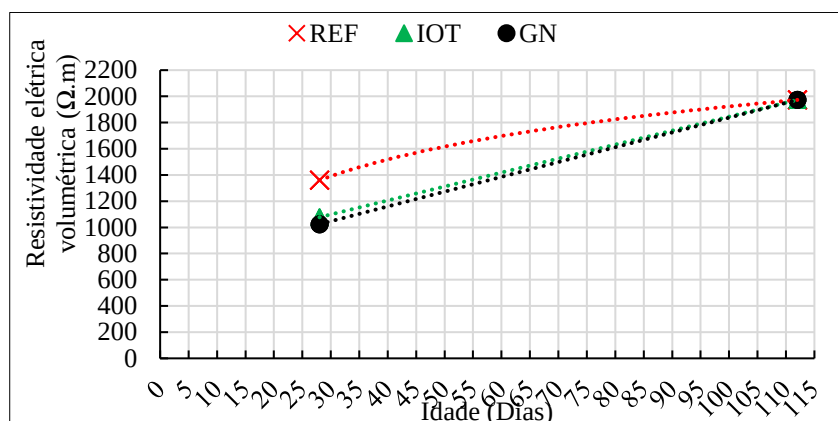


Figura 5.17 Resultados da resistividade elétrica volumétrica das amostras ao longo da idade

A resistividade elétrica volumétrica tem uma grande importância para a avaliação da sua durabilidade (HORNBOSTEL *et al.*, 2013). De acordo com a norma TP 95 (AASHTO, 2014), que também estabelece algumas faixas dos níveis de penetração de cloretos, pode-se classificar como: alto, para valores menores que 120 $\Omega.m$; moderado, para as faixas de 120 $\Omega.m$ e 210 $\Omega.m$; baixo, para as faixas de 210 $\Omega.m$ e 370 $\Omega.m$; muito baixa, para as faixas de 370 $\Omega.m$ e 2.540 $\Omega.m$; e insignificante, para faixas maiores do que 2.540 $\Omega.m$. Os valores obtidos na presente pesquisa foram de 1.077 $\Omega.m$ para a amostra IOT e 1.024 $\Omega.m$ para o GN. Sendo considerado como muito baixo para a penetração de cloretos, de acordo com a TP 95 (AASHTO, 2014). Correlacionando com os resultados de outros autores que utilizaram rejeito de minério de ferro, Almada *et al.*, (2023) obtiveram maior resultado 36 $\Omega.m$ para o tempo de cura de 28 dias, entretanto, na presente pesquisa o resultado do IOT para o tempo de 28 dias de cura, foi de 1.077 $\Omega.m$. Esta diferença pode ter ocorrido, em relação a finura das partículas de rejeito, fazendo com que o empacotamento de partículas fosse mais denso, gerando uma maior densificação da matriz da argamassa e menor quantidade de poros. Portanto, uma menor conectividade destes poros. Não foi possível realizar o ensaio com 7 dias, devido ao aparelho não estar funcionando.

O fator a/c pode ter levado ao bom resultado na resistividade elétrica da presente pesquisa, uma vez que o fator a/c foi de 0,375 e sendo menor do que a pesquisa de Almada (2021), 0,50 a/c. Assim sendo, quanto menor a quantidade de água na relação a/c, menor

será a quantidade de poros e suas interligações, causando uma maior resistividade elétrica (SANTOS, 2006). Outro motivo que pode ter levado a uma resistividade elétrica elevada, foi a adição de 25% de sílica ativa. Uma vez que a sílica ativa causa um efeito de refinamento dos poros e a redução da permeabilidade do concreto. Vale destacar que a sílica ativa tem reações de hidratação mais progressiva com o tempo, fazendo com o que a resistividade elétrica aumente (MEDEIROS; LIMA, 2016).

Portanto, a resistividade elétrica superficial e volumétrica, em ambas as amostras, apresentaram bons resultados e fazem com que a argamassa tenha uma boa durabilidade, corroborando os demais indicadores de durabilidade, como porosidade, absorção de água por imersão e resistência mecânicas, em que todos tiveram bons resultados.

5.2.9 Análise das fases hidratadas

O quantitativo das fases anidras das argamassas das amostras estão nas Figura 5.18 e Figura 5.19. Visualiza-se que as argamassas entre 7 dias e 28 dias de cura tiveram uma tendência de redução de quantidade de fases anidras. Entretanto, as argamassas de REF e IOT tiveram uma variação maior nesta redução, sendo o REF (5,77%) para (3,56%) e o IOT (4,92%) para (3,50%). Todavia, para o tempo ao longo da idade de 28 dias para 112 dias, as amostras de IOT e REF se estabilizaram em 3,20% e 3,38%. Por outro lado, a amostra de GN foi a que teve a maior variação na redução ao longo de 28 para 112 dias, sendo de 4,73% para 2,64%, conforme mostram as Figura 5.18 e Figura 5.19.

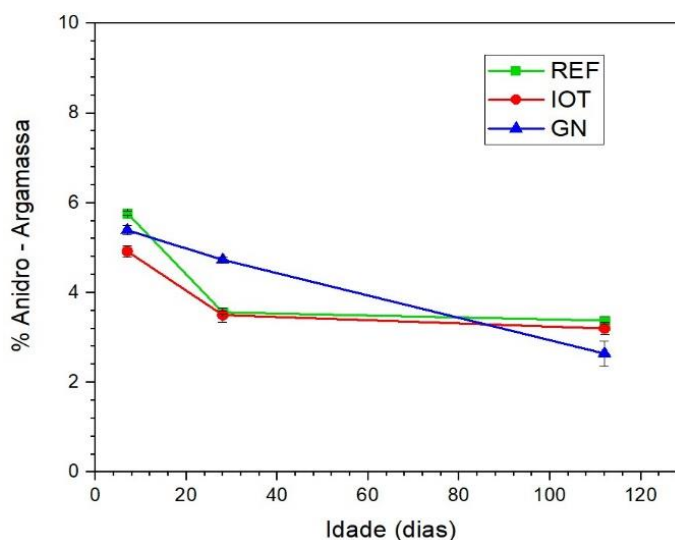


Figura 5.18 – Quantitativo da porcentagem das fases anidras das amostras (REF, IOT e GN)

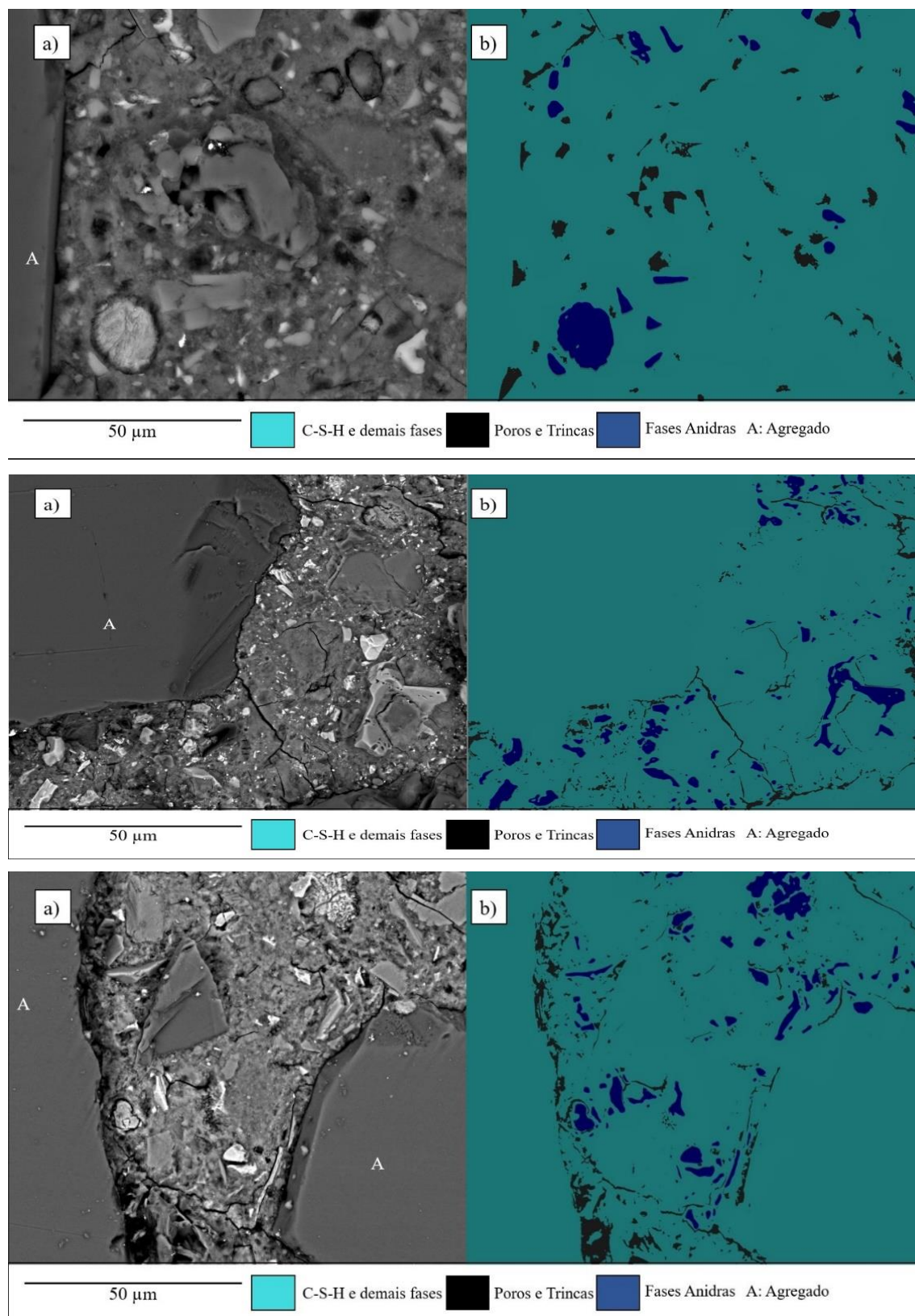


Figura 5.19 – (a) imagem MEV (b) imagem tratada com ênfase na identificação da fase anidra das argamassas com REF, IOT e GN aos 112 dias.

Este resultado corrobora o comportamento mecânico registrado ao longo do tempo, no qual se observou aumento da compressão mais acentuado para as argamassas com GN. Nesta, constata-se maior reação dos compostos reduzindo as fases não hidratadas, ou seja, aparentemente o GN potencializou a reatividade de sílica ativa. O IOT permitiu maximizar as reações de nucleação do cimento, todavia não foi mais discreto em relação a presença de sílica ativa. Faz-se necessário estudos adicionais para aprofundar tais observações.

Na Figura 5.20 é possível visualizar as perdas de massa de hidróxido de cálcio (CH) e carbonato de cálcio (CC) das amostras ao longo do tempo (7, 28 e 112 dias) segundo análise de termogravimetria (TG/DTA). Observa-se que tanto o hidróxido de cálcio como o carbonato de cálcio aumentaram a longo do tempo. Contudo, esse aumento foi maior nas amostras com gnaiss ou com IOT. Isso indica que esses materiais podem ter funcionado como pontos de nucleação favorecendo a hidratação do cimento Portland. Isso pode ser verificado também nas análises de imagens, que mostra a tendência de redução maior das partículas anidras nas amostras com adição de GN ou IOT, ao longo do tempo.

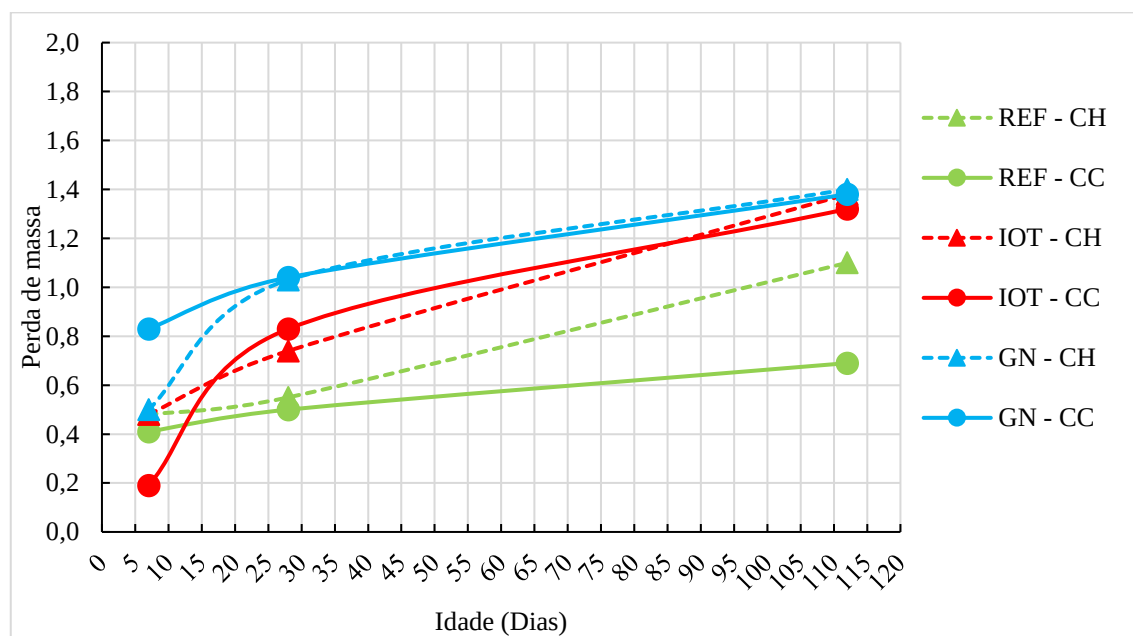


Figura 5.20 - Resultado da termogravimetria (TG/DTA) das argamassas (REF, IOT e GN) sobre a perda de massa ao longo do tempo.

Legenda: CH: hidróxido de cálcio, CC: carbonato de cálcio

6 CONCLUSÕES

Este estudo apresentou que ao utilizar o rejeito de minério de ferro *in natura* como adição mineral, por meio do empacotamento de partículas pode gerar argamassas estruturais de alto desempenho.

Pode-se concluir acerca das propriedades analisadas:

- As características físicas (granulometria aproximada de 4,7 μm , área superficial de 35,133 m^2/g , densidade de 3,85 g/cm^3) e químicas (48% de Fe_2O_3 e 21,20% de SiO_2) do rejeito de minério de ferro (IOT) podem influenciar na produção das argamassas.
- As características dos materiais e o processo de empacotamento gerou argamassas com alta densificação e reduzida porosidade (menor que 5% nas primeiras idades e menor que 3% nas idades mais avançadas), uma vez que os valores foram bem baixos.
- A percolação de água foi reduzida com inserção das adições minerais devido ao efeito filler de redução da interconectividade dos poros, corroborado para baixa absorção de água por imersão (0,68% com um tempo de cura de 112 dias - sendo 32,50% menor que REF) e muito baixo coeficiente de capilaridade (0,04% em 112 dias).
- Estes levaram a melhorias das propriedades mecânicas como maximização das resistências à compressão (95,42 MPa), resistência à tração na flexão (8,26 MPa) e aumento da durabilidade, com resistividade elétrica superficial e volumétrica apresentaram valor elevados de 833 $\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$ e 1.973 $\Omega\cdot\text{m}$, respectivamente aos 112 dias de cura. Resultados associados a melhor ancoragem das partículas as pastas de cimento devido ao efeito da sílica ativa atuando com material pozolânico, a nucleação promovida pela adição de IOT que pode estar melhorando a hidratação dos compósitos cimentícios, ao melhor empacotamento de partículas do rejeito de minério de ferro e a um baixo fator a/c (0,375).
- Na análise de quantitativos de fases anidras, a argamassa de IOT teve um valor de 3,20% com 112 dias de cura, sendo -5,30% menor do que a argamassa de referência, demonstrando que melhorou a nucleação e promoção das reações de hidratação do cimento. O que corroborou com a análise de termogravimétrica TG/DTA na qual a argamassa com IOT, perdeu 1,38 mg de hidróxido de cálcio (25% maior que REF) e 1,32 mg de massa de carbonato de cálcio ao longo de 112 dias (91% maior que REF)

Identifica-se uma tendência de melhor hidratação tanto do cimento quanto da reação pozolânica da sílica ativa nas argamassas ao longo da idade. Fazendo com que o empacotamento de partículas ocorresse de forma mais eficiente, gerando uma maior densificação da matriz e redução dos poros. Isto gerou argamassas com excelente desempenho mecânico e excelentes resultados em relação a durabilidade. Comprova-se que é possível obter argamassas de alta resistência com adição de rejeito de minério de ferro *in natura*.

A seguir, são apresentadas sugestões para continuidade do trabalho, no intuito de avaliar certas influências em argamassas estruturais de alto desempenho com adição de rejeito de minério de ferro *in natura*.

- Avaliação das propriedades mecânicas e durabilidade em idades mais avançadas, 180 dias e 365 dias.
- Avaliação das propriedades mecânicas e indicadores de durabilidade com um teor de sílica ativa diferentes, como 30%, 35% e 40%.
- Estudo dos compostos hidratados em idades mais avançadas, 180 dias e 365 dias.
- Estudar outros IOTs com granulometrias distintas e avaliar se podem influenciar as respectivas propriedades.
- Estudo das propriedades mecânicas e indicadores de durabilidade em diferentes processos de cura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AARÃO, G. M. **Caracterização mineralógica e tecnológica de feldspatos piroexpansíveis de pegmatitos do distrito de Conselheiro Pena**, MG. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 154 p., 2015.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO: TP 95**. Standard Method of Test for Surface Resistivity Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. 2014.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). **Anuário Mineral Brasileiro – Principais substâncias metálicas**. Brasília-DF, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro/PreviaAMB2022.pdf>. Acesso em: 29/25/2023.

AGUIAR, L. C. DE. **Os efeitos da variação de temperatura nas medidas de resistividade elétrica superficial do concreto**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 103 p., 2018.

ALMADA, B. S.; CANCIO, A. S.; DUARTE, M. S. et al. Reuso de rejeito de minério de ferro em compósitos cimentícios. In: VI Congresso de Engenharia Civil, 2019, Juiz de Fora. **Anais [...]**. Juiz de Fora: Templo, 2019. v. 1, p. 136-149, mai. 2019. Disponível em: <https://www.ufjf.br/congressodeengenharia/anais-vi-conenge-2019/>. Acesso em: 12 abr. 2020.

ALMADA, B. S. **Influência da heterogeneidade de rejeitos de minério de ferro utilizados como adição mineral nas propriedades de microconcretos**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 135 p., 2021.

ALMADA, B. S. et al. Study of mechanical, durability and microstructural properties of cementitious composite with addition of different iron ore tailings from Brazil. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 18, p. 1947–1962, 2022.

ALMADA, B. S. et al. Evaluation of the microstructure and micromechanics properties of structural mortars with addition of iron ore tailings. **Journal of building engineering**. v. 63, p. 105405, 2023.

ANDRADE, B. D. de. **Estudo da obtenção de geopolímero a partir de aluminossilicato sintetizado via sol-gel**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 75 p., 2019.

ANDRADE, L. C. R., **Caracterização de rejeitos de mineração de ferro, in natura e segregados, para aplicação como material de construção civil**. Tese (Doutorado), Universidade Federal de Viçosa, 2014.

APAZA, F. R.; GUIMARÃES, A. C. R.; VIVONI, A. M. *et al.* Evaluation of the performance of iron ore waste as potential recycled aggregate for micro-surfacing type cold asphalt mixtures. **Construction And Building Materials**. v. 266, p. 121020, jan. 2021.

ARISTIMUNHO, P. B.; BERTOCINI, S. R. Aplicação de lama de minério de ferro em forma de pó na presença de cimento portland. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 5, n. 2, p. 153–165, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS: **ABNT NBR 10007**: Amostragem de Rejeitos sólidos – Rio de Janeiro, 2004.

____ **ABNT NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos, Rio de Janeiro, 2018.

____ **ABNT NBR 7214**: Areia normal para ensaio de cimento - Especificação, Rio de Janeiro, 2015.

____ **ABNT NBR 7215**: Cimento Portland — Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos, Rio de Janeiro, 2019.

____ **ABNT NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica, Rio de Janeiro, 2005.

____ **ABNT NBR 9779**: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão, Rio de Janeiro, 2012.

____ **ABNT NBR 11768**: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Parte 1: Requisitos, Rio de Janeiro, 2019.

____ **ABNT NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Determinação do índice de consistência, Rio de Janeiro, 2016.

____ **ABNT NBR 12142**: Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de provas prismáticos, Rio de Janeiro, 2010.

BALESTRA, C. E. T., et al.. Evaluation of chloride ion penetration through concrete surface electrical resistivity of field naturally degraded structures present in marine environment. **Construction and Building Materials**, 230, 116979. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116979>

BARRETO, P. B. **Caracterização e concentração do minério de cobre da mineração caraíba**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 113 p., 2015.

BASTOS, L. A. de. C. **Utilização de rejeito de barragem de minério de ferro como matéria prima para infraestrutura rodoviária**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 113 p., 2013.

BASTOS, L. A. D. C.; SILVA, G. C.; MENDES, J. C. *et al.* Using Iron Ore Tailings from Tailing Dams as Road Material. **Journal Of Materials In Civil Engineering**. v. 28, n. 10, p. 04016102-9, out. 2016.

BEZERRA, C. G.; ROCHA, C. A. A.; SIQUEIRA, I. S. *et al.* Feasibility of iron-rich ore tailing as supplementary cementitious material in cement pastes. **Construction and Building Materials**, v. 303, p. 124496-10, out. 2021.

BOCCAMINO, Guilherme Denardi. **Desenvolvimento de geometria para empilhamento de rejeito desaguados de minério de ferro: estudo de caso para os rejeitos gerados na instalação de tratamento de minérios itabiríticos (ITM-I) em operação na Mina do Pico**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 110 p., 2017.

BORGES, P, H, R. *et al.* Estudo comparativo da análise de ciclo de vida de concretos geopoliméricos e de concretos à base de cimento Portland composto (CP II). **Ambiente Construído**. v. 14, n. 2, p. 153-168, jun 2014.

BORGES, P. H. R *et al.* Reuse of iron ore tailings in the production of geopolymer mortars, **Revista Escola de Minas, International Engineering Journal**, Ouro Preto, v. 72, n. 4, p. 581-587, 2019.

BRAGA, A. L. C. **Simulação numérica acoplada, via mef, da construção de um depósito de rejeito de minério de ferro**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 84 p., 2016.

BRASIL, 2015, **Desempenho do setor mineral em 2020 supera expectativas**. Disponível em: <https://www.gov.br/pt-br/noticias/financas-impostos-e-gestao-publica/2021/02/desempenho-do-setor-mineral-em-2020-supera-expectativas#:~:text=O%20aumento%20foi%20de%2031,%24%2032%20bilh%C3%B5es%2C%20em%202020>. Acesso em: 13/04/2021.

CAMPOS, H. F. *et al.* Eco-efficient concrete, optimized by Alfred's particle packing model, with partial replacement of Portland cement by stone powder. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 15, n. 2, p. 18–32, 2022.

CARMIGNANO, O. *et al.* Iron Ore Tailings: Characterization and Applications. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 00, n. 00, p. 1–17, 2021.

CARVALHO EUGÊNIO, T. M. *et al.* Study on the feasibility of using iron ore tailing (iot) on technological properties of concrete roof tiles. **Construction and Building Materials**, v. 279, p. 122484, abr. 2021.

CARVALHO, J. M. F. D.; DEFAVERI, K.; MENDES, J. C. *et al.* Influence of particle size-designed recycled mineral admixtures on the properties of cement-based composites. **Construction and Building Materials**, v. 272, November, 2020.

CARVALHO, J. M. F. et al. More eco-efficient concrete: An approach on optimization in the production and use of waste-based supplementary cementing materials. **Construction and Building Materials**, v. 206, p. 397–409, 2019.

CARVALHO, W. D. S. de. **Sistema de disposição compartilhada de estéreis e rejeitos desaguados da mina de Fernandinho**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 161 p., 2017.

CARRASCO, E. V. M., MAGALHÃES, M. D. C., SANTOS, W. J. D., ALVES, R. C., MANTILLA, J. N. Characterization of mortars with iron ore tailings using destructive and nondestructive tests. **Construction and Building Materials**, v. 131, p. 31–38, 2017.

CASTRO, A. L. DE; PANDOLFELLI, V. C. Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. **Cerâmica**, v. 55, n. 1, p. 18–32, 2009.

CASTRO, N. L. B. de.; ALMADA, B. S.; FAJARDO, A. A. *et al.* Influence of Addition Contents of Iron Ore Tailings on Structural Mortar. **Journal of Management and Sustainability**. v. 11, n. 1, p. 74, 2021.

CANCIO, A. S.; COELHO, J. R. C.; DUARTE, M. et al. Study of the Reuse of Iron Ore Tailing in Cementitious Compounds. **International Journal of Science and Engineering Investigations**. v. 7, n. 77, p. 77, jun. 2018.

CHÁCARA, D. M. **Reologia de depósitos de rejeitos espessados de minério de ferro para estudos de dam break**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 150 p., 2020.

CHINNAPPA, G. B; KARRA, R. C. Experimental and Statistical Evaluations of Strength Properties of Concrete with Iron Ore Tailings as Fine Aggregate. **Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste**, v. 24, n. 1, p. 04019038, 2020.

COMITÉ EUROPEU DE NORMALIZAÇÃO. **NP EN 12390-3**: Ensaio de Concreto Endurecido – Resistência à compressão dos corpos de prova de ensaio, Portugal, 2009.

CORDEIRO, L. C. A. **Caracterização de rejeito de beneficiamento de minério de ferro em faixas ultrafinas antes e após tratamento térmico**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 117 p., 2014.

COSTA, A. V.; GUMIERI, A. G.; BRANDÃO, P. R. G., Interlocking concrete blocks produced with sinter feed tailings, **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 7, n. 2, p. 228-259, 2014.

COSTA, J. C. V. **Caracterização do itabirito dolomítico da Mina de Conceição, visando aproveitamento como matéria-prima na siderurgia**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 90 p., 2013.

COUTO, F. R.; FERREIRA, A. de M.; PONTES, P. P. *et al.* Physical, chemical and microbiological characterization of the soils contaminated by iron ore tailing mud after Fundão Dam disaster in Brazil. **Applied Soil Ecology**. v. 158, p. 103811, fev. 2021.

CUNHA, A. A. **Caracterização tecnológica e estudo termomagnético de rejeitos de minério de ferro**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 96 p., 2015.

CUNHA, F. R. da. **Influência de parâmetros experimentais na granulação de minério de ferro**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 100 p., 2018.

DAS, S. K.; KUMAR, S.; RAMACHANDRARAO, P. Exploitation of iron ore tailing for the development of ceramic tiles. **Waste Management**, v. 20, n. 8, p. 725–729, dez. 2000.

DAUCE, P. D. **Caracterização tecnológica de rejeito de jigagem de minério de ferro**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 155 p., 2017.

DEFÁVERI, K, C, S.; SANTOS, L, F.; CARVALHO, J, M, F. *et al.* Iron ore tailing-based geopolymer containing glass wool residue: a study of mechanical and microstructural properties: A study of mechanical and microstructural properties. **Construction And Building Materials**. v. 220, p. 375-385, set. 2019.

DONG, G.; TIAN, G.; GONG, L.; TANG, Q.; LI, M.; MENG, J.; LIANG, J. Mesoporous zinc silicate composites derived from iron ore tailings for highly efficient dye removal: Structure and morphology evolution. **Microporous and Mesoporous Materials**, vol. 305, p. 110352, jun. 2020.

DUAN, P.; YAN, C.; ZHOU, W. *et al.* Fresh Properties, Compressive Strength and Microstructure of Fly Ash Geopolymer Paste Blended With Iron Ore Tailing Under Thermal Cycle. **Construction and Building Materials**. v. 118, p. 76-88, ago. 2016

DUARTE, E. B.; NEVES, M. A.; OLIVEIRA, De. F. B. *et al.* Trace metals in Rio Doce sediments before and after the collapse of the Fundão iron ore tailing dam, Southeastern Brazil. **Chemosphere**. v. 262, p. 127879, jan. 2021.

DUARTE, M. S. Influence of mechanical treatment and magnetic separation on the performance of iron ore tailings as supplementary cementitious material. **Journal of building engineering**, v. 59, p. 105099, 2022.

DWECK, J.; SILVA, P. F.; BUCHLER, P. M.; CARTLEDGE, F. K. Study by Thermogravimetry of the evolution of ettringite phase during type II Portland cement hydration. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 69, p. 179-186, 2002.

FUNK, J. E. & DINGER, D. R., Kluwer Academic Press, Boston, Predictive Process Control of Crowded Particulate Suspensions, **Applied to Ceramic Manufacturing**. 1994.

ELÓI, F. P. da. F. **Ativação alcalina do rejeito de barragem de minério de ferro com adição de sílica ativa**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 68 p., 2020

FAJARDO, A. A. **Levantamento das características e formas de reaproveitamento de rejeitos de minério de ferro na construção civil**. Monografia (Especialização), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 64 p., 2020.

FARZADNIA, N.; *et al.* Characterization of high strength mortars with nano alumina at elevated temperatures. **Cement and Concrete Research**, v. 54, p. 43–54, 2013.

FENG, W.; DONG, Z.; JIN, YU. *et al.* Comparison on micromechanical properties of interfacial transition zone in concrete with iron ore tailings or crushed gravel as aggregate. **Journal of Cleaner Production**, v. 319, n. July, 2021.

FERRANTE, F. **Estudo de viabilidade para recuperação de minério de ferro em rejeitos contidos em barragens**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 86 p., 2014.

FERREIRA, J.P. **Síntese de geopolímeros à base de metacaulim e lama de rejeito de minério da barragem do Córrego do Feijão (Brumadinho – MG)**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 88 p., 2021

FERREIRA, D. A. P. **Avaliação de metais em plantas cultivadas nos solos impactados pelo rejeito de minério de ferro da Barragem de Fundão**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 72 p., 2020.

FERREIRA, J. C. **Estudos sobre drenagem e redução de umidade do minério de ferro de Carajás com a utilização de geossintéticos**. Dissertação (Mestrado), Universidade de Brasília, Brasília, 108 p., 2009.

FERREIRA, R. F; FURTADO, M. A. T. O Minério de Ferro da China. **XXIII Encontro Nacional de Tratamento de Minério e Metalurgia Extrativa – ENTMMME**, Gramado Rio Grande do Sul, p. 129-135, 2009. Disponível em: <https://www.artigos.entmme.org/>. Acesso em: 09/02/2022.

FIGUEIREDO, R. A. M.; BRANDÃO, P. R. G.; SOUTSOS, M. *et al.* Producing sodium silicate powder from iron ore tailings for use as an activator in one-part geopolymer binders. **Materials Letters**, v. 288, p. 129333, January, 2021.

FILHO, J. H. *et al.* Atividade pozolânica de adições minerais para cimento portland (Parte ii): índice de atividade pozolânica com cimento portland (IAP), difração de raios-x (DRX) e termogravimetria (TG/DTG). **Revista Materia**, v. 22, n. 3, 2017.

FONTES, W, C.; MENDES, J, C.; SILVA, S, N, da. *et al.* Mortars for laying and coating produced with iron ore tailings from tailing dams. **Construction And Building Materials**. v. 112, p. 988-995, jun. 2016.

FONTES, W. C.; FRANCO, D. C. J. M.; DEFAVERI, K. *et al.* Hydraulic Tiles Produced with Fine Aggregates and Pigments Reclaimed from Iron Ore Tailings. **Journal of Sustainable Metallurgy**, vol. 7, no. 1, p. 151–165, Janeiro. 2021.

FORDHAM, C. J.; SMALLEY, I. J. A simple thermogravimetric study of hydrated cement. **Cement and Concrete Research**, v. 15, p. 141-144, 1985.

GALVÃO, J. L. B.; ANDRADE, H. D.; BRIGOLINI, G. J. *et al.* Reuse of iron ore tailings from tailings dams as pigment for sustainable paints. **Journal Of Cleaner Production**. v. 200, p. 412-422, nov. 2018

GARCIA, D. C. S. **Influência da cura em autoclave na microestrutura, resistência mecânica e funcionalização de recobrimento de TiO₂ de compostos cimentícios**. [s.l.] Universidade Federal de Minas Gerais, 2019.

GENTIL, G. A. **Avaliação da estabilização química de rejeito de minério de ferro para aplicação em infraestrutura de pavimentos**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 92 p., 2020.

GIRI, S. K.; DAS, N. N.; PRADHAN, G. C. Magnetite powder and kaolinite derived from waste iron ore tailings for environmental applications. **Powder Technology**, v. 214, n. 3, p. 513–518, September, 2011.

GOMES, V. G. R. **Predição do teor de ferro em processo de beneficiamento mineral usando modelo autorregressivo**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 109 p., 2020.

GOYAL, S. *et al.* Study On Partial Replacement Of Sand With Iron Ore Tailing On Compressive Strength Of Concrete. **International Journal of Research in Engineering & Advanced Technology**, v. 3, n. 2, 2015.

GRUSKOVNJAK, A. *et al.* Quantification of hydration phases in supersulfated cements: Review and new approaches. **Advances in Cement Research**, v. 23, n. 6, p. 265–275, 2011.

GU, X. *et al.* Hydration characteristics investigation of iron tailings blended ultra high performance concrete: The effects of mechanical activation and iron tailings content. **Journal of Building Engineering**, v. 45, n, p. 103459, January, 2022.

GUODONG Z., XIUZHI Z., ZONGHUI Z., XIN C., Preparation and properties of concrete containing iron tailings/manufactured sand as fine aggregate, **Advanced Materials Research**, v. 838-841, p. 152-155, 2014.

GUERRA, A. N. L. P. **Caracterização e utilização de rejeito de minério de ferro pellet feed em pavimentos de blocos intertravados de concreto**. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 127 p., 2014.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO – **IBRAM**. Relatório Anual de Atividades, Janeiro à Dezembro de 2022a. Disponível em: <https://ibram.org.br/relatorios-de-atividades/>. Acesso em 29/05/2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO – **IBRAM**. Setor Mineral 2022b. Disponível em: <https://ibram.org.br/publicacoes/>. Acesso em 29/05/2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO – **IBRAM**. Informações sobre a economia mineral brasileira 2020b. Disponível em: <https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2021/02/Economia-Mineral-Brasileira-IBRAM-2020.pdf>. Acesso em 13/04/2021.

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS – **ICG**. Rochas. Universidade de São Paulo – USP. Disponível em: <https://didatico.igc.usp.br/rochas>. Acesso em: 09/02/2022.

HAN, X.; MENG, J.; LIU, J. *et al.* Enhanced far infrared radiation properties of functional ceramics derived from iron ore tailings incorporating tourmaline particles. **Ceramics International**, no. November, p. 1–10, Nov. 2020.

INSTITUTO PRISTINO. **Atlas – Quadrilátero Ferrífero**. Disponível em <https://institutopristino.org.br/atlas/quadrilatero-ferrifero>. Acesso em: 09/04/2022.

HAN, F.; LI, L.; SONG, S.; LIU, J., Early-age hydration characteristics of composite binder containing iron tailing powder, **Powder Technology**, v. 3015, p. 322-331, 2017.

HORNBOSTEL, K.; LARSEN, C. K.; GEIKER, M. R. Relationship between concrete resistivity and corrosion rate - A literature review. **Cement and Concrete Composites**, v. 39, p. 60–72, 2013.

HUANG, X.; RANADE, R.; LI, V. C. Feasibility Study of Developing Green ECC Using Iron Ore Tailings Powder as Cement Replacement. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 25, n.7, p. 923–931, 2013.

JANG, K. O.; NUNNA, V. R. M.; HAPUGODA, S. *et al.* Chemical and mineral transformation of a low-grade goethite ore by dehydroxylation, reduction roasting and magnetic separation. **Minerals Engineering**, v. 60, p. 14–22, January, 2014.

KRISHNA, R. S.; QUEZADA, G. R.; SAHU, J. K. *et al.* Rheological characterization and performance of flocculants in iron ore tailings management. **Materials Today: Proceedings**, v. 43, p. 2888–2894, 2021.

KURANCHIE, F. A.; SHUKLA, S. K.; HABIBI, D. *et al.* Utilisation of iron ore tailings as aggregates in concrete. **Cogent Engineering**. v. 2, n. 1, p. 327- 345. dez. 2015.

LAYSSI, H. *et al.* Electrical resistivity of concrete. **Concrete International**, v. 37, n. 5, p. 41–46, 2015.

LI, C.; SUN, H.; BAI, J. et al. Innovative methodology for comprehensive utilization of iron ore tailings. Part 1. The recovery of iron from iron ore tailings using magnetic separation after magnetizing roasting. **Journal of Hazardous Materials**, v. 174, n. 1–3, p. 71–77, September, 2010.

LI, J.; TIAN, Y.; SUN, Q. et al. Research on iron ore tailing improving Compressive Strength of Alkali-activated Slag Foamed concrete. In: **International conference on civil engineering and transportation 2015**, 5., 2015, Paris. Proceedings. Paris: Atlantis Press, 2015. v. 1, p. 1371-1375. dez. 2014.

LI, X.; ZHANG, N.; YUAN, J. et al. Preparation and microstructural characterization of a novel 3D printable building material composed of copper tailings and iron tailings. **Construction and Building Materials**, v. 249, p. 118779, March, 2020.

LI, W.; HAN, Y.; LIU, X. et al. Effect of fluidized magnetizing roasting on iron recovery and transformation of weakly magnetic iron mineral phase in iron tailings. **Physicochemical Problems of Mineral Processing**, v. 55, n. 4, p. 906–916, January, 2019.

LING, G.; SHUI, Z.; GAO, X.; SUN, T.; YU, R.; LI, X. Utilizing Iron Ore Tailing as Cementitious Material for Eco-Friendly Design of Ultra-High Performance Concrete (UHPC). **Materials**, vol. 14, no. 8, p. 1829, Abr. 2021.

LIU, J. H.; ZHOU, Y. C.; WU, A. X. *et al.* Reconstruction of broken Si-O-Si bonds in iron ore tailings (IOTs) in concrete. **International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials**, vol. 26, no. 10, p. 1329–1336, Jan. 2019.

LIU, W.; XU, X.; AN, Y. Study on the Sprayed Concrete with Iron Tailings. **Advanced Materials Research**, v. 347–353, p. 1939–1943, 2012.

LIU, Y.; DU, F.; YUAN, L. et al. Production of lightweight ceramisite from iron ore tailings and its performance investigation in a biological aerated filter (BAF) reactor. **Journal Of Hazardous Materials**. v. 178, n. 1-3, p. 999-1006, jun. 2010.

LUO, L.; LI, K.; FU, W. et al. Preparation, characteristics and mechanisms of the composite sintered bricks produced from shale, sewage sludge, coal gangue powder and iron ore tailings. **Construction And Building Materials**. v. 232, p. 117250, jan. 2020.

LUZ, A. B. da; LINS, F. A. F., **Tratamento de Minérios**, Centro de Tecnologia Mineral (CETEM), Ministério da Ciência e Tecnologia, 5ª ed., cap. 1, Rio de Janeiro, 2010.

LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. **Tratamento de Minérios**, Centro de Tecnologia Mineral (CETEM), Ministério da Ciência e Tecnologia, 5ª ed., p. 3, 4 e 842, 2010.

LV, X.; LIN, Y.; CHEN, X. et al. Environmental impact, durability performance, and interfacial transition zone of iron ore tailings utilized as dam concrete aggregates. **Journal of Cleaner Production**, v. 292, p. 126068, January, 2021.

MA, B. G.; CAI, L. X.; LI, X.G. et al. Utilization of iron tailings as substitute in autoclaved aerated concrete: physico-mechanical and microstructure of hydration products. **Journal of Cleaner Production**, v. 127, p. 162–171, July, 2016.

MANTILLA, J, N, R.; MIRANDA, D, N.; FUINA, J, S. et al. Mechanical Characteristics of Pavers with Iron Ore Tailings. **Applied Mechanics And Materials**. v. 864, p. 330-335, abr. 2017.

MAGALHÃES, L. F.; MORAIS, I. S.; LARA, L. F. S.; RESENDE, D. S.; MENEZES, R. M. R. O.; AGUILAR, M. T. P.; BEZERRA, A. C. S. Iron Ore Tailing as Addition to Partial Replacement of Portland Cement, **Materials Science Forum**, v. 930, p. 125-130, 2018.

MAGALHÃES, L. F. de.; FRANÇA, S.; OLIVEIRA, M. dos S. *et al.* Iron ore tailings as a supplementary cementitious material in the production of pigmented cements. **Journal of Cleaner Production**, vol. 274, Julho. 2020.

MARVILA, M. T. et al. Estudo da capilaridade para argamassas de múltiplo uso. **Anais. Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração**. v. 72, p. 2572–2578, São Paulo, 2017.

MEDEIROS-JUNIOR, R. A. et al. Investigação da resistência à compressão e da resistividade elétrica de concretos com diferentes tipos de cimento. **Revista ALCONPAT**, v. 4, n. 2, p. 113–128, 2014.

MEDEIROS, R. A.; LIMA, M. G. Electrical resistivity of unsaturated concrete using different types of cement. **Construction and Building Materials**, v. 107, p. 11–16, 2016.

MELO, C.; MONTEIRO, R.; GOMES, P. C. **Estudo do volume de pasta em diferentes composições de agregados para concreto autoadensável**. Libro de Comunicaciones / Livro das Comunicações. **Anais...** Valencia: Universitat Politècnica València, 5 mar. 2018
Disponível em: <http://ocs.editorial.upv.es/index.php/HAC-BAC/HAC2018/paper/view/6045>

MENDES, B, C.; PEDROTI, L, G.; FONTES, M, P, F. et al. Technical and environmental assessment of the incorporation of iron ore tailings in construction clay bricks. **Construction And Building Materials**. v. 227, p. 116669, dez. 2019.

MENDES, J. J. **Recuperação de ferro contido em rejeitos de mineração, por processamento termoquímico, seguido de separação magnética**. Tese (Doutorado), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 112 p., 2018.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto Microestrutura, Propriedades, e Materiais**, 4a ed. São Paulo: Pini, 2014.

MONTGOMERY, D. C; RUNGER, G. C. **Estatística e probabilidade para engenheiros**, 5ª edição, Editora LTC, 2014.

MORAIS, C.F.; BELO, B.R.; BEZERRA, A.C.S *et al.* Thermal and mechanical analyses of colored mortars produced using Brazilian iron ore tailings. **Construction And Building Materials**. v. 268, p. 121073, jan. 2021.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**; Trad. CREMONINI, R. A. 5. ed. São Paulo, Bookman, 2016.

OLIVEIRA, S. J. D. **Avaliação de briquetes de misturas de finos de minérios de ferro e rejeito de mineração para uso em altos-fornos**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 115 p., 2019.

c, K. J.; YOHANNA, P.; EBEREMU, A. O. Cement modification of tropical black clay using iron ore tailings as admixture. **Transportation Geotechnics**, v. 5, p. 35–49, 2015.

PASCOAL, A. DA L. et al. Aproveitamento Do Rejeito De Minério De Ferro: Tendência E Otimização De Processo Através De Concentração Magnética. **Tecnologia em Metalurgia Materiais e Mineração**, v. 15, n. 3, p. 197–201, 2018.

PEREIRA, O. C.; BERNARDIN, A. M. Ceramic colorant from untreated iron ore residue. **Journal of Hazardous Materials**. v. 233–234, p. 103–111, 30 set. 2012.

PIFFER, V. S.; SOARES, K.; GALDINO, A. G. S. Evaluation of mechanical and thermal properties of PP/iron ore tailing composites. **Composites Part B: Engineering**, v. 221, p. 109001-14, May, 2021.

PIMENTEL GOMES, F. **Curso de estatística experimental**. 14^a ed. Piracicaba – SP: Editora da Universidade de São Paulo, 2000. 477p.

PINTO, F. B. et al. Mixture design for self-compacting concrete using a virtual particle packing method Projeto de mistura para concreto autocompactante usando um método de embalagem virtual de partículas. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 5, p. 50029–50049, May, 2021.

PORTAL GEOLOGIA, Mapa .Disponível em <http://www.portalgeologia.com.br/index.php/mapa/?lang=en>. Acesso em: 09/04/2022.

PROTASIO, F. N. M.; AVILLEZ, R. R.; LETICHEVSKY, S. et al. The use of iron ore tailings obtained from the Germano dam in the production of a sustainable concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 278, August, 2020.

QUAN, X. et al. Influence of iron ore tailings by-product on the mechanical and electrical properties of carbon fiber reinforced cement-based composites. **Journal of Building Engineering**, v. 45, n. January 2022, p. 103567-13, jan. 2022.

RAUL, B.A.S; MANOEL, M.B.N; VANESSA, A.F.M, B. *et al.* Aplicação do software EMMA na análise do empacotamento máximo de partículas utilizando o Metacaulim. In: XVII Congresso Internacional sobre patologia e reabilitação de construções, 2021, Fortaleza. v. 1, p. 779–786, 2022. Disponível em: <http://doi.editoracubo.com.br/10.4322/CINPAR.2021.098>. Acesso em: 31 jan. 2022.

REIS, L. A. **Controle preditivo por modelo de um circuito simulado de remoagem de minério de ferro**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 90 p., 2018.

ROCHA, R. B. D. **Concentração de rejeito de flotação e lamas de minério de ferro por separação magnética**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 93 p., 2018.

RODRIGUES, R. de. S. **Grau de Liberação de Diferentes Tipos de Minério de Ferro das Minas de Alegria (Mariana-MG) e sua Influência nas Etapas de Cominuição e Concentração**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 275 p., 2016.

ROSIERE, C. A. ; CHEMALE Jr., F. Itabiritos e minérios de ferro de alto teor do Quadrilátero Ferrífero - uma visão geral e discussão. **Geonomos**, v. 8, n. 2, p. 27-42, 2000.

ROSIERE, C. A. *et al.* Microstructures, textures and deformation mechanisms in hematite. **Journal of Structural Geology**, v. 23, n. 9, p. 1429–1440, 2001.

ROY, S. K.; NAYAK, D.; RATH, S. S. A review on the enrichment of iron values of low-grade Iron ore resources using reduction roasting-magnetic separation. **Powder Technology**, v. 367, p. 796–808, April, 2020.

SAKTHIVEL, R.; VASUMATHI, N.; SAHU, D. *et al.* Synthesis of magnetite powder from iron ore tailings. **Powder Technology**, v. 201, n. 2, p. 187–190, March, 2010.

SANT'ANA FILHO, J, N.; SILVA, S, N, da.; SILVA, G, C. *et al.* Technical and Environmental Feasibility of Interlocking Concrete Pavers with Iron Ore Tailings from Tailings Dams. **Journal Of Materials In Civil Engineering**. v. 29, n. 9, p. 04017104, set. 2017.

SANTOS, L. **Avaliação da resistividade elétrica do concreto como parâmetro para a previsão da iniciaçãoda corrosão induzida por cloretos em estruturasde concreto**. [s.l.] Universidade de Brasília, 2006.

SHETTIMA, A, U.; HUSSIN, M, W.; AHMAD, Y. *et al.* Evaluation of iron ore tailings as replacement for fine aggregate in concrete. **Construction And Building Materials**. v. 112, p. 72-79, set. 2016

SILVA, F, L, da. **Aproveitamento e Reciclagem de Rejeitos de Concentração de Minério de Ferro na Produção de Pavers e Cerâmica**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 127 p., 2014a.

SILVA, F, L, da.; ARAUJO, F, G, S.; TEIXEIRA, M, P. *et al.* Study of the recovery and recycling of tailings from the concentration of iron ore for the production of ceramic. **Ceramics International**. v. 40, n. 10, p. 16085-16089, dez. 2014b

SOUZA, D. O. O. de. **Interpretação e aplicação dos níveis de controle do monitoramento geotécnico na avaliação de segurança de barragens de mineração.** Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Pará, Tucuruí, 118 p., 2018.

SOUZA, T. da. S.; BARONE, L. da. S. F.; LACERDA, D. *et al.* Cytogenotoxicity of the water and sediment of the Paraopeba River immediately after the iron ore mining dam disaster (Brumadinho, Minas Gerais, Brazil). **Science Of The Total Environment.** v. 775, p. 145193, jun. 2021.

SUPINO, S.; MALANDRINO, O.; TESTA, M. *et al.* Sustainability in the EU cement industry: the italian and german experiences: the Italian and German experiences. **Journal Of Cleaner Production.**, v. 112, p. 430-442, jan. 2016

TANG, C.; LI, T.; NI, W. *et al.* Recovering iron from iron ore tailings and preparing concrete composite admixtures. **Minerals**, v. 9, n. 4, p. 1–14, April, 2019.

TELHADO, F. M. **Petrologia e geoquímica do Ortognaisse das Alcáçovas e rochas associadas: contributo para a compreensão da evolução geodinâmica da Zona de Ossa Morena.** Dissertação (Mestrado), Universidade de Lisboa, Lisboa, 112 p., 2018.

TERAMOTO, E. H.; GEMEINER, H.; ZANATTA, M. B. T. *et al.* Metal speciation of the Paraopeba river after the Brumadinho dam failure. **Science Of The Total Environment.** v. 757, p. 143917, fev. 2021.

THOMPSON, F.; OLIVEIRA de, B. C.; CORDEIRO, M. C. *et al.* Severe impacts of the Brumadinho dam failure (Minas Gerais, Brazil) on the water quality of the Paraopeba River. **Science Of The Total Environment.** v. 705, p. 135914, fev. 2020.

UGAMA, T. I.; EJEH, S. P.; AMARTEY, D. Y. Effect of Iron Ore Tailing on the Flexural Strength. **Civil and Environmental Research.** v. 6, n. X, p. 2773–2778, 2014.

UNITED STATE GEOLOGICAL SURVEY (USGS). National Minerals Information Center – Mineral Commodity Summaries, 2023. Disponível em: <https://pubs.er.usgs.gov/publication/mcs2023>. Acesso em: 29/05/2023.

UWADIALE. G. G. O. O. Upgrading Fine-Grained Iron Ores: (i) General Review (ii) Agbaja Iron Ore. In: Hanna J., Attia Y.A. (eds). **National Metallurgical Development Centre.** Nigeria, 1990. p. 401-411

VALE, Conheça mais sobre a história de Carajás, a maior mina de minério de ferro do mundo, ago. 2018. Disponível em: <http://www.vale.com/hotsite/PT/Paginas/conheca-mais-sobre-historia-carajas-maior-mina-minerio-ferro-mundo.aspx>. Acesso em: 12/04/2021

VALLE, F. R. S. *et al.* Use of recycled aggregates from civil construction in self-compacting mortar. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 15, n. 1, p. 1–13, 2022.

WANG, C. L.; NI, W.; ZHANG, S-Q. et al. Preparation and properties of autoclaved aerated concrete using coal gangue and iron ore tailings. **Construction and Building Materials**, v. 104, p. 109–115, 2016.

WEISHI, L., GUOYUAN, L., YA, X., QIFEI, H. The properties and formation mechanisms of eco-friendly brick building materials fabricated from low-silicon iron ore tailings. **Journal of Cleaner Production**, v. 204, p. 685–692, 2018.

WOSNIACK, L. M. et al. Resistividade elétrica do concreto pelo ensaio de migração de cloretos: comparação com o método dos quatro eletrodos. **Ambiente Construído**, v. 21, n. 3, p. 321–340, 2021.

XIAOXIN, F. et al. Investigation of Drying Shrinkage of concrete prepared with iron mine tailings. **Key Engineering Materials**, v. 477, p. 37–41, 2011.

XIONG, C., LI, W., JIANG, L., WANG, W., GUO, Q. Use of grounded iron ore tailings (GIOTs) and BaCO₃ to improve sulfate resistance of pastes. **Construction and Building Materials**, v. 150, p. 66–76, 2017.

XU, F.; WANG, S.; LI, T. et al. Mechanical properties and pore structure of recycled aggregate concrete made with iron ore tailings and polypropylene fibers. **Journal of Building Engineering**, v. 33, p. 101572, June, 2020.

YANG, C.; CUI, C.; QIN, J. *et al.* Characteristics of the fired bricks with low-silicon iron tailings. **Construction and Building Materials**, vol. 70, p. 36–42, Jul. 2014.

YANG, G.; DENG, Y.; WANG, J. Non-hydrothermal synthesis and characterization of MCM-41 mesoporous materials from iron ore tailing. **Ceramics International**, vol. 40, no. 5, p. 7401–7406, Jun. 2014.

YAO, R.; LIAO, S.; DAI, C. *et al.* Preparation and characterization of novel glass-ceramic tile with microwave absorption properties from iron ore tailings. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, vol. 378, p. 367–375, 15 Mar. 2015.

YI, Z.; SUN, H.; WEI, X. *et al.* Iron ore tailings used for the preparation of cementitious material by compound thermal activation. **International Journal Of Minerals, Metallurgy And Materials**. v. 16, n. 3, p. 355-358, jun. 2009.

YOUNG, G.; YANG, M. Preparation and characterization of Portland cement clinker from iron ore tailings. **Construction and Building Materials**, v. 197, p. 152–156, 2019.

YU, J.; HAN, Y.; GAO, P. et al. An innovative methodology for recycling iron from magnetic preconcentrate of an iron ore tailing. **Physicochemical Problems of Mineral Processing**, v. 54, n. 3, p. 668–676, 2018.

YU, J.; HAN, Y.; LI, Y. et al. Beneficiation of an iron ore fines by magnetization roasting and magnetic separation. **International Journal of Mineral Processing**, v. 168, p. 102–108, Setemper, 2017.

YU, L.; ZHANG, J.; MU, K., Relationships between Compressive Strength and Microstructure in Mortars with Iron Ore Tailings as Fine Aggregate, **Applied Mechanics and Materials**, v. 188, p. 211-218, 2012.

YUNHONG, C. *et al.* Test research on the effects of mechanochemically activated iron tailings on the compressive strength of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 118, p. 164–170, 2016.

ZHANG, C.; LI, S. Utilization of iron ore tailing for the synthesis of zeolite A by hydrothermal method. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, vol. 20, no. 3, p. 1605–1614, Mar. 2018.

ZHANG, N.; TANG, B.; LIU, X. Cementitious activity of iron ore tailing and its utilization in cementitious materials, bricks and concrete. **Construction And Building Materials**. v. 288, p. 123022, jun. 2021.

ZHANG, W.; GU, X.; QIU, J. *et al.* Effects of iron ore tailings on the compressive strength and permeability of ultra-high performance concrete. **Construction and Building Materials**. vol. 260, p. 119917, jun. 2020.

ZHAO, J.; NI, K.; SU, Y.; SHI, Y. An evaluation of iron ore tailings characteristics and iron ore tailings concrete properties. **Construction And Building Materials**. v. 286, p. 122968, jun. 2021.

ZHAO, S.; FAN, J.; SUN, W. Utilization of iron ore tailings as fine aggregate in ultra-high performance concrete. **Construction And Building Materials**. v. 50, p. 540-548, jan. 2014.

ZHENG, J.; GAO, Z.; HE, H.; YANG, S.; SUN, C. Efficient degradation of Acid Orange 7 in aqueous solution by iron ore tailing Fenton-like process. **Chemosphere**, vol. 150, p. 40–48, Fev. 2016.

ZHOU, M. *et al.* Volcanic activity and thermal excitation of rich-silicon iron ore tailing in concrete. **Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.**, v. 32, n. 2, p. 365–372, 2017.