CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

PEDRO HENRIQUE TRAZZI VESCOVI

O IMPACTO DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA E DO TEOR DO REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO (RMF) NAS PROPRIEDADES FÍSICAS, MECÂNICAS E DURABILIDADE DE CIMENTOS COMPOSTOS COM RMF

BELO HORIZONTE
2021

PEDRO HENRIQUE TRAZZI VESCOVI

O IMPACTO DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO NAS PROPRIEDADES FÍSICAS, MECÂNICAS E DURABILIDADE DE CIMENTOS COMPOSTOS COM REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.
Orientadora: Profa. Dra. Flávia Spitale Jacques Poggiali.

BELO HORIZONTE
2021

Vescovi, Pedro Henrique Trazzi
V575i O impacto da composição química do rejeito de minério de ferro nas propriedades físicas, mecânicas e durabilidade de cimentos compostos com rejeito de minério de ferro / Pedro Henrique Trazzi Vescovi. – 2021.
94 f. : il., gráfs, tabs., fotos.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Civil.
Orientadora: Flávia Spitale Jacques Poggiali.
Bibliografia: f. 88-94.
Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Civil

1. Cimento Portland – Aditivos – Teses. 2. Minérios de ferro – Reaproveitamento – Teses. 3. Beneficiamento de minério – Teses. 4. Materiais compostos – Teses. 5. Materiais de construção – Aspectos Ambientais – Teses. I. Poggiali, Flávia Spitale Jacques. II. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD 691.3

Elaboração da ficha catalográfica pela bibliotecária Jane Marangon Duarte, CRB 6º 1592 / Cefet/MG

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha mãe, Maria da Penha, que como professora, sempre acreditou no poder de transformação da educação e da ciência.

AGRADECIMENTOS

O mestrado marcou uma época da minha vida, e durante este período, muitas pessoas estiveram presentes. A estas pessoas eu gostaria de agradecer.

Primeiramente, à minha mãe Maria e ao meu pai Pedro pelo incentivo e dedicação à minha educação e à minha irmã Carolina, por todo suporte oferecido. Obrigado pelo amor incondicional.

Ao Rafael, por tornar este processo mais leve e divertido e por sempre acreditar em mim.

À minha orientadora, Flávia, pelo empenho, suporte, conselhos e dedicação a esta pesquisa.

Aos colegas de laboratório, por todo auxílio prestado. Em especial ao professor Augusto pelo empenho, por ceder equipamentos, materiais e conhecimentos.

Aos meus colegas de mestrado, em especial Lorena e Isabela, pelas trocas, companheirismo e empatia nos momentos difíceis.

A todos professores do PPGEC e ao professor Patterson da Química.

Ao Marlo, pela ajuda prestada no início desta pesquisa.

Aos meus amigos, em especial, Carol, Yasmin e Ewerton, que mesmo virtualmente sempre se fizeram presentes.

À Capes, Fapemig e Cefet-MG pelo auxílio financeiro.

Meu muito obrigado, vocês fizeram a diferença.

RESUMO

No Brasil, a indústria da mineração descarta seu rejeito, comumente, em barragens, que representa riscos à população local e ao meio ambiente. Além disso, a produção de cimento é uma das principais fontes de emissão de carbono, durante a fabricação do clínquer. A adição de rejeito de minério de ferro (RMF) em materiais cimentícios é uma opção de reutilização do rejeito, e reduz a emissão de dióxido de carbono (CO_2) na atmosfera conforme a necessidade de clínquer na produção de cimento diminui. O objetivo desta pesquisa foi avaliar o uso do RMF como material cimentício suplementar (*SCM*) e investigar o impacto da composição química e do teor do RMF rejeito nas propriedades físicas, mecânica e de durabilidade de cimentos compostos com RMF. O calor de hidratação acumulado e os teores de água quimicamente modificada, portlandita remanescente e carbonato de cálcio foram menores para os cimentos com RMF. Com relação à resistência à compressão, os cimentos com 10% de RMF podem ser classificados, pela norma brasileira, como CP-II-Z 40 enquanto os cimentos com 20% de RMF podem ser classificados como CP-IV 32. O RMF aumentou, em menos de 1%, a absorção de água dos cimentos e melhorou a resistência ao ácido sulfúrico em todos os teores de adição. A composição química do RMF e o teor de RMF impactaram, significativamente, todos os resultados (resistência à compressão, absorção de água e resistência ao ácido sulfúrico) dos cimentos com RMF. Por fim, o RMF pode ser considerado como uma possível opção de substituto parcial do clínquer no cimento Portland.

Palavras-chave: cimento Portland, rejeito de minério de ferro, material cimentício suplementar, adição mineral, durabilidade.

ABSTRACT

In Brazil, the mining industry commonly discards its tailings in dams, which pose risks to the local population and the environment. In addition, cement production is one of the main sources of carbon emissions during the manufacture of clinker. The iron ore tailings (IOT) addition to cementitious materials provides the tailings a new destination and reduces the emission of carbon dioxide (CO_2) into the atmosphere as the need for clinker in cement production decreases. This research aimed to evaluate the IOT use as a supplementary cementitious material (SCM) and to investigate the impact of IOT chemical composition and IOT content on the physical, mechanical and durability properties of IOT cements. The accumulated heat of hydration and the chemically modified water remaining portlandite and calcium carbonate contents were lower for IOT cements. Regarding compressive strength, 10% IOT cements could be classified, by the Brazilian standard, as CP-II-Z 40 while 20% IOT cements could be classified as CP-IV 32. The IOT increased, in less than 1%, the water absorption of IOT cements and improved sulfuric acid resistance at all IOT contents. The IOT chemical composition and IOT content significantly impacted all the results (compressive strength, water absorption and sulfuric acid resistance) of IOT cements. Finally, IOT could be considered as a possible partial clinker replacement option in Portland cement.

Keywords: Portland cement, iron ore tailing, supplementary cementitious material, mineral addition, eco-friendly, durability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Progresso de hidratação dos compostos do clínquer. 21
Figura 2 – Formação dos produtos hidratados do cimento. 22
Figura 3 – Curva característica de fluxo de calor. 25
Figura 4 – Curvas de calorimetria isotérmica de Carvalho et al. (2021) e Luo et al. (2016). 36
Figura 5 – Fluxograma de atividades 37
Figura 6 – Amostra RMF (N). 40
Figura 7 – Separador magnético. 40
Figura 8 – Amostras de RMF: N, S e F 41
Figura 9 – Moinho planetário de bolas 42
Figura 10 – Calorímetro isotérmico.Para que?/ 44
Figura 11 – Analisador termogravimétrico. 45
Figura 12 – Equipamento universal EMIC. 47
Figura 13 – Curvas granulométricas das amostras de RMF (N, F e S) e cimento CP-V. 49
Figura 14 – Difratogramas das três amostras de RMF (N, F e S). 51
Figura 15 – Curvas de fluxo de calor dos cimentos referência e compostos com RMF durante 72 horas 53
Figura 16 – Ampliação das curvas de fluxo de calor dos cimentos referência e compostos com RMF entre 6 e 12h. 54
Figura 17 – Magnitude do pico do fluxo de calor para as diferentes amostras de RMF 55
Figura 18 – Calor de hidratação acumulado das pastas de cimento REF e RMF após 72 horas 56
Figura 19 – Análise termogravimétrica (TGA) dos cimento referência e compostos com RMF após 28 dias de cura. 57
Figura 20 – TGA da pasta de cimento referência após 28 dias de cura. 58
Figura 21 – Teor de AQC, portlandita remanescente e carbonato de cálcio dos cimentos referência e compostos com RMF. 60
Figura 22 – Resistência à compressão dos cimentos referência e compostos com RMF aos 28 e 91 dias 62

Figura 23 – Boxplot e diagrama de interação – Resistência à compressão aos 28 dias. 64
Figura 24 – Comparativo das resistências pelo conteúdo de clínquer nas composições. 65
Figura 25 – Calor de hidratação acumulado após 72h por grama de material cimentício por MPa aos 28 dias. 67
Figura 26 – Absorção de água e índice de vazios dos cimentos referência e compostos com RMF aos 28 dias. 68
Figura 27 – Boxplot e diagrama de interação – Absorção de água aos 28 dias. 69
Figura 28 – Boxplot e diagrama de interação – Índice de vazios aos 28 dias. 71
Figura 29 – Perda de massa referente ao ataque de ácido sulfúrico dos cimentos referência e compostos com RMF aos 28 dias. 73
Figura 30 – Relação entre a perda de massa por ataque de ácido sulfúrico e portlandita remanescente. 74
Figura 31 – Boxplot e diagrama de interação – Resistência ao ácido sulfúrico aos 28 dias. 75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais compostos do cimento Portland..... 18
Tabela 2 – Características da composição, finura e resistência à compressão de alguns cimentos comerciais. 20
Tabela 3 – Artigos selecionados pela revisão sistemática da literatura. 28
Tabela 4 – Tipo de uso do RMF por artigo analisado. 29
Tabela 5 – Composição química do RMF por artigo. 30
Tabela 6 – Fases cristalinas do RMF por artigo. 31
Tabela 7 – Programa experimental por artigo. 32
Tabela 8 – Maiores resultados do ensaio de resistência à compressão de cada artigo. 32
Tabela 9 – Composição dos cimentos para os ensaios de argamassa. 43
Tabela 10 – Composição dos cimentos para o ensaio de calorimetria isotérmica. 44
Tabela 11 – Relação entre ensaios, datas e tipo de CP. 45
Tabela 12 – Análise granulométrica das amostras de RMF (N, F e S) e cimento CP-V. 49
Tabela 13 – Composição química das amostras de RMF (N, F e S) e cimento CP-V. 50
Tabela 15 – Perdas de massa (TGA) dos cimentos referência e compostos com RMF 59
Tabela 16 – ANOVA – Resistência à compressão aos 28 dias. 63
Tabela 17 – ANOVA – Resistência à compressão aos 91 dias. 63
Tabela 18 – ANOVA – Absorção de água aos 28 dias. 69
Tabela 19 – ANOVA – Índice de vazios aos 28 dias. 71
Tabela 20 – ANOVA – Resistência ao ácido sulfúrico aos 28 dias. 75

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANM – Agência Nacional de Mineração

ASTM – Sociedade Americana de Ensaios e Testes

BSI – Instituição de Normas Britânicas

CP II-Z – Cimento Portland composto com adição de material pozolânico

CP IV – Cimento Portland tipo pozolânico

DRX – Difração de raios X

EPMA – Microssonda eletrônica

FRX – Espectrometria de fluorescência de raios X

ICP-AES – Espectrometria de emissão atômica por plasma

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do estado de São Paulo

MEV – Microscópio eletrônico de varredura

MIP – Porosimetria por intrusão de mercúrio

MPF – Ministério Público Federal

OMS – Organização Mundial da Saúde

OPAS – Organização Pan-Americana de Saúde

PIB – Produto interno bruto

RMF – Resíduo de minério de ferro

SCM – Material suplementar cimentício

SNIC – Sindicato Nacional da Indústria do Cimento

SNISB – Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens

TG – Análise termogravimétrica

USGS – Serviço Geológico dos Estados Unidos

WBCSD – Conselho Empresarial Mundial para o Desenvolvimento Sustentável

LISTA DE SÍMBOLOS

AFm – monosulfato

A – Al_2O_3 – óxido de alumínio

C – CaO – óxido de cálcio

$CaSO_4$ – sulfato de cálcio

C_3AH_6 – hidrogarnet

CO_2 – dióxido de carbono

C_3A – aluminato tricálcico

C_4AF – ferroaluminato tetracálcico

CH - $Ca(OH)_2$ – hidróxido de cálcio

C_2S – belita – silicato dicálcico

C_3S – alita – silicato tricálcico

CSH - $CaO_x \bullet SiO_2 \bullet H_2Oy$ – silicato de cálcio hidratado

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 13
1.1 PERGUNTA DE PESQUISA 16
1.2 OBJETIVOS 16
1.3 RESTRIÇÕES DA PESQUISA 17
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 18
2.1 CIMENTO PORTLAND 18
2.1.1 Composição química 18
2.1.2 Hidratação 20
2.1.2.1 Aluminatos – C_3A 22
2.1.2.2 Silicatos – C_3S e C_2S 23
2.1.2.3 Ferrita – C_4AF 24
2.1.3 Calor de hidratação 25
2.2 ADIÇÕES MINERAIS 26
2.3 ADIÇÃO DE RMF EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS 27
2.3.1 Caracterização do RMF e programas experimentais 29
2.3.2 Resistência à compressão 32
2.3.3 Análise termogravimétrica e calorimetria isotérmica 35
2.3.4 Absorção de água e resistência ao ácido sulfúrico 36
3. MATERIAIS E MÉTODOS 37
3.1 MATERIAIS 38
3.1.1 Cimento Portland 38
3.1.2 Rejeito de minério de ferro (RMF) 38
3.1.3 Areia 39
3.1.4 Água 39
3.1.5 Hidróxido de cálcio 39
3.2 MÉTODOS UTILIZADOS 39
3.2.1 Beneficiamento do RMF 39
3.2.1.1 Recebimento e secagem 39
3.2.1.2 Separação magnética 40
3.2.1.3 Moagem 41
3.2.2 Caracterização do RMF 42
3.2.2.1 Fluorescência de raios X – FRX 42
3.2.2.2 Difração de raios X – DRX 42
3.2.2.3 Granulometria à laser 42
3.2.3 Produção das argamassas e pastas 43

3.2.4 Calorimetria isotérmica 43
3.2.5 Análise termogravimétrica – TGA..... 45
3.2.6 Moldagem e cura dos corpos de prova..... 45
3.2.7 Resistência à compressão 46
3.2.8 Absorção de água e índice de vazios..... 47
3.2.9 Resistência ao ácido sulfúrico 48
3.3 ANÁLISE DE VARIÂNCIA 48
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO 49
4.1 CARACTERIZAÇÃO DO RMF E DO CIMENTO 49
4.1.1 Análise granulométrica 49
4.1.2 Fluorescência de raios X - FRX..... 50
4.1.3 Difração de raios X - DRX..... 51
4.2 CALORIMETRIA ISOMÉTRICA 52
4.3 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA – TGA..... 56
4.4 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO 61
4.5 ABSORÇÃO DE ÁGUA 67
4.6 RESISTÊNCIA AO ÁCIDO SULFÚRICO 72
5. CONCLUSÕES 77
5.1 TRABALHOS FUTUROS 78
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 80

1. INTRODUÇÃO

A indústria de mineração cresceu consideravelmente nos últimos anos devido ao crescimento econômico e ao aumento do consumo de minerais e metais (MA *et al.*, 2016; RANÄNGEN *et al.*, 2017; LI *et al.*, 2019b). O Brasil possui cerca de 19% das reservas mundiais de minério de ferro, e é o segundo maior país produtor do material (400 Mton em 2020) (USGS, 2021). Segundo dados da Agência Nacional de Mineração (ANM), em 2019, a exploração do minério de ferro foi responsável por 72,8% do valor total dos minerais metálicos comercializados e a 69% do valor de exportações das principais substâncias metálicas (ANM, 2020a). Como consequência, para cada tonelada de minério de ferro processada, cerca de 0,4 toneladas de rejeito de minério de ferro (RMF) são produzidas (IPT, 2016). A maior parte é destinada a barragens de rejeitos.

De acordo com o sistema de classificação de barragens da ANM, cerca de 1,3 trilhões de metros cúbicos de RMF estão depositados em 213 barragens de rejeitos no Brasil, das quais 39 são do tipo de construção “à montante ou desconhecido” (ANM, 2020b), considerado perigoso e arriscado (KOSSOFF *et al.*, 2014). Além disso, 88 barragens de rejeitos (aprox. 42%) têm alto Dano Potencial Associado (DPA) (ANM, 2020b). O indicador DPA refere-se aos danos que a ruptura ou vazamento de uma barragem pode causar em termos de perdas de vidas humanas e impactos sociais, econômicos e ambientais, não sendo raros os casos de rompimentos de barragens de rejeito.

Em caso de falha na estrutura dessas barragens, o impacto ambiental é aumentado. Esses acidentes representam uma ameaça à vida animal e humana e são motivo de preocupação para as indústrias extrativas e para a sociedade (KOSSOFF *et al.*, 2014; CARMO *et al.*, 2017).

Os rompimentos das barragens de Fundão em 2015 e Córrego do Feijão em 2019, ambas em Minas Gerais, foram responsáveis pelo vazamento de mais de 52 milhões de metros cúbicos de lama, deixando 291 mortos e outros 11 desaparecidos. Estes acidentes poluíram rios, mataram toneladas de peixes, destruíram distritos e deixaram milhares de moradores das regiões sem água (BBC BRASIL, 2019; FOLHA DE SÃO PAULO, 2019; G1, 2020; CNN, 2021). Outras consequências dos acidentes incluem a limitação do crescimento de árvores nativas da Mata Atlântica (CRUZ *et al.*, 2020) e o possível alcance dos

sedimentos ao arquipélago de Abrolhos (COIMBRA *et al.*, 2020). Exemplos mais recentes incluem os rompimentos das barragens de Canela, no México e Tieli, na China, ambas em 2020 (CHINA DAILY, 2020; NEWS REPORT MX, 2020).

O Ministério Público Federal (MPF) do Estado de Minas Gerais publicou um documento de recomendação (MPF, 2016) que destaca o risco das barragens de rejeitos e considera o meio ambiente um bem comum das pessoas essencial à qualidade de vida. Para minimizar os impactos ambientais do setor mineral, o MPF recomenda que o Departamento Nacional de Produção Mineral (DMPM) não aprove o Plano de Uso Econômico da mineração de minério de ferro caso o empresário não implemente a reinserção do RMF em outra cadeia econômica, com porcentagens progressivas de até 70% em 2025.

Na literatura, são encontradas aplicações do RMF em concretos (LI *et al.*, 2013, 2019a, 2011; LIU *et al.*, 2012; WANG *et al.*, 2012, 2013, 2014, 2016, 2019; ZHAO *et al.*, 2014; ZHU *et al.*, 2015a, 2015b, 2016; KURANCHIE *et al.*, 2015; SHETTIMA *et al.*, 2016a, 2016b; TIAN *et al.*, 2016a, 2016b; SUNIL *et al.*, 2017; CUI *et al.*, 2017; FEI *et al.*, 2017; LATIF *et al.*, 2017; AKINBINU, 2018; LIANG *et al.*, 2018, 2019; SHASHI KUMAR *et al.*, 2018; KEERTHI RAJ *et al.*, 2018; YARAGAL *et al.*, 2019; JIANG *et al.*, 2019; BANGALORE CHINNAPPA *et al.*, 2020; ORITOLA *et al.*, 2020; XU *et al.*, 2020, 2021; ZHANG *et al.*, 2020a, 2020b; LV *et al.*, 2021; MENDES PROTASIO *et al.*, 2021; CARVALHO EUGÊNIO *et al.*, 2021), cimentos (YI *et al.*, 2009a, 2009b; LI *et al.*, 2010; HUANG *et al.*, 2013b, 2013a; FONTES *et al.*, 2016; LUO *et al.*, 2016; CARRASCO *et al.*, 2017; XIONG *et al.*, 2017; WU *et al.*, 2018; CARVALHO *et al.*, 2019; MENDES *et al.*, 2019b, 2020; CARVALHO *et al.*, 2020; YOUNG *et al.*, 2019; CARVALHO *et al.*, 2021; MAGALHÃES *et al.*, 2020; WANG *et al.*, 2020; YAO *et al.*, 2020a, 2020b; CASTRO MENDES *et al.*, 2020; MORAIS *et al.*, 2021), tintas (GALVÃO *et al.*, 2018), geopolímeros (DUAN *et al.*, 2016a, 2016b; KUMAR *et al.*, 2017; BORGES *et al.*, 2019; FIGUEIREDO *et al.*, 2021), azulejos (DAS *et al.*, 2012; FONTES *et al.*, 2019, 2021), pavimentação (ARUNA *et al.*, 2010; RAVI KUMAR *et al.*, 2012; YISA *et al.*, 2014; BASTOS *et al.*, 2016; FILHO *et al.*, 2017; DE OLIVEIRA *et al.*, 2019; BABATUNDE *et al.*, 2020; DE ARAÚJO *et al.*, 2020), tijolos (LIU *et al.*, 2016; DE FREITAS *et al.*, 2018; WEISHI *et al.*, 2018; MENDES *et al.*, 2019a; CHEN *et al.*, 2020; LUO *et al.*, 2020; SHUBHANANDA RAO *et al.*, 2020) e rochas artificiais (DA SILVA *et al.*, 2020).

Dentre os materiais acima citados, o cimento, classificado na lista das principais fontes de emissão de carbono (BENHELAL *et al.*, 2013; MIKULČIĆ *et al.*, 2016; RUIJVEN *et al.*, 2016; SALAS *et al.*, 2016), devido à produção de clínquer (JOSA *et al.*, 2004), é o material mais consumido no desenvolvimento de infraestrutura no mundo (SCRIVENER *et al.*, 2018). Por esta razão, a indústria cimenteira precisa reduzir o impacto de 7% do total das emissões globais de dióxido de carbono (CO_2) na atmosfera, considerando que há uma tendência de aumento do consumo de aproximadamente 65% para 2050, representando mais de 30% das emissões globais (ROMANO *et al.*, 2018).

Em 2020, a produção mundial de cimento atingiu 4100 Mton, sendo o Brasil responsável por 57 Mton deste valor (USGS, 2021). Assumindo o valor padrão do fator de emissão de CO_2 do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) de 0,4985 toneladas de CO_2 por tonelada de cimento (EL-FADEL *et al.*, 2001), as emissões mundiais de CO_2 da produção de cimento somam cerca de 2,0 Gt.

Sendo assim, para reduzir as emissões de CO_2, as principais ações visam melhorar a eficiência energética em fornos, combustíveis alternativos e substituir ou reduzir o teor de clínquer no cimento Portland, incluindo a adição de resíduos industriais como materiais cimentícios suplementares (*SCMs*) (KUMAR *et al.*, 2006; LOTHENBACH *et al.*, 2011; GARCÍA-GUSANO *et al.*, 2015; ROMANO *et al.*, 2018). A utilização do RMF como *SCM* pode ser uma alternativa para sua aplicação em grandes quantidades, reduzindo o impacto ambiental da produção de cimento e o descarte de rejeitos em barragens.

O RMF é composto principalmente pelos seguintes óxidos: silício, ferro, cálcio, alumínio e magnésio. Os rejeitos utilizados em artigos que abordam o uso do RMF em materiais cimentícios possuem diferentes composições químicas, variando de 6 a 70% o teor de óxido de ferro e de 20 a aproximadamente 70% o teor de óxido de silício (YI *et al.*, 2009b; LI *et al.*, 2010; HUANG *et al.*, 2013b; FONTES *et al.*, 2016; LUO *et al.*, 2016; XIONG *et al.*, 2017; WU *et al.*, 2018; CARVALHO *et al.*, 2019, 2020; YOUNG *et al.*, 2019; CARVALHO *et al.*, 2021; YAO *et al.*, 2020b, 2020a; MAGALHÃES *et al.*, 2020; WANG *et al.*, 2020; MORAIS *et al.*, 2021). Contudo, faltam informações sobre o impacto desses óxidos na durabilidade e no comportamento mecânico de cimento com RMF. Até

o momento, a influência destes óxidos no mecanismo de hidratação do cimento permanece incerta.

Com base nas informações acima, o objetivo desta pesquisa foi investigar o impacto da composição química do RMF, representada principalmente pelos teores de óxido de ferro e óxido de sílica, e o impacto do teor de RMF na composição do cimento nas propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade de cimentos compostos com RMF. O efeito dos parâmetros experimentais anteriormente citados foi avaliado estatisticamente e o nível de significância desses parâmetros foi determinado por meio da análise de variância (ANOVA).

1.1 PERGUNTA DE PESQUISA

A composição química e o teor do RMF impactam as propriedades físicas, mecânica e de durabilidade de cimento Portland composto com RMF?

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral da pesquisa é avaliar o impacto da composição química e do teor do RMF utilizado como material cimentício suplementar no desempenho do cimento Portland composto com RMF.

Os objetivos específicos são:

(i) quantificar o calor de hidratação de cimentos Portland compostos com RMF com distintas composições químicas e diferentes teores de RMF durante 3 dias;

(ii) quantificar os teores de água quimicamente combinada, portlandita remanescente e carbonato de cálcio de cimentos Portland compostos com RMF com distintas composições químicas e diferentes teores de RMF aos 28 dias;

(iii) avaliar o comportamento mecânico de cimentos Portland compostos com RMF com distintas composições químicas e diferentes teores de RMF aos 28 e 91 dias;

(iv) avaliar a durabilidade de cimentos Portland compostos com RMF com distintas composições químicas e diferentes teores de RMF aos 28 dias;

(v) identificar a relação existente entre as propriedades dos cimentos Portland compostos com RMF por meio dos resultados dos ensaios de

argamassas endurecidas (variáveis dependentes), conforme previsto pela NBR 7215 (ABNT, 2019) e as variáveis independentes, sendo elas, a composição química do RMF e o teor de RMF por meio de uma análise de variância (ANOVA).

1.3 RESTRIÇÕES DA PESQUISA

Esta pesquisa possui como restrições:

- Um tipo específico de amostra de RMF cedida por empresa local;
- Produção de três amostras de RMF com diferentes composições químicas por meio da técnica de separação magnética a partir da amostra como coletada;
- Número limitado de ensaios experimentais devido à disponibilidade de materiais e acesso aos laboratórios em decorrência da pandemia do Covid-19;
- Os ensaios dos cimentos em pastas se restringem à calorimetria isotérmica e análise termogravimétrica;
- Os ensaios dos cimentos em argamassa se restringem à resistência à compressão, absorção de água e resistência ao ácido sulfúrico.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 CIMENTO PORTLAND

2.1.1 Composição química

O cimento Portland é definido como um aglomerante hidráulico obtido pela moagem de clínquer, ao qual se adiciona, durante a fabricação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio ($CaSO_4$), encontrado sob as formas de gipsita, hemidrato ou bassanita. Além disso, o cimento pode conter adições minerais, comumente chamadas de adições, como materiais pozolânicos, carbonáticos e escória granulada de alto forno, em teores estabelecidos pela norma brasileira (ABNT, 2018).

O clínquer Portland é constituído em sua maior parte por silicatos de cálcio com propriedades hidráulicas, fabricados a partir da queima de misturas moídas dosadas de materiais calcários e argilosos em um forno rotativo aquecida a uma temperatura de cerca de 1300-1450 °C. Este processo consome 1100-1400 Kcal/g de energia (RAMACHANDRAN *et al*., 2002; ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2018) e gera 842 kg/ton de CO_2 em função da massa de clínquer produzida (WBCSD, 2016).

As matérias-primas para a fabricação de cimento Portland (calcário e argila) contêm, em proporções adequadas, óxido de silício, óxido de alumínio, óxido de cálcio e óxido de ferro. É usual considerar a composição do cimento pelos óxidos que são representados individualmente como: C = CaO; S = SiO_2; A = Al_2O_3; F = Fe_2O_3; M = MgO; S = SO_3; e H = H_2O. A formação do silicato tricálcico pode ser representada por 3C + S = C_3S (Equação 1) (LAWRENCE, 1998). Os outros compostos principais são o C_2S, C_3A e o C_4AF (Tabela 1).

Tabela 1 – Principais compostos do cimento Portland.

Nome do composto	Composição em óxidos	Abreviatura
Silicato tricálcico	$3CaO.SiO_2$	C_3S
Silicato dicálcico	$2CaO.SiO_2$	C_2S
Aluminato tricálcico	$3CaO.Al_2O_3$	C_3A
Ferroaluminato tetracálcico	$4CaO.Al_2O_3.Fe2O_3$	C_4AF

Fonte: Adaptado de Neville (2015).

Enquanto o componente alita (C_3S) é responsável pelo desenvolvimento da resistência mecânica nas idades iniciais, a belita (C_2S) reage lentamente com

a água e contribui pouco para a resistência mecânica nas primeiras idades. Porém, em um ano essa diferença reduz, e os dois componentes promovem a mesma resistência mecânica (RAMACHANDRAN *et al.*, 2002). Desta forma, é necessário que o cimento contenha entre 70 a 80% de silicatos de cálcio (C_3S e C_2S) para garantir a resistência mecânica determinada, sendo que mais de 60% do cimento deve ser constituído pela fase alita (C_3S) (JACKSON, 2003).

O restante da composição compreende compostos básicos necessários no processamento térmico ou são economicamente inviáveis para serem removidos das matérias-primas disponíveis. Estes incluem: C_3A (0-16%); C_4AF (1-17%); MgO (0,5-6%); Na_2SO_4 e K_2SO_4 (0,5-3%); e CaO (0,2-4%) (JACKSON, 2003).

A composição do cimento Portland, não contendo materiais secundários e tendo razão de alumina/óxido de ferro maior ou igual a 0,64, pode ser calculada baseado nas equações de Bogue. Os termos entre parênteses representam a porcentagem daquele determinado óxido (C, S, A, F ou C_3S) na massa total de cimento (JACKSON, 2003):

$$\%C_3\mathrm{S} = 4{,}017(\mathrm{C}) - 7{,}6(\mathrm{S}) - 6{,}718(\mathrm{A}) - 1{,}43(\mathrm{F}) - 2{,}85(\mathrm{S}) \quad \text{(Equação 2)}$$

$$\%C_2\mathrm{S} = 2{,}867(\mathrm{S}) - 0{,}7544\,(C_3S) \quad \text{(Equação 3)}$$

$$\%C_3\mathrm{A} = 2{,}65(\mathrm{A}) - 1{,}692(\mathrm{F}) \quad \text{(Equação 4)}$$

$$\%C_4\mathrm{AF} = 3{,}043(\mathrm{F}) \quad \text{(Equação 5)}$$

Deve ser ressaltado que a equação de Bogue subestima o teor de C_3S e superestima o de C_2S, porque outros óxidos substituem parte do CaO no C_3S. Não existem C_3S e C_2S quimicamente puros no clínquer de cimento Portland. Métodos como fluorescência de raios-X (FRX), espectrometria de raios-X, absorção atômica, fotometria de chama e microssonda eletrônica (EPMA) melhoram a estimativa da composição do cimento (NEVILLE, 2015).

Diferentes tipos de cimentos são obtidos por meio da proporcionalidade adequada das matérias-primas a fim de se obter proporções dos diversos compostos (NEVILLE, 2015). As características gerais de composição, finura e resistência à compressão de cimentos classificados pela ASTM C-150 estão mostradas na Tabela 2.

Tabela 2 – Características da composição, finura e resistência à compressão de alguns cimentos comerciais.

Designação pela ASTM C-150	Composição (%)				Finura (cm^2/g)	% da resistência à compressão com relação ao cimento geral		
	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF		1 dia	2 dias	28 dias
Geral	50	24	11	8	1800	100	100	100
Moderada resistência a sulfatos e moderado calor de hidratação	42	33	5	13	1800	75	85	90
Alta resistência inicial	60	13	9	8	2600	190	120	110
Baixo calor de hidratação	26	50	5	12	1900	55	55	75
Resistente a sulfatos	40	40	4	9	1900	65	75	85

Fonte: Adaptado de Ramachandran *et al.* (2002).

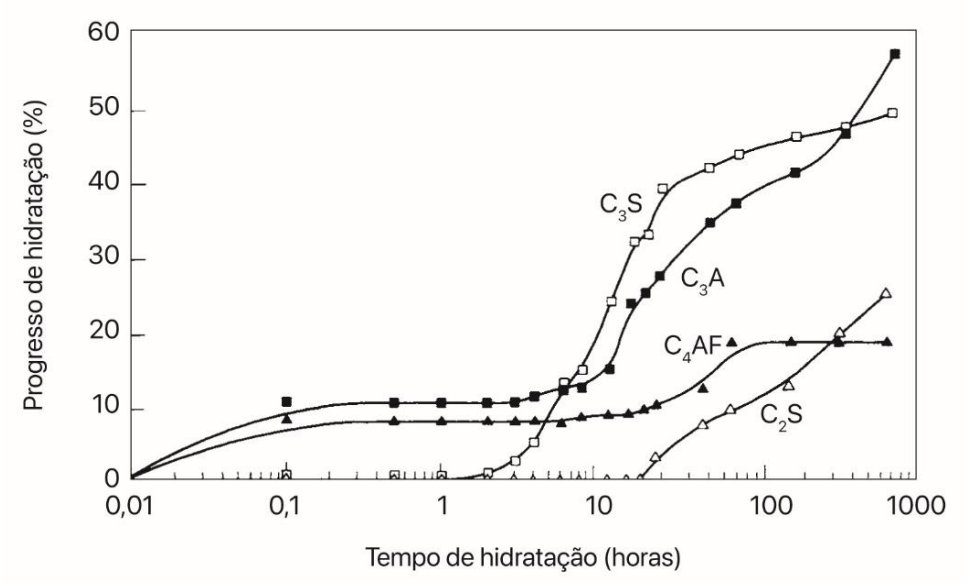
2.1.2 Hidratação

O cimento Portland anidro adquire propriedade adesiva quando misturado à água, pois a hidratação do cimento gera compostos que possuem propriedades de pega e endurecimento. Em outras palavras, a presença de água, dos silicatos e dos aluminatos listados na Tabela 1 formam produtos hidratados que, com o tempo, resultam em uma massa firme e resistente, ou seja, a pasta de cimento hidratada (MEHTA *et al.*, 2008; NEVILLE, 2015).

A relação mútua de água e cimento na mistura (a/c) afeta a reologia da suspensão produzida, o progresso da hidratação e as características do material hidratado. Uma proporção a/c entre 0,3 e 0,6 exibe uma consistência de pasta chamada de “pasta fresca de cimento” que endurece à medida que a hidratação progride e se converte em uma “pasta endurecida de cimento”. O termo “pega” significa uma perda repentina de plasticidade da pasta original e sua conversão em um material sólido com uma resistência mecânica quase mensurável enquanto o endurecimento representa o desenvolvimento de dureza e resistência que seguem a fixação da pasta. Vários fatores influenciam o progresso da hidratação e sua cinética, entre eles, composição de fases do cimento, finura do cimento, relação água/cimento, temperatura de cura, aditivos químicos e adições, isto é, materiais intercalados com cimento em grandes quantidades (ODLER, 1998).

Os principais compostos hidratados são classificados em aluminato tricálcico hidratado e silicatos de cálcio hidratados, e a evolução da hidratação do cimento pode ser avaliada por meio do calor de hidratação e quantidade de $Ca(OH)_2$ da pasta (NEVILLE, 2015). Os aluminatos são conhecidos por hidratarem mais rápido do que os silicatos, conforme Figura 1. Desta forma, adiciona-se o sulfato de cálcio para previnir a pega imediata dos aluminatos. A perda de consistência e o tempo de pega característicos da pasta do cimento Portland são amplamente determinadas por reações de hidratação envolvendo os aluminatos. Os silicatos, que compõem aproximadamente 75% do cimento Portland comum, têm um importante papel na resistência mecânica (MEHTA *et al.*, 2008).

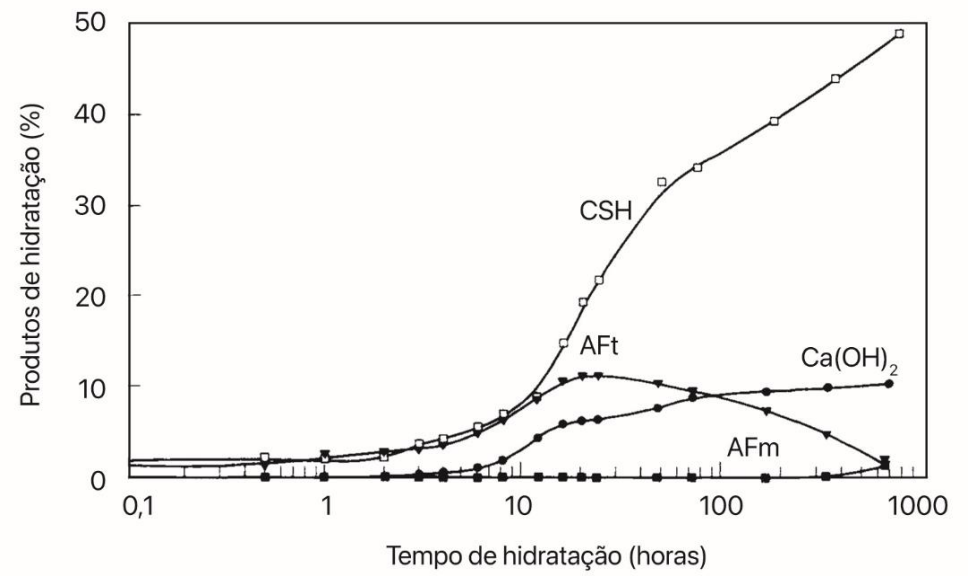
Figura 1 – Progresso de hidratação dos compostos do clínquer.



Fonte: Adaptado de Odler (1998, p. 267).

Os principais processos que ocorrem na hidratação de cimentos Portland são bem conhecidos. As fases do clínquer hidratam-se, resultando principalmente na formação de CSH, portlandita, etringita e AFt/Afm (Figura 2) (ODLER, 1998; MEHTA *et al.*, 2008; LOTHENBACH *et al.*, 2011).

Figura 2 – Formação dos produtos hidratados do cimento.



Fonte: Adaptado de Odler (1998, p. 267).

O CSH é o principal produto da hidratação da pasta de cimento Portland, enquanto a portlandita (hidróxido de cálcio cristalino) é o segundo produto mais abundante. Este composto pode ser facilmente distinguido do restante da pasta por microscopia ótica (ODLER, 1998). A fase AFm refere-se a uma família de aluminatos de cálcio hidratados, com base na estrutura semelhante a hidrocalumita do $4CaO{\cdot}Al_2O_3{\cdot}13–19\ H_2O$. No entanto, o OH^- pode ser substituído por SO_4^{-2} e CO_3^{-2}. Essas composições não formam soluções sólidas e, do ponto de vista mineralógico, se comportam como fases separadas. Portanto, muitos cimentos hidratados conterão misturas de fases AFm (Figura 2) (MATSCHEI *et al.*, 2007).

2.1.2.1 Aluminatos – C_3A

Embora a quantidade de C_3A que a maioria dos cimentos possui é relativamente pequena, seu comportamento e sua relação estrutural com outras fases do cimento se tornam importantes. A reação do C_3A com a água é imediata e libera grande quantidade de calor de hidratação. O C_3A hidratado forma um material intersticial prismático escuro, possivelmente com outras substâncias em solução sólida. Muitas vezes, apresenta placas cercadas por silicatos de cálcio hidratados (MEHTA *et al.*, 2008; NEVILLE, 2015).

A hidratação rápida do C_3A é desacelerada com a adição de gipsita durante o processo de produção do cimento. Deste modo, na prática não são

importantes as reações de hidratação do C_3A sozinho, mas sim com a presença de gipsita (MEHTA *et al.*, 2008). Com o C_4AF, o sulfato de cálcio pode acelerar a hidratação dos silicatos (NEVILLE, 2015).

A etringita é formada como o principal produto da hidratação do C_3A devido à elevada relação sulfato/aluminato no início do processo. Além disso, quantidades menores de monossulfato são produzidas se houver um desequilíbrio entre a reatividade de C_3A e a taxa de dissolução do sulfato de cálcio. A formação da etringita contribui para a perda de consistência e para o início de solidificação da pasta, com a formação de um pico de calor (ODLER, 1998; MEHTA *et al.*, 2008). Após uma rápida reação inicial, a taxa de hidratação dos aluminatos é desacelerada distintamente. A duração deste período de repouso pode variar e aumentar com o aumento da quantidade de sulfato de cálcio na pasta original (ODLER, 1998).

O C_3A contribui pouco ou nada para a resistência do cimento, exceto nas primeiras idades. Quando a pasta de cimento endurecida é atacada por sulfatos, a formação de sulfoaluminato de cálcio a partir do C_3A leva a uma expansão, o que pode desagregar a pasta endurecida. No entanto, o C_3A funciona como fundente, facilitando a combinação do óxido de cálcio com a sílica, auxiliando na fabricação do cimento (NEVILLE, 2015).

2.1.2.2 Silicatos – C_3S e C_2S

As velocidades de hidratação do C_3S e do C_2S variam consideravelmente, conforme mostra a Figura 1. O C_3S é o principal e mais importante constituinte do cimento Portland, majoritariamente responsável pelos tempos de pega e endurecimento. Sua composição exata e reatividade podem variar em diferentes cimentos.

Como produtos da hidratação do C_3S à temperatura ambiente, forma-se uma fase de hidrato de silicato de cálcio amorfo com uma razão molar CaO/SiO_2 inferior a 3,0, denominada “fase CSH” e o $Ca(OH)_2$ (CH), como pode ser observado na Figura 2. Já o C_2S libera uma pequena quantidade de calor durante sua lenta hidratação, e é responsável pelo aumento de resistência nas idades avançadas, produzindo CSH e hidróxido de cálcio em menor volume (ODLER, 1998).

Devido ao caráter amorfo do CSH e sua estequiometria variável, a cinética de hidratação pode apenas ser estudada pela determinação direta da quantidade de C_3S não reagido em função do tempo de hidratação. Alguns métodos indiretos, como a determinação do calor de hidratação ou a estimativa do teor de água não evaporável, são utilizados para estudar a cinética da hidratação. Ao usar tais métodos, presume-se tacitamente uma natureza constante do material hidratado assim formado, embora exista evidência de que varia com o grau de hidratação (ODLER, 1998).

Apesar dos produtos formados serem semelhantes, alguns fatos entre o C_3S e C_2S devem ser observados. Primeiro, espera-se que a resistência final do cimento Portland de alto teor de C_2S seja maior do que o cimento de alto teor de C_3S. Isso é explicado pelos cálculos estequiométricos que evidenciam diferença na produção de CSH. O C_2S leva vantagem ao produzir 82% do composto em sua hidratação, contra 61% do C_3S. Além disso, como a durabilidade do cimento a ambientes agressivos é reduzida com presença de CH, o cimento com alto teor de C_2S torna-se mais durável a estes ambientes (MEHTA *et al.*, 2008).

Foi constatado que a principal diferença entre a microestrutura e a hidratação do cimento em comparação com C_3S é o preenchimento mais uniforme e eficiente do espaço originalmente preenchido com água. Isso leva a poros muito mais finos nas pastas de cimento. Além disso, a depleção[1] de sulfato após o principal pico de calor do C_3S é impactada pela quantidade de CSH formada, pois os íons sulfato são absorvidos no CSH durante as primeiras horas de hidratação e liberados posteriormente, levando à formação de etringita antes da formação das fases de Afm (SCRIVENER *et al.*, 2019).

2.1.2.3 Ferrita – C_4AF

Sob condições comparáveis, os produtos de hidratação formados na hidratação das fases de ferrita são semelhantes em muitos aspectos aos formados a partir de C_3A, embora as taxas de reação sejam diferentes (ODLER, 1998; ROSE *et al.*, 2006). Quando o C_4AF se hidrata na presença do sulfato de cálcio ($CaSO_4$), os produtos são estruturalmente semelhantes àqueles formados da hidratação do C_3A (MEHTA *et al.*, 2008).

[1] Redução de alguma substância ou processo físico, químico ou biológico.

A reatividade da fase ferrita pode variar em uma ampla faixa e parece depender da razão Al/Fe. Geralmente, diminui com o aumento do teor de Fe. (ODLER, 1998). A função exercida pelo C_4AF na pega inicial e nas reações de endurecimento da pasta de cimento Portland depende, basicamente, de sua composição química e temperatura de desenvolvimento (MEHTA *et al.*, 2008).

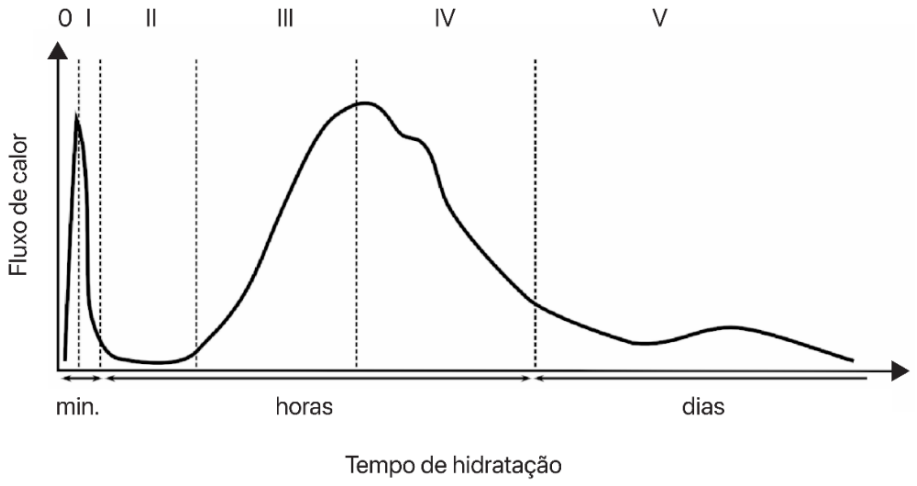
A hidratação de C_4AF forma um hidrossilicato de cálcio e alumínio (*hydrogarnet*) (C_3AH_6) em que Fe substitui aleatoriamente o Al, bem como uma fase amorfa de FeOOH. Produtos intermediários como AFm (isto é, uma fase lamelar mal organizada) também são formados, mas evoluem rapidamente para o *hydrogarnet*. O ferro parece não estar incorporado na estrutura do Afm (ROSE *et al.*, 2006).

2.1.3 Calor de hidratação

A hidratação do cimento Portland é uma reação altamente exotérmica. O fluxo de calor, normalmente em watts por grama de material cimentício, e a quantidade de calor total liberada, em joules por grama de material cimentício, podem ser utilizados para caracterizar a reatividade do material, além dos tempos de pega e endurecimento (MEHTA *et al.*, 2008; RAMADJI *et al.*, 2020; DIXIT *et al.*, 2021).

Desta forma, a cinética das reações de hidratação pode ser mensurada por meio de um calorímetro isotérmico que gera uma curva característica como a apresentada na Figura 3. É importante mencionar que os picos podem ser resultados de processos simultâneos (BAZZONI, 2014).

Figura 3 – Curva característica de fluxo de calor.



Fonte: Adaptado de Bazzoni (2014, p. 2).

De acordo com Bazzoni (2014), primeiramente, em (0) ocorre a dissolução das fases anidras. Aqui, a dissolução do C_3A é controlada pelo sulfato de cálcio, evitando o endurecimento do material. Em (I), a reações desaceleram rapidamente e há em (II) um período de baixa atividade química. Em (III), ocorre a formação de CSH e CH devido à hidratação de C_3S e C_2S, ocasionando o principal pico da hidratação. Em (IV), observa-se uma nova desaceleração das reações e um segundo pico, decorrente da formação de etringita. Por fim, em (V), quando o gesso é totalmente consumido, ocorre um terceiro pico devido à formação de Afm, resultado da reação da etringita com o C_3A.

2.2 ADIÇÕES MINERAIS

A substituição do clínquer por resíduos industriais minerais, cujo descarte inadequado causa impactos ambientais, sociais e econômicos, é uma estratégia para melhorar a sustentabilidade dos cimentos, reduzindo o consumo de energia e aumentando a produção sem exigir novos fornos de produção (MEYERS *et al.*, 2006; ZHANG *et al.*, 2016; APRIANTI, 2017; SCRIVENER *et al.*, 2018).

Os *SCM*s são compostos de materiais siliciosos amorfos (YAO *et al.*, 2020a), e representam uma fonte de matéria-prima relativamente barata e amplamente disponível, capaz de substituir até 50% de clínquer, mantendo um desempenho semelhante aos cimentos existentes. Aumentar o teor de substituição de clínquer para 40%, por exemplo, poderia evitar até 400 milhões de toneladas de emissões de CO_2 anualmente (SCRIVENER *et al.*, 2018).

Os substitutos mais comuns são os subprodutos reativos: escória de alto forno granulado, cinzas volantes e lodo de resíduos (TSAKIRIDIS *et al.*, 2008; LIZARAZO-MARRIAGA *et al.*, 2011; LIU *et al.*, 2014; MA *et al.*, 2016), destacando o uso de resíduos da indústria siderúrgica (DA SILVA *et al.*, 2016; BORGES MARINHO *et al.*, 2017; DINIZ *et al.*, 2017), bem como da indústria de mineração (LI *et al.*, 2010; HUANG *et al.*, 2013c, 2013b; YOUNG *et al.*, 2019; YAO *et al.*, 2020b, 2020a). Entretanto, qualquer material amorfo ou imperfeitamente cristalino contendo sílica, alumina e/ou cal pode ser potencialmente um *SCM* reativo (SCRIVENER *et al.*, 2018).

A utilização adequada de materiais residuais leva ao desenvolvimento de cimentos com demanda reduzida de materiais naturais, o que ajuda a reduzir o custo de construção (BHAGATH SINGH *et al.*, 2019). Essa estratégia pode ser

acompanhada de vantagens tecnológicas, como aprimoramentos no desempenho mecânico (BERNDT, 2009; NIE *et al.*, 2015), e na durabilidade em ambientes agressivos (IRASSAR *et al.*, 1996; MONTEIRO *et al.*, 2003; ORTEGA *et al.*, 2012, 2018; GLINICKI *et al.*, 2016).

As reações químicas ocorridas entre os íons de sulfato e o aluminato de tricálcico (C_3A) e o hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$) produzem, respectivamente, etringita e gesso, levando à expansão e fissuração do concreto (TIAN *et al.*, 2000). Sendo assim, os métodos convencionais para restringir ataques de sulfato incluem o uso de cimento com menor teor de C_3A (TOSUN-FELEKOĞLU, 2012), e a redução de $Ca(OH)_2$, adicionando misturas minerais com menor teor de CaO ou materiais que podem consumir $Ca(OH)_2$ em reações pozolânicas (CHINDAPRASIRT *et al.*, 2007).

O RMF contém baixo teor de CaO e um certo teor de substâncias ativas (LI *et al.*, 2010) que reagem com o $Ca(OH)_2$ nas pastas de cimento, preenchendo espaços vazios e retardando a entrada de sulfato (SKAROPOULOU *et al.*, 2013). Portanto, o cimento com adição de RMF pode, teoricamente, obter um nível mais alto de resistência ao sulfato, melhorando a durabilidade de argamassas e concretos.

Os materiais pozolânicos, na presença de água, reagem com o CH à temperatura ambiente, para formar compostos com propriedades cimentícias. Pela norma brasileira, o cimento Portland composto (CP-II-Z) pode conter de 6 a 14% de massa de material pozolânico, enquanto o cimento Portland pozolânico (CP-IV) admite a incorporação de 15 a 50% de massa do material (ABNT, 2018b).

Entretanto, a mistura de *SCMs* com cimento Portland leva a um sistema mais complicado, onde a hidratação do cimento e a reação hidráulica do *SCM* ocorrem simultaneamente e podem influenciar a reatividade um do outro. A cinética da reação do *SCM* depende da composição química, da finura e da quantidade de fases reativas (LOTHENBACH *et al.*, 2011).

2.3 ADIÇÃO DE RMF EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS

Um portifólio bibliográfico sobre o uso de RMF na produção de materiais cimentícios foi levantado com artigos publicados a partir de 2009 (Tabela 3).

Tabela 3 – Artigos selecionados pela revisão sistemática da literatura.

Artigo	Referência	Título
1	CARVALHO *et al.* (2021)	*Influence of particle size-designed recycled mineral admixtures on the properties of cement-based composites*
2	MORAIS *et al.* (2021)	*Thermal and mechanical analyses of colored mortars produced using Brazilian iron ore tailings*
3	WANG *et al.* (2020)	*Application of calcareous iron ore tailings in the production of cement*
4	YAO *et al.* (2020b)	*Mechanical activation as an innovative approach for the preparation of pozzolan from iron ore tailings*
5	YAO *et al.* (2020a)	*Mechanical activation as an innovative approach for the preparation of pozzolan from iron ore tailings*
6	CARVALHO *et al.* (2020)	*Influence of high - charge and low - charge PCE - based superplasticizers on Portland cement pastes containing particle - size designed recycled mineral admixtures*
7	MAGALHÃES *et al.* (2020)	*Iron ore tailings as a supplementary cementitious material in the production of pigmented cements*
8	CARVALHO *et al.* (2019)	*More eco-efficient concrete: An approach on optimization in the production and use of waste-based supplementary cementing materials*
9	YOUNG *et al.* (2019)	*Preparation and characterization of Portland cement clinker from iron ore tailings*
10	WU *et al.* (2018)	*Properties of Cementitious Composites Containing Active/Inter Mineral Admixtures*
11	XIONG *et al.* (2017)	*Use of grounded iron ore tailings (GIOTs) and $BaCO_3$ to improve sulfate resistance of pastes*
12	LUO *et al.* (2016)	*Utilization of Iron Ore Tailings as Raw Material for Portland Cement Clinker Production*
13	FONTES *et al.* (2016)	*Mortars for laying and coating produced with iron ore tailings from tailing dams*
14	HUANG *et al.* (2013b)	*Development of green engineered cementitious composites using iron ore tailings as aggregates*
15	LI *et al.* (2010)	*Innovative methodology for comprehensive utilization of iron ore tailings Part 2: The residues after iron recovery from iron ore tailings to prepare cementitious material*
16	YI *et al.* (2009b)	*Iron ore tailings used for the preparation of cementitious material by compound thermal activation*

Fonte: Autor (2021).

Dos 16 artigos selecionados, quase metade foi publicada em 2021 ou 2020. Além disso, quase 60% destes artigos foram publicados em periódicos classificados pelo Qualis/Capes como A1, de alto impacto. Isto demonstra a importância deste tema perante os recentes rompimentos das barragens de rejeitos. O objetivo de cada artigo analisado está descrito na Tabela 4.

Tabela 4 – Tipo de uso do RMF por artigo analisado.

Artigo	Tipo de uso do RMF
(1), (2), (6), (7), (8), (10), (11)	Substituição parcial de cimento
(3), (9), (15)	Produção de clínquer
(4), (5), (16)	Produção de material pozolânico
(12)	Substituição parcial de argila
(13)	Substituição total de agregado e parcial de cal
(14)	Agregado no desenvolvimento de *ECC*[2]

Fonte: Autor (2021).

Embora os efeitos do uso do RMF na produção de materiais cimentícios tenham sido investigados nos últimos anos por diversos meios como relatados na Tabela 4, a relação da composição química do RMF com as propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade dos cimentos produzidos com RMF permanece complexa e necessita de estudos.

Os subtópicos seguintes são baseados na caracterização dos rejeitos e nos resultados encontrados experimentalmente por cada artigo.

2.3.1 Caracterização do RMF e programas experimentais

A composição química do RMF utilizado em cada artigo está apresentada na Tabela 5.

[2] Compósito cimentício.

Tabela 5 – Composição química do RMF por artigo.

Artigo	RMF (% peso)				
	SiO_2	**Fe_2O_3**	**CaO**	**Al_2O_3**	**MgO**
(1), (6), (8)	35,50	56,90	0,20	5,80	-
(2)	22,30	65,78	0.01	4,25	0,14
(3)	26,55	34,88	12,42	11,00	2,98
(4), (5)	62,04	22,06	4,27	5,80	3,40
(7)	23,00	66,98	-	3,20	-
(9)	29,14	17,01	13,20	5,01	16,27
(10)	71,21	10,62	3,22	5,04	3,22
(11)	51,89	13,45	23,31	5,39	1,93
(12)	45,41	10,86	12,41	19,07	7,23
(13)	24,19	45,92	-	4,82	-
(14)	69,52	8,13	4,14	7,44	3,72
(15)	63,40	6,09	13,29	9,92	1,50
(16)	63,07	13,82	8,18	5,60	0,23

Fonte: Autor (2021).

Pela Tabela 5, pode-se observar que o RMF é composto principalmente por SiO_2, Fe_2O_3, CaO, Al_2O_3 e MgO. Especificamente em (9), o RMF contém alto teor de MgO e baixo teor de SiO_2 comparado com os outros rejeitos relatados na Tabela 5. Outros rejeitos que possuem baixo valor de SiO_2 estão presentes nos artigos (2), (3), (13) e em (7), que possui o menor valor.

Além disso, no artigo (12), o teor de Al_2O_3, principal componente da argila, é de 19,07%, o que pode ser considerado alto, comparado ao restante dos rejeitos que estão entre os valores de 1,50 a 11,00%. Neste artigo, o RMF substitui a argila natural na produção de cimento (LUO *et al.*, 2016).

Os rejeitos utilizados nos ensaios experimentais de (4), (5), (10), (14) (15) e (16) contêm mais de 60% em peso de SiO_2 e pertencem ao tipo com alto teor de sílica enquanto os artigos (2) e (7) possuem alto teor de Fe_2O_3, acima de 60%.

Ainda de acordo com a Tabela 5, observa-se que o RMF utilizado em todos os artigos, exceto por (9), atende à exigência da NBR 12653 (ABNT, 2014), que determina o somatório dos teores de Fe_2O_3, SiO_2 e Al_2O_3 ser superior à 70%.

As principais fases cristalinas do RMF utilizado em cada artigo obtidas pelo ensaio de difração de raios-X (DRX) estão agrupadas na Tabela 6.

Tabela 6 – Fases cristalinas do RMF por artigo.

Artigo	Q	G	H	K	S	D	A	Se	Ma	Kf	Ar	Mi
(1), (6), (8)	x	x	x									
(2), (7)	x	x	x	x								
(3)	x		x	x	x	x						
(4), (5)	x						x					
(9)	x					x		x	x	x		
(10)	x										x	
(12)							x					
(13)	x		x	x							x	
(14)	x						x			x		
(15)	x				x			x				x
(16)	x								x			x
Total	14	5	7	4	2	2	4	2	2	2	2	2

Q – Quartzo
G – Goetita
H – Hematita
K – Caulinita
S – Siderita
D – Dolomita
A – Anfibólio
Se – Serpentina
Ma – Magnetita
K-f – K-feldspato
Ho – Hornblenda
Ar – Arnotita
Mi - Mica

Fonte: Autor (2021).

De acordo com a Tabela 6, o quartzo é a fase cristalina mais frequente nos rejeitos utilizados, seguido pela hematita, goetita e caulinita. As fases cristalinas que foram citadas apenas uma vez não foram incluídas na Tabela 6. É o caso do mineral ferrotschermakite em (12), calcita em (3), anortoclase e tremolita em (16), clorita e hornblenda em (10) e estilpnomelano e moscovita em (4) e (5). O artigo (11) não apresentou resultados quanto à composição mineralógica do RMF.

A Tabela 7 lista os teores de uso do RMF e os programas experimentais dos artigos cujos resultados dos ensaios realizados são de interesse desta pesquisa. Nesta etapa, são considerados apenas os artigos que investigaram a substituição de cimento, argila, agregado ou cal por RMF (vide Tabela 4).

Tabela 7 – Programa experimental por artigo.

Artigo	Teor de RMF (%)	Ensaios realizados				
		RC	TG	C	AA	AS
(1)	25, em volume	X	X	X		
(3)	0, 3, 6, 9 e 10, em massa	X	X			
(6)	25, em volume					
(7)	0, 10, 20 e 30, em massa	X			X	X
(8)	0, 10, 20, 30, 40, 50, 40, em volume	X				
(9)	5, 10, 15, 20, em massa	X				
(10)	30 e 50, em massa	X				
(11)	0, 15 e 30, em massa	X				
(12)	0 e 100	X		X		
(13)	0, 10, 20, 50 e 100, em volume	X				
(15)	30, 40 e 50, em massa	X				

RC – Resistência à compressão
TG – Termogravimetria
C – Calorimetria
AA – Absorção de água
AS – Ataque de ácido sulfúrico

Fonte: Autor (2021).

2.3.2 Resistência à compressão

A Tabela 8 resume os maiores resultados para resistência à compressão dos artigos analisados.

Tabela 8 – Maiores resultados do ensaio de resistência à compressão de cada artigo.

Artigo	Teor de RMF (%)	Óxidos (%)		Idade (dias)	Resistência à compressão (MPa)	Relação com amostra referência (%)
		Ferro	Silício			
(1)	25	56,90	35,50	28	36,70	- 4,68
(3)	3	65,78	22,30	28	55,30	- 5,63
(7)	10	66,68	23,00	91	54,11	- 10,97
(8)	20	56,90	35,50	28	~96,00	+ 2,93
(9)	10	17,01	29,14	28	52,30	+3,36
(10)	30	10,62	71,21	180	62,00 (aprox.)	- 8,82
(11)	15	13,45	51,89	91	63,00 (aprox.)	+ 5,00 (aprox.)
(12)	100	10,86	45,41	28	48,60	+5,20
(13)	25	45,92	24,19	28	15,40	+ 13,00
(15)	30	6,09	63,40	90	54,30	Não há amostra referência

Fonte: Autor (2021).

Analisando a Tabela 8, é importante enfatizar que o teor de uso do RMF não pode ser considerado fator de comparação entre os resultados obtidos pelos artigos, pois é possível perceber que não há proporcionalidade entre o teor de uso e a resistência à compressão. Isso pode ser atribuído à composição mineral da área de exploração da mineração geológica a partir da qual os rejeitos foram produzidos, a composição química do próprio rejeito, o tratamento aplicado aos rejeitos, o tipo de cimento ou clínquer utilizado e o método de teste aplicado nas amostras.

Partindo para uma discussão individual, em (1), foram investigados rejeitos com diferentes áreas superficiais. A argamassa com o RMF mais grosso atingiu 68% da resistência à compressão da argamassa referência, explicado pelo aumento da entrada de ar no material. Porém, o teor de CH das pastas com este tipo de rejeito indica ganhos de resistência a longo prazo. Já para o outro tipo de rejeito, mais fino, a resistência à compressão atingiu 95% do desempenho da amostra referência, classificando o material como pozolânico de acordo com a norma brasileira.

No artigo (3), os autores afirmam que há um declínio na resistência à compressão devido à diminuição de C_3S e ao aumento de C_2S na produção dos clínqueres à medida que aumenta a incorporação de RMF. Desta forma, para atingir os requisitos de desempenho da norma chinesa, o teor máximo de RMF utilizado deve ser de 6%.

De forma semelhante, o artigo (7) obteve sucessivos decréscimos na resistência à compressão à medida que o teor de substituição de cimento por RMF nas argamassas aumentou. Apesar da queda, a resistência das amostras com 10% de RMF apresentou valores acima de 40 MPa, atendendo às especificações do cimento composto tipo pozolânico classe 40. Os autores ressaltam que as argamassas com rejeitos calcinados são mais resistentes do que argamassas com rejeitos *in natura* devido à presença de *metacaulim* nestes rejeitos. Ainda assim, aos 28 dias, todas as amostras atingiram resistência superior a 32 MPa, satisfazendo às especificações do cimento Portland tipo pozolânico de acordo com a NBR 16697 (ABNT, 2018).

O artigo (8) comparou argamassas com diferentes adições de resíduos industriais, sendo eles, RMF, escória de alto forno, rejeitos de quartzo e quartzito. A resistência à compressão da argamassa com RMF obteve os menores valores

junto com os maiores índices de vazios comparados aos outros rejeitos. Mesmo assim, a composição com 20% de RMF alcançou um valor maior (quase 3%, Tabela 8) comparada à amostra referência aos 28 dias.

Um acréscimo similar de 3,4% na resistência à compressão foi observado em (9) nas amostras com 10% de substituição de cimento por RMF, aos 28 dias, atingindo 52,3 MPa. Porém, a amostra com 20% de RMF diminui acentuadamente este valor para 38,4 MPa. Esta diferença, como em artigos citados anteriormente, é atribuída à redução significativa de C_3S da composição.

Em (10), conforme a relação a/c e o teor de substituição de cimento por cinza volante e RMF aumentam, a resistência à compressão diminui. Em idades iniciais, as adições minerais atuam como fíler e o impacto à longo prazo na resistência à compressão se torna maior apenas quando o teor de substituição é de 50%.

As pastas de cimento de (11) com substituições de 15 e 30% sofreram uma perda de 7 a 14%, respectivamente, na resistência comparada à amostra referência aos 28 dias devido à redução nos produtos de hidratação do cimento. Entretanto, em idade mais avançada, as pastas com 15% de RMF apresentaram um aumento de 6,9% na resistência, atingindo aproximadamente 62 MPa.

A resistência à compressão das argamassas de (13) com substituição de areia por RMF foi melhor quando comparada às argamassas convencionais aos 28 dias. Os autores afirmam que quanto maior a relação cimento/RMF, melhor será o desempenho mecânico da argamassa, devido ao fenômeno de disposição de grãos de RMF pelos produtos da hidratação do cimento.

No artigo (15), o comportamento pozolânico dos rejeitos elevou a resistência à compressão das argamassas com adição de RMF comparada à argamassa referência aos 3, 28 e 90 dias de cura. Além disso, foi verificado que o tratamento térmico realizado nos rejeitos promoveu uma atividade cimentícia fundamental ao desenvolvimento da resistência.

Por fim, é possível resumir que os principais fatores que influenciam a resistência à compressão dos cimentos com RMF são a área superficial do rejeito, sendo melhor o desempenho quando o rejeito é mais fino, o desenvolvimento de C_3S que afeta diretamente a resistência à compressão, o teor de utilização de rejeito, que na maioria dos artigos é inversamente

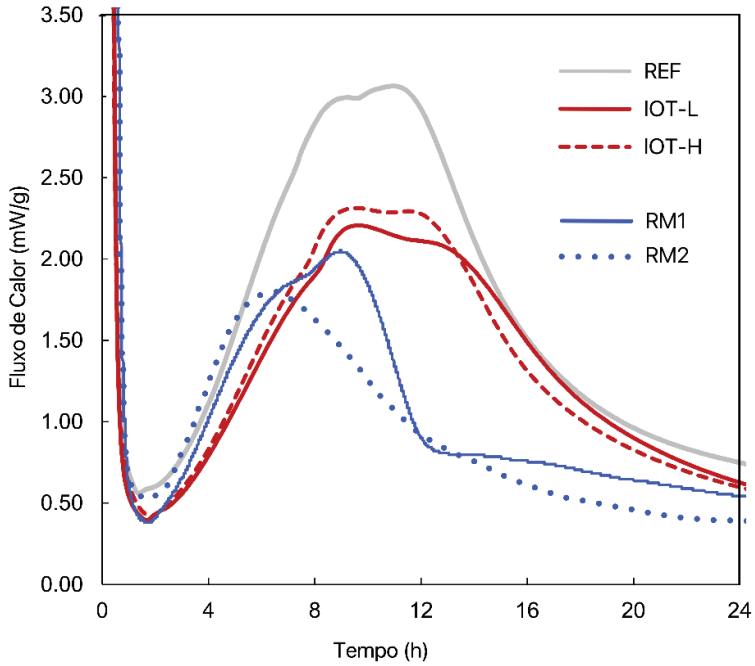
proporcional ao desenvolvimento da resistência e o tratamento térmico aplicado ao rejeito, que melhora os resultados.

2.3.3 Análise termogravimétrica e calorimetria isotérmica

As curvas termogravimétricas obtidas em (1) mostram que o RMF mais fino resultou em uma redução de 23 e 27% no conteúdo de CH em comparação com a pasta referência aos 28 e 91 dias, respectivamente. A ativação pozolânica por moagem ultrafina é responsável pela diferença de resultados obtidos pelos rejeitos mais finos e grossos. Além disso, conforme aumenta-se o teor de RMF na produção de cimento, menor é a quantidade de etringita, gel de CSH e CH, o que resulta em menores resistências físicas do cimento preparado (WANG *et al.*, 2020).

As curvas de fluxo de calor do artigo (1) (Figura 4, curvas REF, IOT-L e IOT-H) exibiram diferentes tempos e intensidades entre os picos exotérmicos. As curvas das pastas de cimento com RMF (IOT-L e IOT-H) possuem o primeiro pico mais alto do que o segundo, explicado pelo aumento da alcalinidade do cimento e pela formação precoce de Aft. A curva da pasta referência (REF) mostra a separação destes picos, com o segundo pico mais alto. A pasta com o rejeito mais fino (IOT-L) apresentou menor atraso entre os picos, indicando aumento no grau de hidratação das partículas de cimento.No artigo (12) (Figura 4, curvas RM1 e RM2), a amostra com RMF (RM2) tem um pico exotérmico mais fraco comparada à amostra referência (RM1) devido à menor taxa de hidratação do silicato de cálcio.

Figura 4 – Curvas de calorimetria isotérmica de Carvalho *et al.* (2021) e Luo *et al.* (2016).



Fonte: Adaptado de Carvalho *et al.* (2021) e Luo *et al.* (2016).

2.3.4 Absorção de água e resistência ao ácido sulfúrico

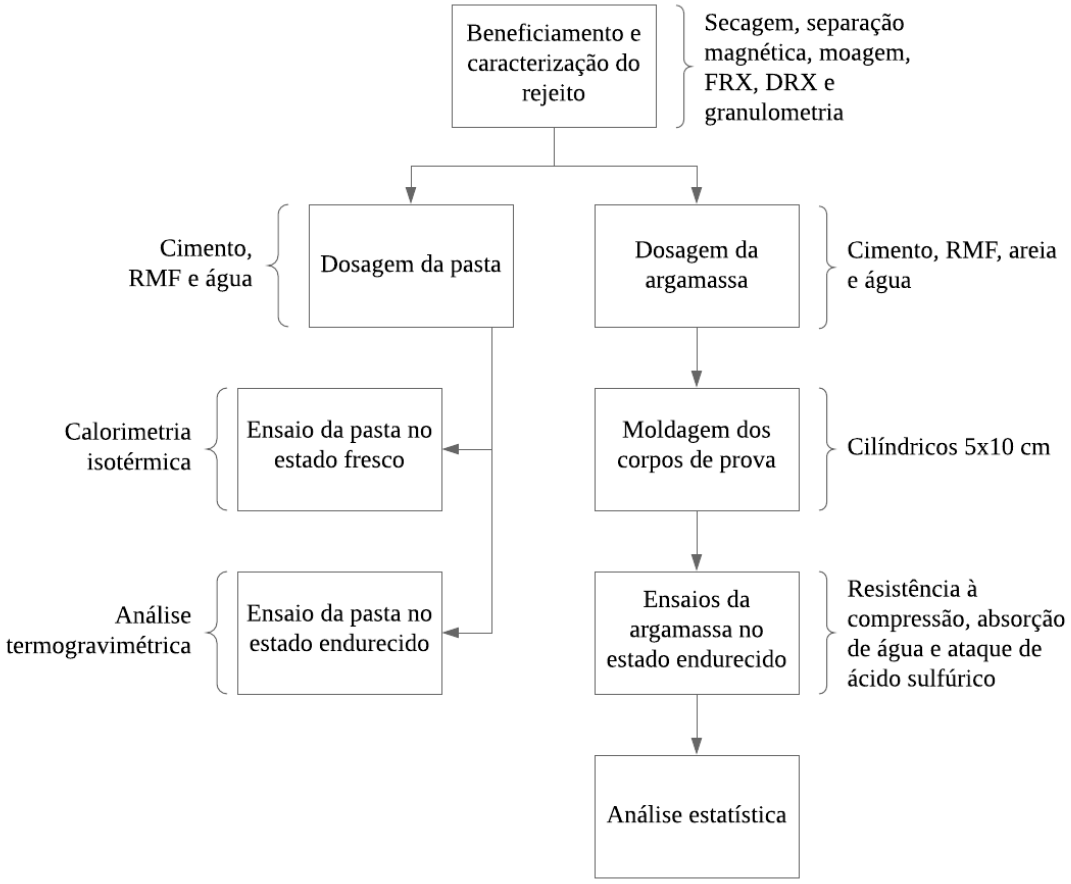
Com relação à absorção de água, a adição de RMF no cimento aumentou a porosidade do material contribuindo com uma maior taxa de percolação das substâncias, resultando em um pequeno aumento (aprox. 0,37%) na absorção de água (MAGALHÃES *et al.*, 2020).

No artigo (7), foi verificada a resistência das amostras com RMF expostas à solução de ácido sulfúrico. Como resultado, foi identificado que à medida que se aumenta o teor de substituição de cimento por RMF, a perda de massa da amostra diminui. A adição de RMF reduz, durante a hidratação do cimento, a quantidade de CH, altamente suscetível a ambientes ácidos.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O fluxograma de atividades (Figura 5) lista os procedimentos adotados pela pesquisa.

Figura 5 – Fluxograma de atividades.



Fonte: Autor (2019).

O RMF estava disponível para pesquisa no Laboratório de Mecânica dos Pavimentos e Materiais do CEFET-MG. Sendo assim, primeiro foi realizado o beneficiamento do material por meio de secagem e separação magnética a fim de se obter amostras com diferentes composições químicas. As amostras de RMF foram, então, caracterizadas pelas técnicas de fluorescência de raios X (FRX), difração de raios X (DRX), e granulometria à laser. Para realizar a inserção do RMF na produção do cimento Portland, o cimento tipo CP-V ARI (ABNT, 1991) foi escolhido como referência por ser normatizado com menor teor de adições e facilmente encontrado no mercado. Desta forma, com base na NBR 7215 (ABNT, 2019), as argamassas foram produzidas para os ensaios de resistência à compressão, absorção de água e ataque de ácido sulfúrico. Já para

os ensaios de termogravimetria e calorimetria, foram utilizadas pastas de cimento.

É válido comentar que materiais usualmente utilizados na produção do cimento, como escória granulada de alto forno, pozolanas e materiais carbonáticos, são chamados de adição, mesmo que tenham entrado nos cimentos compostos em substituição ao clínquer Portland.

Com os resultados obtidos foi realizada uma análise de variância (ANOVA) a fim de se avaliar a influência dos fatores independentes, sendo eles, o teor de RMF na composição do cimento e o tipo de composição química do RMF nas propriedades físicas, mecânicas e durabilidade do cimento compostos com RMF.

3.1 MATERIAIS

Os cimentos desenvolvidos foram analisados por meio de argamassas e pastas com os seguintes materiais: cimento Portland, areia normatizada, RMF e água.

3.1.1 Cimento Portland

O cimento Portland utilizado é do tipo de alta resistência inicial CP-V ARI, constituído de 95 a 100% de clínquer (ABNT, 1991). O objetivo deste cimento na pesquisa é a sua composição ser predominantemente clínquer Portland moído e gesso com baixo teor de material carbonático. Com isso, a substituição parcial do cimento em questão por RMF se aproxima da produção de cimentos Portland compostos. Outro aspecto é que como esse cimento não recebe na sua produção adições como escória granulada de alto forno e pozolanas, o impacto do teor de RMF na composição do cimento pode ser mais bem avaliada.

3.1.2 Rejeito de minério de ferro (RMF)

A amostra de RMF foi cedida, como coletada, pela mineradora Vallourec, retirada diretamente na pilha de rejeitos proveniente dos espessadores. Desta forma, o RMF constitui um material mais fino do que o rejeito proveniente das peneiras de alta frequência. A amostra foi coletada de forma aleatória, em vários pontos da pilha.

3.1.3 Areia

A areia normatizada utilizada foi produzida pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) do Estado de São Paulo. Foram utilizadas quatro faixas granulométricas diferentes, referentes aos materiais retidos nas peneiras nº 16 (1,19 mm), nº 30 (0,59 mm), nº 50 (0,297 mm) e nº 100 (0,169 mm), de acordo com a norma NBR 7215 (ABNT, 2019).

3.1.4 Água

A água utilizada é classificada como potável e foi fornecida pela Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA).

3.1.5 Hidróxido de cálcio

O hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$) foi utilizado em solução saturada para a cura dos corpos de prova segundo a NBR 7215 (ABNT, 2019). A massa molar fornecida pelo fabricante é 74,09 g/mol e a concentração mínima de $Ca(OH)_2$ é de 93%.

3.2 MÉTODOS UTILIZADOS

A pesquisa foi dividida em cinco etapas. Na primeira etapa foi realizado o beneficiamento do RMF, incluindo secagem, separação magnética e moagem. Durante a segunda etapa foi realizada a caracterização química e física das amostras de RMF por meio das técnicas de FRX, DRX e granulometria à laser. Na terceira etapa foram produzidas as pastas para avaliação dos cimentos no estado fresco e as moldagens das argamassas em corpos de prova. Na quarta etapa foram realizados os ensaios das pastas e das argamassas no estado endurecido. Por último, foi realizada uma análise estatística de análise de variância (ANOVA).

3.2.1 Beneficiamento do RMF

3.2.1.1 Recebimento e secagem

O RMF cedido pela mineradora estava disponível no Laboratório de Mecânica dos Pavimentos e Materiais do CEFET-MG e apresentava umidade de 14%. O material foi seco em estufa durante 24 horas a 100° C ± 5 °C e, após estar seco, foi destorroado manualmente. A Figura 6 apresenta o material após

secagem, antes da realização da separação magnética. Esta é a primeira amostra de RMF obtida, denominada como (N).

Figura 6 – Amostra RMF (N).

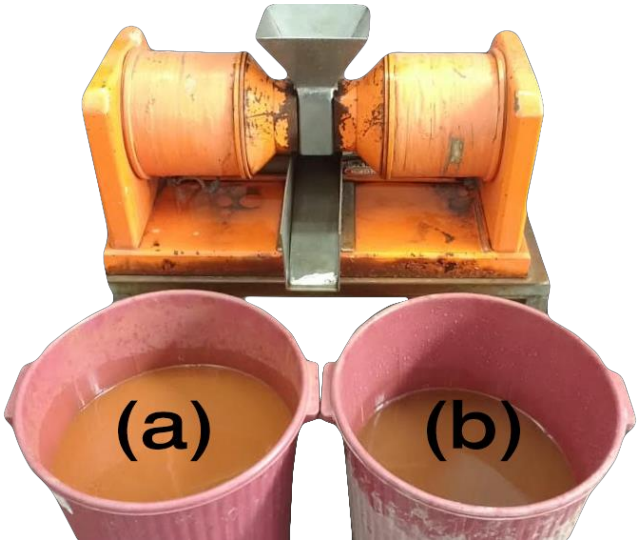


Fonte: Autor (2019).

3.2.1.2 Separação magnética

O processo de separação magnética a úmido foi realizado no Laboratório de Tratamento de Minério da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) com a utilização do equipamento WHIMS 3X4L do fabricante Carpco Inc., apresentado na Figura 7.

Figura 7 – Separador magnético.



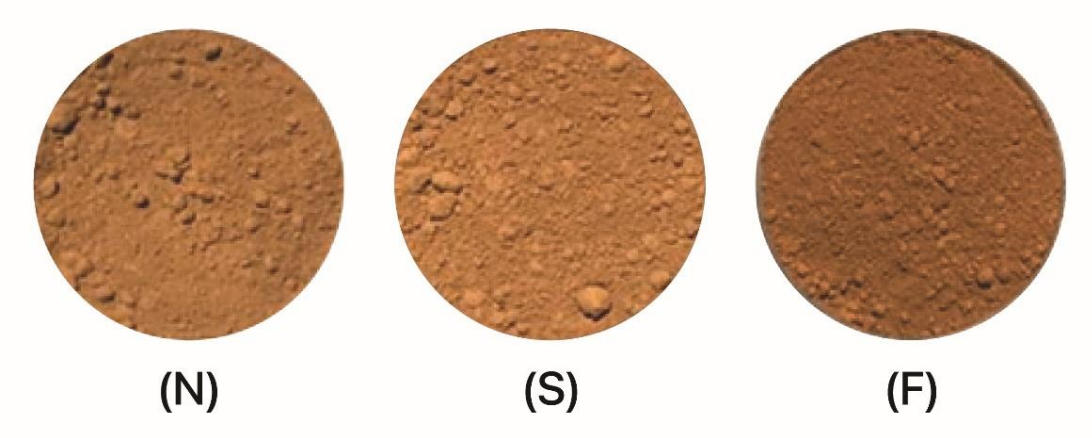
Fonte: Autor (2019).

Para o procedimento, foi preparada uma mistura de 400 g de RMF por litro d'água. A mistura foi liberada no funil com campo magnético ajustado em 7 ampéres, e então, o líquido de cor marrom, deslocou-se para o balde (a) (Figura

7ª). Em seguida, o campo magnético foi desligado e o balde (a) foi trocado pelo balde (b). Com o auxílio de uma mangueira, foi lançada água no equipamento para que todo material retido no campo magnético fosse retirado do funil. Assim, um líquido mais escuro foi liberado no balde (b) (Figura 7ᵇ).

Após a finalização da separação magnética, as duas amostras de RMF obtidas foram secas em estufa por 24 horas a uma temperatura de 100° C ± 5 °C. A primeira amostra de RMF, adotada como (S), corresponde ao rejeito obtido pelo líquido passante no balde (a) (Figura 7ª) e possui teor de óxido de ferro reduzido. A segunda amostra de RMF, chamada de (F), refere-se ao material obtido pelo líquido do balde (b) (Figura 7ᵇ) com maior teor de óxido de ferro. Como resultado, foram obtidas três amostras de RMF, com diferentes composições químicas: N, S e F (Figura 8).

Figura 8 – Amostras de RMF: N, S e F.



Fonte: Autor (2019).

3.2.1.3 Moagem

Com o objetivo de aumentar a reatividade do RMF, o material foi submetido à moagem em moinho de bolas para reduzir sua granulometria e aumentar sua área superficial. O tempo de moagem escolhido foi de 10 minutos, e a frequência estabelecida foi de 300 rpm.

O moinho planetário de alto desempenho utilizado no experimento é da marca FRITSCH, modelo Pulverisette 5 (Figura 9). O equipamento contém quatro recipientes de moagem com capacidade de 500 ml cada, constituído de óxido de zircônio. Foram utilizadas 20 esferas de moagem, de 20 mm de diâmetro, também de óxido de zircônio.

Figura 9 – Moinho planetário de bolas.



Fonte: Autor (2019).

3.2.2 Caracterização do RMF

3.2.2.1 Fluorescência de raios X – FRX

O ensaio de FRX foi realizado como objetivo de determinar qualitativamente a composição química das amostras de RMF (N, F e S). Da mesma forma, o cimento CP-V também foi caracterizado pela técnica de FRX. O equipamento utilizado foi o S2 Ranger da marca Bruker presente no Laboratório de Análises Químicas e Térmicas do PPGEC, localizado no CEFET-MG.

3.2.2.2 Difração de raios X – DRX

A mineralogia presente nas três amostras de RMF foi investigada por meio do ensaio de DRX. O equipamento utilizado no ensaio foi o difratômetro da marca SHIMADZU, modelo XRD-7000, do Laboratório de Caracterização de Materiais do Departamento de Engenharia de Materiais do CEFET-MG. As fases cristalinas foram identificadas por meio do software *Match* da *Crystal Impact*.

3.2.2.3 Granulometria à laser

A granulometria das três amostras de RMF foi analisada em um granulômetro à laser Cilas 1090 Particle Analyzer do Laboratório de Análises Químicas e Térmicas do PPGEC do CEFET-MG. A amostra foi previamente tratada por ultrassom por 60 segundos, para dispersão das partículas, e o ensaio foi realizado com obscuração de 10%.

3.2.3 Produção das argamassas e pastas

Após a caracterização do RMF, foi realizada a produção das argamassas e pastas. Para as argamassas, baseado na NBR 7215 (ABNT, 2019), a razão cimento/areia foi de 1:3 em massa, e a relação água/cimento (a/c) foi de 0,48, correspondente à consistência padrão da pasta de referência obtida com o cimento brasileiro.

Baseado na NBR 16697 (ABNT, 2018), foram determinados os percentuais de substituição de 10 e 20% de clínquer pelo RMF. Os cimentos com 10% de RMF se enquadram no cimento Portland composto com material pozolânico – CPII-Z, enquanto os cimentos com 20% de substituição atendem ao tipo cimento Portland pozolânico – CP-IV.

A Tabela 9 apresenta as quantidades de materiais utilizadas em cada composição dos cimentos, em gramas. REF é o cimento referência e não contém RMF. Os cimentos seguintes são definidos pela letra que representa o tipo de amostra de RMF utilizada (N, F ou S) e o número que determina o teor de substituição de clínquer pelo RMF.

Tabela 9 – Composição dos cimentos para os ensaios de argamassa.

Cimento	Adição (%)	Materiais (g)					
		CP-V	RMF			Areia	Água
			N	F	S		
REF	0	624				1872	300
N10	10	561,6	62,4			1872	300
N20	20	499,2	124,8			1872	300
F10	10	561,6		62,4		1872	300
F20	20	499,2		124,8		1872	300
S10	10	561,6			62,4	1872	300
S20	20	499,2			124,8	1872	300

Fonte: Autor (2021).

3.2.4 Calorimetria isotérmica

Neste ensaio foi utilizado o calorímetro isotérmico I-Cal 2000 HPC (Tenessine Instuments) (Figura 10) presente no Laboratório de Mecânica dos Pavimentos e Materiais do CEFET-MG.

Figura 10 – Calorímetro isotérmico.



Fonte: Autor (2021).

De acordo com o método A da norma americana C1702 (ASTM, 2017), o calorímetro isotérmico é configurado para que o material cimentício e a água possam ser equilibrados em temperatura e misturados enquanto estão na célula do calorímetro. A Tabela 10 apresenta as quantidades de materiais utilizadas em cada cimento, em gramas. A relação a/c foi de 0,48. Para todos os 7 cimentos, o fluxo de calor foi registrado durante as 72 horas após a adição da água ao cimento.

Tabela 10 – Composição dos cimentos para o ensaio de calorimetria isotérmica.

Cimento	Adição (%)	Materiais (g)				
		CP-V	RMF			Água
			N	F	S	
REF	0	40				19,2
N10	10	36	4			19,2
N20	20	32	8			19,2
F10	10	36		4		19,2
F20	20	32		8		19,2
S10	10	36			4	19,2
S20	20	32			8	19,2

Fonte: Autor (2020).

O calor total de hidratação, Qt, é o valor integrado dos dados de energia por grama de cimento (J/g) versus tempo obtido pelo calorímetro.

$$Q_t = \int_{t=t_0}^{t_e} P d_t \text{(Equação 6)}$$

Onde t_o é o tempo inicial de mistura do cimento e água e t_e é o tempo final do teste.

3.2.5 Análise termogravimétrica – TGA

A análise termogravimétrica (TGA) é um método capaz de analisar a reatividade da mistura pozolânica por meio das reações de hidratação do cimento (TEIXEIRA *et al.*, 2019). As curvas TGA foram obtidas usando um aparelho Hitachi STA7300 (Figura 11).

Figura 11 – Analisador termogravimétrico.



Fonte: Autor (2021).

Os materiais foram aquecidos de 35 a 1000 °C com uma taxa de aquecimento de 10 °C/min com fluxo de nitrogênio de 60 ml/min. As análises DTA foram realizadas para o cimento referência (REF) e compostos com RMF (N10, N20, F10, F20, S10, S20) aos 28 dias. A relação a/c foi fixada em 0,48. Os cimentos foram misturados em recipientes plásticos que foram mantidos lacrados durante o tempo de cura. Antes dos testes, os cimentos foram secos em estufa, durante 3 horas, quebradas em pequenos pedaços e moídas para atingir tamanhos de partículas abaixo de 45 μm. A massa média de amostra foi de 10 mg.

3.2.6 Moldagem e cura dos corpos de prova

A relação entre os ensaios realizados por meio de argamassas, idades do ensaio e tipo de corpos de prova estão listados na Tabela 11.

Tabela 11 – Relação entre ensaios, datas e tipo de CP.

Ensaio	**Idade (dias)**		**Dimensão do CP**
	28	**91**	**(cm)**
Resistência à compressão	X	X	5x10
Absorção de água	X		5x10
Resistência ao ácido sulfúrico	X		5x10

Fonte: Autor (2020).

A quantidade de corpos de prova (CP) necessária foi calculada a partir da combinação dos seguintes fatores: número de ensaios experimentais, tipos de amostra, teores de RMF, idades dos ensaios e número de CPs para cada traço de cimento. O Quadro 1 apresenta o cálculo dos 180 CPs.

Quadro 1 – Cálculo total do número de CPs.

- **Resistência à compressão:**

= nº dos tipos de amostra x nº de teores de RMF x nº de idades do ensaio x nº de CPs para cada traço de cimento:

3 x 3 x 2 x 5 = 90;

- **Absorção de água:**

= nº dos tipos de amostra x nº de teores de RMF x nº de idades do ensaio x nº de CPs para cada traço de cimento:

3 x 3 x 1 x 5 = 45;

- **Resistência ao ácido sulfúrico:**

= nº dos tipos de amostra x nº de teores de RMF x nº de idades do ensaio x nº de CPs para cada traço de cimento:

3 x 3 x 1 x 5 = 45;

= 90 + 45 + 45 = 180.

Fonte: Autor (2020).

Os CPs foram desmoldados após 24 horas segundo a NBR 7215 (ABNT, 2019) e curados imersos em solução saturada de hidróxido de cálcio até as idades dos ensaios (Tabela 12).

3.2.7 Resistência à compressão

A resistência à compressão foi ensaiada por meio do rompimento dos corpos de prova em idades de 28 e 91 dias segundo a NBR 7215 (ABNT, 2019). O ensaio foi realizado no Equipamento Universal da marca EMIC (Figura 12) presente no Laboratório de Mecânica dos Pavimentos e Materiais do CEFET-MG, calibrado para operar com taxa de incremento de tensão de 0,25MPa/s.

Figura 12 – Equipamento universal EMIC.



Fonte: Autor (2020).

A resistência à compressão é calculada pela seguinte equação:

$$F_{cj} = \frac{4F}{\pi D^2} \text{ (Equação 7)}$$

Onde F_{cj} é a resistência à compressão em MPa, F é a carga de ruptura do CP em N e D é o diâmetro médio do CP em mm.

3.2.8 Absorção de água e índice de vazios

O ensaio de absorção de água foi realizado no Laboratório de Mecânica dos Pavimentos e Tecnologia dos Materiais, no CEFET-MG com a utilização de balança hidrostática, estufa, cesto de arame e tanque de água, baseado na NBR 9778 (ABNT, 2005). Os valores de absorção de água por imersão e índice de vazios, ambas em %, foram obtidos pelas Equações 8 e 9:

$$A = \frac{M_{sat} - M_s}{M_s} x100 \text{ (Equação 8)}$$

$$Iv = \frac{M_{sat} - M_s}{M_{sat} - Mi} x100 \text{ (Equação 9)}$$

Em que A é a absorção de água, Iv é o índice de vazios, M_{sat} é a massa do CP saturado, M_s é a massa do CP seco em estufa e Mi é a massa do CP saturado imerso em água.

3.2.9 Resistência ao ácido sulfúrico

A resistência ao ácido sulfúrico foi verificada por meio da perda de massa do CP após imersão do CP em um ambiente agressivo de ácido sulfúrico de acordo com o método adotado por Magalhães *et al.* (2020). Para tanto, os CPs curados por 27 dias em solução saturada de cal foram secos em estufas a 100° C ± 5 °C, durante 72h, pesados e imersos em uma solução de ácido sulfúrico (H_2SO_4) com concentração de 5%, por volume. Após sete dias, os CPs foram retirados do ácido sulfúrico, lavados, escovados, secos em estufa a 100° C ± 5 °C, durante 72h, e pesados novamente para determinar a perda de massa.

Segundo o fabricante, o ácido sulfúrico utilizado possui densidade de 1,83 g/cm³ e pureza de 98%.

3.3 ANÁLISE DE VARIÂNCIA

A análise de variância (ANOVA) foi realizada para verificar quaisquer diferenças significativas entre os valores médios de resistência à compressão, absorção de água e resistência ao ácido sulfúrico para os diferentes tipos de composições químicas do RMF (N, F e S) e teores de RMF (0%, 10% e 20%).

A ANOVA é um tratamento estatístico aplicado aos resultados experimentais para determinar se há contribuição de determinados fatores e das interações entre estes fatores. As variáveis respostas são resistência à compressão, absorção de água e resistência ao ácido sulfúrico enquanto o tipo de composição química do RMF e o teor de RMF são as variáveis independentes. Para o cálculo, foi utilizado o RStudio versão 1.3.9.59.

A análise foi realizada com um nível de confiança de 95%. Desta forma, os valores P abaixo de 0,05 rejeitam a hipótese nula de igualdade entre as médias das amostras, e as variáveis independentes são consideradas significativas nas respostas.

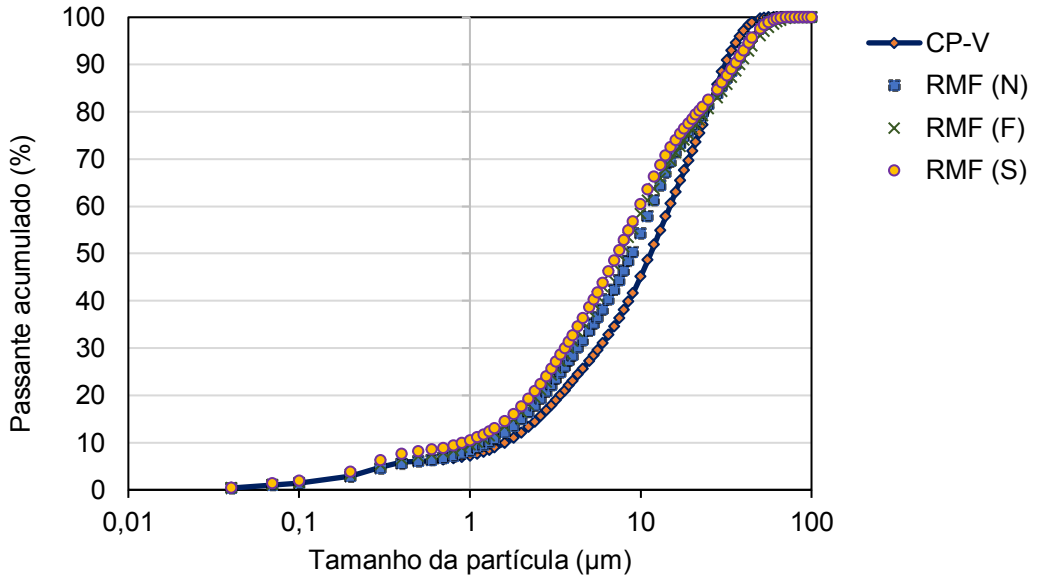
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO RMF E DO CIMENTO

4.1.1 Análise granulométrica

A Figura 13 e a Tabela 12 mostram os resultados das análises granulométricas realizadas nas amostras de RMF (N, F e S) e do cimento CP-V.

Figura 13 – Curvas granulométricas das amostras de RMF (N, F e S) e cimento CP-V.



Fonte: Autor (2020).

Tabela 12 – Análise granulométrica das amostras de RMF (N, F e S) e cimento CP-V.

Tamanho de partícula (µm)	CP-V	RMF		
		N	F	S
D_M	14,19	13,62	13,79	12,67
D_{10}	1,62	1,30	1,09	0,92
D_{50}	11,42	8,92	7,59	7,34
D_{90}	31,23	36,00	39,09	35,36

Fonte: Autor (2020).

Observando o gráfico da Figura 13 e a Tabela 12, verifica-se que a amostras de RMF apresentam diâmetro médio entre 12,67 e 13,62 µm e distribuição granulométrica similar ao cimento, que apresenta diâmetro médio de 14,19 µm. Desta forma, é possível afirmar que a separação magnética não alterou de forma significativa a granulometria das amostras de RMF.

Além disso, todas as amostras de RMF, quanto ao item distribuição granulométrica, atendem ao critério de materiais pozolânicos da NBR 12653

(ABNT, 2014) que determina o limite de 20% de material retido na peneira 45 µm. A granulometria reduzida do material gera maior área superficial e aumenta a reatividade do material, o que favorece a reação pozolânica (CHENG *et al.*, 2016).

4.1.2 Fluorescência de raios X - FRX

Na Tabela 13 estão apresentadas as composições químicas obtidas pelo ensaio de FRX das três amostras de RMF (N, F e S) e do cimento CP-V.

Tabela 13 – Composição química das amostras de RMF (N, F e S) e cimento CP-V.

Óxidos (%, em massa)	CP-V	RMF		
		N	F	S
SiO_2	23,29	27,11	17,69	35,78
Fe_2O_3	4,99	56,59	68,42	45,99
Al_2O_3	6,45	2,20	3,38	3,38
$SiO_2 + Fe_2O_3 + Al_2O_3$		85,90	89,49	85,15
CaO	55,92	-	-	-
MgO	5,01	-	-	-
SO_3	-	0,17	0,17	0,23

Fonte: Autor (2019).

Observa-se pela Tabela 13 que as amostras de rejeito são constituídas quase em sua totalidade por Fe_2O_3, SiO_2 e Al_2O_3. Neste critério, as três amostras de RMF podem ser consideradas como materiais pozolânicos classe N, pois atendem aos dois requisitos de composição química da NBR 12653 (ABNT, 2014) que determinam o somatório de Fe_2O_3, SiO_2 e Al_2O_3 acima de 70% e SO_3 abaixo de 4%.

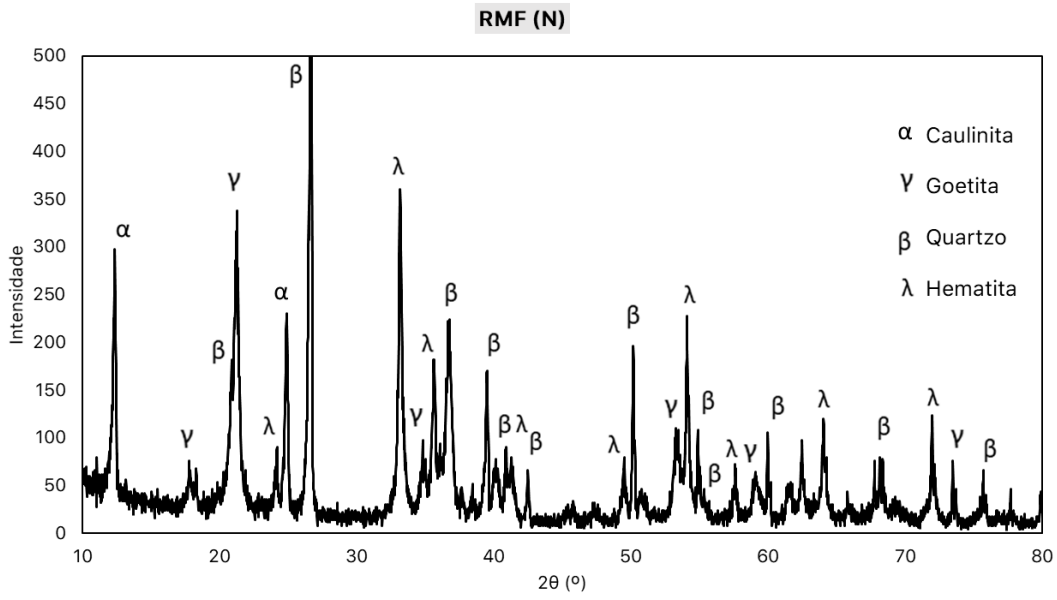
Como era esperado, as amostras possuem diferentes teores de Fe_2O_3, SiO_2 e Al_2O_3. A amostra (S) é a resultante do material passante pelo separador magnético, com menor teor de Fe_2O_3 e maior teor de SiO_2 em sua composição. A amostra (N), referente ao material como coletado, possui os teores de Fe_2O_3 e SiO_2 intermediários. Este material não passou pelo processo de separação magnética. Por fim, a amostra (F) possui a maior massa em porcentagem de Fe_2O_3 e a menor de SiO_2. Este material foi obtido após o desligamento do campo magnético do separador magnético. Os teores de Al_2O_3 variam entre 0 e 3,38% para as três amostras de RMF.

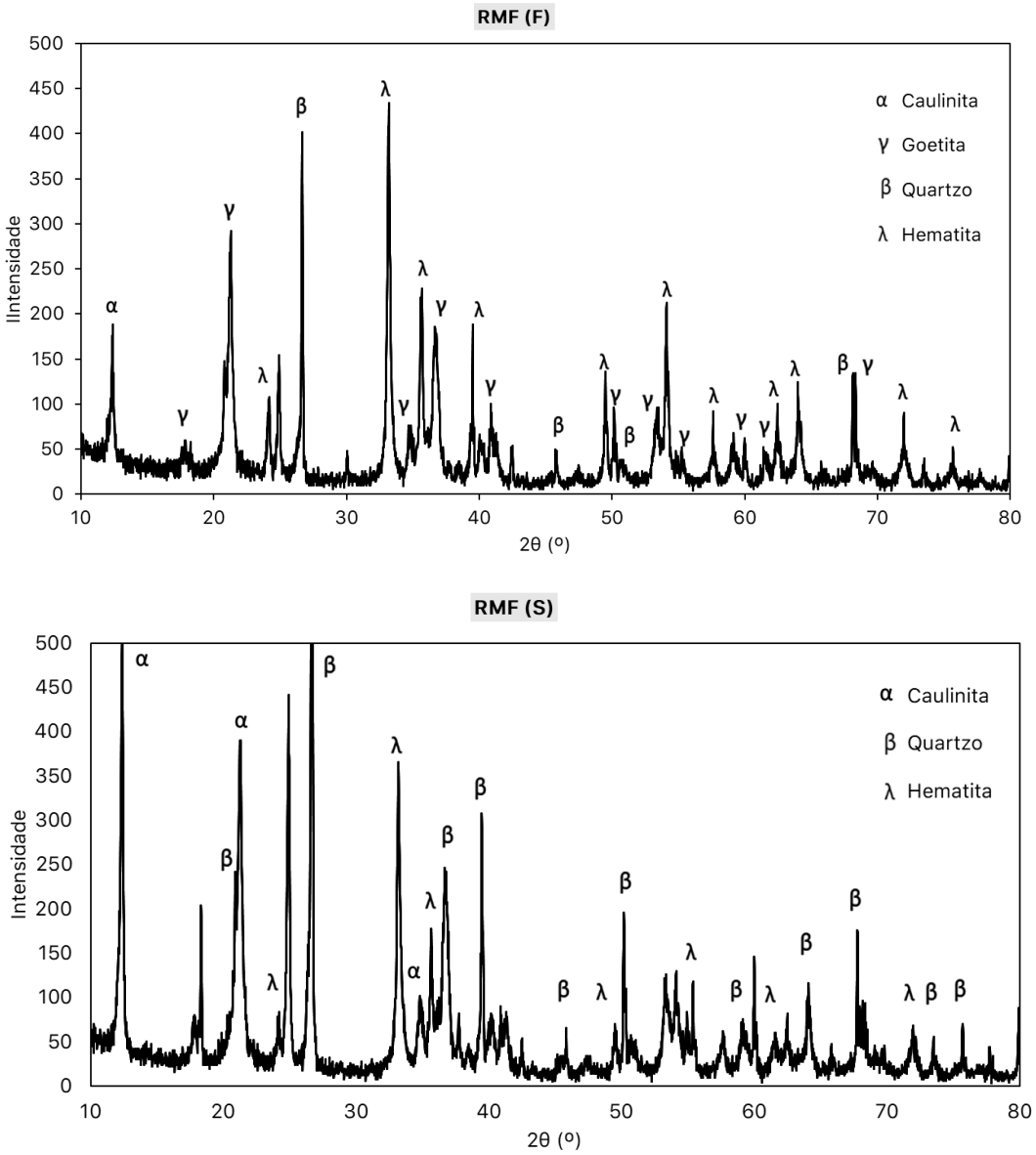
Assim como alguns artigos (YI *et al.*, 2009b; LI *et al.*, 2010; HUANG *et al.*, 2013b; FONTES *et al.*, 2016; LUO *et al.*, 2016; XIONG *et al.*, 2017; WU *et al.*, 2018; CARVALHO *et al.*, 2019, 2020; YOUNG *et al.*, 2019; CARVALHO *et al.*, 2021; YAO *et al.*, 2020a, 2020b; MAGALHÃES *et al.*, 2020; WANG *et al.*, 2020; MORAIS *et al.*, 2021), as amostras de RMF utilizadas nesta pesquisa possuem o Fe_2O_3 variando aproximadamente de 46 a 70% e o SiO_2 de 18 a 36% em sua composição.

4.1.3 Difração de raios X - DRX

Os difratogramas das três amostras de RMF (N, F e S) estão mostrados na Figura 14.

Figura 14 – Difratogramas das três amostras de RMF (N, F e S).





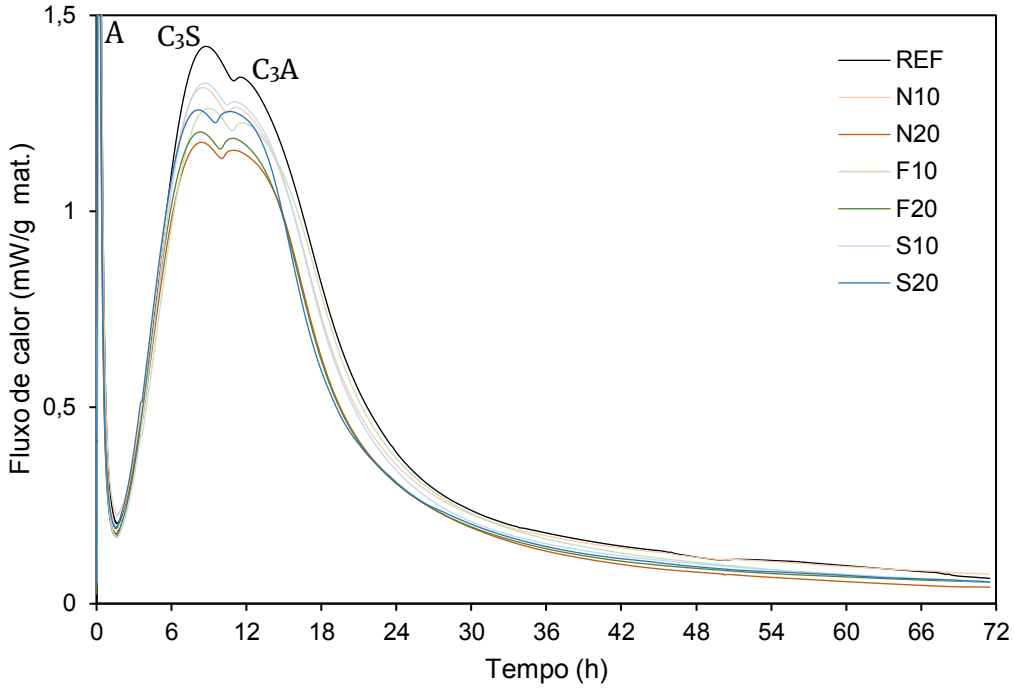
Fonte: Autor (2020).

Em todos os diagramas foram identificados picos referentes a quartzo (SiO_2), hematita (Fe_2O_3), goetita (FeOOH) e caulinita ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$). Estes resultados são semelhantes às amostras de RMF utilizadas nos artigos (MAGALHÃES *et al.*, 2020; MORAIS *et al.*, 2021) referenciadas no Capítulo 2 (Tabela 6).

4.2 CALORIMETRIA ISOMÉTRICA

A Figura 15 apresenta o fluxo de calor, por grama de material cimentício, durante os 3 dias iniciais de hidratação dos 6 cimentos compostos com RMF mais o cimento referência.

Figura 15 – Curvas de fluxo de calor dos cimentos referência e compostos com RMF durante 72 horas.

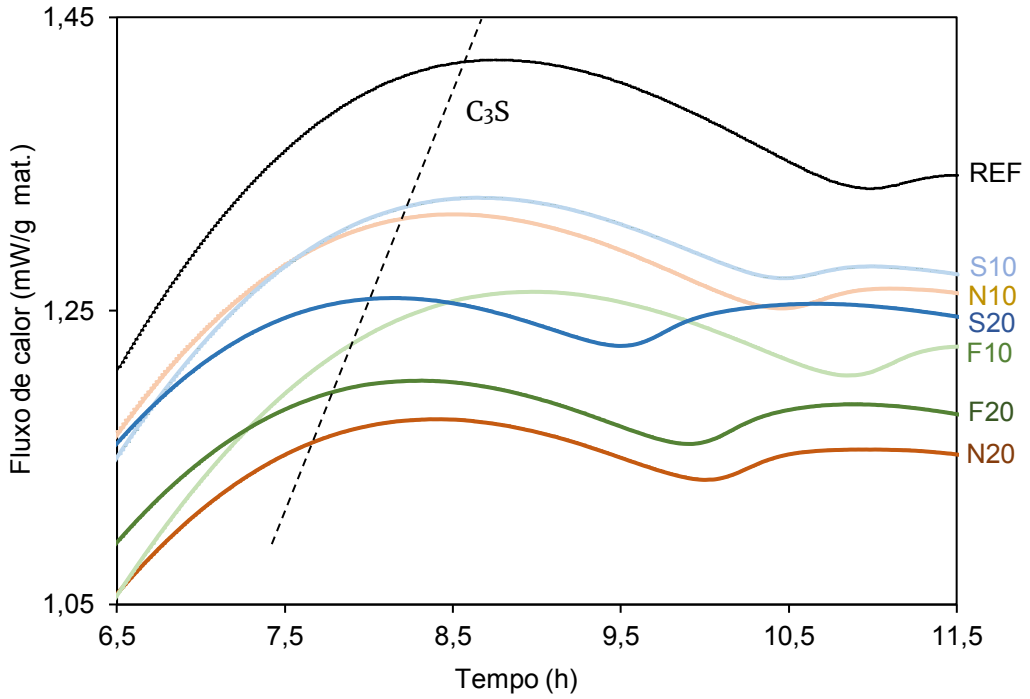


Fonte: Autor (2020).

De acordo com a Figura 15, no geral, todos os cimentos apresentaram formato de curvas semelhantes com relação ao tempo das reações ocorridas e seguem o padrão de picos esperados pela literatura. O pico inicial (A) é devido ao umedecimento e dissolução das partículas. Este pico ocorreu imediatamente após a adição de água ao cimento e RMF. Logo após, foi observado um período de indução caracterizado pela redução do fluxo de calor e um período de aceleração que resultou no pico associado ao C_3S. Em seguida, houve um pico mais baixo relacionado à hidratação do C_3A e um período de desaceleração onde o fluxo de calor foi gradualmente reduzido (BAZZONI, 2014).

A Figura 16 mostra uma ampliação das curvas entre 6 e 12 horas de hidratação para uma melhor visualização do pico exotérmico associado à hidratação do C_3S. Em todos os cimentos, a relação a/c foi mantida constante.

Figura 16 – Ampliação das curvas de fluxo de calor dos cimentos referência e compostos com RMF entre 6 e 12h.

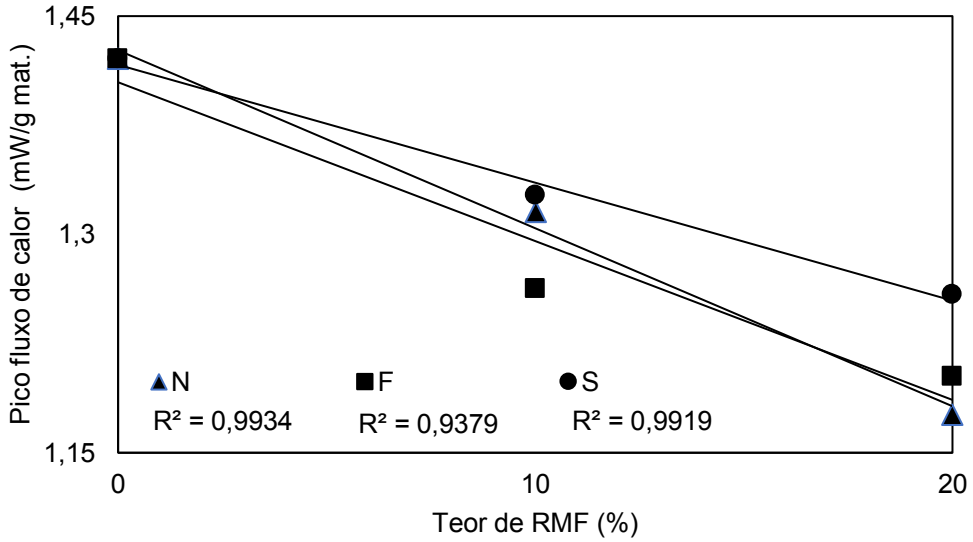


Fonte: Autor (2020).

O RMF na composição do cimento não alterou de forma significativa o tempo do pico de fluxo de calor das pastas que ocorreu, em média, às 8,5 horas. Porém, o efeito de diluição de todos os cimentos com RMF quando comparadas à referência induziu a uma diminuição no pico de fluxo de calor associado ao pico de C_3S (Figura 16) que pode levar ao aumento da porosidade e à redução da resistência dos cimentos (RAMACHANDRAN *et al*., 2002).

A Figura 17 mostra as magnitudes do pico de fluxo de calor obtidas pelos diferentes cimentos com RMF (N), RMF (F) e RMF (S) com três teores de RMF (0, 10 e 20%).

Figura 17 – Magnitude do pico do fluxo de calor para as diferentes amostras de RMF.



Fonte: Autor (2020).

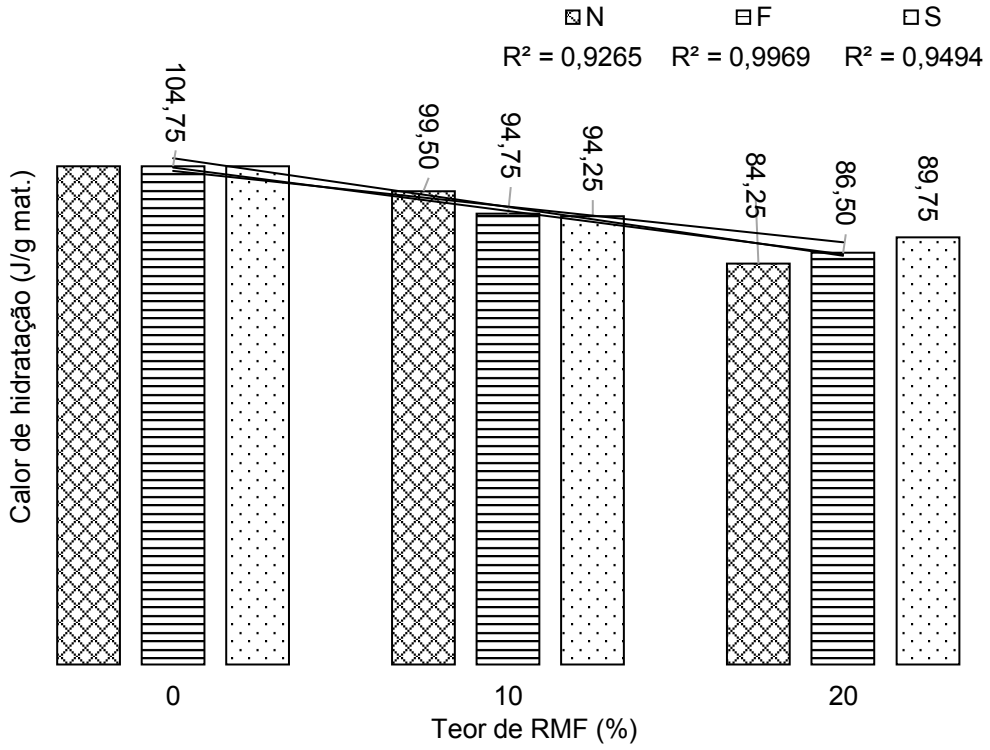
Para todos os cimentos com RMF (N, F e S), o pico do fluxo de calor é inversamente proporcional ao teor de RMF no cimento. Ou seja, quanto maior o teor de RMF no cimento, menor o pico do fluxo de calor (Figura 17). Essa queda do pico do fluxo de calor pode estar relacionada à quantidade de clínquer dos cimentos, pois quanto menor a taxa de hidratação do silicato tricálcico (C_3S), menor a magnitude deste pico (Figuras 16 e 17). Além disso, este resultado pode sugerir que houve atividade pozolânica nas pastas com RMF, pois a reação pozolânica é mais lenta do que a hidratação do C_3S e libera menos calor de hidratação em idades iniciais (BARGER *et al.*, 2001; HOSSAIN, 2003; LUO *et al.*, 2016; YANG *et al.*, 2016; MUNJAL *et al.*, 2021).

Por exemplo, em comparação com o cimento referência, a magnitude do pico de fluxo de calor dos cimentos com 10 e 20% de RMF N diminuiu em 7,30 e 17,17%, respectivamente. Resultados similares foram obtidos por (LUO *et al.*, 2016; CARVALHO *et al.*, 2021). Em ambos os artigos, o pico do fluxo de calor referente à hidratação do C_3S foi menor para as pastas com RMF.

Comparando as composições químicas dos rejeitos, os cimentos S10 e S20 obtiveram as menores quedas no pico do fluxo de calor em relação à REF (Figura 17). Este resultado indica que o maior teor de óxido de silício do RMF S pode ter contribuído para o aumento de C_3S, baseado na Equação 1, ou que o maior teor de óxido de ferro do RMF F e do RMF N reduziu a quantidade de C_3S formada nos cimentos com RMF F e RMF N (LAWRENCE, 1998).

O calor de hidratação acumulado em 72 horas por grama de material cimentício foi calculador a partir das áreas sob as curvas da Figura 14 e está apresentado na Figura 18.

Figura 18 – Calor de hidratação acumulado das pastas de cimento REF e RMF após 72 horas.



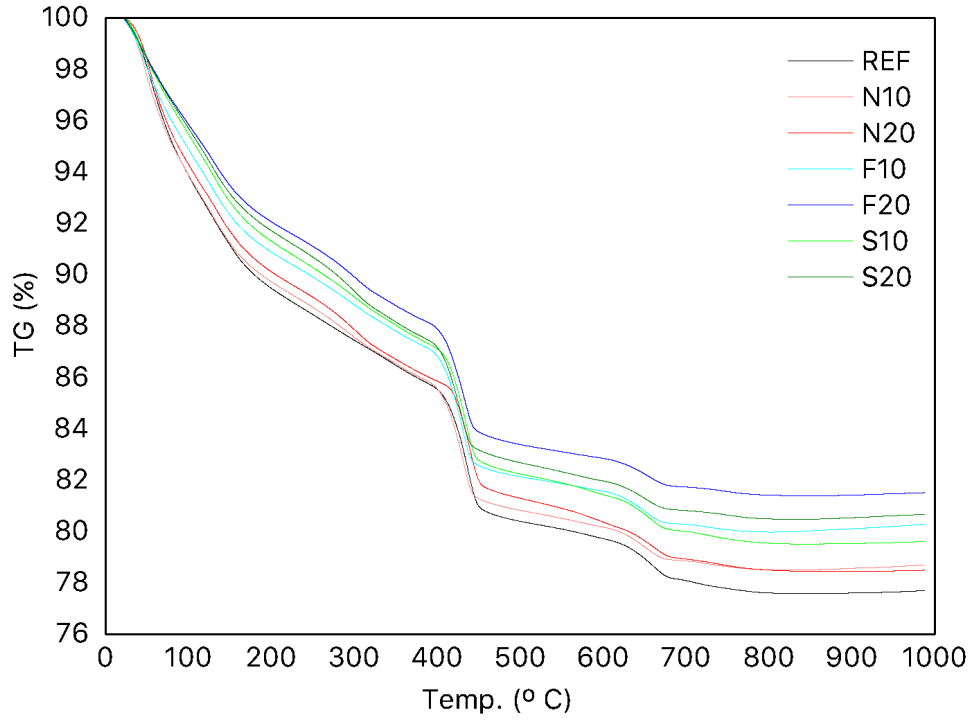
Fonte: Autor (2020).

Pode-se afirmar que o aumento do teor de RMF reduziu o calor de hidratação dos cimentos com RMF de todos os tipos de amostras (N, F e S) (Figura 18). Esta redução pode ser atribuída à diminuição de C_3S devido à substituição de clínquer por RMF (JITTIN *et al.*, 2021) e à possível atuação do RMF como material pozolânico (BARGER *et al.*, 2001; HOSSAIN, 2003).

4.3 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA – TGA

A Figura 19 apresenta os resultados da TGA dos cimentos referência e compostos com RMF após 28 dias de cura. As curvas mostram três etapas significativas de perdas de massa entre as temperaturas aproximadas de 35 a 400 °C, 400 a 450 °C e de 450 a 1000 °C.

Figura 19 – Análise termogravimétrica (TGA) dos cimento referência e compostos com RMF após 28 dias de cura.

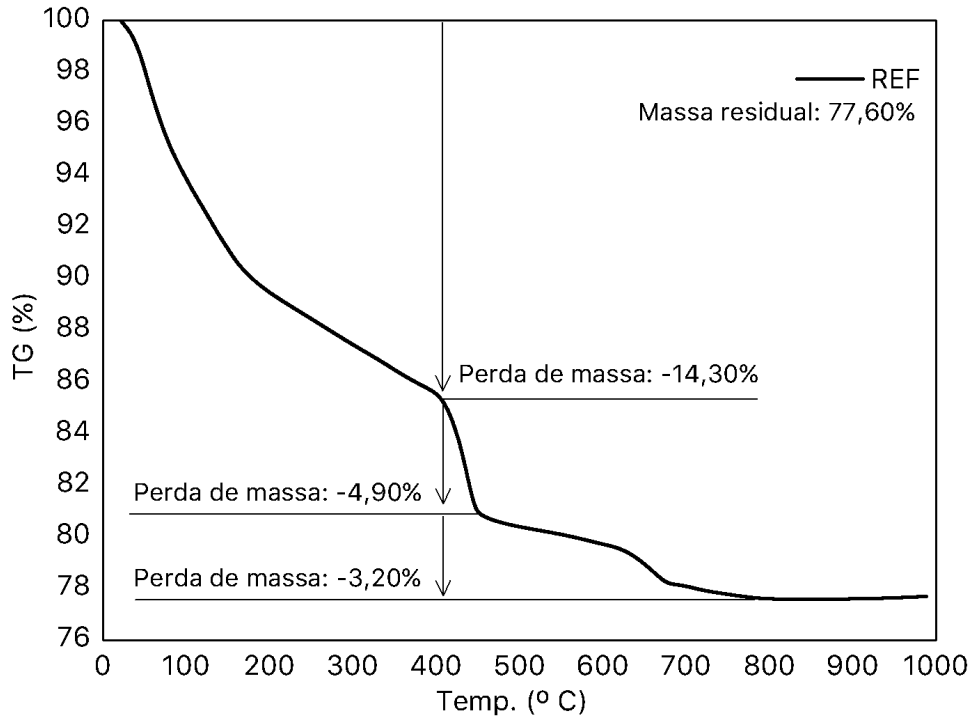


Fonte: Autor (2021).

A perda de massa da faixa de temperatura entre 35 e 400 °C é atribuída ao teor de água quimicamente combinada (AQC) referente à desidratação de CSH e etringita. A decomposição do hidróxido de cálcio ocorre na faixa de 400 a 450 °C (aprox.) e a perda de massa referente à faixa de 450 a 1000 °C indica a decomposição do carbonato de cálcio da pasta (Figura 19) (TAYLOR, 1997; VEDALAKSHMI *et al.*, 2003).

A Figura 20 apresenta, como exemplo, a quantificação da perda de massa do cimento REF. A quantificação dos teores de compostos hidratados formados, como o hidróxido de cálcio e o carbonato de cálcio remanescentes foi verificada por eixos verticais que identificaram as perdas de massa das fases de decomposição na matriz cimentícia.

Figura 20 – TGA da pasta de cimento referência após 28 dias de cura.



Fonte: Autor (2021).

O teor remanescente de hidróxido de cálcio foi encontrado multiplicando a água de composição do hidróxido de cálcio por 4,11 (razão da massa molecular de $Ca(OH)_2$ e de H_2O) enquanto o teor de carbonato de cálcio contido na pasta foi encontrado multiplicando a perda de massa de CO_2 por 2,27 (razão da massa molecular de $CaCO_3$ e de CO_2). Seguindo a recomendação de Taylor (1997), os valores foram normalizados por meio da razão entre a 100% e a massa residual de cada pasta. Sendo assim, a Tabela 15 apresenta as perdas de massas para o cimento referência (Figura 20) e cimentos com RMF.

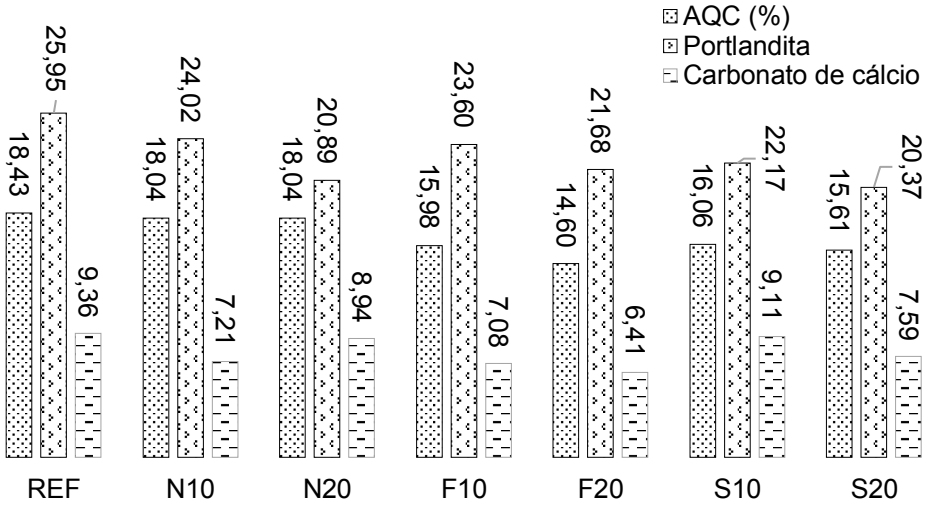
Tabela 14 – Perdas de massa (TGA) dos cimentos referência e compostos com RMF.

Cimento	AQC (%)	Hidróxido de cálcio (%)		Carbonato de cálcio (%)		Massa residual (%)	Fator normalização
		H_2O	$Ca(OH)_2$	CO_2	$CaCO_3$		
REF	Perdas de massa TG						
	14,30	4,90	20,14	3,20	7,26	77,60	1,29
	Perdas de massa corrigidas para a mesma base de não voláteis						
	18,43	6,31	25,95	4,12	9,36	100,00	
N10	Perdas de massa TG						
	14,20	4,60	18,91	2,50	5,68	78,70	1,27
	Perdas de massa corrigidas para a mesma base de não voláteis						
	18,04	5,84	24,02	3,18	7,21	100,00	
N20	Perdas de massa TG						
	14,20	4,00	16,44	3,10	7,04	78,70	1,27
	Perdas de massa corrigidas para a mesma base de não voláteis						
	18,04	5,08	20,89	3,94	8,94	100,00	
F10	Perdas de massa TG						
	12,80	4,60	18,91	2,50	5,68	80,10	1,25
	Perdas de massa corrigidas para a mesma base de não voláteis						
	15,98	5,74	23,60	3,12	7,08	100,00	
F20	Perdas de massa TG						
	11,90	4,30	17,67	2,30	5,22	81,50	1,23
	Perdas de massa corrigidas para a mesma base de não voláteis						
	14,60	5,28	21,68	2,82	6,41	100,00	
S10	Perdas de massa TG						
	12,80	4,30	17,67	3,20	7,26	79,70	1,25
	Perdas de massa corrigidas para a mesma base de não voláteis						
	16,06	5,40	22,17	4,02	9,11	100,00	
S20	Perdas de massa TG						
	12,60	4,00	16,44	2,70	6,13	80,70	1,24
	Perdas de massa corrigidas para a mesma base de não voláteis						
	15,61	4,96	20,37	3,35	7,59	100,00	

Fonte: Autor (2021).

A Figura 21 resume o teor de massa, em porcentagem, de AQC, portlandita remanescente e carbonato de cálcio. Os dois primeiros parâmetros são influenciados pela ocorrência de reação pozolânica em pastas cimentícias (VEDALAKSHMI *et al.*, 2003; BERENGUER *et al.*, 2020).

Figura 21 – Teor de AQC, portlandita remanescente e carbonato de cálcio dos cimentos referência e compostos com RMF.



Fonte: Autor (2021).

Pela Figura 21, é possível perceber que o teor de AQC, aos 28 dias, do cimento REF é superior a todos os cimentos com RMF, o que pode ser explicado pelo seu maior percentual de fases reativas. Este resultado corrobora com o calor de hidratação acumulado apresentado na Figura 18 que foi inferior para todos os cimentos com RMF. Desta forma, são esperados para os cimentos com RMF menor grau de hidratação, resistência e maior porosidade (ABRÃO *et al.*, 2020). Estas hipóteses são confirmadas ao longo do Capítulo 4 nas seções de resistência à compressão (4.4) e absorção de água e índice de vazios (4.5).

O teor de AQC também é influenciado pelo tempo de cura em decorrência da progressiva hidratação das fases anidras do cimento assim como as reações pozolânicas (EL-DIADAMONY *et al.*, 2018; ABRÃO *et al.*, 2020; MOHSEN *et al.*, 2020). Aos 28 dias, dentre os cimentos com RMF, os melhores resultados foram obtidos por N10 e N20, com uma redução de apenas 0,39% em ambas comparadas à REF. Dentre os cimentos com RMF F e RMF S, conforme o teor de RMF aumenta, o teor de AQC diminui. Isto pode ser atribuído principalmente à diminuição da quantidade de clínquer que possui maior taxa de hidratação que o RMF.

Os menores teores de portlandita, que chegam a 20,37 e 20,89% para as pastas S20 e N20, respectivamente, são explicados pelo menor teor de clínquer consumido e pela possível participação pozolânica do rejeito, que modifica a quantidade total de portlandita liberada durante a hidratação do cimento (WILD

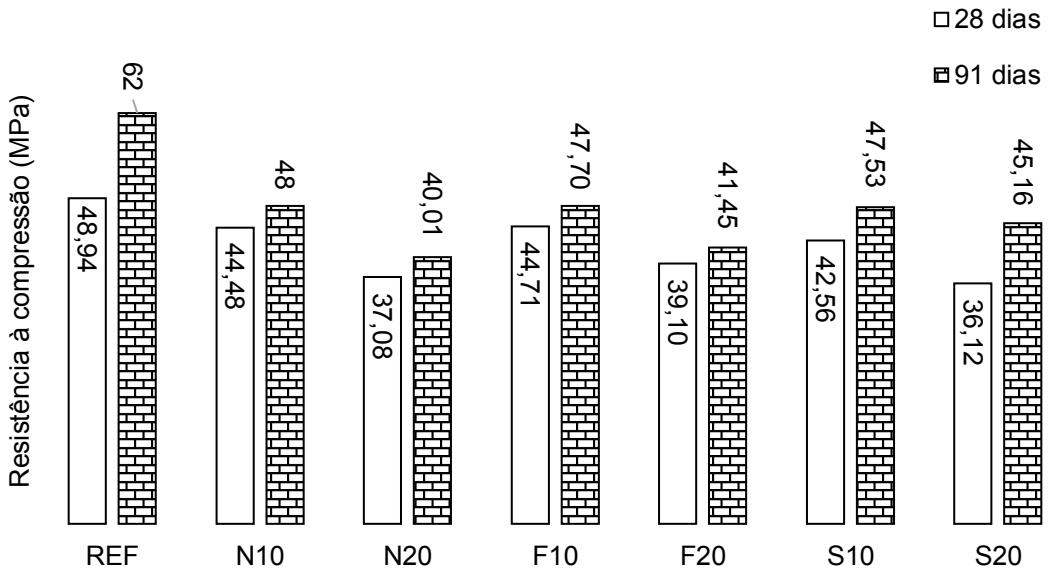
et al., 1997; LEMONIS *et al.*, 2015). O cimento S20, com 20% de adição de rejeito com menor teor de ferro e maior teor de silício, obteve o melhor desempenho com reação ao teor de portlandita, diminuindo em, aproximadamente, 5,6% quando comparado ao cimento REF. A redução progressiva do teor de portlandita dos cimentos com 10 e 20% de RMF é um indicativo de atividade pozolânica, onde as fases da pozolana irão reagir quimicamente com o $Ca(OH)_2$ para produzir fases de hidratação com propriedades cimentícias (WILD *et al.*, 1997; PAYÁ *et al.*, 2003; LEMONIS *et al.*, 2015).

Os teores de carbonato de cálcio são constituídos pela parcela de calcário contida no cimento, com máximo de 10% exigido pela NBR 16697 (ABNT, 2018), mais a parcela resultante da carbonatação do cimento. Todos os cimentos com adição de RMF obtiveram menores valores de carbonato de cálcio quando comparados ao cimento referência (Figura 21). Isto sugere que a adição de RMF no cimento pode resultar em maior resistência à carbonatação da pasta (SEDIĆ *et al.*, 2020). Apesar de valores próximos, o cimento com o rejeito com maior teor de óxido de ferro e menor teor de óxido de sílica (RMF F) alcançou o melhor desempenho quanto ao teor de carbonato de cálcio, sendo que o cimento F20 reduziu em aproximadamente 3% o teor do carbonato de cálcio.

4.4 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A Figura 22 apresenta a resistência à compressão para os cimentos referência e compostos com RMF nas idades de 28 e 91 dias.

Figura 22 – Resistência à compressão dos cimentos referência e compostos com RMF aos 28 e 91 dias.



Fonte: Autor (2021).

Conforme a Figura 22, todos os cimentos com RMF apresentaram resistências menores do que o cimento REF aos 28 e aos 91 dias de cura. Além disso, similar aos artigos (YOUNG *et al.*, 2019; MAGALHÃES *et al.*, 2020) vistos no Capítulo 2, os cimentos com 20% de RMF apresentaram resistências inferiores que os cimentos com 10% de RMF. Isso pode ter sido causado pela redução do teor de clínquer da matriz.

Estes resultados são compatíveis com as informações obtidas pela calorimetria isotérmica. O cimento REF atingiu o maior pico de fluxo de calor, referente à hidratação do C_3S e acumulou o maior calor durante os 3 dias iniciais de hidratação. Além disso, o teor de AQC retirado da TGA foi, também, inferior para os cimentos com RMF (KADRI *et al.*, 2011; ABRÃO *et al.*, 2020).

Aos 28 dias, dentre os cimentos com RMF, as maiores resistências foram obtidas pelos cimentos F10 e N10 com 44,71 MPa e 44,48 MPa, respectivamente. Os cimentos F20 e N20 atingiram os valores de 39,10 MPa e 37,08 MPa, respectivamente. O aumento no teor de 10% de RMF F e RMF N resultou em quedas de 12,55 e 16,64%, respectivamente. Já os cimentos com RMF S, com maior teor de óxido de silício, obtiveram as menores resistências tanto para os teores de 10 (S10) quanto 20% (S20), sendo 42,56 MPa para S10 e 36,12 MPa para S20.

A tendência de aumento na resistência com o passar do tempo é esperada em todos os cimentos, o que é atribuído principalmente à hidratação contínua e às possíveis reações pozolânicas (ARSLAN *et al.*, 2020; KHAN *et al.*, 2020). Aos 91 dias, dentre os cimentos compostos com RMF, F10, S10 e N10 atingiram resistências de 47,70 MPa, 47,53 MPa e 46 MPa, respectivamente. Os cimentos S20, F20 e N20 atingiram 45,16 MPa, 41,45 e 40,01 MPa, respectivamente. Comparando a resistência das idades de 28 e 91 dias, o maior percentual de ganho de resistência dos cimentos com RMF S (11,68% para S10 e 25% para S20) pode ter sido causado pelas reações pozolânicas em idades mais avançadas decorrentes da formação de CH resultante da hidratação do cimento. Os teores de portlandita obtidos pelo TGA (Figura 21) validam que os cimentos com RMF S consomem mais CH durante a hidratação do cimento (LEMONIS *et al.*, 2015).

Os resultados da ANOVA para a resistência à compressão aos 28 e 91 dias estão nas Tabelas 16 e 17, respectivamente. A última coluna destas tabelas indica o efeito estatístico de cada fator nas respostas.

Tabela 15 – ANOVA – Resistência à compressão aos 28 dias.

Tabela de análise de variância					
Resposta: Resistência à compressão aos 28 dias					
	Df	Sum sq	Mean sq	F	P
Teor RMF	1	509,11	509,11	168,16	**1,72e-11**
Composição RMF	3	39,90	13,30	4,393	**0,0151**
Interação 2 fatores	2	3,83	1,92	0,63	0,5407
Resíduos	21	63,58	3,03		

Fonte: Autor (2021), adaptado de RStudio.

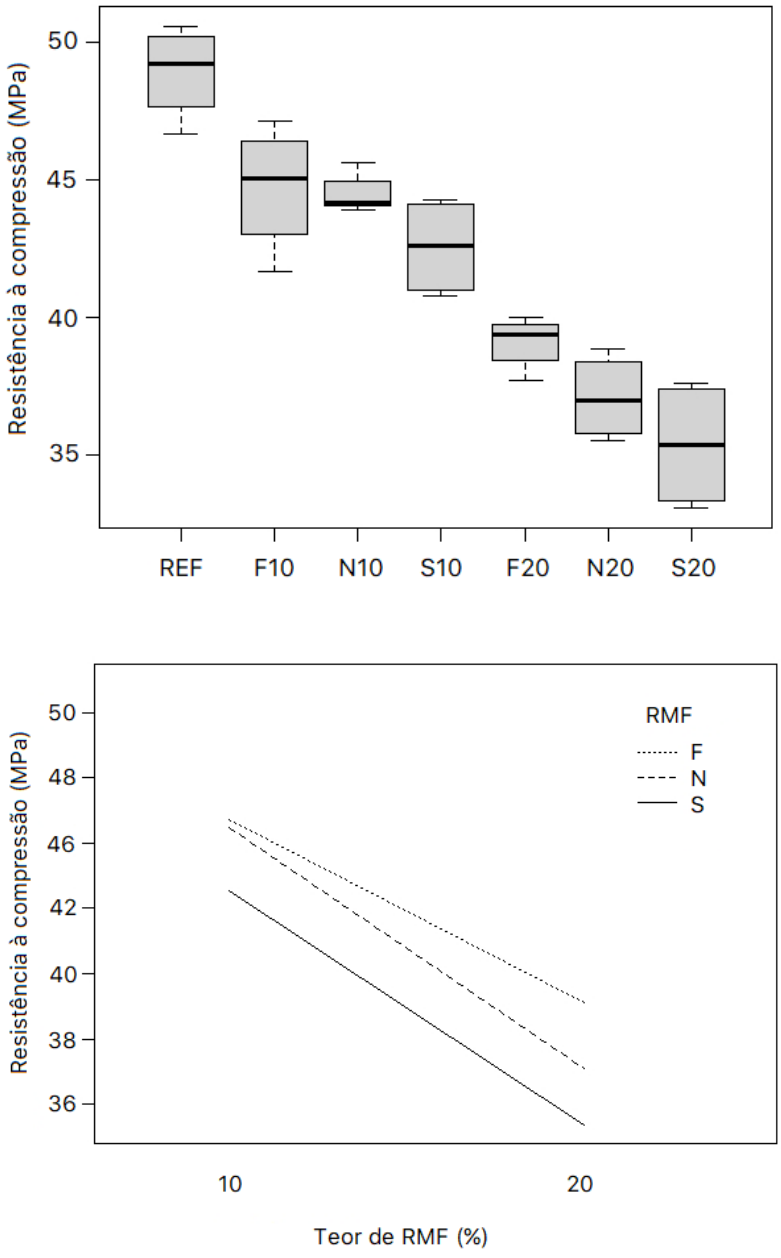
Tabela 16 – ANOVA – Resistência à compressão aos 91 dias.

Tabela de análise de variância					
Resposta: Resistência à compressão aos 91 dias					
	Df	Sum sq	Mean sq	F	P
Teor RMF	1	1007,10	1007,10	265,58	**12,15e-13**
Composição RMF	3	171,90	57,30	15,11	**1,82e-05**
Interação 2 fatores	2	21,30	10,70	2,81	0,0829
Resíduos	21	79,60	3,80		

Fonte: Autor (2021), adaptado de RStudio.

De acordo com as Tabelas 16 e 17, ambas as variáveis independentes (teor de RMF e composição química do RMF) impactam a variável resposta (resistência à compressão aos 28 e 91 dias) (P<0,05). Entretanto, a interação entre as duas variáveis não possui efeito significativo na resposta (P>0,05). O *boxplot* e o diagrama de interação presentes na Figura 23 mostram visualmente que o impacto do teor de RMF é maior do que a composição química do RMF utilizado nas argamassas com relação à resistência à compressão aos 28 dias.

Figura 23 – *Boxplot* e diagrama de interação – Resistência à compressão aos 28 dias.



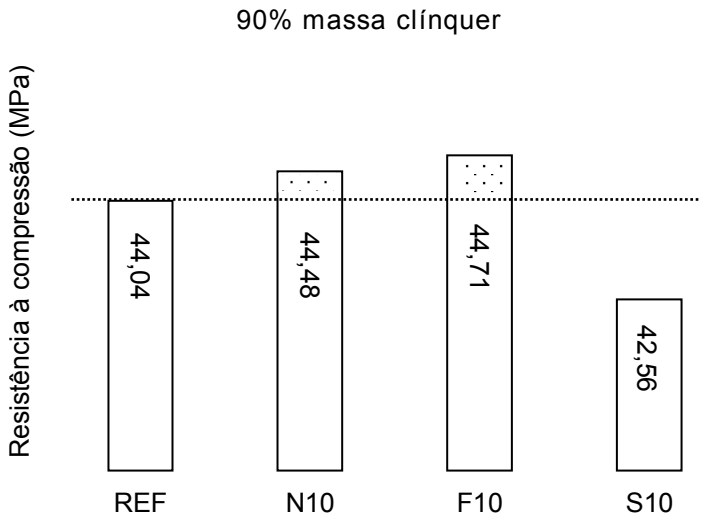
Fonte: Autor (2021), adaptado de RStudio.

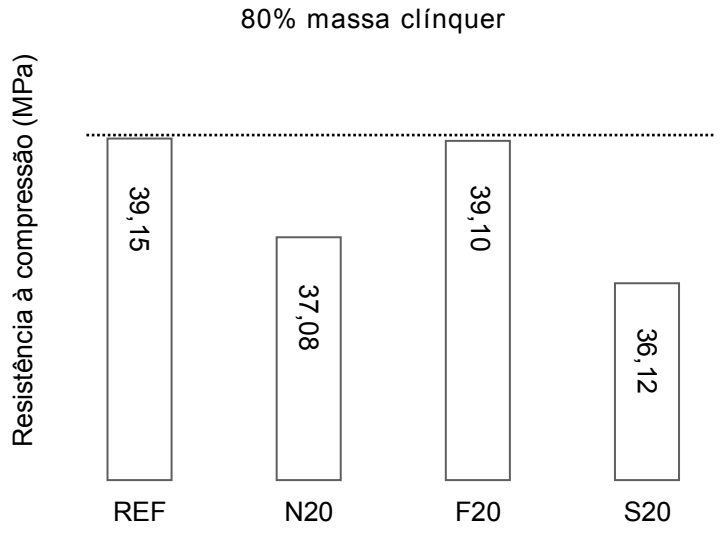
O diagrama de interação da Figura 23 mostra que, aos 28 dias, os cimentos com RMF se comportaram de maneira semelhante quanto à resistência à compressão. É possível observar uma linha de queda na resistência para ambos os cimentos com 10 e 20% de RMF partindo dos maiores valores obtidos pelos cimentos com o RMF F para os menores valores obtidos pelos cimentos com RMF S.

Isto pode ser um indicativo que o óxido de ferro residual do rejeito contribuiu para um ganho na resistência dos cimentos. Entretanto, como a interação entre materiais pozolânicos e cimentícios são complexos, são necessários novos estudos que possam apenas variar o teor de óxido de ferro do RMF para determinar a razão deste acréscimo. Artigos que analisaram o efeito da adição de nano óxido de ferro (NF), composto por magnetita e hematita, em pastas e argamassas de cimento Portland mostram que todas as pastas de cimento contendo NF resultaram em valores de resistência mais altos do que as referências. Uma das explicações, segundo os autores, seria que a adição de NF pode acelerar a formação de CSH, como resultado do aumento do teor de portlandita e, portanto, aumentar a resistência (LI *et al.*, 2004; AMER *et al.*, 2015).

Os gráficos da Figura 24 foram elaborados com o objetivo de comparar os resultados das resistências à compressão aos 28 dias considerando o conteúdo de clínquer utilizado nas composições.

Figura 24 – Comparativo das resistências pelo conteúdo de clínquer nas composições.





Fonte: Autor (2021).

É possível perceber que entre os cimentos com 90% de clínquer, apenas o cimento com RMF S não atingiu o valor do cimento referência. Nesta comparação, podem ser levantadas duas hipóteses. A primeira, já mencionada anteriormente (LI *et al.*, 2004; AMER *et al.*, 2015), seria que teor de óxido de ferro do RMF F e do RMF N contribuiu com o desenvolvimento superior da resistência à compressão, mesmo com a redução de 10% do teor de clínquer. A segunda hipótese seria que o óxido de silício do RMF S prejudicou o desenvolvimento da resistência à compressão. Xie *et al.* (2020) afirma que a estrutura mais densa do nano SiO_2 (NS) pode impedir a hidratação adicional do cimento, levando ao declínio de resistência.

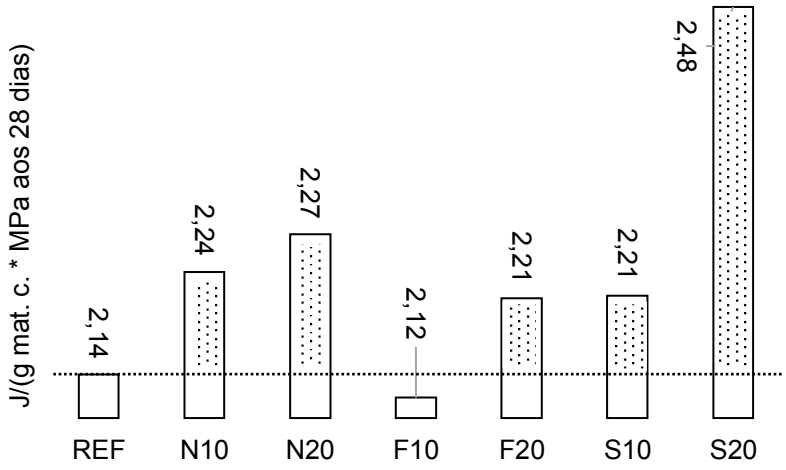
O mesmo efeito ocorreu para os cimentos com 80% de clínquer. O cimento F20 ficou bem próximo do valor referência, indicando o efeito benéfico do óxido de ferro do rejeito. Porém os cimentos com RMF N e RMF S, com menores teores de óxido de ferro e maiores teores de óxido de silício não foram capazes de atingir o valor referência. Ainda assim, avaliando as vantagens sócio-ambientais da subsituição de clínquer por RMF de até 20%, esta perda de resistência de, no máximo, 7,74%, pode ser considerada aceitável.

Todavia, os cimentos com 10% de RMF podem ser consideradas pela NBR 16697 (ABNT, 2018) como CP-II-Z 40, com resistência mínima de 40 MPa aos 28 dias, enquanto os cimentos com 20% de RMF podem ser classificados como CP-IV 32 com resistência mínima de 32 MPa aos 28 dias e 40 MPa aos 91 dias. Como os requisitos físicos da norma americana C595 (ASTM, 2019) para

cimentos misturados exigem 25 MPa aos 28 dias, os cimentos com 10 e 20% de RMF podem ser classificados como os tipos IP(10) e IP(20), respectivamente. Além disso, de acordo com a norma europeia EN 197-1 (BSI, 2011), os cimentos com 10 e 20% de RMF se encaixam nas classes 42,5 e 32,5, respectivamente. Isto mostra que a reinserção do RMF na produção de cimento, além de ambientalmente favorável, também é comercialmente viável.

O gráfico da Figura 25 apresenta o calor de hidratação acumulado após 72 horas de hidratação, em joules por grama de material cimentício por MPa aos 28 dias.

Figura 25 – Calor de hidratação acumulado após 72h por grama de material cimentício por MPa aos 28 dias.



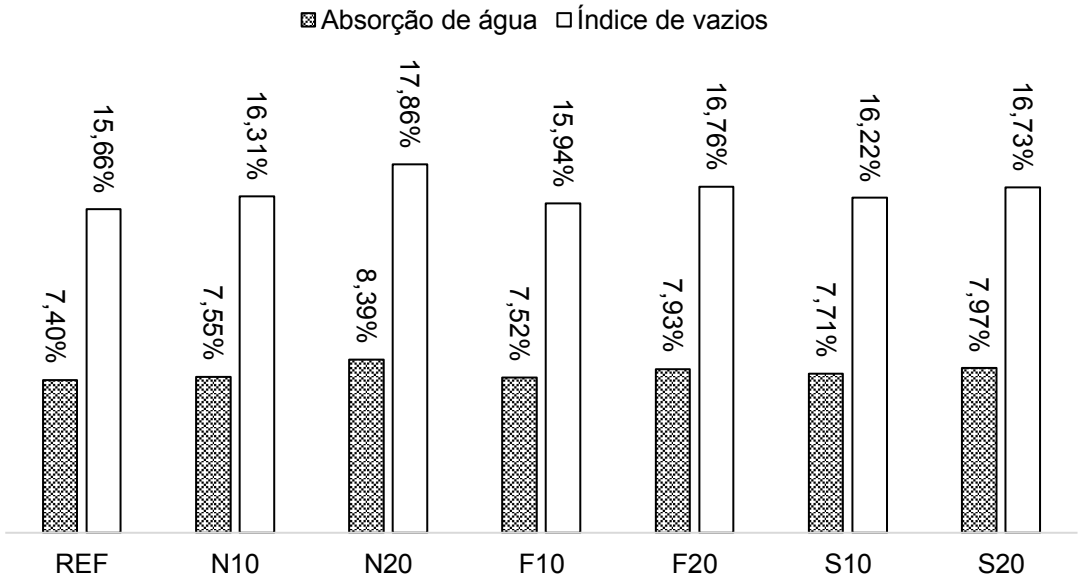
Fonte: Autor (2021).

Na Figura 25 é possível constatar que para atingir 1 MPa de resistência à compressão aos 28 dias, os cimentos com RMF liberaram calor bem próximo aos cimentos referência, com uma diferença máxima de 0,34 (aprox. 16%). O cimento F10, com 10% de RMF com maior teor de óxido de ferro, obteve o melhor desempenho, com valor um pouco abaixo da referência.

4.5 ABSORÇÃO DE ÁGUA

O teste de durabilidade de absorção de água foi realizado para os cimentos REF e compostos com RMF após 28 dias de cura. Dois parâmetros foram determinados, a absorção de água, em % e o índice de vazios, também em %. Os resultados estão apresentados na Figura 26.

Figura 26 – Absorção de água e índice de vazios dos cimentos referência e compostos com RMF aos 28 dias.



Fonte: Autor (2021).

Os resultados da Figura 26 mostram um aumento na absorção de água e no índice de vazios para todos os cimentos com RMF comparados à referência. O pequeno aumento (máximo de 1%) na absorção de água dos cimentos com 10 e 20% de RMF pode ser atribuída à sua estrutura menos densa e consequentemente mais porosa (SIDDIKA *et al.*, 2020).

Dentre os cimentos com RMF, os resultados foram bem próximos. O cimento F10 obteve o melhor desempenho para o índice de vazios e para a absorção de água com valores de, respectivamente, 15,94 e 7,52%. Já o cimento N20 apresentou o pior desempenho com um aumento de 1% e 2,20% para a absorção de água e índice de vazios, respectivamente.

Com relação ao teor de RMF, a redução de 10 e 20% do teor de clínquer levou a um aumento na absorção de água de, no máximo, 0,31 e 1%, respectivamente. Estes valores são muito pequenos quando comparados aos ganhos ambientais e econômicos da redução de até 20% de clínquer nos cimentos, tornando viável a utilização do rejeito em matrizes cimentícias com relação à absorção de água.

Analisando os tipos de rejeito utilizados nos cimentos, é possível afirmar que a diferença entre os resultados também é muito pequena. A maior diferença na absorção de água para os cimentos com 10% de RMF foi de 0,16% entre os

cimentos com RMF S e RMF N e de 0,87% para os cimentos com 20% de RMF entre os cimentos com RMF N e RMF F.

Entretanto, mesmo com uma diferença de menos de 1% entre os resultados, a ANOVA apresentada na Tabela 18 afirma que estatisticamente há influência da composição química do RMF (P<0,05), do teor de RMF (P<0,05) e da interação entre estes dois fatores na absorção de água (P<0,05).

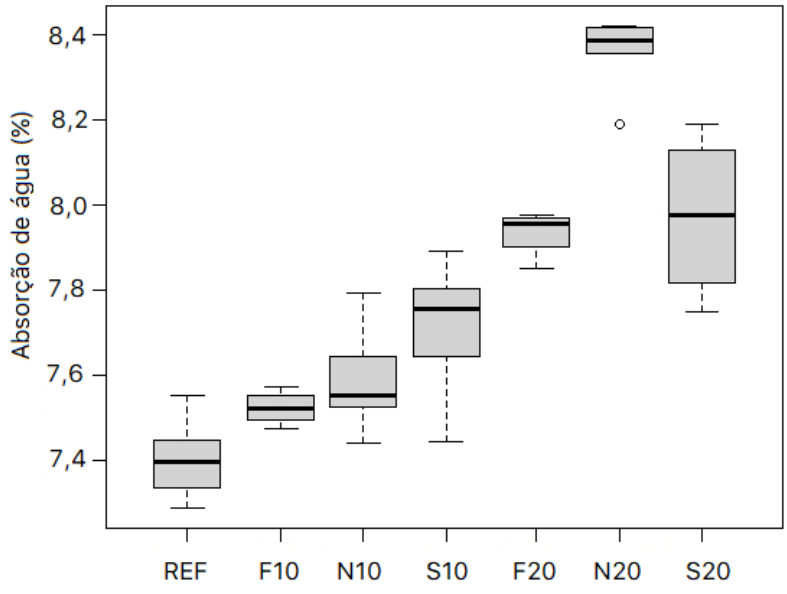
Tabela 17 – ANOVA – Absorção de água aos 28 dias.

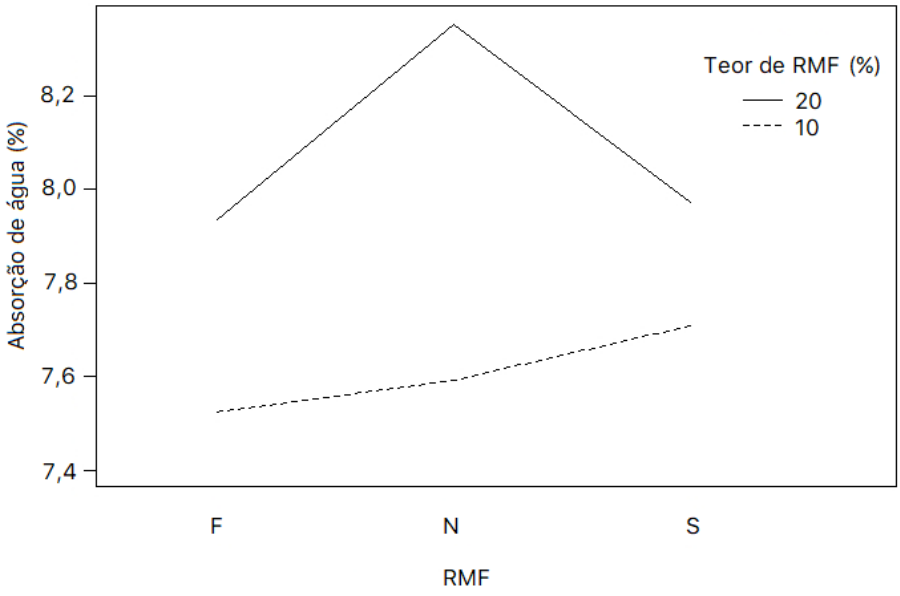
Tabela de análise de variância					
Resposta: Absorção de água aos 28 dias					
	Df	Sum sq	Mean sq	F value	P
Teor RMF	1	2,347e-04	2,347e-04	146,524	**5,96e-12**
Composição RMF	3	4,092e-05	1,364e-05	8,516	**0,000455**
Interação	2	3,111e-05	1,555e-05	9,711	**0,000757**
Resíduos	25	4,004e-05	1,600e-06		

Fonte: Autor (2021), adaptado de RStudio.

O *boxplot* e o diagrama de interação da absorção de água aos 28 dias mostra a influência destes fatores na resposta (Figura 27).

Figura 27 – Boxplot e diagrama de interação – Absorção de água aos 28 dias.





Fonte: Autor (2021), adaptado de RStudio.

Ambos os gráficos da Figura 27 mostram a diferença entre os resultados com relação ao teor de RMF. Pode-se observar pela linha referente ao teor de 20% de RMF que o maior teor de RMF acarretou valores superiores quanto à absorção de água. Entretanto, a comparação entre a composição química dos rejeitos não é linear visto que os cimentos com RMF F obtiveram o melhor desempenho em ambos os teores de 10 e 20% enquanto os cimentos com RMF N e RMF S têm desempenhos contrários quanto ao teor de RMF. Quando o teor de RMF foi de 10%, o cimento S10, com o RMF S obteve o pior desempenho com relação à absorção de água. Já quando o teor de RMF é de 20%, o cimento N20 obteve o pior desempenho.

Similar à absorção de água aos 28 dias, o índice de vazios aos 28 dias também foi influenciado, estatisticamente, pelo teor de RMF ($P<0,05$), pela composição química do RMF ($P<0,05$) e pela interação destes dois fatores. A Tabela 19 apresenta o resultado da ANOVA para o índice de vazios aos 28 dias.

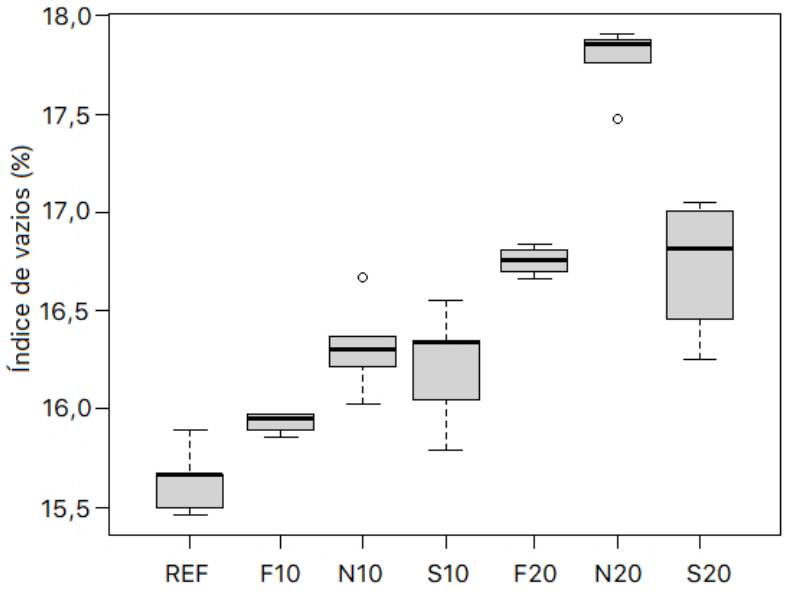
Tabela 18 – ANOVA – Índice de vazios aos 28 dias.

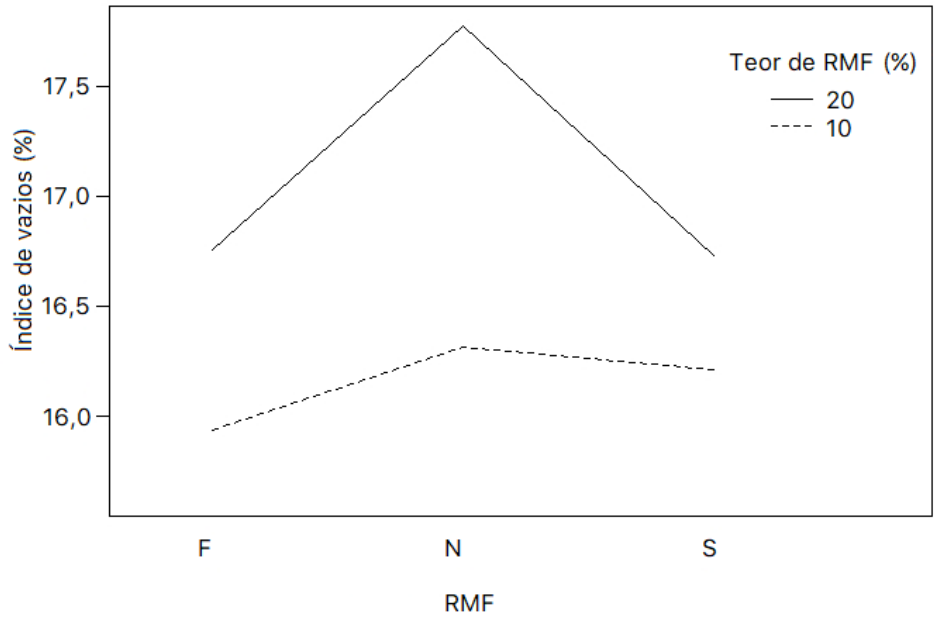
Tabela de análise de variância					
Resposta: Índice de vazios aos 28 dias					
	Df	Sum sq	Mean sq	F value	P
Teor RMF	1	0,0010243	0,0010243	206,49	**1,38e-13**
Composição RMF	3	0,0002858	0,0000953	19,21	**1,13e-06**
Interação	2	0,0001099	0,0000549	11,07	**0,00036**
Resíduos	25	0,0001240	0,0000050		

Fonte: Autor (2021), adaptado de RStudio.

O gráfico de interação e o *boxplot* apresentados na Figura 28 mostram como ocorre esta interação entre os fatores para o índice de vazios aos 28 dias.

Figura 28 – *Boxplot* e diagrama de interação – Índice de vazios aos 28 dias.





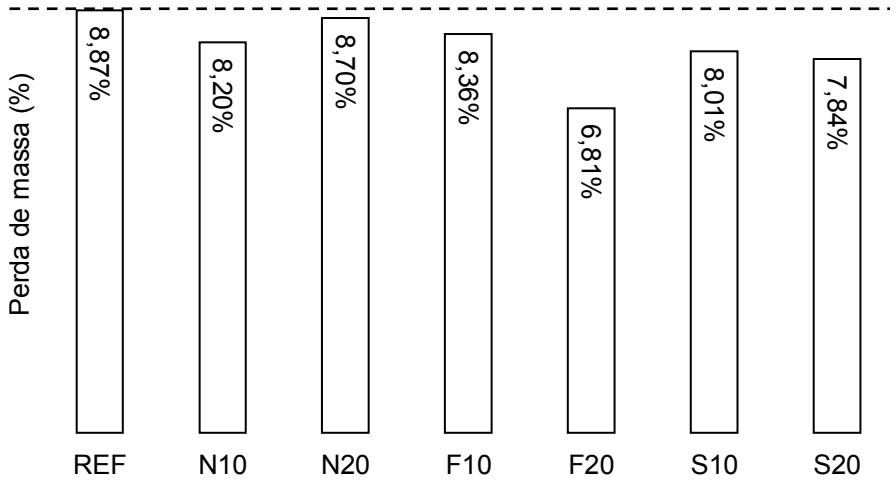
Fonte: Autor (2021), adaptado de RStudio.

Pelos gráficos da Figura 28 pode-se perceber que o teor de RMF tem uma influência maior do que a composição química do RMF. O diagrama de interação da Figura 28 aponta o impacto da composição química, do teor de RMF e da interação entre estes dois fatores, que se assemelham aos resultados da absorção de água. Como mencionado anteriormente, os cimentos com o RMF F obtiveram os menores índices de vazios tanto para 10 quanto para 20% de adição de RMF. Este resultado pode ter influenciado o melhor desempenho da resistência à compressão obtida pelos cimentos com RMF F sabendo que a resistência aumenta com a diminuição da porosidade (CHEN *et al.*, 2013).

4.6 RESISTÊNCIA AO ÁCIDO SULFÚRICO

A perda de massa referente ao ataque de ácido sulfúrico dos cimentos referência e compostos com RMF aos 28 dias está apresentada na Figura 29.

Figura 29 – Perda de massa referente ao ataque de ácido sulfúrico dos cimentos referência e compostos com RMF aos 28 dias.



Fonte: Autor (2021).

O ataque de ácido sulfúrico é mais perigoso do que o ataque de sulfato devido à dissolução de íons sulfato junto com íons hidrogênio. O ácido sulfúrico decompõe os produtos da hidratação e forma produtos expansivos como o monossulfato e a etringita (BASSUONI *et al.*, 2007; KOLAWOLE *et al.*, 2021). Neste sentido, todos os cimentos produzidos com RMF exibiram menor perda de massa, isto é, melhor resistência ao ácido sulfúrico em comparação com o cimento referência. Isto significa que a utilização de RMF como *SCM* pode ser uma maneira de aumentar a resistência ao ataque ácido independente do teor de RMF.

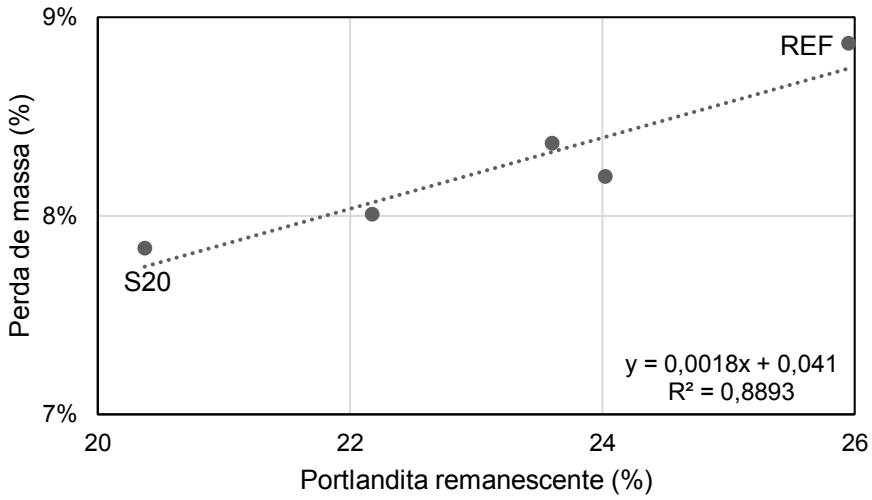
Para os cimentos com o RMF F e RMF S, o maior teor de RMF foi responsável pelo melhor desempenho. A maior resistência ao ácido sulfúrico dos cimentos com RMF pode ser atribuída à melhor resistência ao ácido das partículas de RMF em comparação com as partículas de clínquer. Venkatesan *et al.* (2020) identificaram que o concreto produzido com ferro em pó obteve boa resistência ao ataque ácido sulfúrico e Magalhães *et al.* (2020) mostraram que quanto maior teor de RMF no cimento, maior a resistência ao ácido sulfúrico.

A resistência ao ataque ácido depende da estrutura dos poros do cimento, da capacidade dos componentes da matriz de neutralizar o ácido e dos produtos da corrosão (SHI *et al.*, 2000). Quanto maior a porosidade e permeabilidade, maior a degradação sofrida pelo cimento (SOUZA *et al.*, 2020). Pensando nisso,

apesar da estrutura mais porosa da matriz, identificada pelo índice de vazios, a resistência ao ácido sulfúrico dos cimentos com RMF foi maior do que o cimento REF, independentemente do teor de RMF. Sendo assim, uma das possíveis razões deste desempenho é a atuação do RMF como material pozolânico.

Os materiais pozolânicos podem melhorar a estabilidade da matriz cimentícia em ambiente ácido pela presença reduzida de hidróxido de cálcio (portlandita) que é mais vulnerável ao ataque de ácido (ZIVICA *et al.*, 2002; OUESLATI *et al.*, 2012). A Figura 30 apresenta a relação da perda de massa dos cimentos pelo ataque de ácido sulfúrico, em %, com a portlandita remanescente dos cimentos obtida pelo ensaio termogravimétrico. Foram retirados o maior e o menor valor de perda de massa (F20 e N20) para minimizar os erros.

Figura 30 – Relação entre a perda de massa por ataque de ácido sulfúrico e portlandita remanescente.



Fonte: Autor (2021).

Como discutido anteriormente (SHI *et al.*, 2000), o teor de portlandita remanescente não é o único fator que influencia o desempenho dos cimentos ao ataque de ácido sulfúrico. Porém, pela Figura 30 é possível perceber que a linha de tendência com R^2 de 0,89 indica uma boa correlação entre a perda de massa decorrente do ataque ácido e a portlandita remanescente apesar do baixo número de pontos plotados no gráfico. Isto é, o modelo explica 89% da variabilidade dos dados. Neste caso, o cimento REF foi responsável pelo pior desempenho com perda de massa de 8,87% e portlandita remanescente de 9,36% e o melhor resultado foi obtido por S20 com perda de massa de 7,84% e portlandita remanescente de 20,37%.

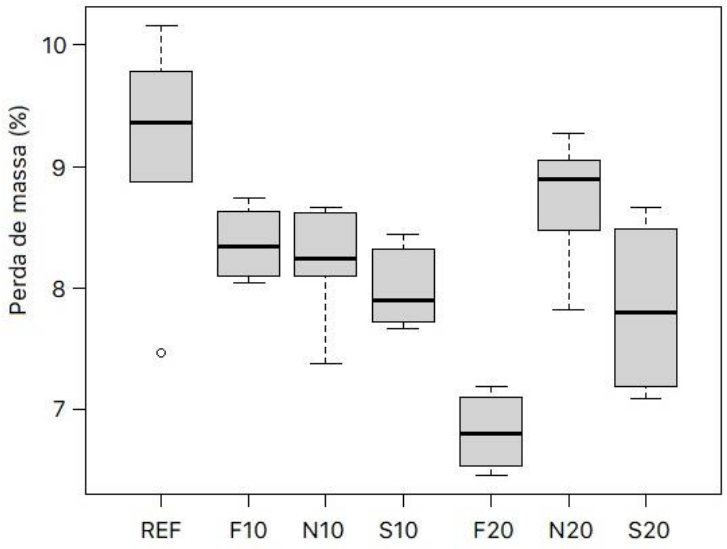
A Tabela 20 e a Figura 31 apresentam, respectivamente, o resultado da ANOVA e o *boxplot* e diagrama de interação para a resistência ao ácido sulfúrico aos 28 dias.

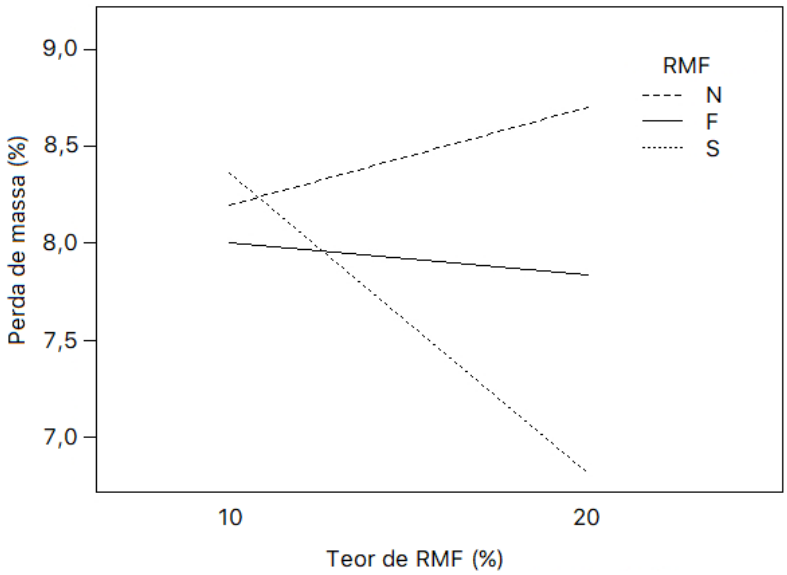
Tabela 19 – ANOVA – Resistência ao ácido sulfúrico aos 28 dias.

Tabela de análise de variância					
Resposta: Resistência ao ácido sulfúrico aos 28 dias					
Fatores	Df	Sum sq	Mean sq	F value	P
Teor RMF	1	0,0005174	0,0005174	13,296	**0,00122**
Composição RMF	3	0,0004158	0,0001386	3,561	**0,02843**
Interação	2	0,0004827	0,0002414	6,203	**0,00649**
Resíduos	25	0,0009728	0,0000389		

Fonte: Autor (2021), adaptado de RStudio.

Figura 31 – *Boxplot* e diagrama de interação – Resistência ao ácido sulfúrico aos 28 dias.





Fonte: Autor (2021), adaptado de RStudio.

A Tabela 20 indica que as duas variáveis independentes (teor de RMF e composição química do RMF) impactam a resistência ao ácido sulfúrico ($P<0,05$) e que a interação destes dois fatores também impacta o resultado ($P<0,05$). O *boxplot* apresenta visualmente o impacto do teor de RMF enquanto o gráfico de interação mostra como os tipos de rejeito (N, F e S) se comportam diante do teor de uso.

Enquanto o cimento com RMF (N) reduz a resistência ao ácido sulfúrico com o aumento do teor de RMF, ambas os cimentos com RMF (F) e RMF (S) melhoram a resistência com o aumento do teor de RMF, indicados pela queda na linha da perda de massa. Destes dois, é possível notar a queda mais acentuada referente à perda de massa obtida pelo RMF (F), que obteve o melhor desempenho com 20% de RMF.

5. CONCLUSÕES

Esta pesquisa desenvolveu cimentos compostos com RMF visando a redução do teor de clínquer na produção de cimento e a reinserção do RMF em outras cadeias de produção evitando seu descarte em barragens de rejeito. Os ensaios foram realizados por meio de argamassas e pastas de cimento para determinar o impacto da composição química do RMF e do teor de RMF nas propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade do cimento Portland composto com RMF. Foram produzidas 6 composições de cimentos, com 3 tipos de rejeitos (N, F e S) e 2 teores de RMF (10 e 20%). Os resultados obtidos foram avaliados pela ANOVA para determinar o impacto das variáveis independentes (composição dos rejeitos e teor de RMF) nas variáveis respostas (resistência à compressão, absorção de água, índice de vazios e resistência ao ácido sulfúrico). A adição de RMF em materiais cimentícios obteve resultados satisfatórios quanto às propriedades mecânicas e de durabilidade considerando os ganhos econômico, social e ambiental.

Os principais resultados podem ser resumidos da seguinte forma:

- O RMF reduz o pico de fluxo de calor associado à hidratação de C_3S;
- O pico do fluxo de calor referente à hidratação do C_3S é inversamente proporcional ao teor de RMF no cimento;
- O maior teor de óxido de silício pode ter contribuído para o aumento de C_3S dos cimentos com o RMF S;
- Os teores de AQC obtidos pela TGA sugerem que os cimentos com RMF possuem menos fases reativas;
- Os teores de portlandita obtidos pela TGA indicam possível atividade pozolânica do RMF, sendo que o maior teor de óxido de silício do RMF S pode ter contribuído para o maior consumo de portlandita.
- Os teores de carbonato de cálcio obtidos pela TGA sugerem que a adição de RMF no cimento resulta em maior resistência à carbonatação da pasta.
- A redução do teor de clínquer dos cimentos com RMF resultaram em menores resistências à compressão aos 28 e 91 dias;
- Aos 91 dias, possíveis reações pozolânicas referentes aos cimentos com RMF podem ter contribuído com o desenvolvimento da resistência à compressão;

- Com relação à resistência à compressão, os cimentos com 10% de RMF podem ser classificados, pela norma brasileira, como CP-II-Z 40, com resistência mínima de 40 MPa aos 28 dias. Os cimentos com 20% de RMF podem ser classificados, pela norma brasileira, como CP-IV 32 com resistência mínima de 32 MPa aos 28 dias e 40 MPa aos 91 dias;
- O aumento, de no máximo 1%, na absorção de água é muito baixo comparado aos ganhos ambientais da redução de até 20% do teor de clínquer;
- O RMF aumenta a resistência dos cimentos ao ácido sulfúrico;
- Há um indicativo de possível atividade pozolânica do RMF devido à diminuição de portlandita remanescente dos cimentos com RMF;
- A composição química do RMF e o teor de RMF impactou, significativamente, todos os ensaios dos cimentos endurecidos (resistência à compressão, absorção de água, índice de vazios e resistência ao ácido sulfúrico).

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Conforme o desenvolvimento desta pesquisa, foram identificadas sugestões que visam melhorar a discussão acerca do impacto da composição química do RMF nas propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade de cimentos compostos com RMF. Além disso, abaixo estão incluídas algumas atividades que não foram realizadas devido à pandemia do Covid-19, que levou à falta de materiais e fechamento de laboratórios. São elas:

- Obter amostras adicionais de RMF com diferentes composições químicas para realizar análise de regressão;
- Fixar os valores dos componentes químicos do RMF alternando apenas um componente a fim de se identificar o impacto direto deste determinado composto;
- Realizar ensaios adicionais de caracterização dos materiais, como MEV e BET;
- Realizar ensaios adicionais de pozolanicidade das amostras de RMF;
- Realizar ensaios físicos adicionais nas pastas de cimento com RMF como trabalhabilidade e tempos de pega;

- Realizar ensaios mecânicos adicionais nas argamassas de cimento com RMF como resistência à flexão;
- Realizar ensaios de durabilidade adicionais como resistência a sulfatos e carbonatação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733: Cimento Portland de Alta Resistência Inicial.** Rio de Janeiro, 1991.

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

_____. **NBR 12653: Materiais pozolânicos — Requisitos.** Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 16697: Cimento Portland – Requisitos**. Rio de Janeiro, 2018.

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

ABRÃO, P. C. R. A.; CARDOSO, F. A.; JOHN, V. M. **Efficiency of Portland-pozzolana cements: Water demand, chemical reactivity and environmental impact**. Construction and Building Materials, v. 247, p. 118546, 30 jun. 2020.

AKINBINU, V. A. **Utilization of Wastes from Metal Processing Plants as Fine Aggregates Replacement for High Strength Concrete**. Journal of Solid Waste Technology and Management, v. 44, n. 3, p. 223–231, 2018.

AMER, A. A.; EL-SOKKARY, T. M.; ABDULLAH, N. I. **Thermal durability of OPC pastes admixed with nano iron oxide**. HBRC Journal, v. 11, n. 2, p. 299–305, 17 ago. 2015.

ANM - AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. **Anuário Mineral Brasileiro: principais substâncias metálicas**. Brasília. 2020a.

_____. **Classificação Nacional da Barragem**. Disponível em: <https://app.anm.gov.br/SIGBM/Publico/ClassificacaoNacionalDaBarragem>. Acesso em: 23 jun. 2020b.

APRIANTI, E**. A huge number of artificial waste material can be supplementary cementitious material (SCM) for concrete production–a review part II**. Journal of cleaner production, v. 142, p. 4178–4194, 2017.

ARSLAN, F.; BENLI, A.; KARATAS, M. **Effect of high temperature on the performance of self-compacting mortars produced with calcined kaolin and metakaolin**. Construction and Building Materials, v. 256, p. 119497, 30 set. 2020.

ARUNA, M.; SAMPATH KUMAR, N. N. N. **Studies on iron tailings towards usage for paving blocks manufacture**. International Journal of Earth Sciences and Engineering, v. 3, n. 6, p. 861–868, dez. 2010.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C1702 -17: Standard Test Method for Measurement of Heat of Hydration of Hydraulic Cementitious Materials Using Isothermal Conduction Calorimetry**. West Conshohocken, 2017.

_____. **C595/C595M: Standard Specification for Blended Hydraulic Cements**. West Conshohocken, 2019.

_____. **C150: Standard Specification for Portland Cement**. West Conshohocken, 2020.

BABATUNDE, A. Q. *et al*. **Effect of Elapsed Time after Mixing on the Strength Properties of Lime–Iron Ore Tailings Treated Black Cotton Soil as a Road Construction Material**. Infrastructures, v. 5, n. 11, p. 1–19, 2020.

BANGALORE CHINNAPPA, G. *et al*. **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, 1 jan. 2020.

BARGER, G. M. *et al***. Use of Raw or Processed Natural Pozzolans in Concrete**, 2001.

BASSUONI, M. T.; NEHDI, M. L. **Resistance of self-consolidating concrete to sulfuric acid attack with consecutive pH reduction**. Cement and Concrete Research, v. 37, n. 7, p. 1070–1084, 1 jul. 2007.

BASTOS, L. A. de 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, out. 2016.

BAZZONI, A. **Study of early hydration mechanisms of cement by means of electron microscopy**. École Polytechinique Fédérale de Lausanne, 2014.

BBC BRASIL. **Tragédia com barragem da Vale em Brumadinho pode ser a pior no mundo em 3 décadas**. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/brasil-47034499>. Acesso em: 29 jun. 2020.

BENHELAL, E. *et al*. **Global strategies and potentials to curb CO2 emissions in cement industry**. Journal of Cleaner Production, v. 51, p. 142–161, 2013.

BERENGUER, R. A. *et al*. **Sugar cane bagasse ash as a partial substitute of Portland cement: Effect on mechanical properties and emission of carbon dioxide.** Journal of Environmental Chemical Engineering, v. 8, n. 2, p. 103655, 1 abr. 2020.

BERNDT, M. L. **Properties of sustainable concrete containing fly ash, slag and recycled concrete aggregate**. Construction and Building Materials, v. 23, n. 7, p. 2606–2613, 1 jul. 2009.

BHAGATH SINGH, G. V. P.; SUBRAMANIAM, K. V. L. **Production and characterization of low-energy Portland composite cement from post-industrial waste**. Journal of Cleaner Production, v. 239, p. 118024, 1 dez. 2019.

BORGES MARINHO, A. L. *et al*. **Ladle furnace slag as binder for cement-based composites**. Journal of Materials in Civil Engineering, v. 29, n. 11, p. 4017207, 2017.

BORGES, P. H. R. *et al*. **Reuse of iron ore tailings in the production of geopolymer mortars**. Revista Escola de Minas, v. 72, n. 4, p. 581–587, 1 out. 2019.

CARMO, F. F. do F. F. do *et al*. **Fundão tailings dam failures: the environment tragedy of the largest technological disaster of Brazilian mining in global context**. Perspectives in Ecology and Conservation, v. 15, n. 3, p. 145–151, 1 jul. 2017.

CARRASCO, E. V. M. *et al*. **Characterization of mortars with iron ore tailings using destructive and nondestructive tests**. Construction and Building Materials, v. 131, p. 31–38, jan. 2017.

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, 2021.

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, 10 maio 2019.

CARVALHO, J. M. F. *et al*. **Influence of high-charge and low-charge PCE-based superplasticizers on Portland cement pastes containing particle-size designed recycled mineral admixtures**. Journal of Building Engineering, v. 32, 2020.

CARVALHO, J. M. F. *et al*. **Influence of Particle Size-Designed Recycled Mineral Admixtures on the Properties of Cement-Based Composites.** Construction and Building Materials, v. 272, 2021.

CASTRO MENDES, J. *et al*. **Coating Mortars Based on Mining and Industrial Residues. Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 22, n. 5, p. 1569–1586, 2020.

CHEN, H. *et al*. **Fabrication of Baking-Free Bricks from Iron Ore Tailings. Current Materials Science**, v. 13, n. 2, p. 97–110, 2020.

CHEN, X.; WU, S.; ZHOU, J. **Influence of porosity on compressive and tensile strength of cement mortar**. Construction and Building Materials, v. 40, p. 869–874, 1 mar. 2013.

CHENG, Y. *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.

CHINA DAILY. **Heilongjiang mine leakage contained**. Disponível em: <http://global.chinadaily.com.cn/a/202003/31/WS5e829f85a310128217283361.html>. Acesso em: 5 jun. 2020.

CHINDAPRASIRT, P. *et al*. **Sulfate resistance of blended cements containing fly ash and rice husk ash**. Construction and Building Materials, v. 21, n. 6, p. 1356–1361, 2007.

CNN. **Brumadinho: tragédia faz 2 anos sem barragens desativadas e com disputa jurídica**. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/nacional/2021/01/25/brumadinho-tragedia-faz-2-anos-sem-barragens-desativadas-e-com-disputa-juridica>. Acesso em: 26 fev. 2021.

COIMBRA, K. T. O.; ALCÂNTARA, E.; DE SOUZA FILHO, C. R. **Possible Contamination of the Abrolhos Reefs by Fundao Dam Tailings, Brazil – New Constraints Based on Satellite Data**. Science of the Total Environment, v. 733, 2020.

CRUZ, F. V. D. S. *et al*. **Does Samarco's Spilled Mud Impair the Growth of Native Trees of the Atlantic Rainforest?**. Ecotoxicology and Environmental Safety, v. 189, 2020.

CUI, X.-W. *et al*. **Study on the Reaction Mechanism of Autoclaved Aerated Concrete Based on Iron Ore Tailings. Revista Romana de Materiale/ Romanian Journal of Materials**, v. 47, n. 1, p. 46–53, 2017.

DA SILVA, C. B.; DE PAIVA, P. R. P. **Artificial Stone Production Using Iron Ore Tailing (IOT).** Ceramica, v. 66, n. 378, p. 164–171, 2020.

DA SILVA, M. J. *et al*. **Feasibility Study of Steel Slag Aggregates in Precast Concrete Pavers**. ACI Materials Journal, v. 113, n. 4, 2016.

DAS, S. K. *et al***. Iron ore tailing: A waste material used in ceramic tile compositions as alternative source of raw materials**. Transactions of the Indian Ceramic Society, v. 71, n. 1, p. 21–24, jan. 2012.

DE ARAÚJO, S. R. *et al*. **Reverse Logistics System Applied to the Reuse of Iron Ore Tailings. Waste Management and Research**, v. 38, n. 12, p. 1429–1437, 2020.

DE FREITAS, S. M. A. C. S. M. A. C. *et al*. **Steel slag and iron ore tailings to produce solid brick**. Clean Technologies and Environmental Policy, v. 20, n. 5, p. 1087–1095, 1 jul. 2018.

DE OLIVEIRA, T. M. *et al*. **Geomechanical Properties of Mixtures of Iron Ore Tailings Improved with Portland Cement**. Acta Scientiarum - Technology, v. 41, 2019.

DINIZ, D. H. *et al*. **Blast oxygen furnace slag as chemical soil stabilizer for use in roads**. Journal of materials in civil engineering, v. 29, n. 9, p. 4017118, 2017.

DIXIT, A.; DU, H.; PANG, S. D. **Performance of mortar incorporating calcined marine clays with varying kaolinite content**. Journal of Cleaner Production, v. 282, p. 124513, 1 fev. 2021.

DUAN, P. *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. 2016a.

DUAN, P. *et al*. **Development of fly ash and iron ore tailing based porous geopolymer for removal of Cu(II) from wastewater**. Ceramics International, v. 42, n. 12, p. 13507–13518, set. 2016b.

EL-DIADAMONY, H. *et al*. **Hydration and characteristics of metakaolin pozzolanic cement pastes**. HBRC Journal, v. 14, n. 2, p. 150–158, 1 ago. 2018.

EL-FADEL, M. *et al*. **Uncertainty in estimating and mitigating industrial related GHG emissions**. Energy Policy, v. 29, n. 12, p. 1031–1043, 1 out. 2001.

BSI - BRITISH STANDARDS INSTITUTION. EN 197-1: **Cement composition, specifications and conformity criteria for common cements**. 2000.

FEI, J.; CHEN, X. Study on Basic Mechanical **Properties of Iron Ore Tailings Green Concrete.** Agro Food Industry Hi-Tech, v. 28, n. 3, p. 390–394, 2017.

FIGUEIREDO, R. A. 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, 2021.

FILHO, J. N. S. J. N. S. ana *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, 1 set. 2017.

FOLHA DE SÃO PAULO. **Moradores lutam por nova vida após tragédias em Mariana e Brumadinho.** Disponível em: <https://www1.folha.uol.com.br/ilustrissima/2019/11/moradores-lutam-por-nova-vida-apos-tragedias-em-mariana-e-brumadinho.shtml>. Acesso em: 29 jun. 2020.

FONTES, W. C. *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. *et al*. **Assessment of the use potential of iron ore tailings in the manufacture of ceramic tiles: From tailings-dams to "brown porcelain**". Construction and Building Materials, v. 206, p. 111–121, 10 maio 2019.

FONTES, W. C. *et al*. **Hydraulic Tiles Produced with Fine Aggregates and Pigments Reclaimed from Iron Ore Tailings**. Journal of Sustainable Metallurgy, 2021.

G1. **Um ano após tragédia da Vale, dor e luta por justiça unem famílias de 259 mortos e 11 desaparecidos**. Disponível em: <https://g1.globo.com/mg/minas-gerais/noticia/2020/01/25/um-ano-apos-tragedia-da-vale-dor-e-luta-por-justica-unem-familias-de-259-mortos-e-11-desaparecidos.ghtml>. Acesso em: 29 jun. 2020.

GALVÃO, J. L. B. *et al*. **Reuse of iron ore tailings from tailings dams as pigment for sustainable paints**. Journal of Cleaner Production, v. 200, p. 412–422, 1 nov. 2018.

GARCÍA-GUSANO, D.; CABAL, H.; LECHÓN, Y. **Long-term behaviour of CO2 emissions from cement production in Spain: scenario analysis using an energy optimisation model**. Journal of Cleaner Production, v. 99, p. 101–111, 15 jul. 2015.

GLINICKI, M. A. *et al*. **Influence of blended cements with calcareous fly ash on chloride ion migration and carbonation resistance of concrete for durable structures**. Materials, v. 9, n. 1, p. 18, 2016.

HOSSAIN, K. M. A. **Blended cement using volcanic ash and pumice.** Cement and Concrete Research, v. 33, n. 10, p. 1601–1605, 1 out. 2003.

HUANG, X. *et al***. Mechanical and thermal properties of green lightweight engineered cementitious composites**. Construction and Building Materials, v. 48, p. 954–960, 2013a.

HUANG, X. *et al*. **Development of green engineered cementitious composites using iron ore tailings as aggregates**. Construction and Building Materials, v. 44, p. 757–764, 1 jul. 2013b.

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, jul. 2013c.

IPT - INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Resíduos de mineração**. Disponível em: <http://www.ipt.br/noticias_interna.php?id_noticia=1043>. Acesso em: 17 fev. 2020.

IRASSAR, E. F.; DI MAIO, A.; BATIC, O. R. **Sulfate attack on concrete with mineral admixtures**. Cement and Concrete Research, v. 26, n. 1, p. 113–123, 1996.

JACKSON, P. J. Portland Cement: **Classification and Manufacture. In: Lea's Chemistry of Cement and Concrete**. Elsevier Ltd., 2003. p. 25–94.

JIANG, Y. *et al*. **Preparations of Composite Concretes Using Iron Ore Tailings as Fine Aggregates and Their Mechanical Behavior**. Materiali in Tehnologije, v. 53, n. 4, p. 467–472, 2019.

JITTIN, V.; MINNU, S. N.; BAHURUDEEN, A. **Potential of sugarcane bagasse ash as supplementary cementitious material and comparison with currently used rice husk ash**. Construction and Building Materials. 1 mar. 2021.

JOSA, A. *et al*. **Comparative analysis of available life cycle inventories of cement in the EU**. Cement and Concrete Research, v. 34, n. 8, p. 1313–1320, 2004.

KADRI, E. H. *et al*. **Influence of metakaolin and silica fume on the heat of hydration and compressive strength development of mortar**. Applied Clay Science, v. 53, n. 4, p. 704–708, 1 out. 2011.

KEERTHI RAJ, R.; MOHAMED RAJAB, P. **Effect of red mud and iron ore tailings on the strength of self-compacting concrete with polypropylene fibre**. International Journal of Civil Engineering and Technology, v. 9, n. 13, p. 456–471, 2018.

KHAN, K. *et al*. **Effective use of micro-silica extracted from rice husk ash for the production of high-performance and sustainable cement mortar**. Construction and Building Materials, v. 258, p. 119589, 20 out. 2020.

KOLAWOLE, J. T. *et al*. **Blended cement binders containing bamboo leaf ash and ground clay brick waste for sustainable concrete**. Materialia, v. 15, p. 101045, 1 mar. 2021.

KOSSOFF, D. *et al*. **Mine tailings dams: Characteristics, failure, environmental impacts, and remediation**. Applied Geochemistry, v. 51, p. 229–245, 1 dez. 2014.

KUMAR, R. *et al*. **Utilization of Iron Ore Tailings for the Production of Fly Ash - GGBS-Based Geopolymer Bricks**. Journal of Advanced Manufacturing Systems, v. 16, n. 3, p. 275–290, 1 set. 2017

KUMAR, S.; KUMAR, R.; BANDOPADHYAY, A. **Innovative methodologies for the utilisation of wastes from metallurgical and allied industries**. Resources, Conservation and Recycling, v. 48, n. 4, p. 301–314, 1 out. 2006.

KURANCHIE, F. A. *et al*. **Utilisation of iron ore tailings as aggregates in concrete**. Cogent Engineering, v. 2, n. 1, 7 set. 2015.

LATIF, S. A.; RAHMAN, M. S. A.; SIKIRU, O. **Sorptivity of Concrete Containing Iron Ore Tailings**. Revista Romana de Materiale/Romanian Journal of Materials, v. 47, n. 3, p. 336–344, 2017.

LAWRENCE, C. D. **The constitution and specification of Portland cements. In: Lea's chemistry of cement and concrete**. Elsevier, 1998. p. 131–193.

LEMONIS, N. *et al*. **Hydration study of ternary blended cements containing ferronickel slag and natural pozzolan**. Construction and Building Materials, v. 81, p. 130–139, 15 abr. 2015.

LI, C. *et al*. **Innovative methodology for comprehensive utilization of iron ore tailings. Part 2: The residues after iron recovery from iron ore tailings to prepare cementitious material**. Journal of Hazardous Materials, v. 174, n. 1–3, p. 78–83, 15 fev. 2010.

LI, D. *et al*. **Phase transformation of iron ore tailings during autoclaved curing.** Kuei Suan Jen Hsueh Pao/Journal of the Chinese Ceramic Society, v. 39, n. 4, p. 708–713, abr. 2011.

LI, D. Z. *et al*. **Reaction mechanism of aerated concrete prepared by iron tailings under the condition of autoclaved curing**. Beijing Keji Daxue Xuebao/Journal of University of Science and Technology Beijing, v. 35, n. 6, p. 799–805, 2013.

LI, H. N. H.-N. *et al*. **Experimental research on dynamic mechanical properties of metal tailings porous concrete**. Construction and Building Materials, v. 213, p. 20–31, jul. 2019a.

LI, H.; XIAO, H. gang; OU, J. ping. **A study on mechanical and pressure-sensitive properties of cement mortar with nanophase materials**. Cement and Concrete Research, v. 34, n. 3, p. 435–438, 1 mar. 2004.

LI, T. *et al*. **Assessing mineral extraction and trade in China from 1992 to 2015: A comparison of material flow analysis and exergoecological approach**. Resources Policy, v. 63, p. 101460, 1 out. 2019b.

LIANG, X. *et al*. **Study on Preparation of Eco-Friendly Autoclaved Aerated Concrete from Low Silicon and High Iron Ore Tailings**. Journal of New Materials for Electrochemical Systems, v. 22, n. 4, p. 224–230, 2019.

LIANG, X. Y. *et al*. **Preparation and Phase Characteristics of Autoclaved Aerated Concrete Using Iron Ore Tailings**. Revista Romana de Materiale/ Romanian Journal of Materials, v. 48, n. 3, p. 381–387, 2018.

LIU, H. *et al*. **Preparation & Properties of Autoclaved Sand-Bricks Using Iron Ore Tailings & Waste Rock**. Journal of Mines, Metals and Fuels, v. 63, n. 12, p. 681–686, 2016.

LIU, J.; NI, W.; YU, M. **Preparation of high-strength concrete by using fly ash and iron ore tailings as major raw materials**. Cailiao Yanjiu Xuebao/Chinese Journal of Materials Research, v. 26, n. 3, p. 295–301, 2012.

LIU, S. *et al*. **Utilization of steel slag, iron tailings and fly ash as aggregates to prepare a polymer-modified waterproof mortar with a core–shell styrene–acrylic copolymer as the modifier**. Construction and Building Materials, v. 72, p. 15–22, 15 dez. 2014.

LIZARAZO-MARRIAGA, J.; CLAISSE, P.; GANJIAN, E. **Effect of Steel Slag and Portland Cement in the Rate of Hydration and Strength of Blast Furnace Slag Pastes**. Journal of Materials in Civil Engineering, v. 23, n. 2, p. 153–160, fev. 2011.

LOTHENBACH, B.; SCRIVENER, K.; HOOTON, R. D. **Supplementary cementitious materials**. Cement and Concrete Research, v. 41, n. 12, p. 1244–1256, 1 dez. 2011.

LUO, L. *et al*. **Utilization of Iron Ore Tailings as Raw Material for Portland Cement Clinker Production**. Advances in Materials Science and Engineering, v. 2016, 2016.

LUO, L. *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, 2020.

LV, 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, 2021.

MA, B. *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, 20 jul. 2016.

MAGALHÃES, L. F. de *et al*. **Iron Ore Tailings as a Supplementary Cementitious Material in the Production of Pigmented Cements**. Journal of Cleaner Production, v. 274, 2020.

MATSCHEI, T.; LOTHENBACH, B.; GLASSER, F. P. **The AFm phase in Portland cement**. Cement and Concrete Research, v. 37, n. 2, p. 118–130, 2007.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 1a Edição. São Paulo: Ibracon, 2008.

MENDES, B. C. *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, 10 dez. 2019a.

MENDES, J. C. *et al*. **Factors affecting the specific heat of conventional and residue-based mortars**. Construction and Building Materials, v. 237, 2020.

MENDES, J. C. J. C. J. C. J. C. J. C. *et al*. **On the relationship between morphology and thermal conductivity of cement-based composites**. Cement and Concrete Composites, v. 104, p. 103365, 1 nov. 2019b.

MENDES PROTASIO, F. N. *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, p. 123929, 2021.

MEYERS, G. D.; MCLEOD, G.; ANBARCI, M. A. **An international waste convention: measures for achieving sustainable development**. Waste management & research, v. 24, n. 6, p. 505–513, 2006.

MIKULČIĆ, H. *et al*. **Reducing greenhouse gasses emissions by fostering the deployment of alternative raw materials and energy sources in the cleaner cement manufacturing process**. Journal of Cleaner Production, v. 136, p. 119–132, 10 nov. 2016.

MOHSEN, A. *et al*. **Evaluating the Mechanical Properties of Admixed Blended Cement Pastes and Estimating its Kinetics of Hydration by Different Techniques.** Egyptian Journal of Petroleum, v. 29, n. 2, p. 171–186, 1 jun. 2020.

MONTEIRO, P. J. M.; KURTIS, K. E. **Time to failure for concrete exposed to severe sulfate attack**. Cement and Concrete Research, v. 33, n. 7, p. 987–993, 2003.

MORAIS, C. F. F. *et al*. **Thermal and Mechanical Analyses of Colored Mortars Produced Using Brazilian Iron Ore Tailings**. Construction and Building Materials, v. 268, 2021.

MPF - MINISTÉRIO PÚBLICO FEDERAL. **Recomendação nº 014/2016.** Procuradoria da República no Estado de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2016. Disponível em: <https://observatorionacional.cnj.jus.br/observatorionacional/images/observatorio/atuacao-extrajudicial/recomendacoes/mariana/RECOMENDACAO_DNPM_mineracao_sustentavel.pdf>. Acesso em: 29 jun. 2020.

MUNJAL, P.; HAU, K. K.; HON ARTHUR, C. C. **Effect of GGBS and curing conditions on strength and microstructure properties of oil well cement slurry.** Journal of Building Engineering, v. 40, p. 102331, 1 ago. 2021.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto.** 5ª Edição. Bookman Editora, 2015.

NEWS REPORT MX. **Conagua participa de derramamento de barragem de rejeitos no município de Canelas, em Durango**. Disponível em: <https://newsreportmx.com/2020/05/01/atiende-conagua-derrame-de-una-presa-de-jales-en-el-municipio-de-canelas-en-durango/>. Acesso em: 5 jun. 2020.

NIE, Q. *et al*. **Numerical simulation of fly ash concrete under sulfate attack**. Construction and Building Materials, v. 84, p. 261–268, 1 jun. 2015.

ODLER, I. **Hydration, Setting and Hardening of Portland Cement**. In: Lea's Chemistry of Cement and Concrete. Elsevier Ltd., 1998. p. 241–297.

ORITOLA, S. F.; SALEH, A. L.; SAM, A. R. M. **Characterization of Iron Ore Tailings as Fine Aggregate**. ACI Materials Journal, v. 117, n. 2, p. 125–134, 2020.

ORTEGA, J. M. *et al*. **Short-term performance of sustainable silica fume mortars exposed to sulfate attack**. Sustainability, v. 10, n. 7, p. 2517, 2018.

ORTEGA, J. M.; SÁNCHEZ, I.; CLIMENT, M. A**. Durability related transport properties of OPC and slag cement mortars hardened under different environmental conditions**. Construction and Building Materials, v. 27, n. 1, p. 176–183, 2012.

OUESLATI, O.; DUCHESNE, J. **The effect of SCMs and curing time on resistance of mortars subjected to organic acids**. Cement and Concrete Research, v. 42, n. 1, p. 205–214, 1 jan. 2012.

PAYÁ, J. *et al*. **Determination of the pozzolanic activity of fluid catalytic cracking residue. Thermogravimetric analysis studies on FC3R-lime pastes**. Cement and Concrete Research, v. 33, n. 7, p. 1085–1091, 1 jul. 2003.

RAMACHANDRAN, V. S. *et al*. **Introduction to Portland Cement Concrete.** In: Handbook of Thermal Analysis of Construction Materials. Elsevier, 2002. p. 35–69.

RAMADJI, C.; MESSAN, A.; PRUD'HOMME, E. **Influence of Granite Powder on Physico-Mechanical and Durability Properties of Mortar**. Materials, v. 13, n. 23, p. 5406, 27 nov. 2020.

RANÄNGEN, H.; LINDMAN, Å. **A path towards sustainability for the Nordic mining industry.** Journal of Cleaner Production, v. 151, p. 43–52, 10 mai. 2017.

RAVI KUMAR, C. M. M. *et al*. **Experimental studies on Iron-ore tailing based interlocking paver blocks**. International Journal of Earth Sciences and Engineering, v. 5, n. 3, p. 501–504, 2012.

ROMANO, R. C. O. *et al*. **Hydration of Portland cement with red mud as mineral addition**. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, v. 131, n. 3, p. 2477–2490, 2018.

ROSE, J. *et al*. **Evolution of iron speciation during hydration of C4AF**. Waste Management, v. 26, n. 7, p. 720–724, 1 jan. 2006.

RUIJVEN, B. J. Van *et al*. **Long-term model-based projections of energy use and CO2 emissions from the global steel and cement industries**. Resources, Conservation and Recycling, v. 112, p. 15–36, 2016.

SALAS, D. A. *et al*. **Environmental impacts, life cycle assessment and potential improvement measures for cement production: a literature review**. Journal of Cleaner Production, v. 113, p. 114–122, 1 fev. 2016.

SCRIVENER, K. *et al*. **Advances in understanding cement hydration mechanisms**. Cement and Concrete Research, v. 124, p. 105823, 1 out. 2019.

SCRIVENER, K. L.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. M. **Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO2 cement-based materials industry**. Cement and Concrete Research, v. 114, p. 2–26, 1 dez. 2018.

SEDIĆ, K. *et al*. **Carbonation of Portland-Zeolite and geopolymer well-cement composites under geologic CO2 sequestration conditions**. Cement and Concrete Composites, v. 111, p. 103615, 1 ago. 2020.

SHASHI KUMAR, N. V.; ANANTHAYYA, M. B.; GANGADHARAPPA, B. M. **Experimental Investigation on Steel Fiber Reinforced Concrete with the Partial Replacement of Cement by Copper Slag and Fine Aggregate by Iron Ore Tailings**. Journal of Computational and Theoretical Nanoscience, v. 15, n. 1112, p. 3317–3323, 2018.

SHETTIMA, A. U. *et al*. **Effect of Sulphuric Acid on Concrete with Iron Ore Tailings**. Jurnal Teknologi, v. 78, n. 6–12, p. 31–36, 2016a.

SHETTIMA, A. U. *et al*. **Evaluation of iron ore tailings as replacement for fine aggregate in concrete**. Construction and Building Materials, v. 120, p. 72–79, 1 set. 2016b.

SHI, C.; STEGEMANN, J. A. **Acid corrosion resistance of different cementing materials**. Cement and Concrete Research, v. 30, n. 5, p. 803–808, 1 maio 2000.

SHUBHANANDA RAO, P.; CHANDAR, K. R. **Development of energy efficient organic bricks in construction using IOT and perlite**. International Journal of Sustainable Engineering, 2020.

SIDDIKA, A. *et al*. **State-of-the-art-review on rice husk ash: A supplementary cementitious material in concrete**. Journal of King Saud University - Engineering Sciences. King Saud University, 24 out. 2020.

SKAROPOULOU, A. *et al***. Use of mineral admixtures to improve the resistance of limestone cement concrete against thaumasite form of sulfate attack**. Cement and Concrete Composites, v. 37, p. 267–275, 2013.

SOUZA, A. T. *et al*. **Effect of limestone powder substitution on mechanical properties and durability of slender precast components of structural mortar**. Journal of Materials Research and Technology, v. 9, n. 1, p. 847–856, 1 jan. 2020.

SUNIL, B. M.; MANJUNATHA, L. S.; YARAGAL, S. C. **Durability studies on concrete with partial replacement of cement and fine aggregates by fly ash and tailing material**. Advances in Concrete Construction, v. 5, n. 6, p. 671–683, 2017.

TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry**. Thomas Telford London, 1997. v. 2

TEIXEIRA, E. R. *et al*. **Recycling of biomass and coal fly ash as cement replacement material and its effect on hydration and carbonation of concrete**. Waste Management, v. 94, p. 39–48, 1 jul. 2019.

TIAN, B.; COHEN, M. D. **Does gypsum formation during sulfate attack on concrete lead to expansion?** Cement and Concrete Research, v. 30, n. 1, p. 117–123, 2000.

TIAN, Y. *et al*. **Effect of iron ore tailings powder on performance of alkali-activated slag foamed concrete**. Beijing Gongye Daxue Xuebao/Journal of Beijing University of Technology, v. 42, n. 5, p. 742–747, 2016a.

TIAN, Z. X. *et al*. **Experimental Study on the Properties of Concrete Mixed with Iron Ore Tailings**. Advances in Materials Science and Engineering, v. 2016, 2016b.

TOSUN-FELEKOĞLU, K. **The effect of C3A content on sulfate durability of Portland limestone cement mortars**. Construction and Building Materials, v. 36, p. 437–447, 2012.

TSAKIRIDIS, P. E. *et al*. **Utilization of steel slag for Portland cement clinker production. Journal of Hazardous Materials**, v. 152, n. 2, p. 805–811, 1 abr. 2008.

USGS – UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. **Mineral commodity summaries**, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3133/mcs202>. Acesso em: 03 fev. 2020.

VEDALAKSHMI, R. *et al*. **Quantification of hydrated cement products of blended cements in low and medium strength concrete using TG and DTA technique**. Thermochimica Acta, v. 407, n. 1–2, p. 49–60, 2003.

VENKATESAN, B. *et al*. **Experimental study on concrete using partial replacement of cement by Alccofine fine aggregate as iron powder**. In: Materials Today: Proceedings, Part 2, Anais. 1 jan. 2020.

WANG, C.-L. C. L. *et al*. **Experimental study on aerated concrete with Lingqiu iron ore tailings**. Cailiao Kexue yu Gongyi/Material Science and Technology, v. 20, n. 6, p. 7–12, dez. 2012.

WANG, C. *et al*. **Study on the Preparation of High Performance Concrete Using Steel Slag and Iron Ore Tailings**. Journal of New Materials for Electrochemical Systems, v. 22, n. 4, p. 217–223, 2019.

WANG, C. L. *et al*. **Autoclaved aerated concrete prepared with iron ore tailings as siliceous materials**. Cailiao Rechuli Xuebao/Transactions of Materials and Heat Treatment, v. 34, n. 10, p. 7–11, 2013.

WANG, C. L. *et al*. **Experimental study on autoclaved aerated concrete from coal gangue and iron ore tailings**. Meitan Xuebao/Journal of the China Coal Society, v. 39, n. 4, p. 764–770, 2014.

WANG, C. L. *et al*. **Preparation and properties of autoclaved aerated concrete using coal gangue and iron ore tailings**. Construction and Building Materials, v. 104, n. 2, p. 109–115, fev. 2016.

WANG, Q. *et al*. **Application of Calcareous Iron Ore Tailings in the Production of Cement**. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects, 2020.

WBCSD – WOLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT. **GNR Project**. Disponível em: <https://www.wbcsdcement.org/GNR-2016/>. Acesso em: 3 out. 2019.

WEISHI, L. *et al*. **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, 10 dez. 2018.

WILD, S.; KHATIB, J. M. **Portlandite consumption in metakaolin cement pastes and mortars.** Cement and Concrete Research, v. 27, n. 1, p. 137–146, 1 jan. 1997.

WU, P. *et al*. **Properties of cementitious composites containing active/inter mineral admixtures**. Polish Journal of Environmental Studies, v. 27, n. 3, p. 1323–1330, 2018.

XIE, Z. *et al*. **Effects of colloidal nanosilica/polycarboxylate ether superplasticizer nanocomposite and graphene oxide on properties of fly ash blended cement**. Construction and Building Materials, v. 262, p. 120767, 30 nov. 2020.

XIONG, C. *et al*. **Use of grounded iron ore tailings (GIOTs) and BaCO3 to improve sulfate resistance of pastes**. Construction and Building Materials, v. 150, p. 66–76, set. 2017.

XU, F. *et al*. **The Mechanical Properties of Tailing Recycled Aggregate Concrete and Its Resistance to the Coupled Deterioration of Sulfate Attack and Wetting–Drying Cycles**. Structures, v. 27, p. 2208–2216, 2020.

XU, F. *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, 2021.

YANG, K. H.; MOON, G. D.; JEON, Y. S. **Implementing ternary supplementary cementing binder for reduction of the heat of hydration of concrete**. Journal of Cleaner Production, v. 112, p. 845–852, 20 jan. 2016.

YAO, G. *et al*. **Activation of hydration properties of iron ore tailings and their application as supplementary cementitious materials in cement**. Powder Technology, v. 360, p. 863–871, 2020a.

YAO, G. *et al*. **Mechanical activation as an innovative approach for the preparation of pozzolan from iron ore tailings**. Minerals Engineering, v. 145, p. 106068, 1 jan. 2020b.

YARAGAL, S. C. *et al*. **Multi-criteria optimization of fly ash and iron ore tailing based concretes subjected to elevated temperatures**. Indian Concrete Journal, v. 93, n. 10, p. 44–52, 2019.

YI, Z. L.; SUN, H. H.; LI, Y. **Research on the influence of thermal activation for the cementitious activity of iron ore tailing**. Wuhan Ligong Daxue Xuebao/Journal of Wuhan University of Technology, v. 31, n. 12, 2009a.

YI, Z. lai *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, 1 jun. 2009b.

YISA, G. L.; SANI, J. E. **Reliability Estimate of Strength Characteristic of Iron Ore Tailing Stabilized Lateritic Soil for Road Pavement Sub-Base Materials**. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, v. 19 S, p. 4177–4192, 2014.

YOUNG, G.; YANG, M. **Preparation and characterization of Portland cement clinker from iron ore tailings**. Construction and Building Materials, v. 197, p. 152–156, 10 fev. 2019.

ZHANG, M. *et al*. **Manifest system for management of non-hazardous industrial solid wastes: results from a Tianjin industrial park**. Journal of Cleaner Production, v. 133, p. 252–261, 2016.

ZHANG, W. *et al*. **Effects of Iron Ore Tailings on the Compressive Strength and Permeability of Ultra High Performance Concrete**. Construction and Building Materials, v. 260, 2020a.

ZHANG, Z. *et al*. **Utilization of Iron Tailings Sand as an Environmentally Friendly Alternative to Natural River Sand in High-Strength Concrete: Shrinkage Characterization and Mitigation Strategies**. Materials, v. 13, n. 24, p. 1–15, 2020b.

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, 15 jan. 2014.

ZHU, Z. *et al*. **The feasibility study of concrete with iron ore tailings**. Wuhan Ligong Daxue Xuebao (Jiaotong Kexue Yu Gongcheng Ban)/Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science and Engineering), v. 40, n. 3, p. 428–431 and 436, 2016.

ZHU, Z.; LI, B.; ZHOU, M. **The Influences of Iron Ore Tailings as Fine Aggregate on the Strength of Ultra-High Performance Concrete**. Advances in Materials Science and Engineering, v. 2015, 2015a.

ZHU, Z.; LI, B.; ZHOU, M. **Experimental study on the preparation of UHPC with cascade-grinding iron ore tailings**. Gongneng Cailiao/Journal of Functional Materials, v. 46, n. 20, p. 20043–20047, 30 out. 2015b.

ZIVICA, V.; BAJZA, A. **Acidic attack of cement-based materials - A review Part 2. Factors of rate of acidic attack and protective measures.** Construction and Building Materials, v. 16, n. 4, p. 215–222, 1 jun. 2002.