



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

SILVANDRO FERREIRA DE SIQUEIRA JÚNIOR

**ESTUDO EXPLORATÓRIO DE PROPRIEDADES DE PASTAS DE CAL COM
METACAU LIM E RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO**

Recife

2023

SILVANDRO FERREIRA DE SIQUEIRA JÚNIOR

**ESTUDO EXPLORATÓRIO DE PROPRIEDADES DE PASTAS DE CAL COM
METACALIM E RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em engenharia civil.

Área de concentração: Estruturas.

Orientador: Prof. Dr. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro

Recife

2023

Catálogo na fonte
Bibliotecário Gabriel Luz, CRB-4 / 2222

S618e Siqueira Júnior, Silvano Ferreira de.
Estudo exploratório de propriedades de pastas de cal com metacaulim e
resíduos de construção e demolição / Silvano Ferreira de Siqueira Júnior,
2023.
115 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Recife, 2023.
Inclui referências e apêndices.

1. Engenharia civil. 2. Resíduo de construção e demolição. 3. Cal. 4.
Metacaulim. 5. Compatibilidade. 6. Edificações históricas. I. Carneiro, Arnaldo
Manoel Pereira (Orientador). II. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.) BCTG / 2023 - 168

SILVANDRO FERREIRA DE SIQUEIRA JÚNIOR

**ESTUDO EXPLORATÓRIO DE PROPRIEDADES DE PASTAS DE CAL COM
METACAILIM E RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia civil. Área de concentração: Estruturas.

Aprovada em: 20/07/2023.

BANCA EXAMINADORA

Participação por videoconferência
Prof. Dr. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro (orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Participação por videoconferência
Dr^a. Marylinda Santos de França (examinadora externa)
Technische Universität München - TUM

Participação por videoconferência
Prof^a. Dr^a Ana Cecília Vieira da Nóbrega (examinadora externa)
Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN

Participação por videoconferência
Prof. Dr. Weslei Monteiro Ambrós (examinador externo)
Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS

Dedico este trabalho aos meus filhos Gabriel e Yuri. Nunca desistam!

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me conceder saúde, disposição, força e vigor para iniciar e concluir este desafio, mesmo com todas as estatísticas e prognósticos em meu desfavor.

Agradeço a minha mãe, Marluce Martins de Lima, e ao meu pai, Silvandro Ferreira de Siqueira, pelo dom da vida.

Agradeço a minha esposa, Diwlay Cardoso Maia, pelo amor e suporte em todos os momentos, assim como pela paciência e palavras de conforto nos momentos mais difíceis.

Agradeço aos meus filhos Gabriel Maia de Siqueira e Yuri Maia de Siqueira, por todo o amor genuíno que irradia de vocês.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro, por todas as instruções, pela confiança, paciência, compreensão nos momentos difíceis e pela sua preciosa amizade! Muito obrigado por tudo!

Agradeço ao Prof. Igor Fernandes Gomes pelo apoio e compreensão quando falei que desejava de todo o coração cursar construção civil. Em vez de encontrar bloqueios, tive a sorte de encontrar um profissional ímpar que permitiu a viabilização da minha transferência de área, sem a qual esta dissertação não seria escrita.

Agradeço ao Prof. Antônio Acácio de Melo Neto por disponibilizar os equipamentos e ferramentas do Laboratório de Tecnologia dos Aglomerantes (LABTAG), sem os quais seria mais complexa a minha missão.

Agradeço ao Prof. Pedro Luiz Guzzo por disponibilizar toda a robusta estrutura do Laboratório de Tecnologia dos Minerais (LTM), os quais foram cruciais para a obtenção da maioria dos resultados obtidos nesta dissertação.

Agradeço à Prof^a Aline Figueiredo Nóbrega, pelo suporte e pela disponibilização de equipamentos do LEP (UFCG) que contribuíram significativamente com esta pesquisa.

Agradeço a todos os técnicos e auxiliares dos laboratórios da UFPE e da UFCG que contribuíram bastante com esta pesquisa, especialmente nos momentos de utilização dos equipamentos e com dicas preciosas.

Por fim, agradeço a todos os amigos que fiz ao longo dessa jornada na UFPE e que me ajudaram bastante! Sem vocês, concluir os trabalhos seria muito mais difícil. Muito obrigado!

*“Sucesso para mim é a capacidade de realizar aquilo
que foi planejado e se satisfazer com isso.”*

(Henrique Sucasas)

RESUMO

Diante da atual necessidade de redução das emissões de CO₂ durante o processo produtivo de materiais de construção, além da reutilização de resíduos de construção e demolição (RCD) nesses materiais com vistas a reduzir o impacto ambiental gerado pelo seu descarte inadequado na natureza, faz-se necessária a criação de novas alternativas de materiais sustentáveis que substituam gradativamente aqueles que geram maiores danos ao meio ambiente, os quais devem atender critérios de desempenho, durabilidade e compatibilidade. Com o intuito de contribuir com essa demanda, a presente pesquisa possuiu como objetivo a exploração de propriedades de pastas compostas de cal com metacaulim e resíduos de construção e demolição de maneira a viabilizar uma futura aplicação desse novo produto na produção de argamassas para a restauração de obras históricas e outras aplicações, contribuindo com a redução das emissões de CO₂ no planeta e com o descarte inadequado de resíduos de construção e demolição no meio ambiente. Tendo em vista que a compatibilidade é um dos critérios mais relevantes ao se realizar a conservação e restauração de obras históricas, foram comparadas quatro misturas ao longo da pesquisa, sendo uma de referência (50% cal e 50% metacaulim) e três contendo substituições em massa de cal com metacaulim (MC) por 10, 20 e 30% de RCD. Todas as pastas foram produzidas com razão água/ligante (A/L) = 0,8 e as análises comparativas entre as misturas contendo RCD com a de referência ocorreram nos estados anidro, fresco e endurecido. No estado anidro, os materiais e as misturas foram caracterizados quanto as suas propriedades físicas, químicas e mineralógicas. No estado fresco, foram realizados os ensaios de *mini-slump* e de reologia. No estado endurecido, os seguintes ensaios foram realizados aos 14, 28, 56 e 90 dias: difração de raios-x (DRx); Análise termodiferencial (ATD) combinada com a termogravimetria (TG); espectroscopia infravermelha (IV); resistência à compressão (R_c); e variação de massa ao longo dos 90 dias. Os resultados indicam uma leve modificação físico-química e mineralógica entre as pastas contendo 10% de RCD e a de referência, o que pode ser um indicativo de compatibilidade e viabilizar o emprego de materiais de conservação e restauro contendo proporções de RCD em construções históricas realizadas com cal e pozolanas. Além disso, de acordo com um critério de desempenho mecânico, especificamente a resistência à compressão, todas as misturas contendo RCD atendem aos requisitos de compatibilidade para uso como argamassa de restauração de obras históricas. Consequentemente, algumas misturas obtiveram resultados condizentes com os recomendados para utilização em obras de conservação e restauração do patrimônio histórico. Desse modo, elas podem ser alvo de mais pesquisas que avaliem outros parâmetros de compatibilidade não analisados neste estudo,

viabilizando um melhor comparativo entre as argamassas originais históricas e as argamassas contendo a adição de resíduo de construção e demolição.

Palavras-chave: resíduo de construção e demolição; cal; metacaulim; compatibilidade; edificações históricas.

ABSTRACT

In view of the current need to reduce CO₂ emissions during the production process of construction materials, in addition to the reuse of construction and demolition waste (CDW) in these materials in order to reduce the environmental impact generated by their improper disposal in nature, it's necessary to create new alternatives for sustainable materials that gradually replace those that cause greater damage to the environment, which must meet performance, durability and compatibility criteria. In order to contribute to this demand, the present research aimed to explore the properties of pastes composed of lime with metakaolin and construction and demolition waste in order to enable a future application of this new product in the production of mortars for the restoration of historical constructions and other applications, contributing to the reduction of CO₂ emissions on the planet and the inappropriate disposal of construction and demolition waste in the environment. Bearing in mind that compatibility is one of the most relevant criteria when carrying out the conservation and restoration of historic constructions, four mixtures were compared throughout the research, one being a reference (50% lime and 50% metakaolin) and three containing mass replacements of lime with metakaolin (MK) by 10, 20 and 30% of CDW. All pastes were produced with W/B = 0,8 and comparative analysis between mixtures containing CDW and the reference occurred in anhydrous, fresh and hardened states. In the anhydrous state, the materials and mixtures were characterized in terms of their physical, chemical and mineralogical properties. In the fresh state, the mini-slump and rheology tests were performed. In the hardened state, the following tests were performed at 14, 28, 56 and 90 days: x-ray diffraction (XRD); differential thermal analysis (DTA) combined with thermogravimetry (TG); infrared spectroscopy (IR); compressive strength; and mass variation over the 90 days. The results indicate a slight physical-chemical and mineralogical modification between the pastes containing 10% CDW and the reference one, which may be an indication of compatibility and enable the use of conservation and restoration materials containing proportions of CDW in historic constructions carried out with lime and pozzolans. Furthermore, according to a mechanical performance criterion, specifically compressive strength, all mixes containing CDW meet compatibility requirements for use as mortar for restoring historic constructions. Consequently, some mixtures obtained suitable results with those recommended for use in historic heritage conservation and restoration works. Thus, they may be the subject of further research that evaluates other compatibility parameters not analyzed in this study, enabling a better

comparison between original historic mortars and the mortars containing the addition of construction and demolition waste.

Keywords: construction and demolition waste; lime; metakaolin; compatibility; historic buildings.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	–	DRx da pasta com 50% de metacaulim em massa.....	35
Figura 2	–	Comparativo das porosidades obtidas nos estudos em pasta de Zhang <i>et al.</i> , (2020).....	38
Figura 3	–	Fases mineralógicas presentes nos resíduos aos 28 dias.....	45
Figura 4	–	Distribuição discreta e acumulada da cal.....	53
Figura 5	–	Número de ondas x absorbância (cal hidratada).....	54
Figura 6	–	ATD-TG (cal hidratada).....	54
Figura 7	–	DRx (cal hidratada).....	55
Figura 8	–	Distribuição discreta e acumulada do metacaulim.....	56
Figura 9	–	Número de ondas x absorbância (metacaulim).....	57
Figura 10	–	ATD-TG (metacaulim).....	57
Figura 11	–	DRx (metacaulim).....	58
Figura 12	–	Distribuição granulométrica acumulada do resíduo após moagem.	59
Figura 13	–	Distribuição discreta e acumulada do RCD.....	60
Figura 14	–	Número de ondas x absorbância (RCD).....	61
Figura 15	–	ATD-TG (RCD).....	62
Figura 16	–	DRx (RCD).....	62
Figura 17	–	Misturador Y.....	64
Figura 18	–	Minicone, paquímetro e placa de vidro.....	65
Figura 19	–	Misturador mecânico.....	66
Figura 20	–	Plasticidade das misturas em função da relação água/ligante.....	68
Figura 21	–	Tipos de comportamentos reológicos dos fluídos.....	69
Figura 22	–	Reômetro Discovery HR-1 hybrid serial.....	70
Figura 23	–	Pote acrílico utilizado para moldagem de pastas.....	71
Figura 24	–	Liofilizador L101 da Liotop.....	72
Figura 25	–	Argamassas moldadas em recipientes descartáveis.....	73
Figura 26	–	Curva de distribuição granulométrica da areia Caxitu.....	74
Figura 27	–	Distribuição discreta e acumulada das misturas.....	76
Figura 28	–	Número de ondas x absorbância (misturas).....	77
Figura 29	–	ATD-TG (misturas).....	78
Figura 30	–	DRx (misturas).....	80

Figura 31 –	Viscosidade x tempo.....	81
Figura 32 –	Tensão de cisalhamento x taxa de cisalhamento.....	82
Figura 33 –	DRx das pastas com 14 dias de hidratação.....	83
Figura 34 –	DRx das pastas com 28 dias de hidratação.....	84
Figura 35 –	DRx das pastas com 56 dias de hidratação.....	85
Figura 36 –	DRx das pastas com 90 dias de hidratação.....	86
Figura 37 –	ATD/TG das pastas com 14 dias de hidratação.....	88
Figura 38 –	ATD/TG das pastas com 28 dias de hidratação.....	89
Figura 39 –	ATD/TG das pastas com 56 dias de hidratação.....	90
Figura 40 –	ATD/TG das pastas com 90 dias de hidratação.....	91
Figura 41 –	IV das pastas com 14 dias de hidratação.....	93
Figura 42 –	IV das pastas com 56 dias de hidratação.....	94
Figura 43 –	IV das pastas com 90 dias de hidratação.....	95
Figura 44 –	IAP com a cal aos 7 dias (5751/2015).....	95
Figura 45 –	Variação de massa nas idades.....	96
Figura 46 –	Resistência à compressão das argamassas aos 14 dias.....	98
Figura 47 –	Resistência à compressão das argamassas aos 28 dias.....	99
Figura 48 –	Resistência à compressão das argamassas aos 56 dias.....	99
Figura 49 –	Resistência à compressão das argamassas aos 90 dias.....	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Classificação dos calcários.....	23
Tabela 2	– Exigências químicas diferenciadoras das cales hidratadas.....	24
Tabela 3	– Exigências físicas diferenciadoras das cales hidratadas.....	25
Tabela 4	– Requisitos químicos das cales cálcicas conforme seus valores característicos.....	25
Tabela 5	– Composição química dos principais componentes da cal hidratada Ecobat® ^a	26
Tabela 6	– Quantidade mínima de água adicionada à 100 gramas de cal para obtenção da calda (comparativo entre cal cálcica e cal dolomítica).....	27
Tabela 7	– Composição química da argila caulinítica e do caulim.....	29
Tabela 8	– Composição química do metacaulim.....	32
Tabela 9	– Formulação das proporções em massa de metacaulim e cal.....	33
Tabela 10	– Análise química do metacaulim.....	34
Tabela 11	– Análise química e propriedades físicas dos materiais utilizados na preparação das pastas.....	34
Tabela 12	– Análise química mensurada através de FRx.....	37
Tabela 13	– Composição química dos finos.....	38
Tabela 14	– Proporções das misturas e fluidez das pastas no estado fresco.....	39
Tabela 15	– Composição química da HL2, metacaulim, UGWM e CGWM.....	40
Tabela 16	– Características físicas da HL2, metacaulim, UGWM e CGWM.....	40
Tabela 17	– Propriedades físicas dos materiais utilizados na pesquisa.....	41
Tabela 18	– Determinação da composição química através de FRx.....	43
Tabela 19	– D10, D50 e D90 (em μm) para as amostras.....	44
Tabela 20	– Composição química do cimento e dos diferentes resíduos.....	44
Tabela 21	– Área superficial (finura) e massa específica da cal hidratada.....	52
Tabela 22	– Composição química da cal hidratada com perda ao fogo (valores em %).....	53
Tabela 23	– Área superficial (finura) e massa específica do metacaulim.....	55
Tabela 24	– Composição química do metacaulim com perda ao fogo (valores em %).....	56

Tabela 25 – Área superficial (finura) e massa específica do RCD.....	60
Tabela 26 – Composição química do RCD com perda ao fogo (valores em %)...	61
Tabela 27 – Misturas realizadas (substituição em massa).....	64
Tabela 28 – Espalhamentos obtidos.....	67
Tabela 29 – Misturas escolhidas.....	69
Tabela 30 – Massa específica das misturas.....	75
Tabela 31 – D10, D50 e D90 de cada mistura.....	75
Tabela 32 – Composição química das misturas com perda ao fogo (valores em %) %).....	76
Tabela 33 – Perda de massa (%) por faixa de temperatura no estado anidro.....	78
Tabela 34 – Perda de massa (%) por faixa de temperatura aos 14 dias.....	88
Tabela 35 – Perda de massa (%) por faixa de temperatura aos 28 dias.....	89
Tabela 36 – Perda de massa (%) por faixa de temperatura aos 56 dias.....	91
Tabela 37 – Perda de massa (%) por faixa de temperatura aos 90 dias.....	92
Tabela 38 – Variação de massa (%) em idades específicas.....	97
Tabela 39 – Variação da resistência à compressão (Rc) no período de 56 até 90 dias de cura ao ar.....	101
Tabela 40 – Requisitos mínimos para argamassas de revestimento de edifícios antigos (aos 90 dias).....	102
Tabela 41 – Especificação dos códigos das fases cristalinas identificadas através da DRx.....	113
Tabela 42 – Composição das misturas.....	114
Tabela 43 – Resultados do ensaio de IAP.....	114
Tabela 44 – Composição das argamassas.....	115
Tabela 45 – Resultado do ensaio de resistência à compressão (valores em MPa).	115

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
A/L	Água/ligante
ATD	Análise termodiferencial
CaCO ₃	Carbonato de cálcio
CBCA	Cinza do bagaço da cana-de-açúcar
Ca(OH) ₂	Cal hidratada
C ₂ ASH ₈	Stratlingita
C ₃ AH ₆	Hidrogranada
C ₄ AH ₁₃	Aluminato tetracálcico hidratado
C ₄ ACH ₁₁	Monocarboaluminato
CPs	Corpos de prova
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
DRx	Difração de raios-x
D10	Diâmetro que representa a quantidade acumulada de 10% das partículas
D50	Diâmetro médio das partículas
D90	Diâmetro que representa a quantidade acumulada de 90% das partículas
E	Módulo de elasticidade
FRx	Espectrometria de fluorescência de raios-x
IAP	Índice de atividade pozolânica
IV	Espectroscopia infravermelha
MC	Metacaulim
MCS	Materiais cimentícios suplementares
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
MPa	Mega Pascal
NBR	Norma Brasileira
P.A	Para análise
Rc	Resistência à compressão
RCD	Resíduo(s) de construção e demolição
RPM	Rotação por minuto
TG	Termogravimetria
UR	Umidade Relativa
#200	Peneira 200 (75µm)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	18
1.1	OBJETIVOS.....	20
1.1.1	Objetivo geral.....	20
1.1.2	Objetivos específicos.....	20
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	21
2.1	CAL.....	21
2.1.1	Tipos de Cales hidratadas.....	24
2.1.2	Estudos em pastas de cal hidratada.....	26
2.2	METACAULIM.....	27
2.3	RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO.....	30
2.4	ESTUDOS EM PASTAS COM DIFERENTES COMBINAÇÕES.....	31
2.4.1	Cal com metacaulim.....	32
2.4.2	Cal com metacaulim e um terceiro componente.....	39
2.4.3	Cimento com Resíduo de Construção e Demolição.....	42
2.5	SÍNTESE DA REVISÃO DE LITERATURA.....	45
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	49
3.1	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO E MATERIAIS.....	49
3.1.1	Ensaio de caracterização no estado anidro.....	49
3.1.1.1	Massa específica e área superficial específica (finura Blaine).....	49
3.1.1.2	Granulometria a laser.....	50
3.1.1.3	Fluorescência de raios-x.....	50
3.1.1.4	Difração de raios-x.....	50
3.1.1.5	Espectroscopia infravermelha.....	51
3.1.1.6	Análise termodiferencial e termogravimetria.....	51
3.1.2	Materiais.....	52
3.1.2.1	Cal hidratada.....	52
3.1.2.2	Metacaulim.....	55
3.1.2.3	Resíduo de construção e demolição.....	58
3.2	ESTUDO PILOTO.....	63
3.2.1	Testes com o <i>mini-slump</i> (misturas e método).....	63
3.2.2	Testes com o <i>mini-slump</i> (resultados).....	66

3.3	CARACTERIZAÇÃO DAS PASTAS	69
3.3.1	Estado Fresco.....	69
3.3.2	Estado endurecido.....	70
3.4	ÍNDICE DE ATIVIDADE POZOLÂNICA COM CAL.....	72
3.5	VARIAÇÃO DE MASSA (ARGAMASSAS).....	73
3.6	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (ARGAMASSAS).....	73
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	75
4.1	CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS (ESTADO ANIDRO).....	75
4.2	CARACTERIZAÇÃO DAS PASTAS (ESTADO FRESCO).....	80
4.3	CARACTERIZAÇÃO DAS PASTAS (ESTADO ENDURECIDO).....	83
4.3.1	Microestrutura.....	83
4.3.1.1	Difração de raios-x.....	83
4.3.1.2	Análise termodiferencial e termogravimetria.....	87
4.3.1.3	Espectroscopia infravermelha.....	92
4.3.2	Índice de atividade pozolânica (IAP) com a cal.....	95
4.3.3	Variação de massa (argamassas).....	96
4.3.4	Resistência à compressão (argamassas).....	97
5	CONCLUSÕES.....	103
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	105
	REFERÊNCIAS.....	106
	APÊNDICE A – CÓDIGOS DOS MINERAIS IDENTIFICADOS NO	
	DIFFRAC. EVA.....	113
	APÊNDICE B – DETALHAMENTO DO ENSAIO DE IAP COM A	
	CAL AOS 7 DIAS.....	114
	APÊNDICE C – DETALHAMENTO DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA	
	À COMPRESSÃO.....	115

1 INTRODUÇÃO

A mistura de um material que apresente propriedades ligantes e que possua granulometria abaixo da peneira #200 com água resulta em um produto com consistência pastosa, o qual é denominado de pasta. Dentre os ligantes que compõem as pastas se destacam os aéreos e os hidráulicos na construção civil. A diferença entre ambos se encontra, entre outros fatores, nos produtos gerados durante o processo de hidratação do ligante. Enquanto os ligantes hidráulicos, ao entrar em contato com a água, geram produtos de hidratação resistentes à ação dela, os produtos gerados pelos ligantes aéreos, durante o seu endurecimento, não possuem uma resistência minimamente aceitável à ação da água, o que inviabiliza a sua aplicação em diversas construções (BAUER, 2008).

Na produção de alguns ligantes, geralmente são realizadas adições minerais que podem ser pozolânicas ou não, sendo esta última denominada de adição inerte. Comumente, a pasta possui a nomenclatura do ligante que a constitui, tendo em vista que a depender de aspectos físico-químicos deste, ela apresentará características peculiares ao longo de seu período de hidratação e endurecimento. Consequentemente, compreender o comportamento de pastas confeccionadas com ligantes específicos auxilia na compreensão das propriedades de argamassas nos estados fresco e endurecido (ARANDIGOYEN *et al.*, 2005).

De acordo com Seabra, Labrincha e Ferreira (2007), com o advento do cimento Portland, em meados do século XIX, gradativamente ele foi ocupando o espaço de principal ligante utilizado em obras estruturais, o que perdura até o presente momento, substituindo a predominância do ligante que será um dos componentes da mistura alvo da presente pesquisa, a cal. Esta, por sua vez, consiste em um ligante aéreo resultante do processo de calcinação de rochas calcárias, as quais possuem diversas variedades, onde suas características estão vinculadas à natureza da matéria-prima selecionada para a sua produção e dos processos aos quais ela é submetida (BAUER, 2008).

Nas últimas décadas, com o avanço das pesquisas científicas visando a melhoria constante do desempenho dos materiais de construção em diversos aspectos, a produção de ligantes para pastas, argamassas e concretos passou a ser realizada através da combinação de dois, três ou mais componentes, os quais alteram a microestrutura da zona de transição (pasta-agregado) e impactam diretamente nas propriedades do material tanto em seu estado fresco quanto no endurecido (NUNES, 2010; MEHTA & MONTEIRO, 2014).

Muitas dessas adições minerais, também denominadas materiais cimentícios suplementares (MCS), têm por objetivo a melhoria de desempenho do material para o

atendimento às demandas contemporâneas requeridas pela indústria da construção civil. Além desse objetivo, os iminentes impactos ambientais previstos para as próximas décadas, requerem da indústria da construção civil, responsável por aproximadamente 8% das emissões de CO₂ e pela geração de 25 – 30% dos resíduos existentes ao redor do mundo, uma significativa reformulação em suas opções de materiais cimentícios, de maneira a viabilizar o uso sustentável destes nos empreendimentos a serem construídos, assim como na restauração de obras históricas (GARTNER & HIRAO, 2015; ROBAYO-SALAZAR; VALENCIA-SAAVEDRA; GUTIÉRREZ, 2020).

Nas obras realizadas antes do advento do cimento Portland, o principal ligante utilizado foi a cal em combinação com pozolanas. No Brasil, a cal foi o ligante mais utilizado nas construções realizadas durante o período colonial, especialmente na fabricação de argamassas de assentamento e revestimento. Para o restauro desse patrimônio, é imprescindível a utilização de materiais compatíveis com os utilizados à época da construção, o que exige a experimentação de distintas combinações em diferentes proporções de materiais que podem ter sido utilizados (VELOSA, 2006; CINCOTTO; QUARCIONI; JOHN, 2007; MAGALHÃES, 2018; SOUZA, 2019; BERSCH *et al.*, 2021).

Levando em consideração os estudos de Arcolao (1998) e Santiago (2012) que apresentam o fato de que muitas construções históricas foram realizadas com misturas da cal hidratada com outros materiais de diversas origens, é viável a hipótese de que a inserção de resíduos de construção e demolição por substituição até um determinado limite não impacte a compatibilidade de pastas e argamassas utilizadas na conservação e restauração de edificações históricas. Além disso, o estudo de misturas ternárias compostas por esses materiais pode contribuir com o surgimento de um novo material sustentável com aplicações diversas, não se restringindo ao âmbito da conservação e restauração do patrimônio histórico.

Consequentemente, com o intuito de contribuir com as demandas ambientais supracitadas, esta dissertação analisa as propriedades nos estados anidro, fresco e endurecido de pastas confeccionadas através da mistura ternária de cal hidratada com metacaulim e resíduos de construção e demolição como uma alternativa de material sustentável para uso e aplicação, o que pode abranger obras históricas.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Esta dissertação possui como objetivo geral a avaliação exploratória de propriedades de misturas ternárias compostas de cal com metacaulim e resíduos de construção e demolição de maneira a viabilizar o seu emprego na produção de pastas para compor argamassas para a restauração de obras históricas e outras aplicações, contribuindo com a redução das emissões de CO₂ no planeta e com o descarte inadequado de RCD no meio ambiente.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são os seguintes:

- Discutir quais as proporções em massa de pastas de cal com metacaulim e resíduo de construção e demolição são as mais promissoras para a realização das misturas na presente pesquisa;
- Caracterizar os materiais a serem utilizados, assim como as misturas nos estados anidro, fresco e endurecido através da realização de ensaios (em diferentes idades) para compreender as possíveis alterações geradas pelas diferentes proporções dos materiais empregados; e
- Avaliar a influência das diferentes adições de RCD visando constatar se essa inserção na mistura, até uma determinada proporção, pode propiciar um desempenho compatível com os obtidos pelas pastas de cal com o metacaulim, de modo a viabilizar o seu emprego na conservação e restauração de obras históricas sem causar dano nessas estruturas.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Neste trabalho, os materiais componentes da pasta serão a cal, o metacaulim e o resíduo de construção e demolição. Sabe-se que a mistura entre a cal e o metacaulim é tradicional e corrente na produção de argamassas. Por sua vez, o resíduo de construção e demolição também será utilizado tendo em vista o forte apelo existente na atualidade pela reutilização desses materiais que são descartados inadequadamente, gerando grandes amontoados de detritos sem nenhuma utilidade (SOUZA *et al.*, 2022).

Dessa maneira, para que uma futura produção em larga escala desse novo produto seja viável, faz-se necessária a compreensão das propriedades das pastas constituídas desses materiais para se conhecer a função de cada um deles no sistema (ARANDIGOYEN *et al.*, 2005).

Consequentemente, neste capítulo é realizada uma revisão bibliográfica de tópicos que contribuíram com o desenvolvimento deste trabalho. Inicialmente são apresentados cada um dos componentes da mistura ternária alvo da presente pesquisa, assim como suas características mineralógicas, propriedades físicas, químicas e mecânicas, além de algumas de suas aplicações na construção civil. Em seguida, serão apresentados estudos em pastas contendo diferentes combinações de ligantes em misturas binárias e ternárias onde foram empregadas a cal, o metacaulim e o RCD, isoladamente ou combinados. A avaliação desses estudos em pastas busca explorar dados obtidos através de pesquisas previamente realizadas, onde esses 3 materiais foram utilizados como ligantes de maneira a se obter uma estimativa de qual proporção de cada um deles é viável de ser aplicada no programa experimental desta dissertação. Essa estimativa se fez necessária, tendo em vista que até a data de realização desta pesquisa, não foi encontrado nenhum trabalho experimental cuja mistura entre a cal com metacaulim e o resíduo de construção e demolição houvesse sido realizada.

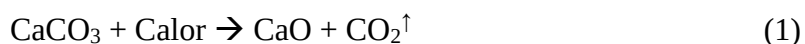
Além de uma estimativa das proporções, a análise de estudos em pastas teve o objetivo de estimar o teor de água mais adequado para a determinação da razão água/ligante das pastas que foram confeccionadas nesta pesquisa, entre outras propriedades físico-químicas das partículas de cada um dos materiais, de forma a otimizar o desempenho do novo produto.

2.1 CAL

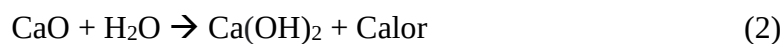
A cal é um material cujo emprego na construção civil data desde 7.000 a.C., durante a construção da cidade de Jericó. Consequentemente, ela é um dos materiais de construção mais

antigos utilizados pelo homem e a sua mistura com adições minerais pozolânicas viabilizou a construção do Império Romano (VELOSA, 2006; CINCOTTO; QUARCIONI; JOHN, 2007).

Segundo Bauer (2008), ela consiste em um ligante oriundo da rocha calcária que é constituída basicamente pelo Carbonato de Cálcio (CaCO_3). Após sua seleção, extração e moagem, o calcário é submetido ao processo de calcinação que consiste em sua exposição a elevadas temperaturas, a qual pode atingir o patamar de 900°C dentro de um forno industrial onde se obtém o óxido de cálcio (CaO), graças ao desprendimento do dióxido de carbono.

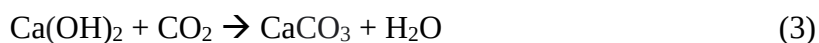


De acordo com Ribeiro, Pinto e Starling (2002), para que a cal viva seja útil para fins construtivos, o que inclui a sua utilização em revestimentos diversos, ela deve ser inicialmente submetida à hidratação, onde o produto obtido é a cal hidratada, Ca(OH)_2 , cuja reação química de formação (2) pode ser visualizada a seguir.



O endurecimento da cal hidratada, Ca(OH)_2 , ocorre através da recombinação desse hidróxido com o dióxido de carbono disponível na atmosfera, onde se obtém novamente o carbonato original cujos cristais possuem fortes ligações químicas (BAUER, 2008).

Tendo em vista que esse endurecimento depende do ar atmosférico, o nome desse ligante é a cal aérea, a qual necessita de uma porosidade que viabilize a evaporação de água existente em seu interior, quando em excesso, assim como a penetração do CO_2 para que ocorra a carbonatação interna da cal (3).



As propriedades que se destacam nas pastas de cal quando comparadas com as produzidas com outros ligantes são a trabalhabilidade e a plasticidade, as quais são influenciadas pela forma e pelo tamanho das partículas de hidróxido de cálcio (RAGO & CINCOTTO, 1999).

Além da cal aérea, também existe a cal hidráulica natural. A sua principal diferença quando comparada com a cal hidratada encontra-se em sua composição química que viabiliza

o seu endurecimento quando em contato com a água, formando produtos de hidratação também resistentes à ação dessa substância (COELHO; TORGAL; JALALI, 2009).

Essa diferenciação ocorre, pois, a cal hidráulica é constituída de silicatos e aluminatos de cálcio, além do hidróxido de cálcio. Conforme pode ser visualizado na tabela 1, isso se deve à constituição da rocha da qual a cal hidráulica natural é extraída, a qual contém argila e calcário, diferentemente das rochas das quais se obtêm a cal aérea que é constituída predominantemente de calcário (CaCO_3) (SEQUEIRA; FRADE; GONÇALVES, 2007).

Tabela 1 – Classificação dos calcários.

Tipo de Calcário	% CaCO_3
Calcário Rico	96 a 100
Calcário Margoso	90 a 96
Marga Calcária	75 a 90
Marga	40 a 75
Marga Argilosa	10 a 40
Argila Margosa	4 a 10
Argila	0 a 4

Fonte: EN 459-1 (2000, Apud Sequeira; Frade; Gonçalves, 2007).

Dessa maneira, ainda conforme Sequeira, Frade e Gonçalves (2007), a cal hidráulica natural é produzida a partir de rochas calcárias com uma % de CaCO_3 que contenha um teor adequado de argila. Consequentemente, com o seu aquecimento em temperaturas entre 900°C e 1200°C, surge um ligante com uma porosidade que viabiliza tanto a hidratação inicial dos silicatos bicálcicos (4) e aluminatos tricálcicos (5) quanto uma carbonatação lenta do hidróxido de cálcio (3) em idades posteriores.



Conforme Cincotto, Quarcioni e John (2007), por apresentar silicatos (4) e aluminatos de cálcio (5) em sua composição, além do hidróxido de cálcio, a cal hidráulica endurece de maneira semelhante ao cimento. Esses autores também citam em seu trabalho que podem ser consideradas como cales hidráulicas as misturas de cal com adições minerais pozolânicas ou com a escória de alto-forno. Regra geral, segundo Bersch *et al.*, (2021), pastas e argamassas produzidas com cal hidráulica possuem resistência mecânica superior àquelas produzidas com cal hidratada. De acordo com Santos e Veiga (2012), a cal hidráulica natural pode ser uma boa

solução na reabilitação de edifícios antigos que estejam localizados em zonas muito úmidas ou em contato direto com a água.

Tendo em vista que a restauração e conservação do patrimônio histórico que esteja em constante exposição à água e à umidade não é o objetivo primário desta pesquisa, nem tampouco a obtenção de elevadas resistências mecânicas nos ensaios a serem realizados, pois isso não é garantia de compatibilidade, definiu-se que a cal hidratada seria um dos ligantes a serem empregados na presente pesquisa.

2.1.1 Tipos de cales hidratadas

A norma brasileira que classifica os diferentes tipos de cales hidratadas é a NBR 7175 (ABNT, 2003), a qual as denomina de CH-I, CH-II ou CH-III conforme exigências químicas (Tabela 2) e físicas (Tabela 3) nela preconizadas. Dentre as exigências químicas, o teor de CO_2 e o teor de óxidos contidos na cal hidratada são os principais parâmetros utilizados para a realização da diferenciação. Por sua vez, as exigências físicas envolvem os seguintes parâmetros: finura; retenção de água; incorporação de areia; estabilidade e plasticidade.

Tabela 2 - Exigências químicas diferenciadoras das cales hidratadas.

Compostos		Limites		
		CH-I	CH-II	CH-III
Anidrido carbônico (CO_2)	Na fábrica	$\leq 5\%$	$\leq 5\%$	$\leq 13\%$
	No depósito	$\leq 7\%$	$\leq 7\%$	$\leq 15\%$
Óxidos de cálcio e magnésio não hidratado calculado ($\text{CaO} + \text{MgO}$)		$\leq 10\%$	$\leq 15\%$	$\leq 15\%$
Óxidos totais na base de não-voláteis ($\text{CaO} + \text{MgO}$)		$\geq 90\%$	$\geq 88\%$	$\geq 88\%$

Fonte: NBR 7175 (2003).

Tabela 3 - Exigências físicas diferenciadoras das cales hidratadas.

Compostos		Limites		
		CH-I	CH-II	CH-III
Finura (% retida acumulada)	Peneira (0,600mm)	$\leq 0,5\%$	$\leq 0,5\%$	$\leq 0,5\%$
	Peneira (0,075mm)	$\leq 10\%$	$\leq 15\%$	$\leq 15\%$
Retenção de água		$\geq 75\%$	$\geq 75\%$	$\geq 70\%$
Incorporação de areia		≥ 3	$\geq 2,5$	$\geq 2,2$
Estabilidade		Ausência de cavidades ou protuberâncias		
Plasticidade		≥ 110	≥ 110	≥ 110

Fonte: NBR 7175 (2003).

Geralmente, cada um desses três tipos de cales hidratadas também podem ser diferenciados em cales cálcicas ou dolomíticas, cuja diferença básica está no teor de magnésio existente na composição química da cal, o que influencia diversas propriedades nas pastas de cal (RAGO & CINCOTTO, 1999).

A versão britânica da norma europeia que trata sobre a cal (BS EN 459-1:2010) também divide as cales hidratadas em cálcicas e dolomíticas, sendo a cálcica uma cal aérea que consista preponderantemente de óxido de cálcio ou hidróxido de cálcio, enquanto a dolomítica possui a preponderância de óxido de cálcio magnésiano ou hidróxido de cálcio magnésiano. Outra semelhança com a norma brasileira está na segmentação das cales cálcicas em três tipos, os quais são denominados de CL 90, CL 80 e CL 70. As exigências químicas para cada um desses tipos de cales cálcicas podem ser visualizadas na tabela a seguir:

Tabela 4 - Requisitos químicos das cales cálcicas conforme seus valores característicos.

Tipos de cales cálcicas	Valores fornecidos como fração de massa em porcentagem				
	CaO + MgO	MgO	CO ₂	SO ₃	Cal disponível
CL 90	≥ 90	≤ 5	≤ 4	≤ 2	≥ 80
CL 80	≥ 80	≤ 5	≤ 7	≤ 2	≥ 65
CL 70	≥ 70	≤ 5	≤ 12	≤ 2	≥ 55

Fonte: adaptado da BS EN 459-1 (2010).

2.1.2 Estudos em pastas de cal hidratada

A seguir, são apresentadas algumas pesquisas onde foram confeccionadas pastas de cal hidratada e os resultados encontrados.

A influência de diferentes teores de água em pastas de cal foi analisada por Arandigoyen *et al.*, (2005), que estudaram para compreender dois aspectos críticos desse material que impactam diretamente a sua vida útil: estrutura porosa e porosidade capilar. A tabela 5 contém a composição química da cal hidratada utilizada nos experimentos, a qual foi classificada como cal hidratada comercial CL90, conforme a EN 459-1.

Tabela 5 - Composição química dos principais componentes da cal hidratada comercial Ecobat®^a

CAL								
	Perda de Massa (%) ^b	SiO ₂ (%)	CaO (%)	MgO (%)	R ₂ O ₃ (%) ^c	SO ₃ (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)
Ecobat®	25,25	1,03	68,53	3,29	0,89	1,37	0,09	0,05
D.P	1,20	0,10	1,10	0,42	0,11	0,22	0,02	0,03

Fonte: adaptado de Arandigoyen *et al.*, 2005.

Nota – a: método especificado pela Norma Europeia EN-196 para análise da composição química; b: perda de massa devido à calcinação entre 975 – 1000°C; c: porcentagem de Fe e Al juntos

As razões água/ligante utilizadas no experimento foram 0,8; 0,9; 1,0; 1,1; 1,2 e 1,3, onde nos resultados foi constatada uma melhor trabalhabilidade com as proporções 0,9 e 1,0.

Por sua vez, Rago e Cincotto (1999) ao estudarem a reologia de pastas de cal hidratada, enfatizaram que as características físico-químicas, a quantidade dos materiais constituintes e o teor de água são fatores que impactam na qualidade desse produto. Nas proporções adequadas, a pasta pode propiciar uma melhor trabalhabilidade em argamassas, que é uma característica de extrema importância no estado fresco, contribuindo com outras propriedades responsáveis por um desempenho adequado, caso da retenção de água e da resistência mecânica. Consequentemente, a qualidade da cal hidratada é de extrema importância para a confecção de uma boa pasta.

Através do estudo em questão, as autoras conseguiram identificar a contribuição de cada tipo de cal hidratada na reologia de pastas de cal, onde, por exemplo, foi constatado que a cal dolomítica necessita de uma menor relação água/ligante para obter um escoamento e espalhamento semelhante à cal cálcica, conforme pode ser visualizado na tabela 6. Isso se deve graças ao tamanho das partículas das cales dolomíticas que são maiores que as contidas nas

cales cálcicas, as quais, por possuir maior finura e maior área superficial específica, necessitam de um maior teor de água para hidratar todas as suas partículas.

Tabela 6 - Quantidade mínima de água adicionada a 100 gramas de cal para obtenção da calda.
(comparativo entre cal cálcica e cal dolomítica).

Tipo de cal hidratada	Qtd de água (ml)	Tipo de cal hidratada	Qtd de água (ml)
Cal dolomítica CH I	80	Cal cálcica CH I	130
Cal dolomítica CH III	70	Cal cálcica CH III	100

Fonte: adaptado de RAGO & CINCOTTO (1999).

Tendo em vista que, por ser um ligante aéreo, a resistência mecânica de produtos que utilizam a cal hidratada como ligante são consideravelmente inferiores às aquelas obtidas com o uso do cimento Portland, é de grande valia se conhecer, previamente a aplicação, as características específicas de cada material tanto no estado fresco quanto no estado endurecido (CINCOTTO; QUARCIONI; JOHN, 2007).

Consequentemente, a busca pela compreensão das características (propriedades) das pastas de cal com metacaulim e resíduos de construção e demolição são necessárias para que seja viável uma aplicação apropriada para esse material de construção.

Nos últimos dois séculos, após alguns milênios de emprego, a utilização da cal como material de construção foi sendo substituída pelo uso do cimento Portland. Contudo, nos últimos anos, conforme Santos e Veiga (2012), tornou-se crescente a necessidade de se restaurar e conservar monumentos e construções históricas, o que resulta em pesquisas que buscam uma melhor compreensão das propriedades da cal e de misturas de cal com pozolanas de maneira a empregá-las em construções antigas que sejam compatíveis (VELOSA, 2006; MAGALHÃES, 2018; BERSCH *et al.*, 2021).

Nesse mesmo intuito, o presente trabalho objetiva a utilização de pastas de cal hidratada misturada com outros dois materiais, os quais serão apresentados a seguir.

2.2 METACAULIM

Os materiais pozolânicos são classificados quanto à origem em naturais e artificiais. As pozolanas naturais são obtidas diretamente da natureza, caso da cinza vulcânica e a opala, enquanto as artificiais são produzidas industrialmente, através de processos químicos que

viabilizam que as suas propriedades pozolânicas se tornem semelhantes às apresentadas pelas pozolanas naturais (LEA, 1938 apud SOUZA, 2013).

A norma brasileira que estabelece os requisitos para os materiais pozolânicos é a NBR 12653 (ABNT, 2014), a qual os classifica em três categorias: classe N – pozolanas naturais que obedecem aos critérios previstos na norma em questão, o que inclui as argilas calcinadas; classe C que são as cinzas volantes produzidas pela queima do carvão mineral em usinas termoelétricas; classe E que inclui todas as pozolanas não contempladas nas classes anteriormente citadas e que atendam aos requisitos da norma.

Conforme Lea (1971, apud Nita & John, 2007), os materiais pozolânicos são constituídos de silicatos ou sílico-aluminatos amorfos, com pouca ou nenhuma atividade ligante, os quais ao entrar em contato com a água em temperatura ambiente reagem quimicamente com o Ca(OH)_2 , formando produtos cimentantes, sendo o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) o principal deles. Além do C-S-H, também pode haver a formação de aluminatos de cálcio hidratado. De acordo com John, Cincotto e Silva (2003), em meio alcalino, o C-S-H se precipita graças à dissolução da pozolana que se combina com os íons Ca^{2+} presentes na solução.

Dentre as pozolanas, o metacaulim é oriundo do processo de calcinação da argila caulínica, cuja constituição é majoritariamente de sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3). Graças a esse elevado teor de sílica e alumina em sua composição, o metacaulim é considerado um material pozolânico de alta reatividade para uso na construção civil, possuindo uma elevada atividade pozolânica (ROCHA, 2005; AZÊREDO, 2012).

Conforme Rocha (2005), para a fabricação do metacaulim com alta reatividade faz-se necessário um caulim de alta qualidade e com baixo teor de impurezas. Em geral, o caulim é obtido através do beneficiamento de argilas caulínicas, cujos teores de caulim em geral situam-se acima de 50%, e abaixo do qual normalmente torna-se inviável para este tipo de aplicação devido ao alto custo de beneficiamento. A tabela 7 mostra a composição química típica da argila caulínica e o do caulim teórico para que se obtenha um metacaulim de alta reatividade. Além disso, o caulim é geralmente formado pela decomposição do feldspato por meio de processos geológicos, conforme representado pela seguinte equação:

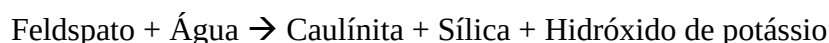
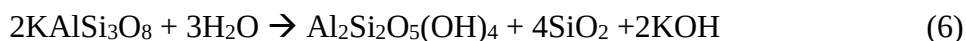


Tabela 7 - Composição química da argila caulínica e do caulim.

Composto	Argila Caulínica típica	Caulim Teórico
SiO ₂	> 40% e < 60%	46,54%
Al ₂ O ₃	> 25% e < 45%	39,50%
Fe ₂ O ₃	< 8%	-
Na ₂ O	< 0,1%	-
K ₂ O	< 3%	-
TiO ₂	< 1%	-
CaO	< 1%	-
H ₂ O (PF)	> 8% e < 18%	13,96%
Outros	< 1%	-
Relação Al ₂ O ₃ / SiO ₂	-	0,85

Fonte: Adaptado de Rocha (2005).

Ainda conforme Rocha (2005), são necessárias 5 etapas para a produção do metacaulim, as quais devem ser minuciosamente controladas de forma a garantir a obtenção de um produto de alta qualidade, são elas: prospecção de argila caulínica; beneficiamento e eliminação de impurezas; secagem; calcinação; moagem e micronização (com seleção granulométrica).

As características químicas e mineralógicas do metacaulim impactam diretamente na sua capacidade de reação pozolânica. Dessa maneira, faz-se necessário um controle minucioso de qualidade em cada uma das etapas de produção do metacaulim. De modo geral, as adições e a velocidade da reação pozolânica do metacaulim com o hidróxido de cálcio depende das características supracitadas e, além delas, outra característica que impacta diretamente na reatividade do metacaulim é a sua finura, influenciando de forma física na reação pozolânica. Ou seja, partículas mais finas tendem a contribuir com o aumento da reatividade do metacaulim (ROCHA, 2005; AZÊREDO, 2012).

Durante a etapa de calcinação, que consiste em uma das etapas de produção do metacaulim, faz-se necessário o aquecimento da caulinita, principal mineral existente no caulim, a uma temperatura compreendida entre 500°C e 900°C. Com isso, a caulinita começa a se transformar em metacaulim através do processo de desidroxilação e desidratação que ocorrem quando a temperatura de calcinação atinge um patamar compreendido entre 400°C e 525°C, o que faz com que o estado cristalino da caulinita seja amorfizado, resultando no surgimento do metacaulim quando a calcinação atinge aproximadamente 800°C (DEER *et al.*, 1964; DEER *et al.*, 1975; SANTOS, 1992; MURRAY, 2007, apud AZERÊDO, 2012).

A norma brasileira que trata acerca do metacaulim é a NBR 15894 (ABNT, 2010). Nela,

são estabelecidos requisitos, o que inclui a parte físico-química, determinação de índice de desempenho, determinação da finura por meio da peneira 45 μm , entre outros. Ambas as normas citadas neste tópico, materiais pozolânicos e metacaulim, fazem referência a utilização dessa adição junto com o cimento, tendo em vista que nas reações químicas do clínquer é formado o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ que reage com a pozolana disponível na mistura de modo semelhante à reação química realizada diretamente entre a cal hidratada e o metacaulim (MEHTA & MONTEIRO, 2014).

Graças a isso, muitos pesquisadores estudam a ativação alcalina como forma de substituir parcialmente o cimento por pozolanas e assim reduzir os impactos ambientais causados pela elevada geração de CO_2 resultante do processo produtivo do cimento. Esta dissertação, contudo, se restringe a avaliação direta dos resultados obtidos entre a mistura de cal hidratada com o metacaulim e o RCD. Portanto, mesmo sabendo que se trata de uma ativação alcalina, esta pesquisa não tem por objetivo a aplicação de misturas entre metacaulim e RCD como substituição parcial ao cimento, o que não é descartável de ser pesquisado a posteriori.

Dessa forma, mesmo com as normas sendo voltadas ao emprego de pozolanas com o cimento, elas serão aplicadas nesta pesquisa, embora não seja o objetivo deste estudo obter materiais com elevadas resistências mecânicas, mas sim compatíveis com aqueles pré-existent nas construções históricas.

2.3 RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

Conforme Tavares *et al.*, (2020), a geração de resíduos sólidos é oriunda do processo natural de crescimento populacional que, quando não acompanhado de um planejamento urbano apropriado, contribui para a intensificação dos problemas já existentes nos centros urbanos das capitais. Os estudos de viabilidade de reutilização desses resíduos, especialmente os provenientes da indústria da construção civil, são alvo de pesquisas em todo o planeta, tendo em vista os impactos ambientais gerados ao longo dos anos graças a sua desenfreada geração e descarte em locais inadequados (BRASILEIRO; MATOS, 2015).

A geração de resíduos de construção e demolição ocorre antes mesmo do início de qualquer obra, pelo fato de que a própria extração da matéria-prima para a produção de insumos também contribui para o aumento desse montante. No final do século XX, Pinto (1999) chegou a conclusão de que mais de 50% em massa dos resíduos sólidos gerados no Brasil são oriundos dos processos de construção e demolição. Por sua vez, Pinto e Gonzales (2005) apontaram as reformas, ampliações e demolições como as principais origens desses

resíduos.

Inúmeros têm sido os esforços para reinserir os resíduos de construção e demolição na cadeia produtiva dos mais diversos materiais de construção. Estudos apontam que os resíduos de construção e demolição podem ser utilizados de duas formas diferentes na composição de pastas, argamassas e concretos: como agregados reciclados ou como adições (PACHECO-TORGAL *et al.*, 2013).

Diante dessas duas possibilidades, a presente dissertação se restringe a utilização do RCD como adição, de maneira a viabilizar uma futura aplicabilidade dele em mistura com a cal e com o metacaulim.

Conforme Angulo (2005), países como Alemanha, Dinamarca, Holanda e Suíça conseguem reutilizar e reciclar um teor compreendido entre 50 e 90% de seus resíduos de construção e demolição. Diante disso, a presente pesquisa espera contribuir com o aumento do índice de reutilização desses resíduos no Brasil de maneira a alcançarmos patamares semelhantes aos europeus.

2.4 ESTUDOS EM PASTAS COM DIFERENTES COMBINAÇÕES

Construções antigas, especialmente aquelas ocorridas antes do advento do cimento Portland, foram executadas tendo a cal como o seu principal ligante. Contudo, percebeu-se à época que quando se misturavam alguns materiais específicos com a cal, ela apresentava melhorias em suas propriedades, além de um melhor desempenho quando comparadas às pastas e argamassas confeccionadas exclusivamente com a cal (TORRES, 2018).

Atualmente, para a restauração dessas edificações, faz-se necessária a utilização de pastas ou argamassas produzidas com materiais que sejam compatíveis com o material original da construção histórica, pois ao se tentar realizar essa atividade com materiais divergentes (caso do cimento Portland), manifestações patológicas se desenvolvem na estrutura devido a sua maior rigidez, ou seja, maior módulo de elasticidade que as argamassas originais da construção (AZERÊDO, 2012; GAMEIRO *et al.*, 2012; SOUZA, 2013; VEIGA, 2017).

Diante dessa demanda, aliada a necessidade de emprego dos resíduos de construção e demolição que são desenfreadamente descartados sem nenhum planejamento no meio ambiente, são necessárias mais pesquisas que visem o atendimento das necessidades contemporâneas da construção civil de maneira sustentável. Nesse intuito e para definir quais as proporções de cada um dos componentes das pastas a serem avaliadas nesta pesquisa, foram

analisadas algumas combinações existentes na literatura e que envolvem pelo menos um dos três materiais utilizados na mistura alvo desta dissertação, conforme pode ser visto a seguir.

2.4.1 Cal com metacaulim

Dentre as combinações, esta é a mais tradicional e a mais utilizada na produção de pastas e argamassas para a restauração de obras históricas, além de ser a que mais possui estudos publicados.

Serry *et al.*, (1984) realizaram a avaliação de produtos de hidratação de quatro misturas em distintas proporções em massa de metacaulim com hidróxido de cálcio. As proporções foram, respectivamente: 80:20; 70:30; 60:40 e 50:50. Os pesquisadores identificaram, através de ensaios de DRx, TG e ATD, a formação de gellenita hidratada (stratlingita), hidrogranada e silicato de cálcio hidratado (C-S-H).

A avaliação foi realizada até os 28 dias de hidratação, sendo que nas duas primeiras horas houve uma ativação térmica das misturas a uma temperatura de 800°C e, em seguida, a cura ocorreu em um ambiente com umidade relativa (UR) de 100%. Dentre os produtos de hidratação identificados, os autores indicaram o seguinte: o principal deles foi a stratlingita cuja quantidade aumentou com o tempo de cura; a hidrogranada surgiu apenas nas etapas iniciais da cura e somente nas misturas com baixo teor de hidróxido de cálcio; e o C-S-H só foi identificado através da TG/ATD, pois na DRx não foi possível graças ao baixo nível de cristalinidade desse composto. Além disso, a razão água/ligante utilizada na pesquisa foi de 1:1.

Acerca do tamanho das partículas, Serry *et al.*, (1984) fazem referência apenas as do metacaulim que foi proveniente da China. Eles informam que 52% das partículas possuem dimensão abaixo de 2µm cuja composição é de 75% de argila caulínica, 16% de quartzo e 9% de outros minerais argilosos. No que diz respeito à composição química, os autores também forneceram apenas a do metacaulim (Tabela 8), tendo em vista que, de acordo com eles, a cal hidratada utilizada era de elevada pureza.

Tabela 8 - Composição química do metacaulim.

MATERIAL	SiO₂ (%)	Al₂O₃ (%)	Fe₂O₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	K₂O + Na₂O (%)	TiO₂ (%)	LOI (%)
Metacaulim	54,78	32,22	0,45	0,15	0,28	0,38	0,30	11,73

Fonte: adaptado de Serry *et al.*, (1984).

Com o objetivo de compreender o teor de produtos hidratados gerados durante a ativação pozolânica do metacaulim com a cal hidratada, De Silva e Glasser (1993), elaboraram pastas com ambos os materiais contendo distintas proporções em massa, as quais podem ser visualizadas na tabela 9.

Tabela 9 - Formulação das proporções em massa de metacaulim e cal.

METACAILIM	CAL
1	6
1	3
1	1,5
1	1,75
1	0,40

Fonte: adaptado de De Silva & Glasser (1993).

Os resultados obtidos pelos autores supracitados após os experimentos evidenciaram que os principais hidratos formados durante a hidratação de pastas de cal e metacaulim, em temperaturas (20°C – 55°C) com umidade relativa de 98%, foram C_2ASH_8 (stratlingita ou gellenita hidratada), C_4AH_{13} (aluminato tetracálcico hidratado), C-S-H (silicato de cálcio hidratado) e C_3AH_6 (hidrogranada). Nas pastas ricas em cal, foram constatadas as fases estáveis de C-S-H e hidrogranada (quando a cura ocorreu na temperatura de 55°C); enquanto o C_2ASH_8 , C_4AH_{13} não apresentaram estabilidade. A água utilizada nas misturas foi deionizada e a relação água/ligante empregada em todas as misturas foi de 0,8. Nenhuma das amostras que foram moldadas em cilindros com 42mm de diâmetro apresentou exsudação, conforme os autores. A idade máxima de avaliação foi aos 180 dias de cura.

De modo semelhante ao realizado por Serry *et al.*, (1984), eles apresentaram apenas a composição química do caulim utilizado (tabela 10) que foi submetido, a posteriori, à calcinação por seis horas a uma temperatura de 730°C. Após esse tratamento térmico, De Silva e Glasser (1993) obtiveram o metacaulim empregado na pesquisa e não mencionaram a nova composição química do material. Na pesquisa, os autores não fazem menção à distribuição do tamanho das partículas.

Tabela 10 - Análise química do metacaulim.

MT	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	K ₂ O (%)	Na ₂ O (%)	SO ₃ (%)	MnO (%)	TiO ₂ (%)	P ₂ O ₅ (%)	LOI (%)
MC	55,23	41,23	0,83	0,09	0,34	2,02	0,02	0,04	0,01	0,04	0,15	13,00

Fonte: adaptado de De Silva & Glasser (1993).

Nota - MT: material; MC: metacaulim; LOI: perda ao fogo (autores não recalculam o teor de óxidos).

Por sua vez, Bakolas *et al.*, (2006) realizaram experimentos com vistas a avaliar a atividade pozolânica do metacaulim. Para isso, foram confeccionadas pastas com diversas proporções de metacaulim e cal, onde os pesquisadores chegaram a conclusão de que a máxima resistência obtida foi através da proporção, em massa, de 1:1 de ambos os componentes. Ainda conforme os autores, o consumo de hidróxido de cálcio é proporcional a quantidade inicial de metacaulim na mistura. A tabela 11 informa a composição química e algumas propriedades físicas de ambos os componentes na fase experimental.

Tabela 11 - Análise química e propriedades físicas dos materiais usados na preparação das pastas.

MT	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	K ₂ O (%)	Na ₂ O (%)	SO ₃ (%)	LOI (%)	Dapar g/cm ³	Dreal g/cm ³	As m ² /g
Cal	0,17	0,18	0,07	70,06	2,35	-	-	0,77	25,60	0,50	2,34	13,60
MC	51,70	40,60	0,64	0,71	0,96	2,00	0,31	0,10	1,19	0,38	2,52	13,83

Fonte: adaptado de Bakolas *et al.*, (2006).

Nota - MT: material; LOI: perda de massa; Dapar: densidade aparente; Dreal: densidade real; As: Área Superficial específica.

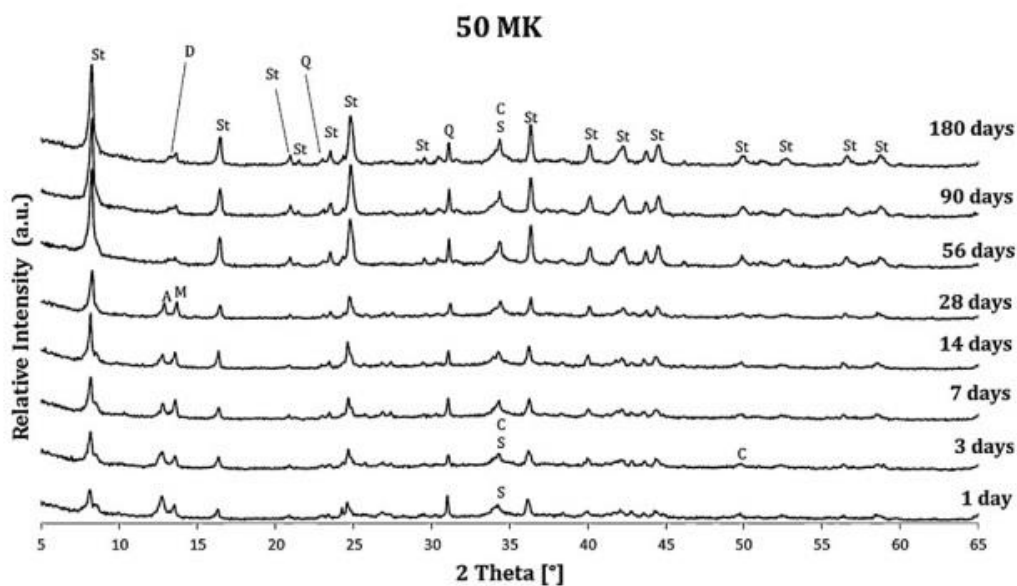
Nessa pesquisa, a relação água/ligante utilizada foi de 1:1 em todas as proporções avaliadas de metacaulim e cal. Acerca da distribuição do tamanho das partículas, ela foi analisada com o auxílio do laser (CILAS 715), onde foi detectado que 100% das partículas de metacaulim possuíam dimensão inferior a 24 µm e 95,6% destas eram de tamanho inferior a 16 µm.

Gameiro *et al.*, (2012), ao realizar experimentos com pastas de cal e metacaulim em temperatura de 23 ± 2 °C e UR > 95%, encontraram resultados semelhantes aos estudos anteriores no que diz respeito aos produtos de hidratação formados. Nos ensaios, a cal utilizada foi para análise (P.A) e o metacaulim foi comercial, não sendo realizada menção à composição química de ambos. Os pesquisadores tinham o objetivo de avaliar os produtos de hidratação

formados com o tempo (1, 3, 7, 14, 28, 56, 90 e 180 dias) para emprego desses materiais na conservação e restauração de obras históricas. As composições das fases foram identificadas através de DRx e ATD/TG. Além disso, os pesquisadores afirmam que distintas proporções de cal com metacaulim apresentam diferentes cinéticas de reação ao longo do período de cura da pesquisa.

Eles indicam que o teor de stratlingita (C_2ASH_8) produzida está diretamente relacionada com o teor de metacaulim na mistura, assim como que existe uma relação diretamente proporcional entre o teor de substituição de cal por metacaulim e a quantidade de produtos pozolânicos encontrados. Na pesquisa, a melhor proporção encontrada, em massa, em relação à extensão da reação pozolânica para ambos os componentes foi a de 1:1 e a relação água/ligante empregada em todas as misturas também foi de 1:1. Na DRx da mistura 1:1 (50% de cal com 50% de metacaulim), os pesquisadores identificaram as seguintes fases cristalinas: hidróxido de cálcio; stratlingita; monocarboaluminato (C_4ACH_{11}); e aluminato tetracálcico hidratado (C_4AH_{13}). Um fato relevante citado por Gameiro *et al.*, (2012), é o de que o pico do aluminato tetracálcico hidratado desaparece após 28 dias de hidratação e o pico do monocarboaluminato é reduzido significativamente a partir dessa mesma idade, o que indica a instabilidade de ambos os aluminatos de cálcio hidratado. Por sua vez, o pico da stratlingita se torna mais intenso com o passar do tempo de cura, conforme pode ser visualizado na figura 1.

Figura 1 - DRx da pasta com 50% de metacaulim em massa.



Fonte: Gameiro *et al.*, (2012).

Nota - St: stratlingita; Q: quartzo; A: C_4AH_{13} ; M: monocarboaluminato; C: calcita; S: CSH; D: $Ca_2Al(OH)_7 \cdot 6.5H_2O$.

Outra pesquisa de Gameiro *et al.*, (2012b) complementa o estudo citado anteriormente com a realização de análise microscópica. Nessa pesquisa, na qual também foi utilizada a proporção de 1:1 (50% cal e 50% MC) na razão água/ligante de 1:1, os pesquisadores reiteram que em temperatura ambiente os principais produtos de hidratação formados são o silicato de cálcio hidratado, a stratlingita, o aluminato tetracálcico hidratado e o monocarboaluminato, cujas quantidades estão diretamente relacionadas com a razão cal/metacaulim da mistura além de outros fatores como temperatura e a presença de outros ativadores. Eles informam que uma das motivações da pesquisa era a de averiguar uma hipótese citada por De Silva e Glasser (1993) de que no longo prazo a stratlingita e os aluminatos de cálcio hidratado se transformavam em hidrogranadas e que esse era o motivo pelo qual alguns pesquisadores identificavam a alteração de volume associado ao aumento da porosidade, assim como a redução de resistências mecânicas graças a uma perda da compactação estrutural. Contudo, na microscopia eletrônica de varredura, eles não identificaram a presença de hidrogranada aos 90 dias e citaram que os estudos em que a hidrogranada foi identificada, a cura ocorreu em temperaturas mais elevadas.

De acordo com Souza (2019), a composição química do metacaulim influencia na cristalização das hidrogranadas nas pastas de cal. Em seu estudo, a pesquisadora levou em consideração algumas pesquisas que citaram a hidrogranada como sendo um dos produtos de hidratação, especialmente quando a cura ocorre em temperaturas elevadas. Graças a isso, ela realizou ensaios com dois tipos de cura (ao ar e térmica), nas idades de 30, 60 e 90 dias.

Ao todo, Souza (2019) utilizou três tipos distintos de metacaulim em misturas com apenas uma cal hidratada. Diferentemente das outras pesquisas em que foram feitas substituições de percentuais de um material pelo outro, a depender da finalidade do estudo, nessa pesquisa as misturas ocorreram por inserção de 10, 20, 30, 40 e 50% em volume de metacaulim sobre o volume de cal. Tendo em vista que foram cinco proporções, três metacaulins e duas curas distintas, ao todo a pesquisadora avaliou trinta misturas com relação $A/L = 1,1$. Quanto às conclusões obtidas com a pesquisa, a pesquisadora indica que determinadas proporções de MC/Cal, a condição de cura e o tipo de metacaulim são os principais aspectos que influenciam na formação de hidrogranadas. Além disso, ela reitera que independentemente da formação das hidrogranadas que são o motivo da queda da resistência mecânica no longo prazo, a instabilidade nessas resistências faz parte do comportamento desses materiais graças à metaestabilidade dos produtos formados entre a cal e o metacaulim, o que não afeta a compatibilidade deles com a alvenaria histórica.

A pesquisa de Azerêdo; Struble e Carneiro (2015) que avaliou características

microestruturais de pastas de cal com metacaulim, este produzido a partir de resíduos de caulim, foi outro estudo em que as avaliações foram realizadas até a idade de 180 dias. Um diferencial em relação às pesquisas citadas anteriormente foi que duas condições de cura foram empregadas (úmida e ao ar). Os principais produtos encontrados por meio de DRx, ATD e MEV foram stratlingita (predominante na cura úmida), monocarboaluminato (predominante na cura ao ar), portlandita e calcita. Os pesquisadores identificaram que na cura úmida a portlandita foi consumida em 28 dias enquanto na cura ao ar foi aos 180 dias.

Além de uma pasta confeccionada somente com a cal hidratada, também foram produzidas mais duas misturas de Cal/MC nas proporções de 1:1 e 1:2 em massa. A relação água ligante utilizada em todas as misturas foi de 1:1. A composição química da cal hidratada e do metacaulim utilizados podem ser visualizadas na tabela 12.

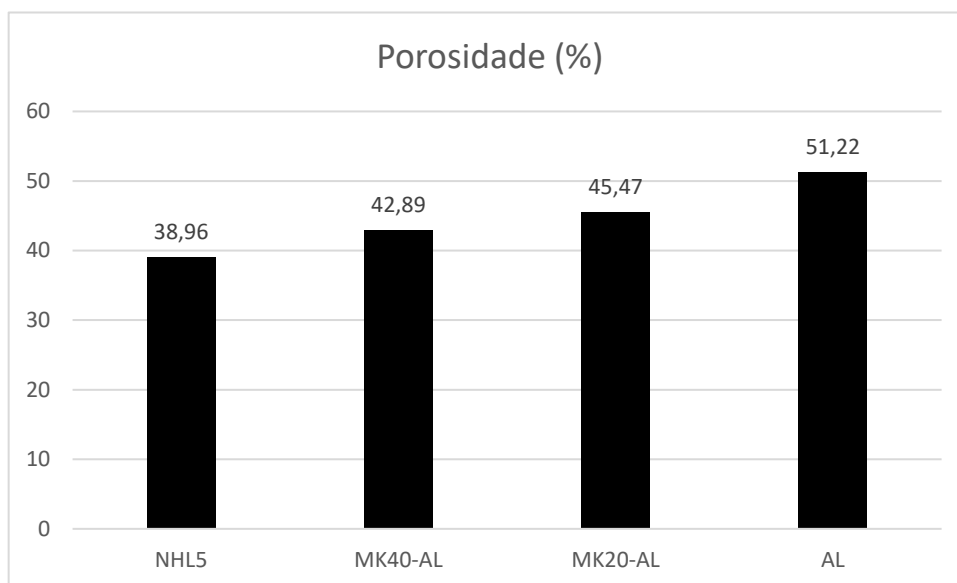
Tabela 12 - Análise química mensurada através de FRx.

MT	SiO₂ (%)	Al₂O₃ (%)	Fe₂O₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	K₂O (%)	Na₂O (%)
Cal	1,25	0,47	0,35	93,10	4,57	0,06	0,03
MC	54,44	41,82	0,43	0,06	0,21	2,95	-

Fonte: adaptado de Azerêdo; Struble e Carneiro (2015).

Conforme Zhang *et al.*, (2020), pastas de cal aérea e metacaulim possuem ganho de resistência similar ao obtido por uma cal hidráulica natural em idades iniciais. Dentre os experimentos realizados, eles obtiveram uma resistência à compressão de 21,06 MPa aos 28 dias para uma pasta de cal contendo 40% de metacaulim. As porosidades encontradas na pesquisa para todas as pastas confeccionadas foram (Figura 2): NHL5 (cal hidráulica natural) = 38,96%; MK40-AL (cal aérea 60% e metacaulim 40%) = 42,89%; MK20-AL (cal aérea 80% e metacaulim 20%) = 45,47%; AL (cal aérea) = 51,22%. Esses resultados evidenciam que quanto maior o teor de substituição da cal por metacaulim, até um determinado limite, o desempenho da mistura torna-se compatível com o da cal hidráulica, além de ser menor a porosidade do sistema e, conseqüentemente, menor a influência do processo de carbonatação para o ganho de resistência da pasta com o passar do tempo.

Figura 2 - Comparativo das porosidades obtidas nos estudos em pasta de Zhang *et al.*, (2020).



Fonte: O autor (2023).

A composição química dos materiais utilizados na fase experimental pelos pesquisadores foi a seguinte:

Tabela 13 - Composição química dos finos (%).

Materiais	CaO	SiO₂	Fe₂O₃	Al₂O₃	MgO	K₂O	SO₃	Na₂O	Densidade específica (g/cm³)
Cal hidráulica Natural	77,07	18,00	0,64	1,87	1,22	0,24	0,56	0,07	2,61
Cal aérea	90,12	3,85	0,29	4,01	1,2	-	-	-	2,26
Metacaulim	0,38	57,65	1,12	38,81	0,21	0,54	0,02	0,06	2,49

Fonte: Adaptado de Zhang *et al.*, (2020).

A relação água/ligante utilizada na pesquisa em questão foi de 0,5, a qual está muito abaixo das demais pesquisas supracitadas tendo em vista que foi necessário utilizar aditivo superplastificante para padronizar a fluidez das pastas tomando por base a fluidez da cal hidráulica natural, conforme pode ser constatado na tabela 14.

Tabela 14 - Proporções da mistura e fluidez das pastas no estado fresco.

Amostras	Nome do componente e proporção da mistura (Massa%)				Relação água/ligante (massa)	Fluidez (mm)
	Cal hidráulica	Cal aérea (AL)	Metacaulim (MK)	Superplastificante polycarboxilato		
Cal hidráulica	100			0,38	0,5	188
Cal aérea (AL)		100		0,57	0,5	185
MK20 - AL		80	20	0,50	0,5	187
MK40 - AL		60	40	0,45	0,5	183

Fonte: adaptado de Zhang *et al.*, (2020).

As porosidades encontradas (figura 2) corroboram com a afirmação realizada por Cincotto, Quarcioni e John (2007) no que diz respeito à semelhança entre a cal hidráulica natural e a cal hidratada com pozolanas. Esse fato sugere que caso seja possível a inserção do RCD em misturas de cal com metacaulim por substituição até uma determinada porcentagem, é possível que o mesmo possa ser realizado substituindo parcialmente a cal hidráulica natural por RCD.

2.4.2 Cal com metacaulim e um terceiro componente

Ainda é incipiente a literatura acerca de misturas ternárias envolvendo a cal, o metacaulim e um terceiro componente. Desse modo, algumas publicações retratam o interesse de pesquisadores em compreender o comportamento e as propriedades apresentadas por essas misturas ternárias, conforme pode ser visto a seguir.

Com o objetivo de estudar o desempenho de pastas constituídas de cal, metacaulim e lodo oriundo do processo de extração e lavagem do cascalho, Thapa e Waldmann (2020) confeccionaram pastas desses materiais. O experimento foi dividido em três etapas e o avanço de uma para outra levava em consideração as descobertas realizadas na etapa anterior. Após as duas primeiras etapas que serviram para otimizar a composição e outros aspectos relevantes para a melhoria do desempenho das pastas, os autores chegaram a conclusão de que as pastas constituídas de cal hidratada possuíam maior ganho de resistência aos 7, 14 e 28 dias de cura em relação a cal hidráulica natural. Dentre os três tipos de cal hidratada empregadas no experimento, a que obteve a melhor performance foi a HL2 (Cal hidratada 2), cuja composição

química, d50 e área superficial específica são apresentadas nas tabelas a seguir:

Tabela 15 - Composição química da HL2, metacaulim, UGWM* e CGWM**.

AMOSTRA	COMPOSIÇÃO QUÍMICA									
	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	TiO ₂ (%)	MnO (%)
HL2	0,14	0,14	0,07	98,62	0,50	0,11	0,15	-	-	-
UGWM	64,97	19,50	9,35	0,41	1,66	0,09	0,24	2,72	0,85	0,06
CGWM	64,01	20,26	8,90	0,41	1,81	-	0,24	3,25	0,90	0,08
MK	69,37	32,01	2,74	0,99	-	-	-	0,31	1,41	-

Fonte: adaptado de THAPA & WALDMANN (2020).

Nota - *UGWM – Lodo da extração do cascalho natural; **CGWM – Lodo da extração do cascalho calcinado.

Tabela 16 - Características físicas do HL2, metacaulim, UGWM e CGWM.

AMOSTRAS	Características físicas	
	Diâmetro médio das partículas d50 (µm)	Área Superficial Específica (m ² /Kg)
HL2	1,41	1.597,20
MK	24,59	418,60
UGWM	7,36	522,50
CGWM	8,36	479,90

Fonte: adaptado de Thapa e Waldmann (2020).

Analisando o experimento por completo, a mistura com o melhor desempenho aos 90 dias, levando em consideração à resistência à compressão, foi a que possuiu a proporção (Cal/Metacaulim/Lodo calcinado) = 1:1,66:1. Ou seja: 45,36% de Metacaulim; 27,32% de cal hidratada; e 27,32% de lodo calcinado (em massa). A relação A/L utilizada nesta última fase do experimento foi de 0,5. Essa baixa relação água/ligante se justifica pelo fato de que a maior área superficial específica dos 3 materiais era a da cal cujo teor na mistura foi muito baixo quando comparado aos outros estudos.

Outra pesquisa que utilizou uma mistura ternária contendo cal hidratada e metacaulim foi a de Costa (2017), a qual avaliou o potencial pozolânico da cinza do bagaço da cana de

açúcar (CBCA) a partir de uma mistura ternária composta por esses três produtos utilizando o método da termogravimetria.

A proporção da cal hidratada utilizada no experimento em questão estava compreendida entre 31 – 34% e o material pozolânico (metacaulim e cinza do bagaço de cana de açúcar) consistiam em um teor compreendido entre 66 e 69%. A relação água/ligante foi mantida constante em 0,9 para todas as misturas, porém foi necessário o uso de aditivos para a padronização da fluidez em alguns ensaios.

A tabela a seguir mostra as propriedades físicas destacadas por Costa (2017) em sua pesquisa.

Tabela 17 - Propriedades físicas dos materiais utilizados na pesquisa.

Amostras	Finura Blaine (m²/kg)	Área Superficial (BET) (m²/g)	Massa específica (g/cm³)
CANP400	1331,54	84,62	2,27
CANM7H	1838,44	143,97	2,35
MTC	2245,49	-	2,60
CAL – CH-I	982,37	-	2,33
FILLER	-	-	2,80

Fonte: Costa (2017).

Nota: CANP400 – Cinza do bagaço da cana de açúcar natural, passante na #400; CANM7H - Cinza do bagaço da cana de açúcar moída por 7h.

Apesar dessa última pesquisa possuir um objetivo diferente da primeira apresentada neste subtópico, uma informação relevante que Costa (2017) destaca é a de que em uma mistura ternária envolvendo cal hidratada e pozolanas, o teor de metacaulim desempenha um papel determinante nas análises a serem realizadas, pois ele é o componente que potencializa a reação pozolânica. Essa informação justifica o melhor resultado encontrado por Thapa & Walldmann (2020), quando a proporção ideal de cal hidratada, metacaulim e o lodo calcinado, respectivamente, foi de 1:1,66;1, ou seja, 27,32% de cal hidratada, 45,36% de metacaulim e 27,32% de lodo calcinado.

A pesquisa de De Araújo (2022) também tratou acerca de uma mistura ternária envolvendo cal com metacaulim e cinza do bagaço de cana-de-açúcar. Nela, foram preparadas 21 composições distintas da mistura entre metacaulim e CBCA para aferição do potencial pozolânico de cada uma delas. Para a realização do ensaio de índice de atividade pozolânica com a cal aos 7 dias, as proporções das misturas dos materiais pozolânicos variaram de 100%

de MC e 0% de CBCA até 0% de MC e 100% de CBCA (substituições de 5 em 5%). A relação água/ligante utilizada em todas as misturas foi fixada em 0,65, independentemente do atendimento ou não ao critério de espalhamento do índice de consistência previsto na NBR 5751 (2015). De acordo com esse método de avaliação de pozolanicidade, a autora identificou que misturas com 55% de CBCA e 45% de MC atingiam os 6 MPa previstos na norma.

Do exposto nas pesquisas analisadas, verifica-se que não há uma padronização de algumas variáveis que influenciam a produção e a durabilidade do material. Como exemplo de fatores que divergem nas pesquisas, tem-se: relação A/L das misturas; tipo de cura; proporções e composição química dos materiais utilizados; utilização ou não de aditivos, dentre outros. Tal fato se justifica, pois, as finalidades das pesquisas são distintas e a realidade local de onde elas foram realizadas provavelmente exigem a utilização de outros materiais disponíveis no ambiente. Consequentemente, análises adicionais de outras misturas, desta vez contendo RCD, foram realizadas de modo a viabilizar a montagem de uma estimativa para as variáveis supracitadas que impactam a produção e a durabilidade do material.

2.4.3 Cimento com Resíduo de Construção e Demolição

Até o momento, ainda é incipiente a literatura acerca do emprego de resíduos de construção e demolição como adição mineral para formar um ligante junto com a cal e o metacaulim. Consequentemente, este subtópico aborda o que há de mais atual acerca da adição do RCD ao cimento, tendo em vista que estudos supracitados evidenciaram que os produtos de hidratação do cimento são semelhantes ao da mistura entre a cal hidratada e o metacaulim.

Frías *et al.*, (2021) realizaram a análise microestrutural para compreender a reatividade em pastas de cimento contendo frações finas de concreto reciclado ou vidro oriundos de resíduos de construção e demolição. Esses pesquisadores realizaram experimentos substituindo os teores de 5, 7 e 10% de cimento por esses diferentes resíduos de construção e demolição (frações finas de concreto reciclado ou vidro laminado). A tabela 18 apresenta a composição química dos materiais utilizados. Para garantir uma dimensão das partículas similar a do cimento Portland Comum, os resíduos foram moídos até uma granulometria inferior a 63 μm e a relação água/ligante utilizada em todas as misturas foi de 0,5.

Tabela 18 - Determinação da composição química através de FRx.

Amostras	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	Cl ⁻	LOI
OPC	14,22%	2,89%	69,81%	3,70%	0,93%	3,36%	0,33%	0,76%	0,14%	0,20%	0,03%	3,22%
HsT	49,97%	8,98%	18,65%	2,30%	1,37%	2,53%	0,80%	3,35%	0,11%	0,28%	0,01%	11,50%
5% HsT	16,01%	3,20%	67,25%	3,63%	0,95%	3,32%	0,35%	0,89%	0,14%	0,20%	0,05%	3,39%
7% HsT	16,72%	3,32%	66,23%	3,60%	0,97%	3,30%	0,36%	0,94%	0,14%	0,21%	0,05%	3,68%
10% HsT	17,80%	3,50%	64,70%	3,56%	0,97%	3,28%	0,38%	1,02%	0,14%	0,21%	0,05%	3,78%
HcG	9,34%	2,88%	50,33%	1,20%	1,12%	0,85%	0,18%	0,47%	0,03%	0,14%	0,03%	33,20%
5% HcG	13,98%	2,89%	68,84%	3,58%	0,94%	3,24%	0,32%	0,75%	0,14%	0,20%	0,05%	4,68%
7% HcG	13,88%	2,89%	68,45%	3,53%	0,94%	3,18%	0,32%	0,74%	0,13%	0,20%	0,05%	5,12%
10% HcG	13,73%	2,89%	67,86%	3,45%	0,95%	3,11%	0,32%	0,73%	0,13%	0,19%	0,05%	6,13%
Vidro	70,30%	1,07%	9,64%	0,92%	3,64%	0,24%	13,36%	0,26%	-	0,07%	0,03%	0,43%
5% Vidro	17,02%	2,80%	66,80%	3,56%	1,07%	3,20%	0,98%	0,74%	0,13%	0,19%	0,05%	3,10%
7% Vidro	18,15%	2,76%	65,60%	3,51%	1,12%	3,14%	1,24%	0,73%	0,13%	0,19%	0,05%	2,95%
10% Vidro	19,82%	2,71%	63,79%	3,42%	1,20%	3,05%	1,62%	0,71%	0,13%	0,19%	0,05%	2,79%

Fonte: adaptado de Frías *et al.*, (2021).

Nota – OPC: cimento Portland comum; HCG: resíduo de construção rico em calcário; HST: resíduo de construção silicoso.

Da análise da tabela é possível constatar que a cada substituição de parte do cimento Portland por quaisquer das proporções dos diferentes resíduos, resultará um material com uma composição química diferente, o qual apresentará características peculiares ao longo do seu processo de hidratação e endurecimento.

Durante a pesquisa, os autores chegaram a algumas conclusões: os produtos de hidratação do cimento Portland comum e o da mistura contendo distintas proporções de diferentes tipos de resíduos não diferiram significativamente; graças a variação dos tipos de resíduos, eles apresentaram diferentes reatividades onde, por exemplo, resíduos constituídos de um maior teor calcário inicialmente agiram como filler e a partir dos 28 dias a reação pozolânica começou a prevalecer.

Por sua vez, Moreno-Juez *et al.*, (2021), também realizaram experimentos com substituições de 5 e 7% de cimento por resíduos de construção e demolição e encontraram resultados semelhantes ao estudo anteriormente apresentado. Além de identificar o efeito filler apresentado pelas partículas de RCD e uma certa pozolanicidade, os autores realizaram uma validação inicial da aplicação desses resíduos em uma fábrica de forma a comprovar a viabilidade de produção das misturas investigadas em larga escala. Na parte experimental, os

resíduos de construção e demolição consistiram em partículas $\leq 5\text{mm}$ obtidas a partir da trituração e peneiramento do resíduo de concreto inicial oriundo de quintal de fábrica a céu aberto. Em seguida, essas partículas foram submetidas a um processo de secagem ao longo de 24 horas em uma temperatura de 105°C para em seguida serem submetidas à moagem em um moinho de bolas. Consequentemente, foram empregadas nas misturas apenas as partículas de RCD de dimensão inferior à $63\text{ }\mu\text{m}$. A tabela 19 apresenta o D10, D50 e D90 do cimento utilizado como referência e de cada um dos resíduos utilizados no experimento. Por sua vez, a tabela 20 apresenta a composição química dos materiais empregados na pesquisa.

Tabela 19 - D10, D50 e D90 (em μm) para as amostras.

	OPC	RCLG	RCLL	RCLV	RCST	RCSC	RCSS	WG
D10 (μm)	1,99	0,82	0,86	0,79	1,04	1,08	1,17	2,70
D50 (μm)	11,60	5,77	5,38	5,22	8,42	8,90	9,37	12,40
D90 (μm)	34,20	31,90	34,40	29,20	44,90	43,20	44,00	41,40

Fonte: Moreno-Juez *et al.*, (2021).

Nota – OPC: cimento Portland comum; RCL(x): frações finas de concreto (rico em calcário) reciclado (a última letra faz referência à localização da fábrica em que o resíduo foi coletado); RCS(x): frações finas de concreto silicoso (a última letra faz referência à localização da fábrica em que o resíduo foi coletado); WG: resíduos de vidro.

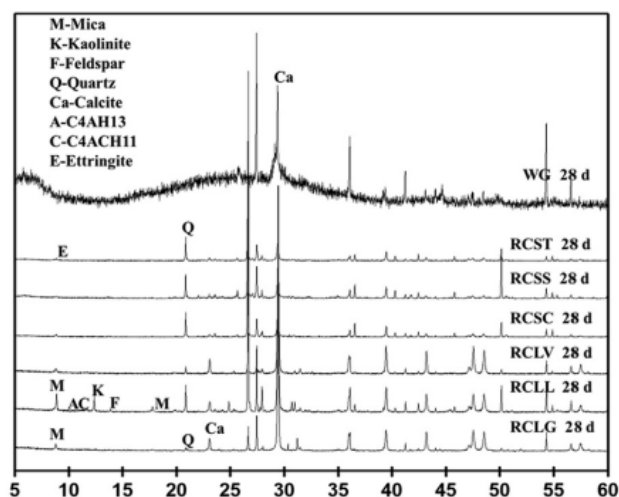
Tabela 20 - Composição química do cimento e dos diferentes resíduos.

%	OPC	RCLG	RCLL	RCLV	RCST	RCSC	RCSS	WG
SiO ₂	11,22	9,34	23,27	12,10	49,97	49,22	58,00	70,30
Al ₂ O ₃	2,89	2,88	6,58	3,78	8,98	8,01	9,56	1,07
CaO	69,81	50,33	38,66	45,93	18,65	21,38	14,48	9,64
Fe ₂ O ₃	3,70	1,20	2,30	2,49	2,30	2,19	2,12	0,92
MgO	0,93	1,12	0,78	0,92	1,37	1,58	1,11	3,64
SO ₃	3,36	0,85	0,59	0,67	2,53	0,88	0,72	0,24
Na ₂ O	0,33	0,18	0,41	0,25	0,80	0,63	0,90	13,26
K ₂ O	0,76	0,47	1,07	0,72	3,35	2,61	3,83	0,26
TiO ₂	0,20	0,14	0,39	0,42	0,28	0,30	0,30	0,07
P ₂ O ₅	0,14	0,03	0,08	0,09	0,11	0,12	0,10	-
Cl ⁻	0,05	0,03	0,02	0,04	0,01	0,03	0,02	0,03
LOI	3,22	33,20	25,70	32,40	11,50	12,90	8,69	0,43

Fonte: Moreno-Juez *et al.*, (2021).

A água/ligante empregada nos experimentos foi de 0,5 para todas as misturas. Esse baixo valor da relação água/ligante se deve ao fato de a substituição ser realizada em relação ao teor de cimento, o qual exige uma menor demanda de água que a cal hidratada. A figura 3 apresenta as principais fases mineralógicas identificadas aos 28 dias nos testes realizados com cada um dos resíduos.

Figura 3 - Fases mineralógicas presentes nos resíduos aos 28 dias.



Fonte: Moreno-Juez *et al.*, (2021).

Essa figura retrata o fato de que a depender da origem do resíduo e da sua composição química, diferentes comportamentos serão observados ao longo da vida útil do material do qual eles farão parte. Além disso, é possível perceber que diante da imensa variedade de resíduos de construção e demolição existentes no mundo, diversas são as possibilidades de aplicação desse material. No âmbito desta dissertação, a pesquisa se restringirá ao uso de apenas um tipo de RCD. Contudo, tendo em vista que as pastas e argamassas para a restauração e conservação de construções históricas necessitam de materiais compatíveis para tal utilidade, inúmeras possibilidades de pesquisas são viáveis de serem realizadas com essa finalidade ao se alterar o RCD empregado nas misturas, o que pode viabilizar mais alternativas de materiais sustentáveis para o futuro.

2.5 SÍNTESE DA REVISÃO DE LITERATURA

Diante dos comentários supracitados com base nas pesquisas elencadas até então, foi possível concatenar algumas informações de maneira a estimar as proporções de cada um dos componentes das misturas ternárias que foram avaliadas no programa experimental desta

dissertação, assim como a razão água/ligante mais promissora para a realização dessas misturas. Desse modo, foi possível elencar as seguintes considerações iniciais:

- Avaliando a composição química das cales empregadas nas pesquisas supracitadas, há uma predominância pelo uso da CH-I graças a sua elevada pureza ou a cal hidratada P.A.
- Devido a sua maior área superficial específica, quanto maior o teor de cal hidratada na mistura, faz-se necessária uma maior quantidade de água para molhar e hidratar todas as partículas. Tendo em vista que a área superficial específica do metacaulim, em boa parte dos casos, é semelhante a da cal, as pesquisas supracitadas que fizeram referência às misturas de ambos os componentes mantiveram a relação água/ligante delas entre 0,8 e 1,1, onde, em um dos estudos, a de 0,8 não apresentou exsudação independente da proporção de MC e Cal.
- As duas pesquisas acerca da mistura entre cimento e RCD fizeram uso da mesma relação água/ligante = 0,5. Essa A/L é a mesma que foi utilizada na pesquisa acerca da mistura entre cal hidratada, metacaulim e lodo calcinado para a amostra com o melhor desempenho (segundo critérios estabelecidos pelos pesquisadores e que não levam em consideração questões como a compatibilidade). Esse baixo valor da relação A/L se justifica pelo fato de que em uma mistura foi empregado apenas cimento com RCD, enquanto na outra foi utilizada uma pequena proporção de cal hidratada em relação aos outros dois componentes da mistura, sendo, portanto, misturas com uma área superficial específica inferior àquelas ricas em cal.
- Misturas de cal com metacaulim na proporção de 1:1 (em massa) apresentaram resultados satisfatórios, sendo esse traço um dos mais utilizados nas pesquisas quando são realizadas pastas e argamassas a partir desses materiais. Contudo, com a inserção de um 3º componente, a utilização da cal passou a ser de no máximo 34% em massa da mistura. Costa (2017) justificou essa redução do teor de cal na mistura devido ao fato de que o teor de metacaulim desempenha um papel determinante quanto ao desempenho do sistema, o que justifica o melhor resultado conferido à proporção 1:1,66:1 (Cal:MC:Lodo) encontrada por Thapa e Walldmann (2020), assim como pode justificar a menor relação água/ligante encontrada. Vale destacar que em algumas pesquisas os bons resultados encontrados se referem ao elevado desempenho mecânico dos materiais, o que não é objetivo primário deste estudo.
- Os tipos de cura empregados nas pesquisas foram: seca (ao ar); úmida e térmica. A depender do tipo de cura escolhido foram constatadas variações nos produtos de hidratação das pastas. Esse fato retrata a relevância que esse fator possui na cinética de reação do material a ser produzido e aplicado em obra.

- Em algumas das pesquisas supracitadas foi realizada a moagem dos resíduos para a obtenção de um material com características semelhantes aos outros empregados na mistura. Além das proporções dos materiais que compuseram a fração ligante das pastas e a relação água/ligante que foi empregada para a confecção das misturas, a moagem dos componentes foi outro fator levado em consideração, pois ela altera a mineralogia e as características físicas dos materiais, a reatividade deles, bem como impactam diretamente na durabilidade das argamassas históricas (MIRIELLO *et al.*, 2010).

Consequentemente, com base no descrito na revisão de literatura e nas considerações supracitadas, foram definidos os seguintes parâmetros iniciais a serem aplicados no programa experimental desta dissertação: a proporção em massa da mistura de referência - (50% Cal e 50% MC = 1:1); o tipo de cura a ser empregado nos experimentos – ao ar; realização da moagem do RCD até a obtenção de partículas passantes na #200 para emprego nas misturas.

Por sua vez, para a definição das proporções de cada material, assim como da relação A/L a ser empregada nas misturas, foi necessária a realização de um Estudo Piloto, o qual está descrito no item 3.2 desta dissertação. Para a sua realização, as seguintes considerações adicionais foram elencadas:

- O resíduo de construção e demolição, comumente utilizado em combinação com o cimento com o objetivo de reduzir a produção de clínquer, possui uma limitação de substituição, a qual impacta consideravelmente no desempenho do produto final a partir de 10% em massa nas misturas com relação água/ligante de 0,5. Contudo, a pesquisa de Thapa e Waldmann (2020) demonstrou que em pastas de cal com metacaulim, a substituição de ambos por aproximadamente 28% (em massa) de lodo calcinado ainda garante um desempenho adequado a determinados fins. Desse modo, levando em consideração que o cimento possui hidraulicidade similar a da cal com o metacaulim, aparenta ser promissora a investigação das propriedades de misturas com um teor de substituição em massa superior aos 10% do ligante principal pelo resíduo de construção e demolição.
- No que diz respeito à relação água/ligante, a revisão de literatura apresenta que tanto 0,5 quanto 0,8 culminaram em resultados satisfatórios quando empregadas em determinadas proporções de materiais. Em resumo, para misturas com teor de cal hidratada $\leq 30\%$ a razão água/ligante de 0,5 foi a mais promissora (graças a redução do teor de partículas muito finas na mistura); por outro lado, quando o teor de cal hidratada foi $\geq 40\%$, as pastas confeccionadas com a razão água/ligante a partir de 0,8 obtiveram melhor desempenho com base nos resultados apresentados na revisão de literatura. Como algumas das misturas realizadas com A/L = 0,5

utilizaram aditivos para padronizar a fluidez das pastas e levando em consideração que as obras de conservação e restauração do patrimônio histórico exigem compatibilidade entre os materiais utilizados à época da construção e os materiais de restauro da atualidade, não é recomendável uma redução significativa do teor de cal hidratada a ser empregada nas pastas nesta pesquisa. Graças a isso, o emprego de relações água/ligante menores que 0,8 foi descartado.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste capítulo são apresentados os materiais e métodos utilizados ao longo do programa experimental desta pesquisa, assim como o estudo piloto a partir do qual foram definidas as proporções e a relação água/ligante empregadas nas misturas.

Os ensaios foram realizados em laboratórios da Universidade Federal de Pernambuco, com exceção do ensaio de reologia que foi realizado na Universidade Federal de Campina Grande. Em resumo, foram realizados os seguintes ensaios nesta pesquisa:

- *Mini-slump*, massa específica, área superficial específica e índice de atividade pozolânica (LABTAG – UFPE)
- Fluorescência de Raios – X (NEG-LABISE – UFPE)
- Espectroscopia de Infravermelho (LTM – UFPE)
- Granulometria a laser (LTM – UFPE)
- Difração de raios-x (LTM – UFPE)
- Análise termodiferencial e termogravimetria (LTM – UFPE)
- Reologia – (LEP – UFCG)
- Resistência à compressão (Laboratório de Tecnologia do Concreto – UFPE)
- Variação de massa (Laboratório de Tecnologia do Concreto – UFPE)

3.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO E MATERIAIS

3.1.1 Ensaios de caracterização no estado anidro

De modo a caracterizar os materiais utilizados no estado anidro, foram realizados os seguintes ensaios: massa específica; área superficial específica; granulometria a laser; fluorescência de raios-x; difração de raios-x; espectroscopia infravermelha e ATD-TG.

3.1.1.1 Massa específica e área superficial específica (finura Blaine)

A massa específica da cal hidratada, do metacaulim e do RCD (após moagem) foram determinadas através do ensaio com o frasco volumétrico de Le Chatelier, conforme preconiza a NBR 16605 (2017). Por sua vez, a área superficial específica dos materiais foi determinada

através do método de permeabilidade ao ar (método de Blaine), normatizado pela NBR 16372 (2015).

3.1.1.2 Granulometria à laser

A granulometria de cada material foi determinada através do granulômetro à laser Malvern, modelo Mastersizer 2000, cujo limite inferior de detecção é 10 nm e o superior é 2000 µm. As análises foram realizadas via seco. As análises granulométricas foram realizadas em triplicata, ou seja, os resultados analisados nesta pesquisa correspondem à média de três medições, onde cada uma delas é a média de três leituras de uma mesma amostra. Além disso, a partir das curvas de distribuição granulométrica, foram determinados os diâmetros característicos de cada material (D10, D50 e D90).

3.1.1.3 Fluorescência de raios-x

De acordo com Oliveira (2011), a FRx é uma técnica não-destrutiva cujo objetivo é a identificação da composição química do material através de uma análise qualitativa de cada elemento químico nele identificado. A premissa desse ensaio se baseia na interação entre os espectros de raios-x incidentes e os elétrons dos átomos que compõem a amostra.

Para a realização da análise da composição química dos materiais com perda ao fogo, inicialmente, a amostra de cada um dos materiais foi seca em estufa a 110°C. Em seguida, uma porção de cada amostra seca foi levada a uma mufla a 1000°C por 2 horas para a determinação de perda ao fogo enquanto outra porção da mesma amostra seca foi prensada em cápsula de alumínio com 30 toneladas de força.

As pastilhas prensadas foram analisadas em espectrômetro de fluorescência de raios-X Rigaku modelo ZSX Primus II, equipado com tubo de Rh e 7 cristais analisadores. Os resultados foram recalculados para 100% para incorporar a perda ao fogo e foram expressos em % de massa.

3.1.1.4 Difração de raios-x

A difração de raios-x é uma técnica que viabiliza a avaliação da estrutura cristalina do material analisado com base no padrão de picos apresentado, o qual possui intensidades

distintas em determinados ângulos característicos (SCRIVENER; SNELLINGS; LOTHENBACK, 2016).

O padrão de difração de raios-x é característico de cada material e é influenciado por sua estrutura cristalina, tamanho do cristal, orientação, entre outras propriedades. Cada pico no padrão de difração corresponde a uma reflexão específica dos átomos no material e é identificado pelo ângulo de difração (2θ) e pela intensidade do pico (LANGFORD; WILSON, 1978).

As análises de difração de raios-x foram realizadas pelo método do pó no equipamento BRUKER D2 PHASER operando com voltagem de 30 kV e corrente de 10 mA ($P = 300$ W), radiação $\text{Cu-K}\alpha = 1,54060\text{\AA}$ e usando detector Bruker-AXS-Lynxeye. A faixa de varredura (2θ) foi de 4° a 80° , com passo do goniômetro de $0,02019^\circ$ e rotação constante da amostra de 10 RPM. A abertura da fenda primária foi de 0,4mm, anteparo (faca) de 3mm e o tempo de contagem por passo de 0,5 segundo. A indexação dos picos em cada difratograma foi realizada majoritariamente com base nos parâmetros fornecidos pelo programa Diffrac.Eva. Os códigos dos picos identificados no Diffrac.Eva podem ser visualizados no Apêndice A. Em alguns casos, quando o programa não sugeria um mineral condizente com o material que estava sendo analisado, os picos foram indexados com base na revisão de literatura.

3.1.1.5 Espectroscopia infravermelha

Para obtenção dos espectros vibracionais de absorção foi utilizado o espectrômetro por transformada de Fourier (FTIR), modelo Bruker Vertex70, pela técnica de refletância total atenuada (ATR), com o acessório Pike Miracle provido de um cristal de seleneto de zinco (ZnSe). Os espectros foram obtidos entre 4000 e 600 cm^{-1} , com resolução de 4 cm^{-1} e 32 varreduras.

3.1.1.6 Análise termodiferencial e termogravimetria

As técnicas de análise termodiferencial (ATD) e de termogravimetria (TG) consistem em análises térmicas que são utilizadas quando se deseja mensurar as transformações estruturais de um sólido quando submetido a uma variação controlada de temperatura em uma atmosfera específica (MACKENZIE, 1984; MATOS; MACHADO, 2004).

A ATD é a técnica mais utilizada no estudo da decomposição térmica. Ela consiste no registro da diferença de temperatura da amostra ao se variar a temperatura do sistema analisado

(amostra e a referência), no qual será possível definir picos endo e/ou exotérmicos decorrentes das reações ou transformações estruturais, como desidratação e oxidação. Por sua vez, a TG analisa as variações na massa da amostra durante o aquecimento controlado, ou quando mantida uma temperatura específica. Esta técnica permite analisar os intervalos de temperatura em que ocorrem as reações químicas, que acarretem em modificações na massa do material, como por exemplo desidratação, desidroxilação e oxidação. Através da técnica da TG, é possível avaliar a concentração de materiais em amostras com elevado grau de pureza (MACHADO; MATOS, 2004; BARROS, 2019).

Nesta pesquisa, as curvas ATD-TG foram obtidas simultaneamente utilizando o equipamento Shimadzu DTH 60, com taxa de aquecimento de 10 °C/min. A temperatura máxima estabelecida foi de 1050 °C. A atmosfera para a realização das análises foi de nitrogênio (N₂) com fluxo constante de 50ml/min. A alumina calcinada foi a amostra de referência empregada. O porta-amostra utilizado foi um cadinho de alumina de formato cilíndrico, com diâmetro de 5,0mm e altura de 2,5mm.

3.1.2 Materiais

3.1.2.1 Cal hidratada

A cal hidratada utilizada nesta pesquisa foi adquirida no comércio local na cidade de Recife-PE. A cal hidratada adquirida é P.A. que foi escolhida por possuir um elevado grau de pureza (> 95% de Ca(OH)₂) de modo a assegurar uma maior confiabilidade nos resultados obtidos.

Através dos ensaios de caracterização no estado anidro, a cal hidratada utilizada apresenta as seguintes características:

- Área superficial específica (finura Blaine) e massa específica

Tabela 21 - Área superficial (finura) e massa específica da cal hidratada.

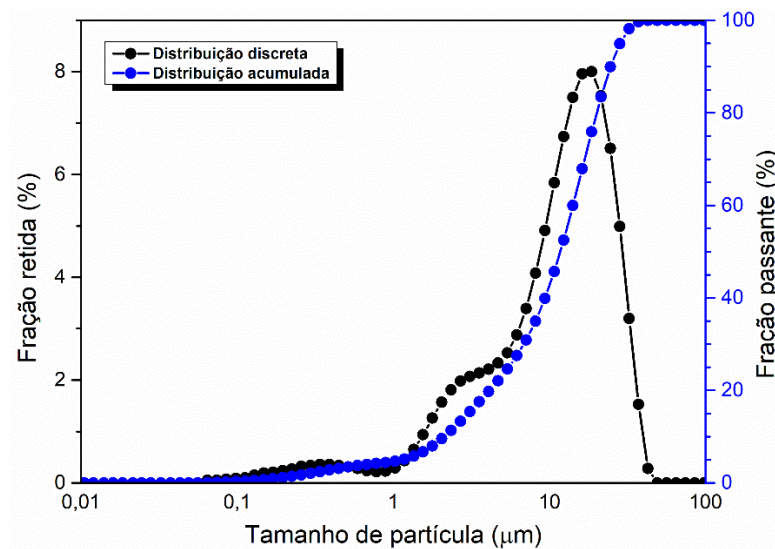
Material	Finura	Massa específica
Cal hidratada	1433,37 m ² /Kg	2,26g/cm ³

Fonte: O autor (2023).

- Granulometria à laser

O ensaio de granulometria mensurou o D10, D50 e D90 da amostra de cal hidratada e viabilizou a construção das curvas de distribuição discreta e acumulada do material (Figura 4). O D10, D50 e D90 foram 2,26 μm , 12,55 μm e 26,30 μm , respectivamente.

Figura 4 - Distribuição discreta e acumulada da cal.



Fonte: O autor (2023).

- Fluorescência de raios-x

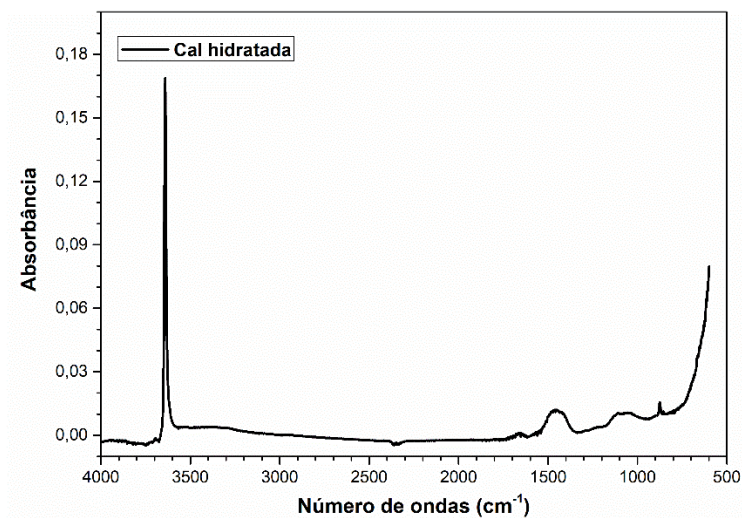
Tabela 22 - Composição química da cal hidratada com perda ao fogo (valores em %).

CaO	72,25
SiO₂	1,06
Al₂O₃	0,19
K₂O	0,27
P₂O₅	0,20
MgO	0,65
SrO	0,15
Fe₂O₃	0,10
TiO₂	0,04
MnO	0,01
SO₃	0,08
Perda ao fogo	25,00

Fonte: O autor (2023).

- Espectroscopia infravermelha

Figura 5 - Número de ondas x absorbância (cal hidratada).

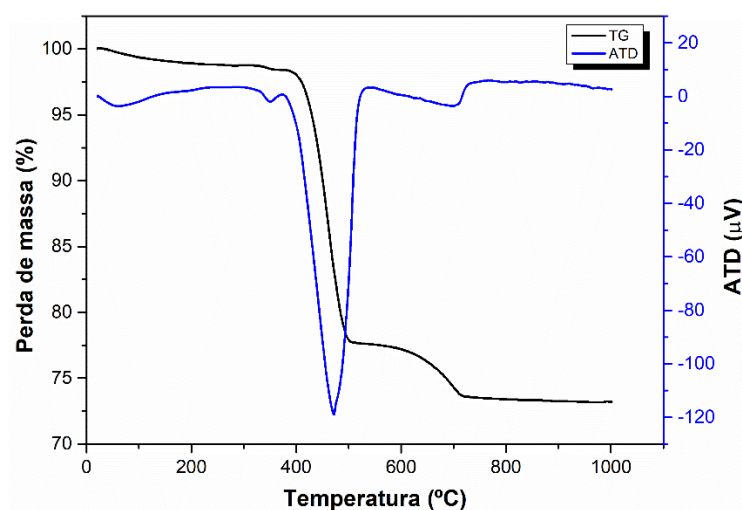


Fonte: O autor (2023).

Semelhantemente ao encontrado na pesquisa de Khachani *et al.*, (2014), as bandas identificadas através do ensaio foram: 3642cm^{-1} referente às ligações químicas entre O – H e as bandas de absorção em aproximadamente 1464 , 1080 e 873cm^{-1} são atribuídas a diferentes vibrações de grupos carbonáticos $\text{C} - \text{O} (\text{CO}_3^{2-})$.

- ATD-TG

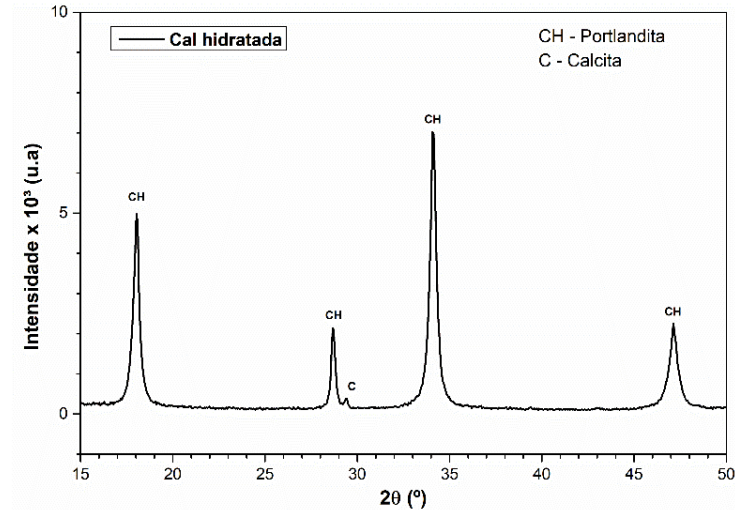
Figura 6 - ATD-TG (cal hidratada).



Fonte: O autor (2023).

- Difração de raios-x

Figura 7 - DRx (cal hidratada).



Fonte: O autor (2023).

3.1.2.2 Metacaulim

O metacaulim utilizado na presente pesquisa é um produto comercializado no Brasil. Os resultados da caracterização físico-química e mineralógica desse material são apresentados a seguir:

- Área superficial específica (finura Blaine) e massa específica

Tabela 23 - Área superficial (finura) e massa específica do metacaulim.

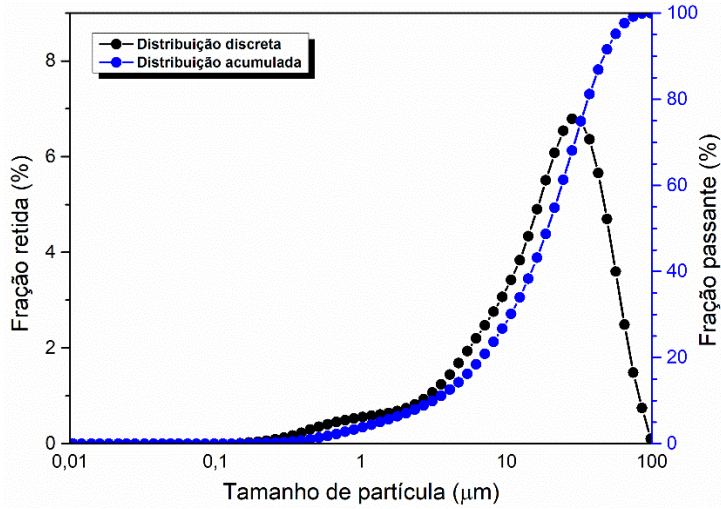
Material	Finura	Massa específica
Metacaulim	584,78 m²/Kg	2,67g/cm³

Fonte: O autor (2023).

- Granulometria a laser

O D10, D50 e D90 do metacaulim foram 3,35µm, 20,57µm e 49,92µm, respectivamente. As curvas de distribuição discreta e acumulada do material podem ser visualizadas na Figura 8.

Figura 8 - Distribuição discreta e acumulada do metacaulim.



Fonte: O autor (2023).

- Fluorescência de raios-x

Tabela 24 - Composição química do metacaulim com perda ao fogo (valores em %).

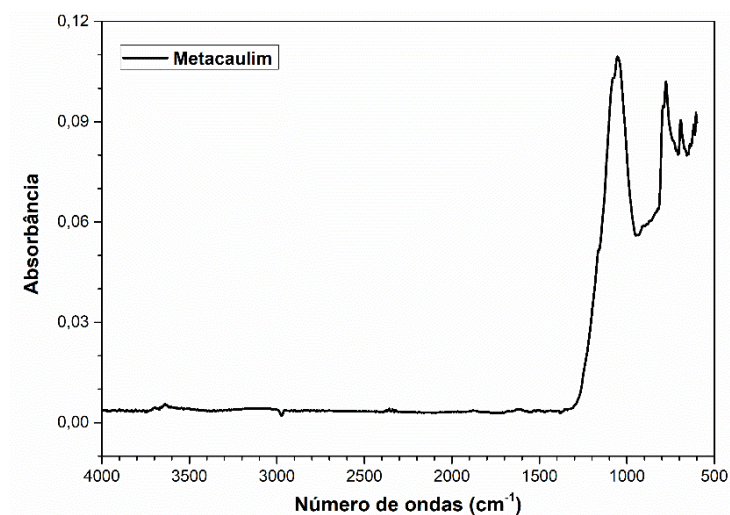
CaO	0,30
SiO₂	58,60
Al₂O₃	33,00
K₂O	1,60
MgO	0,10
Fe₂O₃	2,00
TiO₂	1,30
SO₃	0,10
Na₂O	0,20
Perda ao fogo	2,80

Fonte: O autor (2023).

Nota – FRx fornecida pelo fabricante.

- Espectroscopia infravermelha

Figura 9 - Número de ondas x absorbância (metacaulim).

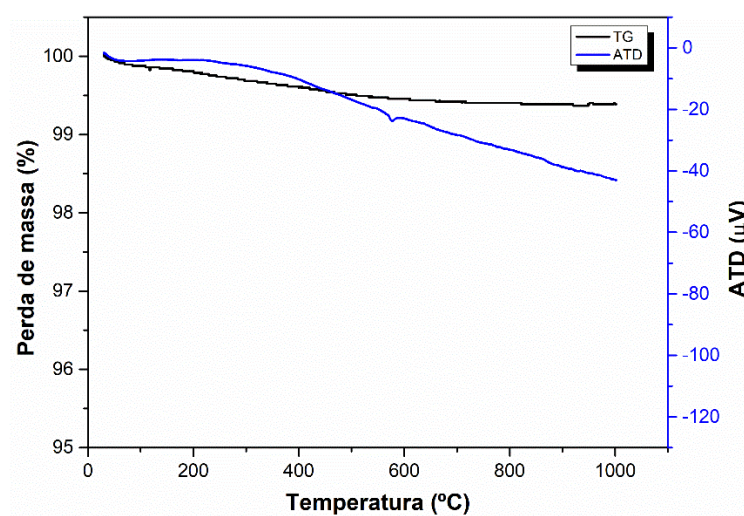


Fonte: O autor (2023).

No estado anidro não foi identificada nenhuma banda no infravermelho do metacaulim entre 4000 e 1300cm⁻¹. As principais bandas identificadas estão localizadas em ≈ 1040 cm⁻¹ referente a ligação Si-O e em ≈ 775 cm⁻¹ referente à ligação Al-O.

- ATD-TG

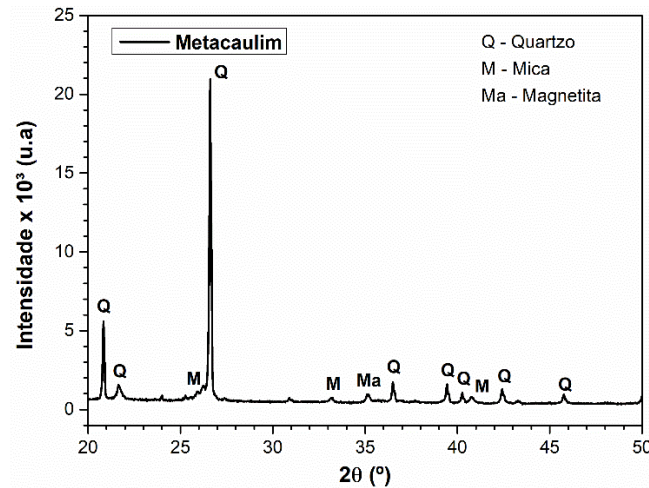
Figura 10 - ATD-TG (metacaulim).



Fonte: O autor (2023).

- Difração de raios-x

Figura 11 - DRx (metacaulim).



Fonte: O autor (2023).

3.1.2.3 Resíduo de construção e demolição

O resíduo de construção e demolição utilizado como adição mineral na presente pesquisa foi concedido pela empresa Ciclo Ambiental, a qual trabalha no tratamento do RCD e está localizada em Camaragibe-PE.

Por possuir uma granulometria incompatível para uso como adição mineral, tendo em vista que o resíduo de construção e demolição coletado na empresa Ciclo Ambiental não foi alvo de nenhuma triagem, foi necessária a realização da moagem do RCD de maneira que fossem empregadas nas misturas apenas as partículas passantes na peneira de 0,075mm.

A moagem do RCD foi realizada com base na metodologia desenvolvida pelo grupo de pesquisa de construção civil “*Estudo e Aplicação de Tecnologia de Materiais para o Desenvolvimento do Ambiente Construído*”, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da UFPE, que trabalha com RCD de maneira a se obter uma distribuição de tamanho de partículas adequada para seu uso e aplicação, em que considera o RCD como material híbrido, com propriedades pozolânicas e/ou inertes.

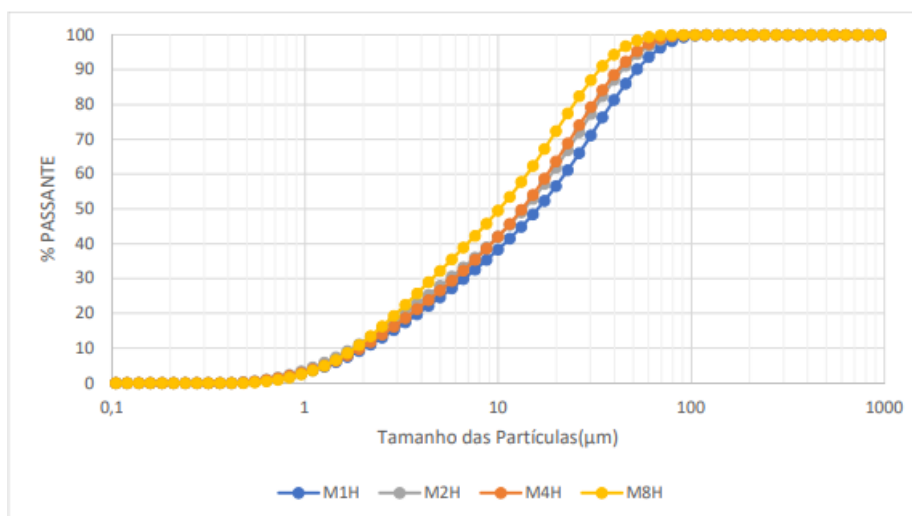
Esse procedimento tem como princípio não fazer a triagem do RCD, diferentemente do que é feito corriqueiramente nas pesquisas. Consequentemente, as partículas do resíduo de construção e demolição coletadas na usina contêm uma considerável variedade de natureza (alvenaria, cerâmica, vidro, agregados e ligantes no estado endurecido) e de dimensões.

Em laboratório, o resíduo de construção e demolição foi submetido a um tratamento inicial de tamanho das partículas, onde foi realizado o seu peneiramento, para submeter à moagem apenas as partículas de RCD passantes na peneira de 0,600mm.

Posteriormente, as partículas de RCD passantes na peneira de 0,600mm foram submetidas a moagem em um moinho de bolas pelo tempo de 2 horas. Este moinho possui volume de 15,9 litros e dimensões de 30x26cm, além de corpos moedores (esferas de porcelana) com 3 dimensões distintas: 55 esferas com 35mm de diâmetro; 139 esferas com 20mm de diâmetro; e 288 esferas com 13mm de diâmetro. Todas as partículas submetidas à moagem foram utilizadas, ou seja, não houve descarte após o procedimento.

A escolha do tempo de moagem levou em consideração o estudo de Góes (2019), o qual evidencia que a moagem do resíduo de construção e demolição, após tratamento inicial de tamanho de partículas, pelo tempo de 2 horas é o suficiente para se obter uma distribuição granulométrica onde aproximadamente 100% das partículas são passantes na peneira de 0,075mm, conforme pode ser visualizado na figura 12.

Figura 12 - Distribuição granulométrica acumulada do resíduo após moagem.



Fonte: Góes (2019).

O resultado da caracterização físico-química e mineralógica do resíduo de construção e demolição, após o procedimento de moagem, é apresentado a seguir:

- Área superficial específica (finura) e massa específica

Tabela 25 - Área superficial (finura) e massa específica do RCD.

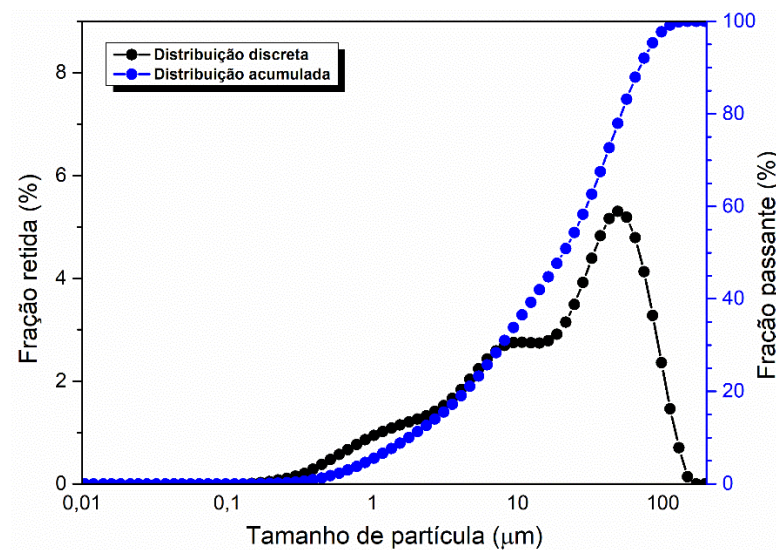
Material	Finura	Massa específica
Resíduo de Construção e demolição	568,69 m ² /Kg	2,59g/cm ³

Fonte: O autor (2023).

- Granulometria a laser

O D10, D50 e D90 do resíduo de construção e demolição após moagem foram 1,90µm, 22,09µm e 73,90µm, respectivamente. As curvas de distribuição discreta e acumulada do material podem ser visualizadas na figura 13.

Figura 13 - Distribuição discreta e acumulada do RCD.



Fonte: O autor (2023).

- Fluorescência de raios-x

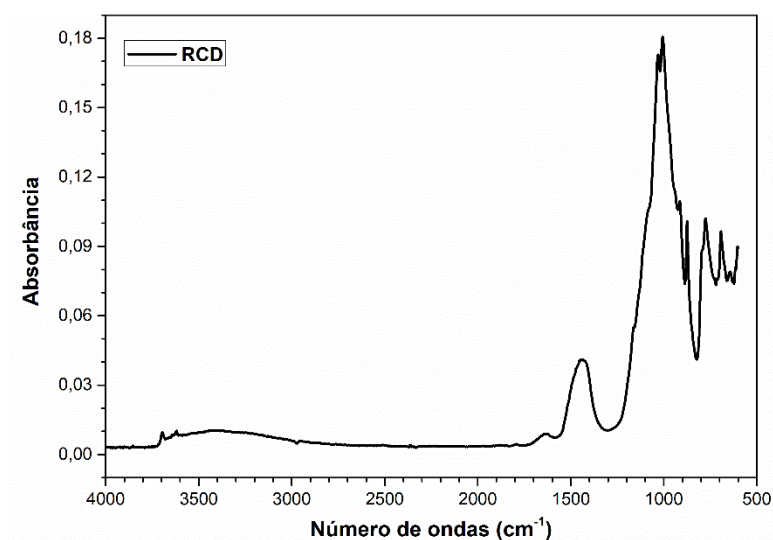
Tabela 26 - Composição química do RCD com perda ao fogo (valores em %).

CaO	9,10
SiO₂	64,27
Al₂O₃	7,69
K₂O	1,64
P₂O₅	0,62
MgO	0,74
SrO	0,03
Fe₂O₃	2,27
TiO₂	0,61
MnO	0,04
SO₃	0,69
Na₂O	0,50
Cr₂O₃	0,06
NiO	0,02
ZnO	0,01
Rb₂O	0,01
ZrO₂	0,08
BaO	0,09
Perda ao fogo	11,53

Fonte: O autor (2023).

- Espectroscopia infravermelha

Figura 14 - Número de ondas x absorvância (RCD).



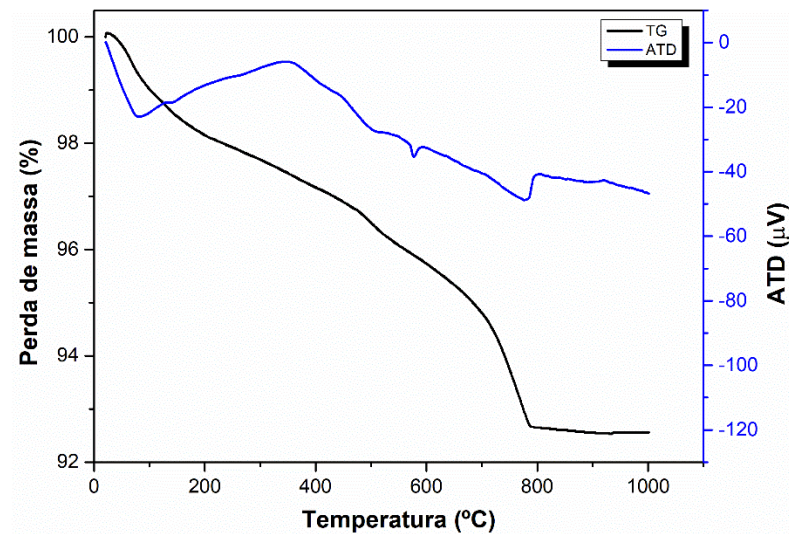
Fonte: O autor (2023).

De acordo com Cunha *et al.*, (2009), que também realizaram a espectroscopia de infravermelho em resíduos de construção e demolição de origem mista (híbrida), as bandas de

maior intensidade localizadas em ≈ 1027 e 1005 cm^{-1} estão relacionadas ao estiramento do SiO_2 e a banda em $\approx 778\text{ cm}^{-1}$ é característico de ligações químicas entre Al-O. Por sua vez, a banda localizada em $\approx 1410\text{ cm}^{-1}$ é associada à vibração de flexão do CO_3^{2-} (CRISTINO, 2021).

- ATD-TG

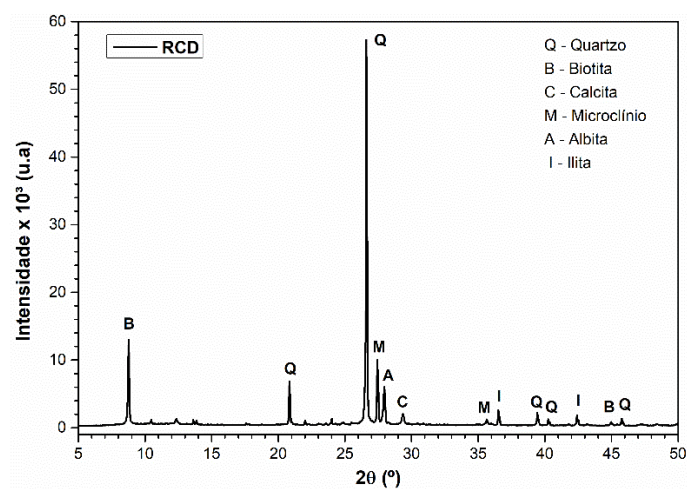
Figura 15 - ATD-TG (RCD).



Fonte: O autor (2023).

- Difração de raios-x

Figura 16 - DRx (RCD).



Fonte: O autor (2023).

3.2 ESTUDO PILOTO

Para a definição das proporções a serem utilizadas na confecção das pastas de Cal-Metacaulim-RCD foi realizado um estudo prévio na revisão de literatura com vistas a verificar a faixa de emprego de cada um desses componentes utilizados em outras combinações existentes na literatura, tendo em vista que não foi encontrado um estudo onde foi empregada essa combinação específica. A síntese desse estudo encontra-se descrita no item 2.5 desta dissertação.

Após a realização desse estudo e com o objetivo de definir qual seria a relação água/ligante que possibilitaria a maior inserção de resíduo de construção e demolição na mistura, foram realizados experimentos que tomaram por base o método do minicone de Kantro (1980), também conhecido como *mini-slump*. Esse experimento possibilita a obtenção do espalhamento de pastas, cujo raio (em cm) é um dado que possui relação com a tensão de escoamento que é uma propriedade reológica do material (RAUCCI; CECCEL; ROMANO; PILEGGI; JOHN, 2018).

Consequentemente, os estudos com o *mini-slump*, os quais são apresentados em 3.2.1 e 3.2.2, contribuíram com a delimitação de qual relação água/ligante e quais proporções de cada material seriam utilizados na produção das pastas nesta pesquisa.

3.2.1 Testes com o *mini-slump* (misturas e método)

Diante dos resultados de estudos apresentados ao longo da revisão de literatura desta pesquisa, além de outros trabalhos, foi definido que a mistura de referência (cal com metacaulim) seria a que mantém a proporção em massa entre ambos os materiais em 1:1 (SERRY *et al.*, 1984; BAKOLAS *et al.*, 2006; PAPAYIANNY & STEFANIDOU, 2006; GAMEIRO *et al.*, 2012; AZÊREDO, 2012; AZERÊDO; STRUBLE; e CARNEIRO, 2015; SALES, 2022).

Tendo em vista a inexistência de estudos que visem adicionar o RCD em misturas de cal com o metacaulim, foi definido que esta avaliação exploratória através do *mini-slump* seria realizada com a substituição em massa de cal com metacaulim por RCD de 10 em 10% até o limite de 50% de substituição em massa (SIQUEIRA JÚNIOR; NÓBREGA; CARNEIRO, 2022).

A relação água/ligante das misturas possuiu 4 variações: 0,8; 0,9; 1,0 e 1,1. Foi utilizada água deionizada para a realização de todas as misturas, de maneira a evitar que outros

compostos fossem formados durante a hidratação do material anidro por influência de íons presentes na água. A temperatura ambiente era de $27^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ e a UR $\approx 75\%$. No total, 24 misturas foram realizadas (Tabela 27).

Tabela 27 - Misturas realizadas (substituição em massa).

Água/Ligante		Misturas				
0,8	Referência	10% RCD	20% RCD	30% RCD	40% RCD	50% RCD
0,9	Referência	10% RCD	20% RCD	30% RCD	40% RCD	50% RCD
1,0	Referência	10% RCD	20% RCD	30% RCD	40% RCD	50% RCD
1,1	Referência	10% RCD	20% RCD	30% RCD	40% RCD	50% RCD

Fonte: O autor (2023).

Antes da realização das misturas, foi realizada a homogeneização de cada uma das proporções estipuladas em um equipamento denominado misturador Y (Figura 17) pelo tempo de 10 minutos, o qual possui velocidade de rotação de 50 rpm.

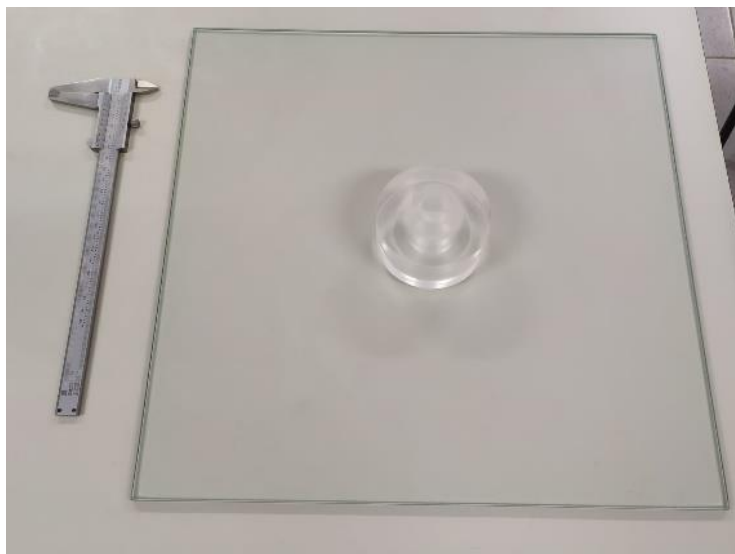
Figura 17 - Misturador Y.



Fonte: O autor (2023).

Para a realização da medição dos espalhamentos foi utilizado o método do minicone de Kantro (1980), também conhecido como *mini-slump* (Figura 18). Ele foi apoiado sobre uma placa de vidro e as medições foram realizadas com um paquímetro após o levantamento do minicone.

Figura 18 - Minicone, paquímetro e placa de vidro.



Fonte: O autor (2023).

Conforme França *et al.*, (2019), uma das etapas de produção de argamassas é o processo de mistura que impacta diretamente o comportamento reológico do material, assim como em propriedades mecânicas no estado endurecido. Consequentemente, com vistas a padronizar esse experimento, o procedimento de preparação das amostras, das misturas e dos ensaios tomou por base o descrito por Aïtcin (2000) onde foram realizadas algumas adaptações tendo em vista que o ligante testado foi a mistura Cal-Metacaulim ou Cal-Metacaulim-RCD.

Em síntese, o procedimento adotado para a preparação das misturas foi o seguinte: 1 – Pesagem de 200 gramas do ligante; 2 – Pesagem da água deionizada utilizando um béquer 250 ml (razões água/ligante de 0,8; 0,9; 1,0 e 1,1); 3 – a placa de vidro foi posicionada sobre uma mesa com nível cuidadosamente verificado e com o minicone posicionado no centro da placa; 4 - Mistura manual, com o auxílio de uma espátula, do ligante com a água, pelo tempo cronometrado de 1 minuto; 5 – Mistura da pasta pelo tempo de 2 minutos em um misturador mecânico RW 20, IKA, com hélice naval de 50 mm (Figura 19) com velocidade de rotação de 1600 rpm; 6 - logo após a mistura no mixer, foi realizada uma mistura manual pelo tempo de 15 segundos.

Figura 19 - Misturador mecânico.



Fonte: O autor (2023).

Por sua vez, o procedimento realizado para o ensaio foi o seguinte: 1 – Imediatamente após as misturas realizadas, o minicone foi preenchido com a pasta e em seguida foi rasado com o auxílio de uma espátula; 2 – dez batidas foram dadas no topo do minicone antes de levantá-lo rapidamente, com a finalidade de melhorar o adensamento; 3 – após o levantamento do minicone, dois diâmetros foram medidos, com o auxílio de um paquímetro, em direções perpendiculares e a média desses valores foi calculada para se obter o valor do espalhamento; 4 – a placa de vidro e o minicone foram limpos com água, enxutos e posicionados para o ensaio seguinte.

3.2.2 Testes com o *mini-slump* (resultados)

Os resultados dos espalhamentos obtidos através do ensaio de *mini-slump* no presente estudo para as misturas de referência, 100 gramas de cal hidratada e 100 gramas de metacaulim, e das demais misturas com a substituição de 20, 40, 60, 80 e 100 gramas de cal-metacaulim por RCD correspondendo a 10, 20, 30, 40 e 50% de substituição, respectivamente, para as 4 relações água/ligante empregadas, foram compiladas na tabela 28.

Tabela 28 – Espalhamentos obtidos.

Água/Ligante		Espalhamentos (em milímetros)				
-	REF	10% RCD	20% RCD	30% RCD	40% RCD	50% RCD
0,8	58,43	68,43	83,49	95,93	117,26	137,34
0,9	79,75	99,91	114,92	130,58	143,56	159,50
1,0	97,15	121,54	141,54	153,33	172,78	178,10
1,1	126,48	147,92	157,81	171,72	185,67	187,11

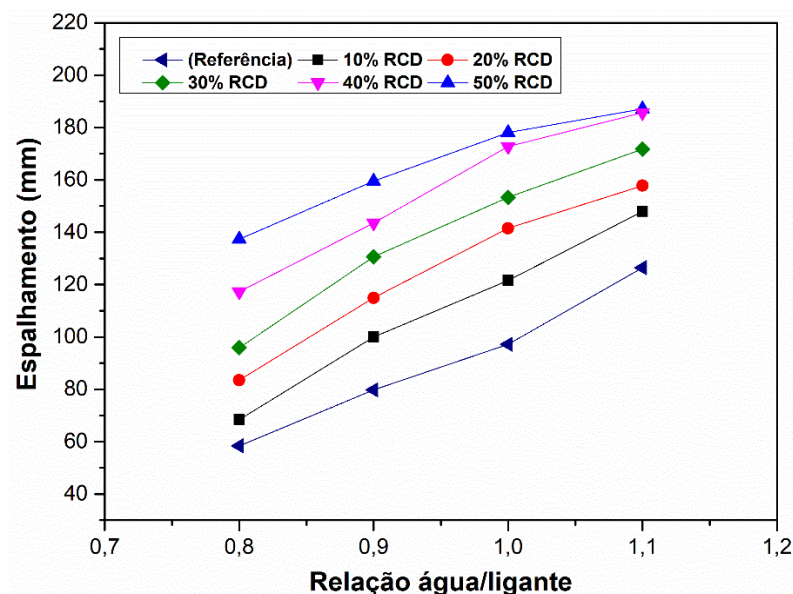
Fonte: O autor (2023).

Da análise da tabela 28, é possível identificar que quanto maior o nível de substituição de cal-metacaulim por RCD, maior se torna o espalhamento obtido. Esse espalhamento foi potencializado com o aumento da razão água/ligante empregada na mistura, o qual atingiu a média de 187,11mm na mistura com 50% de substituição por RCD e água/ligante de 1,1.

Diante disso, pode-se observar que há uma tendência de que o RCD possua menor absorção de água que o sistema cal-metacaulim, o que provavelmente ocorre pelos seguintes motivos: a cada incremento de 10% de RCD, é reduzido em 5% do teor de cal hidratada da mistura, sendo ela o material que possui maior área superficial específica, o que acarreta em um aumento da fluidez da mistura; o incremento de RCD diminui gradativamente o teor de cal-metacaulim da mistura, o que pode reduzir reações pozolânicas iniciais que consomem água; o RCD pode não possuir a mesma reatividade da cal-metacaulim quando em contato com a água. Esses motivos isolados ou combinados podem ser a justificativa para o aumento da fluidez e consequente redução da viscosidade das pastas, sendo necessárias maiores investigações para ratificá-los.

A figura 20 apresenta a curva de espalhamento de cada percentual de substituição de cal-metacaulim por RCD, incluindo as misturas de referência, em função da relação água/ligante empregada.

Figura 20 - Plasticidade das misturas em função da relação água/ligante.



Fonte: O autor (2023).

De acordo com Rago e Cincotto (1999), por ser um material com elevada área superficial específica, a cal hidratada exige uma demanda de água superior ao metacaulim e ao RCD. Quando combinada unicamente com o metacaulim, essa demanda de água diminui. Tomando por base as pesquisas de Bakolas (2006), Azêredo (2012) e Sales (2022) que utilizaram a relação água/ligante de 1,0, quando foram confeccionadas misturas de cal com metacaulim, e analisando a Tabela 28 e a Figura 20, é possível identificar que os espalhamentos das misturas contendo 30% de RCD na relação água/ligante de 0,8 (95,93 mm) e a mistura com 10% de RCD na relação água/ligante de 0,9 (99,91 mm) não apresentam discrepância superior a 3% quando comparados individualmente com o espalhamento obtido pela mistura de referência com relação água/ligante de 1,0 que foi de 97,15 mm. Ou seja, as tensões de escoamento desses materiais, levando em consideração esse parâmetro, aparentam ser semelhantes.

Por viabilizar uma maior incorporação de RCD, o emprego da razão água/ligante de 0,8 apresenta-se como o mais promissor nessas misturas ternárias, tendo em vista que mesmo a substituição de 30% em massa de cal com metacaulim por RCD propiciou praticamente a mesma consistência da mistura de referência com a utilização de água/ligante de 1,0. Portanto, com base nesse critério, as misturas com razão água/ligante de 0,8 com um teor de substituição de até 30% de RCD foram escolhidas para a realização desta pesquisa (Tabela 29).

Tabela 29 - Misturas escolhidas.

Água/Ligante	Misturas			
0,8	Referência	10% RCD	20% RCD	30% RCD

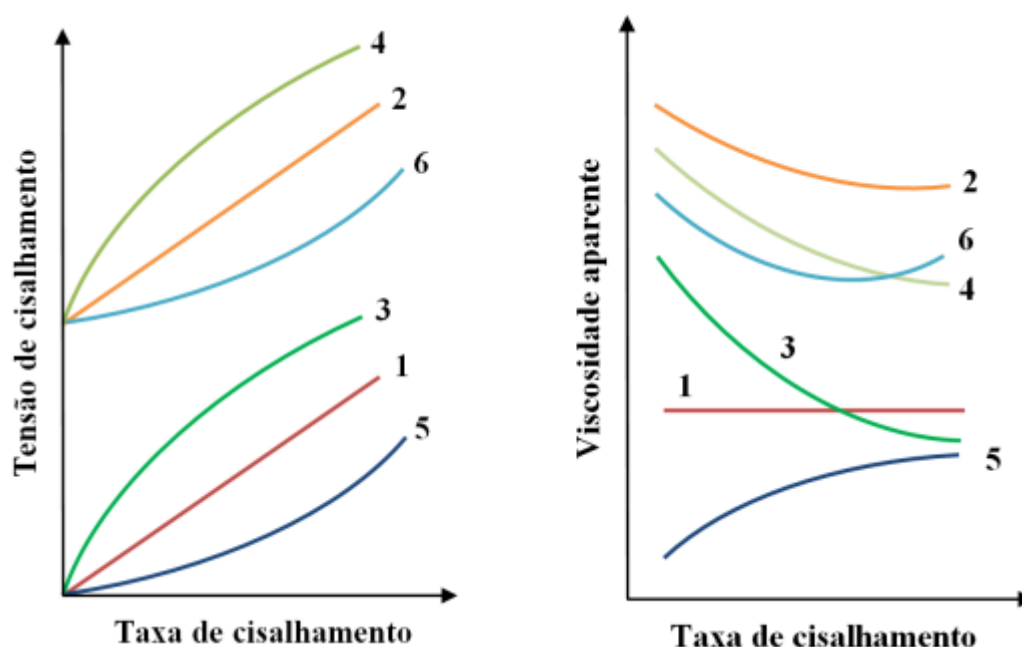
Fonte: O autor (2023).

3.3 CARACTERIZAÇÃO DAS PASTAS

3.3.1 Estado Fresco

De acordo com Romano, Cardoso e Pileggi (2011), a reologia é a ciência da deformação e do fluxo da matéria que tem como grandezas fundamentais a viscosidade e a tensão de escoamento. A viscosidade consiste em uma taxa de deformação na qual um fluido escoar quando submetido a uma tensão de cisalhamento. Por sua vez, a tensão de escoamento é representada pela tensão de cisalhamento mínima necessária para que o fluido comece a escoar. A figura 21 apresenta algumas possibilidades de comportamentos reológicos para distintos materiais.

Figura 21 - Tipos de comportamentos reológicos dos fluídos.



Fonte: Romano, Cardoso e Pileggi (2011, Apud Sales, 2022).

Nota: 1 – newtoniano; 2 – binghamiano; 3 – pseudoplástico; 4 – pseudoplástico com tensão de escoamento; 5 – dilatante; 6 – dilatante com tensão de escoamento.

Com o objetivo de realizar a identificação das propriedades reológicas de cada pasta no estado fresco, as misturas foram avaliadas por meio do ensaio de reometria rotacional em um reômetro Discovery HR-1 hybrid serial, equipado com geometria de placas paralelas (com $\phi = 25\text{mm}$) e gap de 1mm (Figura 22). De modo a minimizar o efeito de deslizamento da amostra, foi inserido um adesivo texturizado na superfície das placas. Após cada análise, esse adesivo era trocado. Foram realizados ensaios de teste de fluxo, de maneira semelhante ao realizado por Sales (2022) que se baseou na revisão bibliográfica de Betioli *et al.* (2009).

Figura 22 - Reômetro Discovery HR-1 hybrid serial.



Fonte: O autor (2023).

Para determinar as propriedades de viscosidade e tensão de escoamento durante o teste de fluxo, as medidas foram realizadas tomando por base o método de rampa, sugerido por Betioli *et al.* (2009), que se trata do ciclo de histerese de aceleração da taxa de cisalhamento de 0s^{-1} a 100s^{-1} por 1 minuto e desaceleração de 100s^{-1} até 0s^{-1} por mais 1 minuto, totalizando 2 minutos por amostra (SALES, 2022).

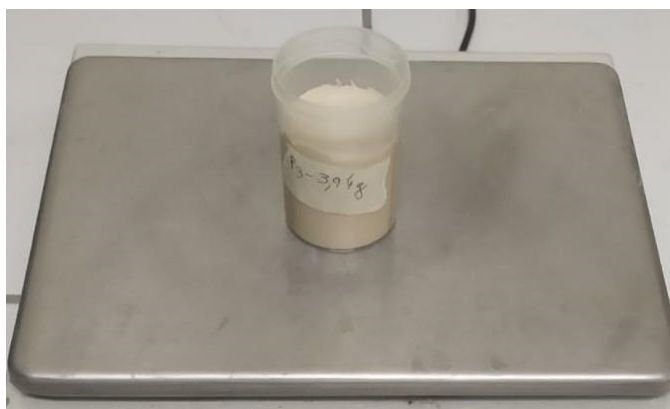
3.3.2 Estado endurecido

A caracterização das pastas no estado endurecido foi realizada em quatro idades distintas: 14, 28, 56 e 90 dias. Os ensaios de caracterização realizados foram a difração de raios

X, a ATD-TG, a espectroscopia infravermelha, além de resistência à compressão e variação de massa (essas duas últimas em argamassas).

A mistura das pastas seguiu o mesmo procedimento indicado em 3.2.1 (testes com o *mini-slump*) onde a A/L empregada foi de 0,8 em todas as 4 misturas. Foram moldados 4 corpos de prova (CPs) de cada proporção em potes cilíndricos de acrílico com capacidade de 50 ml (Figura 23), totalizando 16 CPs (4 por idade).

Figura 23 - Pote acrílico utilizado para moldagem de pastas.



Fonte: O autor (2023).

As reações pozolânicas foram interrompidas nas quatro idades supracitadas através do procedimento de imersão em nitrogênio líquido cujo objetivo é o congelamento instantâneo da água. O tempo em que cada amostra ficou imersa no nitrogênio foi cinco minutos (SCRIVENER; SNELLINGS; LOTHENBACH, 2016).

Na sequência, as amostras foram quebradas em pedaços menores que foram acondicionados em novos recipientes acrílicos e foram submetidos ao processo de liofilização em um liofilizador modelo L101 da Liotop (Figura 24). Na liofilização, as amostras foram submetidas a uma temperatura abaixo de -50°C e uma pressão de alto vácuo (inferior a 500 μHg), seguido por um aumento gradual de temperatura durante o período de 24 horas. A liofilização viabiliza a secagem da amostra de modo que a água presente na mistura, que foi submetida ao resfriamento brusco, passe diretamente do estado sólido para o estado gasoso, através do processo de sublimação que resulta em uma amostra sem água livre, o que assegura a interrupção da hidratação e uniformiza o grau de hidratação de todas as amostras (DE ARAÚJO, 2022).

Figura 24 - Liofilizador L101 da Liotop.



Fonte: O autor (2023).

Após as 24 horas de liofilização, as amostras passaram por um processo de moagem em um moinho planetário pelo tempo de 30 segundos, onde as partículas passantes na peneira de abertura de malha 75 μm foram acondicionadas em eppendorfs que foram armazenados no dessecador até o dia em que foram enviadas para a realização dos ensaios de caracterização.

3.4 ÍNDICE DE ATIVIDADE POZOLÂNICA COM CAL

A avaliação do índice de atividade pozolânica é um método indireto cuja propriedade física avaliada é a resistência à compressão. A metodologia utilizada nesta pesquisa foi o índice de atividade pozolânica com cal hidratada preconizada pela NBR 5751 (ABNT, 2015).

Ao todo foram realizadas quatro avaliações, sendo uma do metacaulim e as outras três de misturas entre o metacaulim e o resíduo de construção e demolição. Não foi inserida a cal hidratada nessas misturas devido ao fato de o ensaio de atividade pozolânica com cal já prever uma quantidade de cal a ser misturada. Consequentemente, o objetivo foi observar se tanto o metacaulim isoladamente quanto as misturas com diferentes teores de RCD atendiam aos requisitos da NBR supracitada.

Vale destacar que a única adaptação realizada em relação ao que preconiza a NBR 5751 (ABNT, 2015) no ensaio para aferição do índice de atividade pozolânica com cal aos 7 dias foi quanto à flexibilização do espalhamento das misturas que sempre foram maiores que os previstos na norma. Essa medida foi adotada, tendo em vista que para se padronizar a fluidez

seria necessária a utilização de aditivo e o intuito desta pesquisa era avaliar a pozolanicidade das misturas com a relação água/ligante 0,8. Maiores detalhes acerca desse ensaio podem ser visualizados no Apêndice B.

3.5 VARIAÇÃO DE MASSA (ARGAMASSAS)

O ensaio de variação de massa foi realizado com o intuito de se aferir o(a) ganho/perda de massa das argamassas com o passar dos dias até a idade de 90 dias. Para isso, foram realizadas as quatro misturas de argamassas de modo idêntico ao realizado para a aferição da resistência à compressão.

Após cada mistura, 6 corpos de prova de 260 g foram moldados em recipientes descartáveis (Figura 25). Tal medida foi necessária para que após os sete dias iniciais os CPs pudessem ser desmoldados sem que houvesse uma perda de massa significativa durante esse procedimento.

Figura 25 - Argamassas moldadas em recipientes descartáveis.



Fonte: O autor (2023).

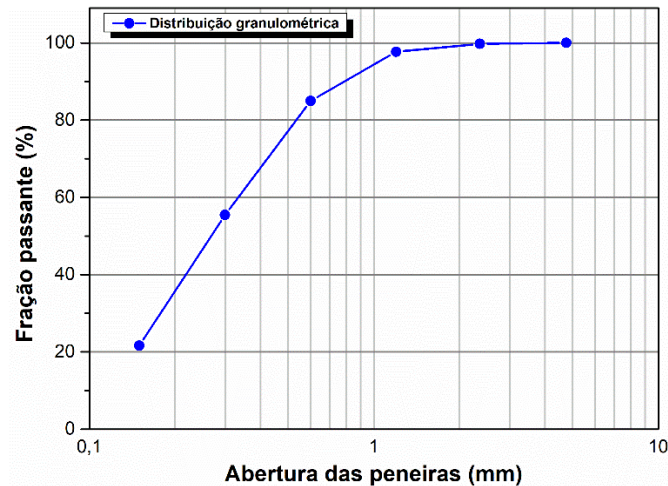
Até a desmoldagem que ocorreu no 7º dia, a massa das argamassas foi pesada diariamente. Do sétimo ao 29º dia, as argamassas foram pesadas a cada 2 dias. Do 29º ao 56º a pesagem ocorreu de 3 em 3 dias e do 56º ao 90º dia o intervalo de tempo entre as pesagens foi de 7 em 7 dias.

3.6 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (ARGAMASSAS)

Para mensurar o desempenho mecânico das pastas, nas idades de 14, 28, 56 e 90 dias, foram produzidas argamassas com traço ligante:agregado de 1:3 em massa. Nas misturas, foi

mantida a relação água/ligante de 0,8 que resultou em uma relação água/materiais secos de 0,2. A areia escolhida para a realização das misturas foi a Caxitu com módulo de finura 1,41 (areia fina) e cuja curva de distribuição granulométrica pode ser visualizada na Figura 26.

Figura 26 – Curva de distribuição granulométrica da areia Caxitu.



Fonte: O autor (2023).

O procedimento de mistura das argamassas foi o descrito na NBR 16541 (ABNT, 2016). Após a realização de cada mistura, foram moldados 3 corpos de prova (CPs) cilíndricos (5x10cm) para cada uma das proporções e para cada idade analisada. A desmoldagem desses CPs foi realizada após 7 dias de cura ao ar em ambiente fechado, onde permaneceram até os dias de realização do ensaio de resistência à compressão que foi realizado na prensa elétrica do tipo AGV-X Shimadzu com capacidade para 300kN, seguindo o procedimento descrito na NBR 7215 (ABNT, 2019). Um maior detalhamento desse ensaio pode ser visualizado no Apêndice C.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos com os ensaios discriminados no capítulo anterior, além de discussões com base na comparação desses resultados entre si e com os obtidos em outras pesquisas.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS (ESTADO ANIDRO)

Os ensaios de caracterização das misturas no estado anidro foram os mesmos citados no item 3.1.1 desta dissertação, com exceção da área superficial específica. Os resultados podem ser visualizados nas tabelas e gráficos a seguir.

- Massa específica das misturas.

Tabela 30 - Massa específica das misturas.

Mistura	Massa específica
Referência	2,45g/cm ³
10% RCD	2,45g/cm ³
20% RCD	2,47g/cm ³
30% RCD	2,49g/cm ³

Fonte: O autor (2023).

- Granulometria à laser

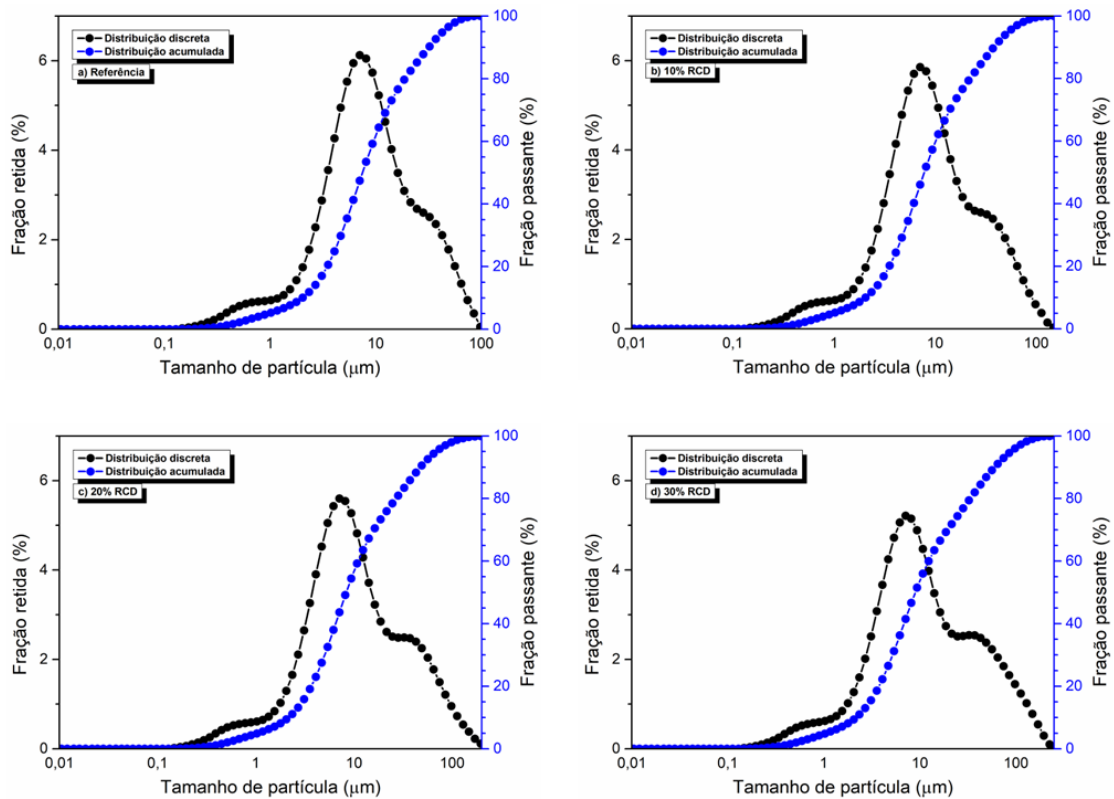
O D10, D50 e D90 de cada mistura no estado anidro foram compilados na tabela 31. As curvas de distribuição discreta e acumulada de cada mistura podem ser visualizadas na Figura 27.

Tabela 31 - D10, D50 e D90 de cada mistura.

Mistura	D10 (em µm)	D50 (em µm)	D90 (em µm)
Referência	2,17	8,04	34,11
10% RCD	2,20	8,34	40,76
20% RCD	2,30	8,90	50,81
30% RCD	2,32	9,57	64,28

Fonte: O autor (2023).

Figura 27 - Distribuição discreta e acumulada das misturas.



Fonte: O autor (2023).

- Fluorescência de raios-x

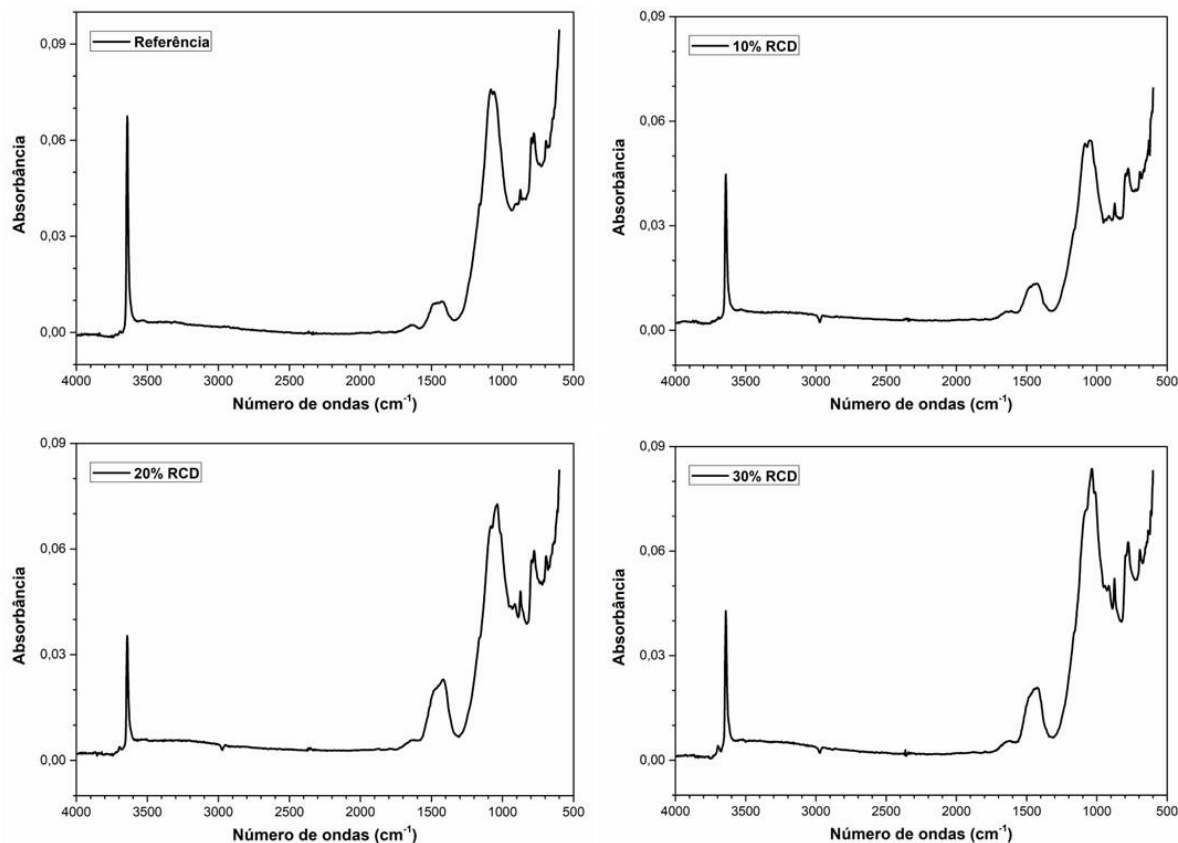
Tabela 32 – Composição química das misturas com perda ao fogo (valores em %).

Principais óxidos	Referência	10% RCD	20% RCD	30% RCD
CaO	50,35	45,70	42,21	40,36
SiO ₂	23,31	27,43	29,80	31,32
Al ₂ O ₃	10,26	10,87	10,86	10,23
K ₂ O	0,28	0,40	0,50	0,65
P ₂ O ₅	0,35	0,36	0,38	0,43
MgO	0,65	0,57	0,70	0,66
SrO	0,11	0,10	0,09	0,08
Fe ₂ O ₃	1,53	1,66	1,69	1,90
TiO ₂	1,18	1,17	0,92	1,02
MnO	-	0,01	0,02	-
SO ₃	0,04	0,09	0,15	0,22
ZrO ₂	0,04	0,04	0,04	0,04
Outros	0,04	0,12	0,51	0,61
Perda ao fogo	11,86	11,48	12,13	12,48

Fonte: O autor (2023).

- Espectroscopia infravermelha

Figura 28 - Número de ondas x absorvância (misturas).

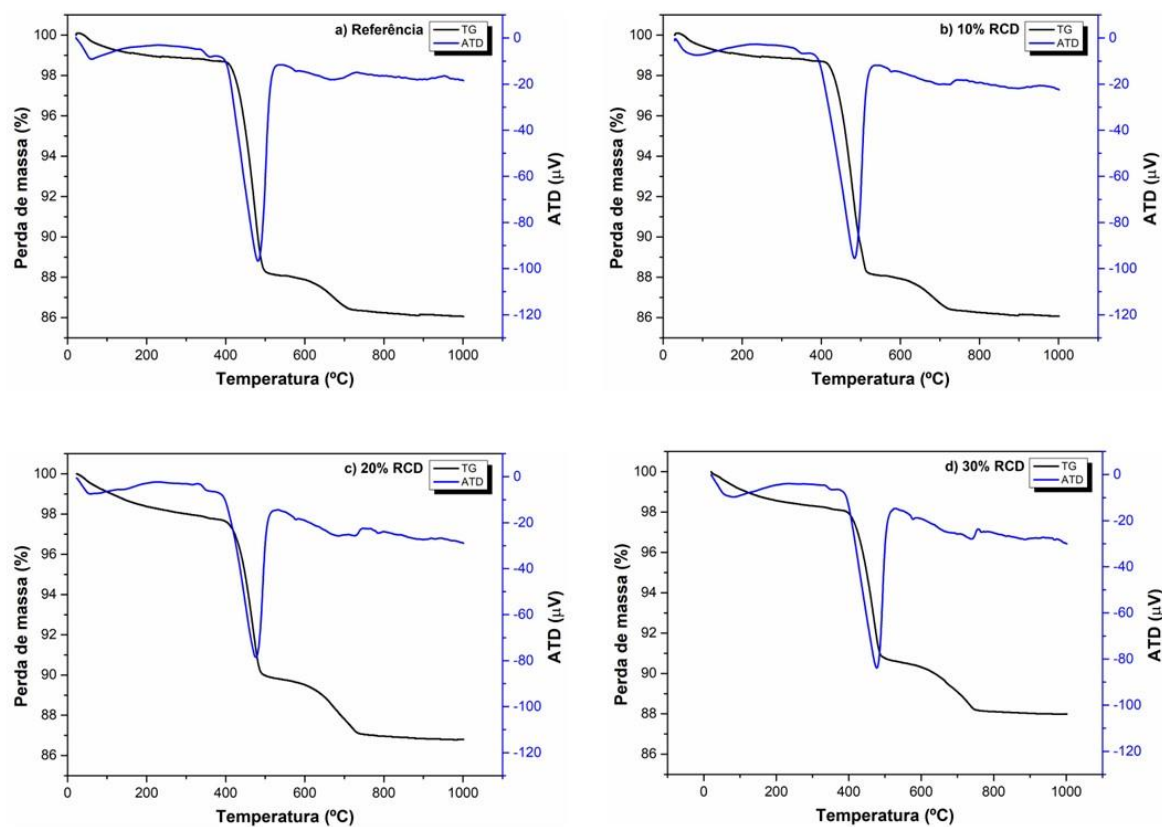


Fonte: O autor (2023).

As bandas apresentadas por cada uma das misturas são resultantes da junção, dentro das devidas proporções, das ligações químicas apresentadas quando foram comentados os resultados da espectroscopia de infravermelho de cada material no capítulo 3 (Figuras 5, 9 e 14). Resumidamente, tem-se o seguinte: a banda localizada em $\approx 3642\text{cm}^{-1}$ se refere às ligações químicas entre O – H; as bandas de absorção em aproximadamente 1464, 1410, 1080 e 873cm^{-1} são atribuídas a diferentes vibrações de grupos carbonáticos C – O (CO_3^{2-}); as bandas de maior intensidade localizadas em ≈ 1040 , 1027 e 1005 cm^{-1} são referentes à ligação Si-O e a banda em $\approx 775\text{ cm}^{-1}$ se refere à ligação Al-O.

- ATD-TG

Figura 29 - ATD-TG (misturas).



Fonte: O autor (2023).

Tabela 33 – Perda de massa (%) por faixa de temperatura no estado anidro.

AMOSTRA	100 – 250°C	390 – 550°C	550 – 840°C
REFERÊNCIA	0,44	10,62	1,91
10% RCD	0,64	9,63	1,78
20% RCD	0,93	7,95	2,85
30% RCD	0,72	7,50	2,46

Fonte: O autor (2023).

Os resultados da análise termodiferencial evidenciam que a maioria das reações químicas ocorridas ao longo do experimento foram endotérmicas. Dentre essas reações, para fins comparativos, todas as figuras apresentaram resultados que foram diferindo aos poucos à medida que o RCD era adicionado. Ao se observar a mistura de referência e a contendo 10%

de RCD, é possível constatar que a perda de massa e a quantidade de energia absorvida para o desencadeamento das reações químicas devido ao aquecimento de ambas as misturas são muito semelhantes. Essa menor discrepância entre elas pode ser um indicativo de compatibilidade das pastas oriundas desses materiais.

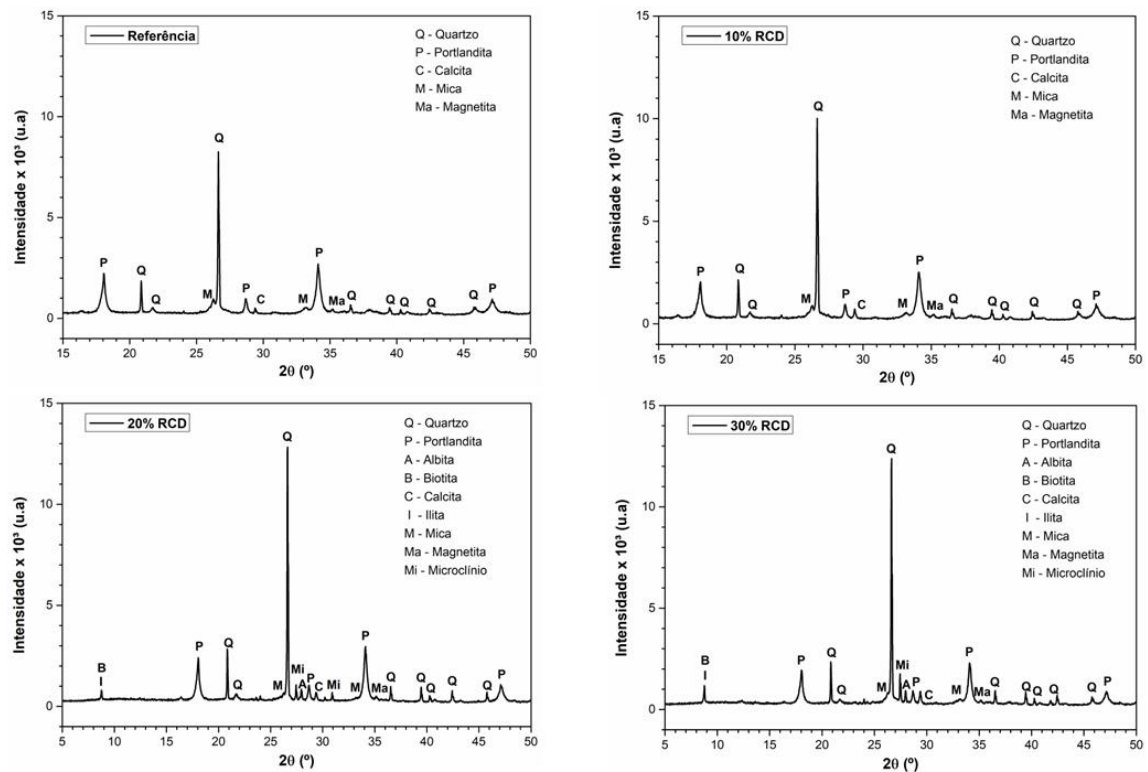
Por sua vez, as misturas com 20 e 30% de RCD também apresentam picos endotérmicos e de perda de massa semelhantes em posição quando comparados com as outras duas misturas. Contudo, a intensidade de alguns deles foi maior ou menor em alguns pontos, destoando consideravelmente da mistura de referência. Por exemplo, logo após a ocorrência da perda de massa referente à água adsorvida (100°C), ocorre uma estabilidade nas curvas que indicam a perda de massa nas amostras de referência e com 10% de RCD, enquanto as curvas de 20 e 30% mantêm uma inclinação maior até o início da perda de massa referente a desidroxilação da cal hidratada que ocorre entre 390 e 550°C (AZERÊDO; STRUBLE; CARNEIRO, 2015).

Tendo em vista que conforme se aumenta a inserção do RCD, menor se torna a quantidade de cal hidratada na mistura, é natural que a perda de massa referente à desidroxilação da cal seja reduzida, o que é mais acentuado em 20 e 30% de RCD, exigindo uma menor absorção de energia para a ocorrência da reação química. Naturalmente, quanto maior a inserção de RCD na mistura, mais semelhante o resultado da ATD/TG se aproxima do apresentado para o RCD (Figura 15). Por sua vez, a partir de $\approx 500^\circ\text{C}$ observa-se a perda de massa em todas as amostras referente à descarbonatação do carbonato de cálcio, a qual é maior em 20 e 30% RCD.

- Difração de raios-x

A figura 30 apresenta os difratogramas obtidos através do ensaio de DRx em cada uma das quatro misturas. Assim como na ATD/TG, o padrão apresentado pelo difratograma da mistura contendo 10% de RCD não diferiu significativamente da mistura de referência. Por sua vez, as misturas contendo 20 e 30% RCD apresentaram difratogramas contendo alguns minerais distintos dos apresentados nas outras duas misturas, o que é um indicativo de que no longo prazo o comportamento desses materiais será distinto.

Figura 30 - DRx (misturas).



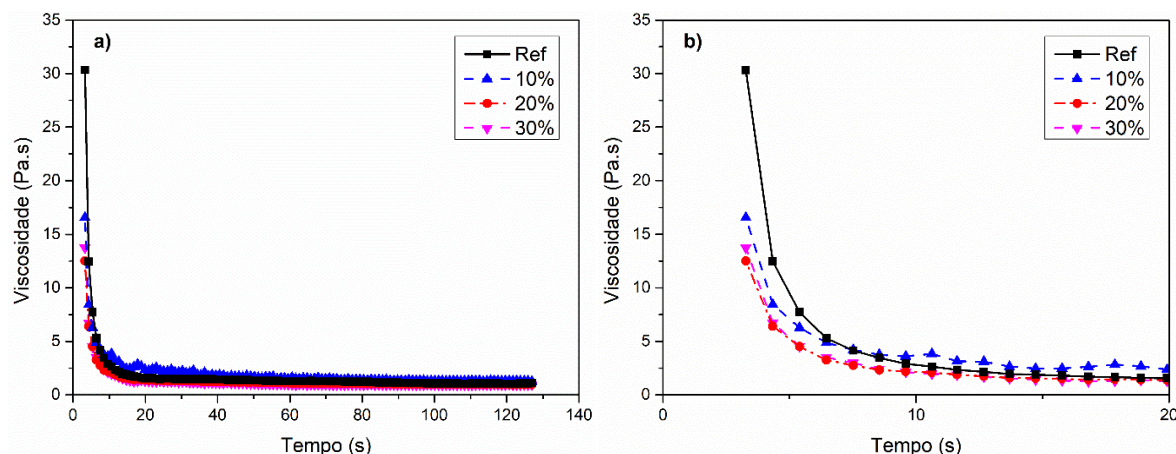
Fonte: O autor (2023).

4.2 CARACTERIZAÇÃO DAS PASTAS (ESTADO FRESCO)

A Figura 31 apresenta o resultado das viscosidades apresentadas pelas misturas com o passar do tempo, as quais foram obtidas através da realização do ensaio de fluxo descrito no item 3.3.1 desta dissertação.

De modo semelhante ao ocorrido no trabalho de Sales (2022), as quatro amostras tiveram redução em sua viscosidade com o passar do tempo devido ao incremento da taxa de cisalhamento. Esse comportamento é típico de fluídos não-newtonianos, o qual está relacionado com a desintegração da estrutura aglomerada do material submetido ao ensaio graças à elevação da taxa de cisalhamento.

Figura 31 - Viscosidade x tempo. a) ensaio completo; b) detalhamento até 20s.



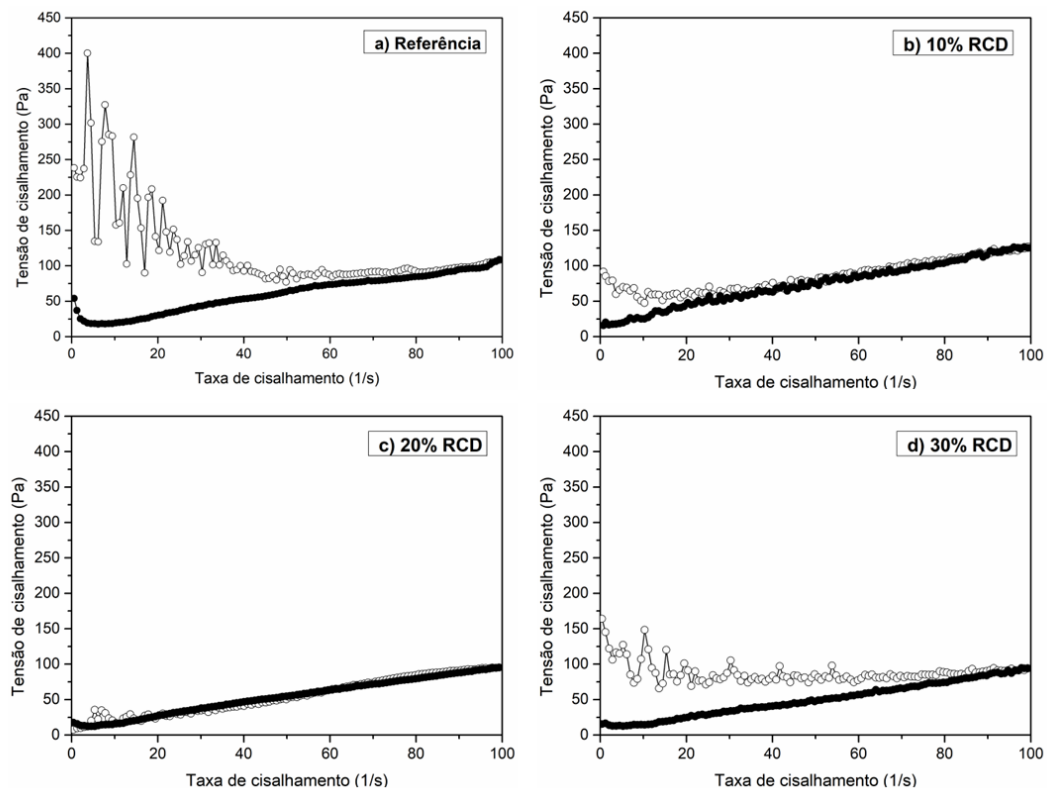
Fonte: O autor (2023).

Da análise da Figura 31 é possível constatar que rapidamente as misturas tiveram suas viscosidades reduzidas até alcançarem um patamar similar e assim permanecerem até o término do ensaio. Dentre as quatro misturas, a que possuiu a maior viscosidade inicial foi a de referência, seguida pela de 10% de RCD que foi superior a de 30 e a de 20% de RCD, respectivamente. Além disso, as misturas contendo RCD possuíram viscosidades iniciais semelhantes e a viscosidade da amostra de referência, por sua vez, após 5 segundos já havia praticamente se igualado às demais.

A Figura 32 apresenta os resultados obtidos ao avaliar a tensão de cisalhamento em função da aceleração e desaceleração da taxa de cisalhamento.

Analisando os resultados, é possível observar que em três das quatro pastas, os ciclos de cisalhamento (aceleração e desaceleração) deixam nítido que as pastas possuem comportamentos reológicos que são dependentes do tempo (Com exceção de 20% RCD, os ciclos não se sobrepõem em sua totalidade). Esse fato viabiliza a classificação dos fluidos em tixotrópicos ou reopéxicos a depender de algumas características. A distinção entre ambos se baseia principalmente no comportamento do fluido quando submetido a uma tensão de cisalhamento constante, sob a qual os fluidos tixotrópicos geralmente possuem sua viscosidade reduzida enquanto os reopéxicos têm sua viscosidade elevada (BETIOLI, 2007).

Figura 32 - Tensão de cisalhamento x taxa de cisalhamento.



Fonte: O autor (2023).

Nota: aceleração (formas preenchidas ●); desaceleração (formas vazias ○).

Conforme Struble e JI (2001, apud Sales, 2022), essa distinção também pode ser realizada por intermédio da análise dos ciclos de cisalhamento, em que os materiais tixotrópicos possuem curva de aceleração acima da curva de desaceleração enquanto o contrário se aplica aos materiais reopéxicos. Visualmente, com exceção da pasta 20% RCD em que a desaceleração praticamente se sobrepõe aos pontos plotados na aceleração, as curvas de desaceleração apresentam-se levemente acima das curvas de aceleração, o que caracteriza a reopexia. Com exceção da mistura de referência, na qual durante o término da desaceleração houve perturbação no ensaio, as pequenas áreas de histerese das misturas, além de indicarem que o comportamento reopéxico é leve, também representam que o sistema é estável e homogêneo (SATO, 2015).

No que concerne ao tipo de comportamento reológico das pastas, todas as misturas necessitaram de uma tensão de cisalhamento inicial para que o fluxo ocorresse, o que reitera que elas são fluidos não-newtonianos. Dentre as possibilidades apresentadas na Figura 21, o que mais se aproxima do comportamento das pastas nesta pesquisa é o modelo binghamiano.

4.3 CARACTERIZAÇÃO DAS PASTAS (ESTADO ENDURECIDO)

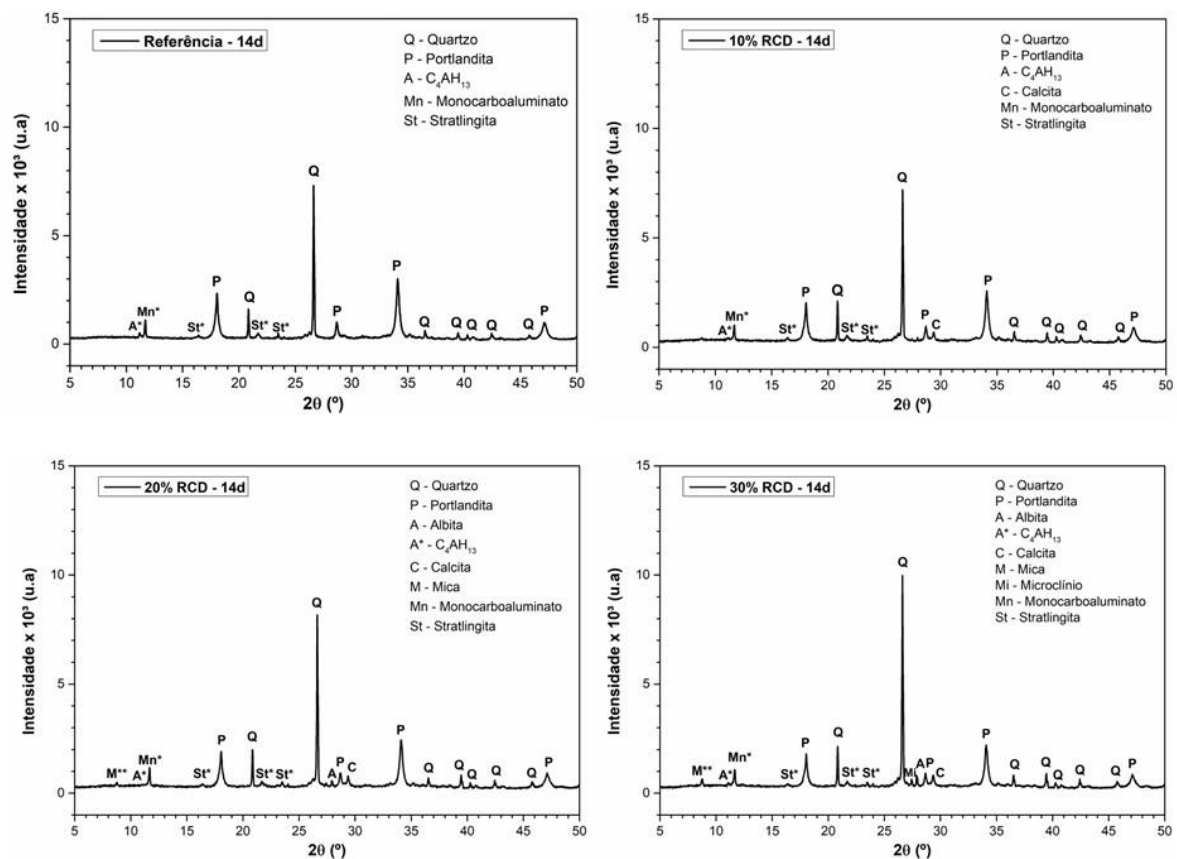
4.3.1 Microestrutura

4.3.1.1 Difração de raios-x

Os resultados das difrações de raios-x são apresentados nas figuras a seguir. Tendo em vista que analisar a compatibilidade entre as pastas com RCD e a de referência é o alvo desta pesquisa, cada figura apresenta a compilação dos quatro resultados por idade.

- 14 dias

Figura 33 - DRx das pastas com 14 dias de hidratação.



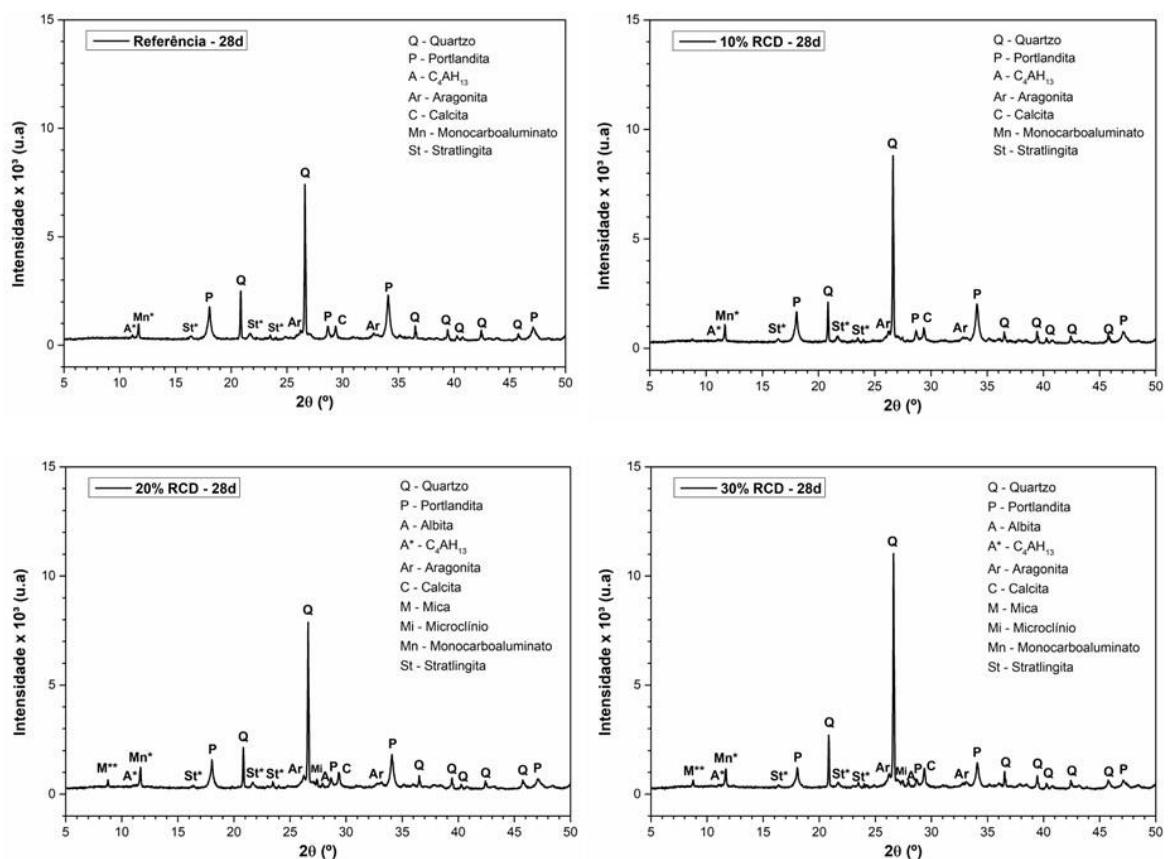
Fonte: O autor (2023).

Nota: *Gameiro *et al.*, (2012); **Moreno-Juez *et al.*, (2021).

Através da análise comparativa dessas pastas na idade de 14 dias (Figura 33), é possível constatar que as pastas de referência e a contendo 10% de RCD possuem um padrão muito semelhante, inclusive na intensidade dos picos, excetuando-se o de calcita próximo da posição 30° (2θ) em 10% RCD. Por sua vez, as misturas contendo 20 e 30% de RCD apresentaram maior semelhança entre si e uma distinção em relação às outras duas misturas pois elas apresentaram alguns picos diferentes como o da mica, do microclínio e da albita, oriundos do incremento de RCD na mistura, tendo em vista que ao longo do período analisado não surgiram esses picos nos difratogramas das pastas de referência.

- 28 dias

Figura 34 - DRx das pastas com 28 dias de hidratação.



Fonte: O autor (2023).

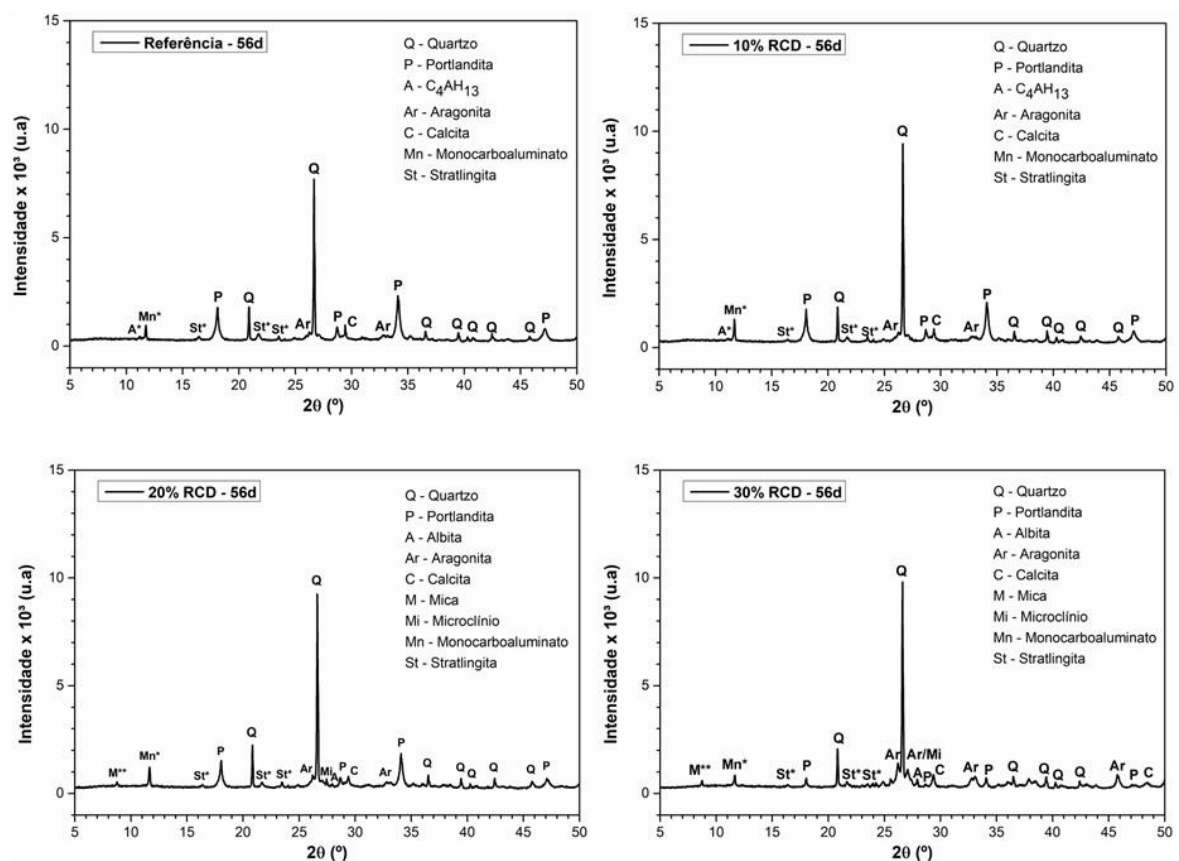
Nota: *Gameiro *et al.*, (2012); **Moreno-Juez *et al.*, (2021).

Nessa idade (Figura 34), surge um pico de calcita na pasta de referência, o que torna esse difratograma mais semelhante ao de 10% RCD. Além disso, surgem picos de aragonita em

todas as pastas. Picos de microclínio, albíta e mica continuam aparecendo apenas nas pastas com 20 e 30% de RCD. Em comparação com a idade anterior, os picos de Portlandita são reduzidos, o que indica o seu consumo no sistema, seja por reações pozolânicas ou por carbonatação. Ressalta-se que um dos produtos da reação pozolânica entre a cal e o metacaulim é o C-S-H, o qual, por ser um material com baixa cristalinidade, não é facilmente detectado através da DRx (SERRY *et al*, 1984).

- 56 dias

Figura 35 - DRx das pastas com 56 dias de hidratação.



Fonte: O autor (2023).

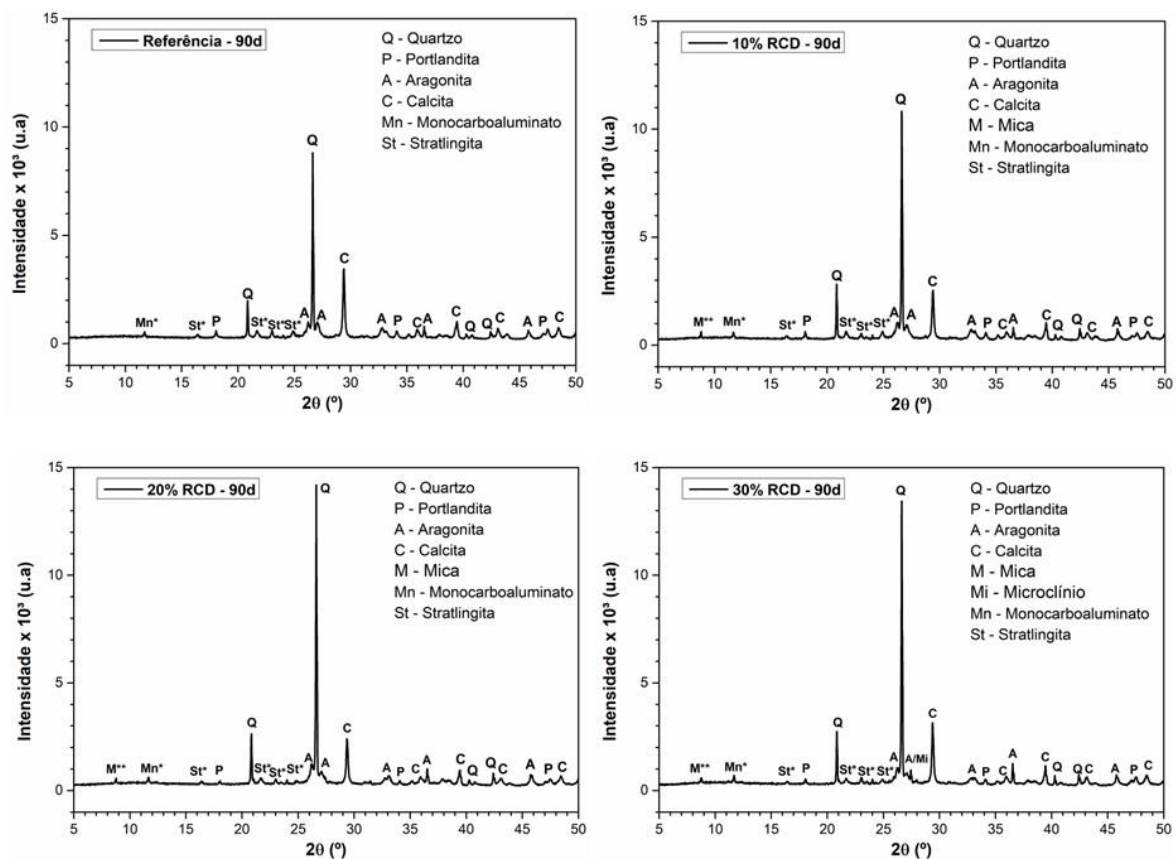
Nota: *Gameiro *et al.*, (2012); **Moreno-Juez *et al.*, (2021).

Aos 56 dias (Figura 35), os picos de portlandita da pasta com 30% de RCD foram bastante reduzidos. Isso porque além de naturalmente já possuir menos cal hidratada em sua composição do que as outras, ela pode ser mais porosa que as demais (graças a maior substituição de RCD que pode viabilizar uma maior difusão interna de CO₂), o que é

evidenciado pelo surgimento de novos picos de calcita e aragonita no gráfico, o que indica que houve mais reações de carbonatação por ingresso de CO₂. Dentre as outras pastas, a de referência e a com 10% RCD continuam possuindo padrões semelhantes, com variação na intensidade de alguns picos.

- 90 dias

Figura 36 - DRx das pastas com 90 dias de hidratação.



Fonte: O autor (2023).

Nota: *Gameiro *et al.*, (2012); **Moreno-Juez *et al.*, (2021).

Aos 90 dias (Figura 36), todos os difratogramas das pastas são consideravelmente modificados em comparação com a idade anterior. Destaca-se no período a redução significativa dos picos de portlandita, assim como o aumento da quantidade e da intensidade dos picos de calcita e aragonita, o que indica que a portlandita foi consumida predominantemente em reações de carbonatação no período. De acordo com De Silva e Glasser

(1993), é um desafio mitigar os efeitos da carbonatação em tempos de cura prolongados, o que justifica essa grande diferença nos difratogramas.

Outro aspecto relevante observado por De Silva e Glasser (1993) é o desaparecimento do pico de aluminato tetracálcico hidratado (C_4AH_{13}) após uma certa idade, fato este que também foi constatado aos 90 dias (Figura 36). Além desse desaparecimento do pico de C_4AH_{13} que Gameiro *et al.* (2012b) também identificaram em sua pesquisa a partir dos 28 dias, eles também constataram a redução dos picos de monocarboaluminato com a avanço do tempo de cura, de modo semelhante ao que também ocorreu nesta pesquisa ao longo de todo o período observado, o que presume que a decomposição dessas fases deve ter ocorrido.

Comparando os gráficos nessa idade entre si, surge um pico de mica na pasta com 10% RCD, tornando-se essa a principal diferença entre esse difratograma e o de referência. Os difratogramas das pastas de 20 e 30% RCD continuaram muito semelhantes entre si e se assemelharam à pasta de 10% RCD, após o surgimento do pico de mica.

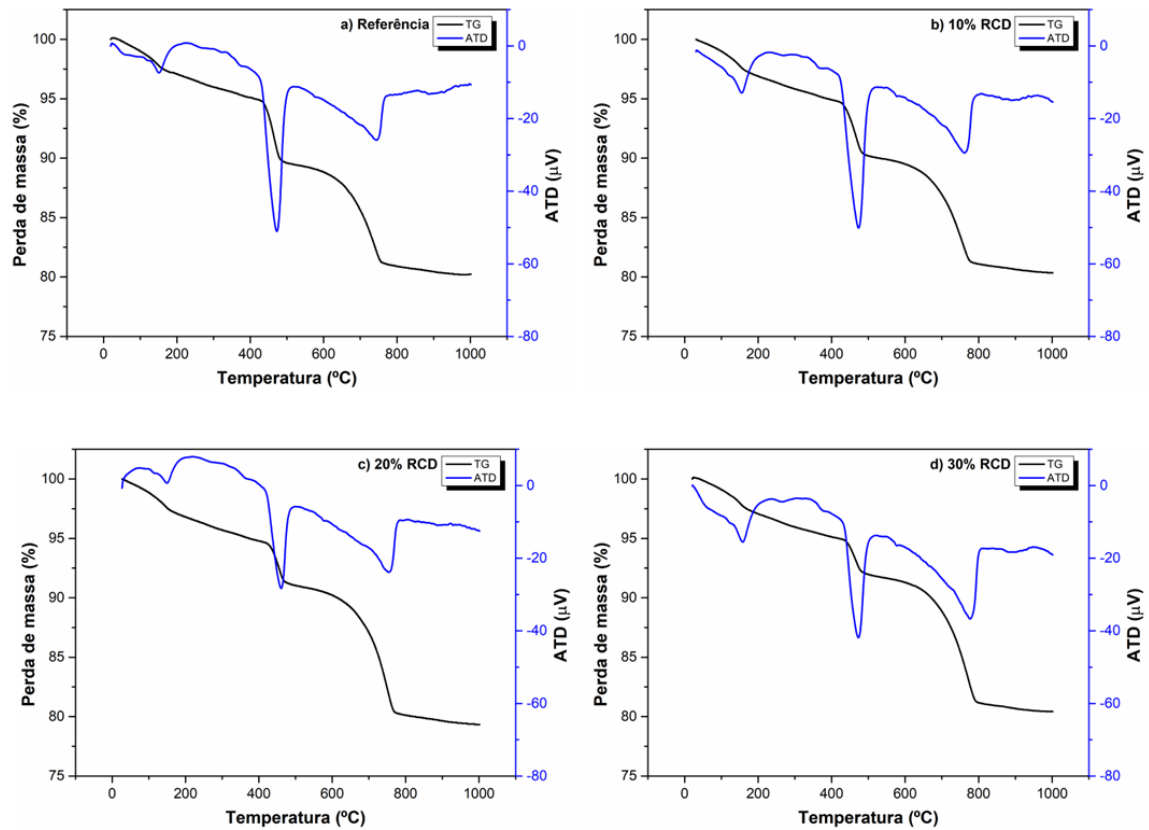
4.3.1.2 Análise termodiferencial e termogravimetria

- 14 dias

Os picos endotérmicos visualizados na ATD resultantes das reações químicas entre a cal hidratada e o metacaulim que acarretaram na perda de massa constatada na termogravimetria foram anteriormente compilados por Azerêdo, Struble e Carneiro (2015), tomando por base diversas pesquisas. Esses picos foram: $\approx 100^\circ\text{C}$ (parte da desidratação da stratlingita); entre 100 e 250°C (desidratação do C-S-H, stratlingita e aluminatos de cálcio hidratados); entre 390 e 550°C (desidroxilação do $\text{Ca}(\text{OH})_2$); e entre 550 e 840°C (descarbonatação do carbonato de cálcio).

Dos resultados obtidos através desse ensaio (Figura 37), é possível constatar que as temperaturas de ocorrência dessas reações se assemelham às supracitadas, o que ocorre em todas as idades analisadas. Nessa idade, 14 dias, com o incremento do RCD, menor se torna a perda de massa na região característica da desidroxilação da cal hidratada e maior passa a ser a perda de massa na região característica da descarbonatação do carbonato de cálcio (Tabela 34).

Figura 37 - ATD/TG das pastas com 14 dias de hidratação.



Fonte: O autor (2023).

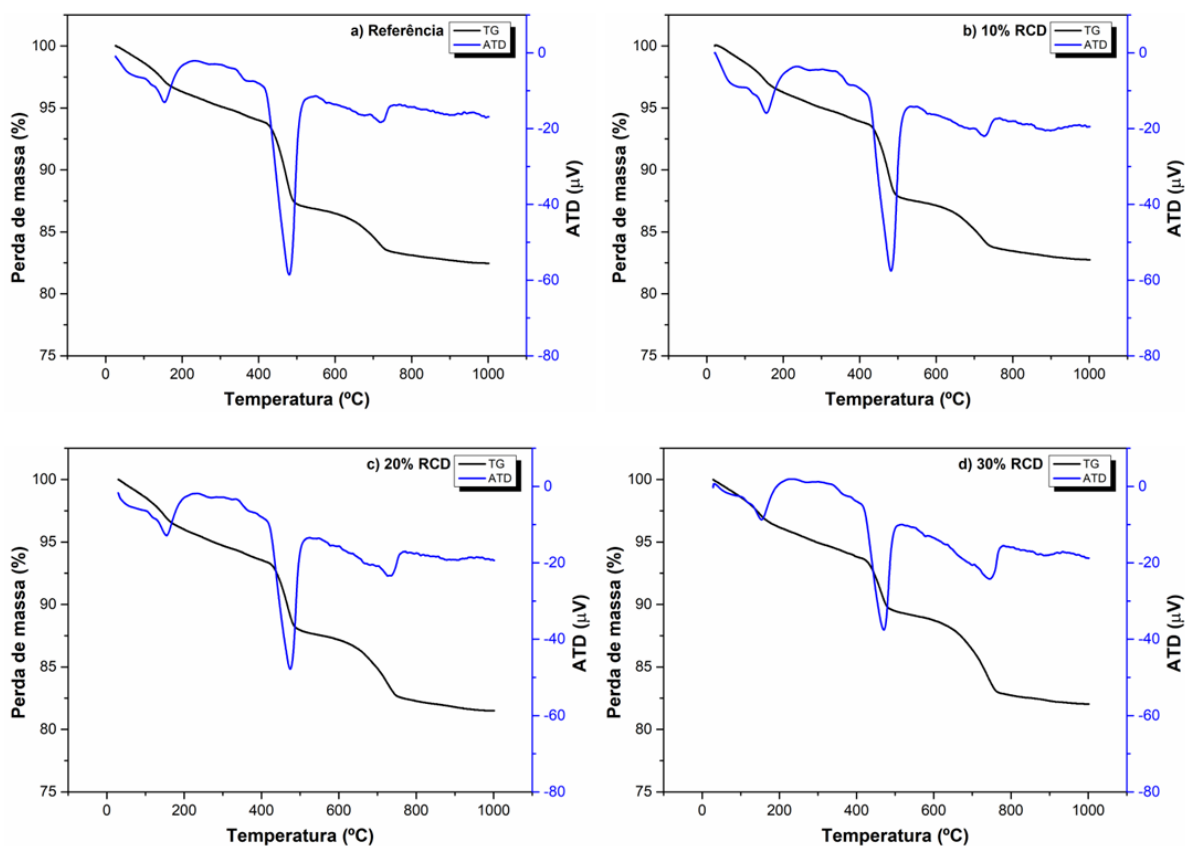
Tabela 34 – Perda de massa (%) por faixa de temperatura aos 14 dias.

AMOSTRA	100 – 250°C	390 – 550°C	550 – 840°C
REFERÊNCIA	2,50	5,90	8,56
10% RCD	2,63	5,10	8,99
20% RCD	2,60	4,12	10,80
30% RCD	2,57	3,56	10,68

Fonte: O autor (2023).

- 28 dias

Figura 38 - ATD/TG das pastas com 28 dias de hidratação.



Fonte: O autor (2023).

Nessa idade, há uma maior perda de massa referente aos produtos de hidratação entre a cal com o metacaulim e o RCD identificados nas regiões de temperatura entre 100°C até 250°C, o que indica uma maior quantidade deles (oriundos de reações pozolânicas) em comparação com a idade anterior. Em relação à desidroxilação da cal hidratada, houve uma maior perda de massa nesse intervalo e uma menor perda de massa referente à descarbonatação do carbonato de cálcio. Esses resultados foram compilados na tabela a seguir:

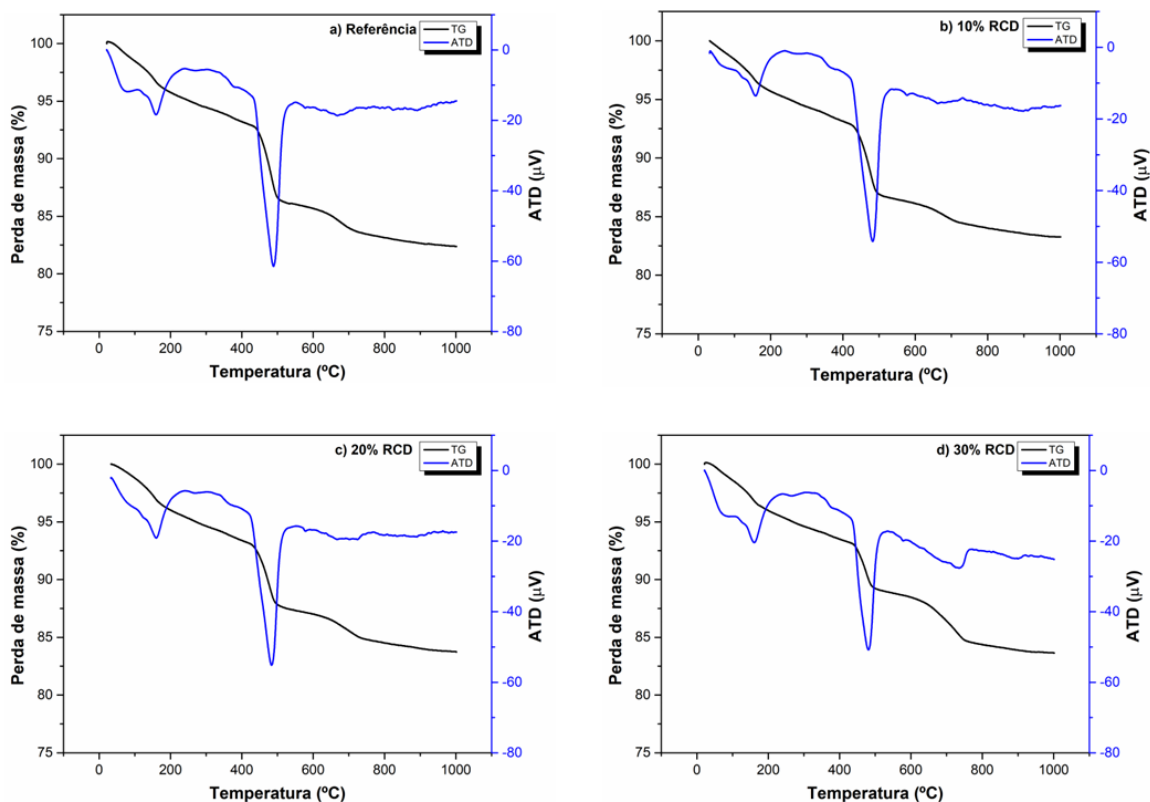
Tabela 35 – Perda de massa (%) por faixa de temperatura aos 28 dias.

AMOSTRA	100 – 250°C	390 – 550°C	550 – 840°C
REFERÊNCIA	2,94	7,26	3,91
10% RCD	3,16	6,55	4,21
20% RCD	3,21	6,12	5,47
30% RCD	3,02	4,84	6,58

Fonte: O autor (2023).

- 56 dias

Figura 39 - ATD/TG das pastas com 56 dias de hidratação.



Fonte: O autor (2023).

A perda de massa das pastas não diferiu significativamente na faixa entre 100 e 250°C, o que pode ser um indicativo de que o teor de produtos hidratados entre elas seja semelhante nessa idade. No que diz respeito à desidroxilação, quanto maior o teor de RCD, menor a perda de massa referente à desidroxilação do Ca(OH)_2 . Por sua vez, na faixa de temperatura característica da decarbonatação, os resultados não apresentaram um padrão, sendo mais acentuada a perda de massa da amostra com 30% de RCD. Esse resultado está em conformidade com o apresentado pela DRx da pasta com 30% RCD aos 56 dias que apresentou mais e maiores picos de calcita e aragonita que as demais misturas, provavelmente devido a uma maior porosidade dessa amostra. A tabela 36 apresenta o percentual de perda de massa por faixa de temperatura nessa idade.

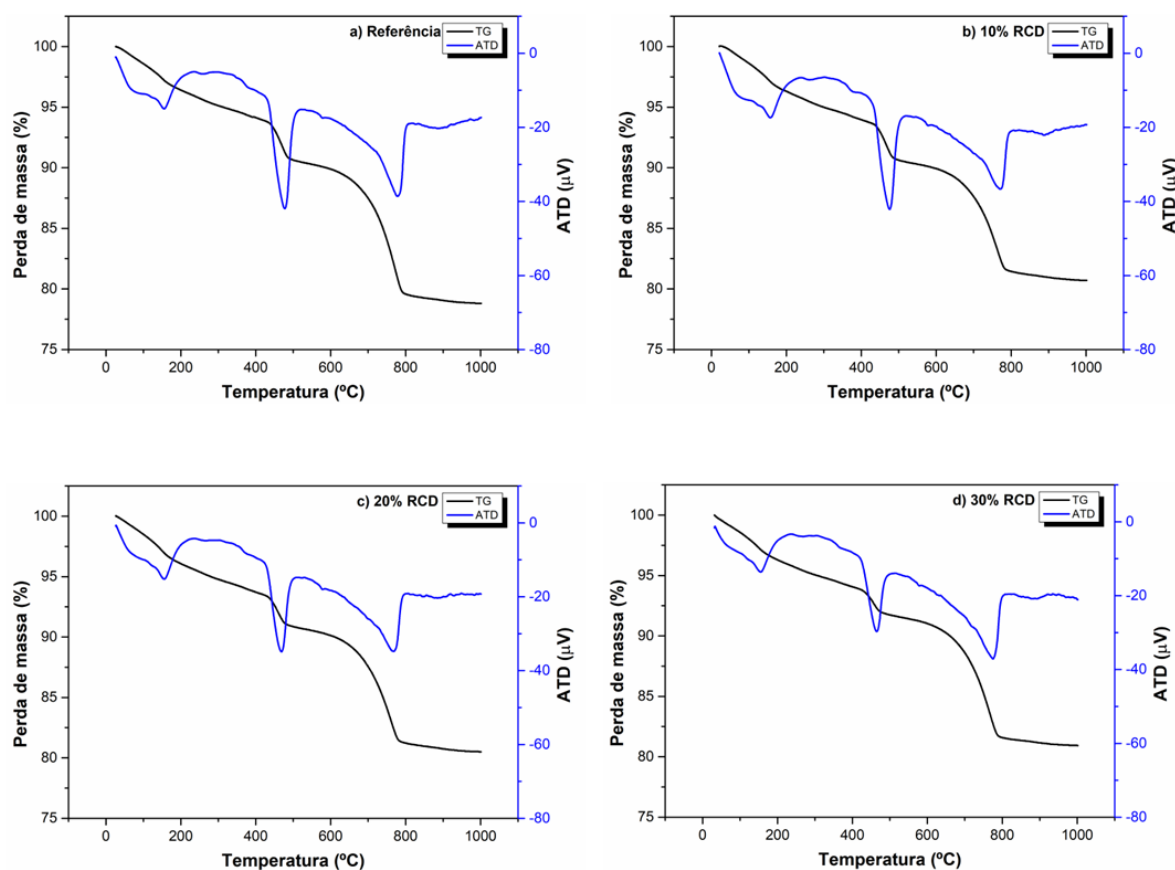
Tabela 36 – Perda de massa (%) por faixa de temperatura aos 56 dias.

AMOSTRA	100 – 250°C	390 – 550°C	550 – 840°C
REFERÊNCIA	3,44	7,29	3,12
10% RCD	3,39	6,78	2,66
20% RCD	3,48	6,19	3,01
30% RCD	3,32	4,77	4,67

Fonte: O autor (2023).

- 90 dias

Figura 40 - ATD/TG das pastas com 90 dias de hidratação.



Fonte: O autor (2023).

Aos 90 dias (Figura 40), é notório o menor teor de cal hidratada em todas as pastas devido a pequena perda de massa referente à desidroxilação (Tabela 37). Segundo a pesquisa de Azerêdo, Struble e Carneiro (2015), só foi constatado o consumo total da portlandita, na cura ao ar, após 180 dias, o que indica que a portlandita ainda remanescente será consumida ao longo

dos próximos 90 dias. Por outro lado, o pico da descarbonatação do carbonato de cálcio aumentou significativamente em todas as pastas, o que está de acordo com as difrações de raios-x do tópico anterior, os quais apresentaram o surgimento e a intensificação de vários picos de calcita e aragonita. Isso indica que o processo de carbonatação foi intenso nesse período, no qual é nítido que ocorreram menos reações pozolânicas. A maior descarbonatação apresentada pela pasta de referência se justifica pelo fato de ser a mistura com maior disponibilidade de Ca(OH)_2 para reagir com o CO_2 ao longo do período analisado. Consequentemente, graças ao maior teor de CaCO_3 formado entre 56 e 90 dias, ela se tornou a que apresentou maior descarbonatação aos 90 dias.

Tabela 37 – Perda de massa (%) por faixa de temperatura aos 90 dias.

AMOSTRA	100 – 250°C	390 – 550°C	550 – 840°C
REFERÊNCIA	2,85	3,92	10,97
10% RCD	2,99	3,77	9,09
20% RCD	3,11	3,29	9,53
30% RCD	2,94	2,74	10,02

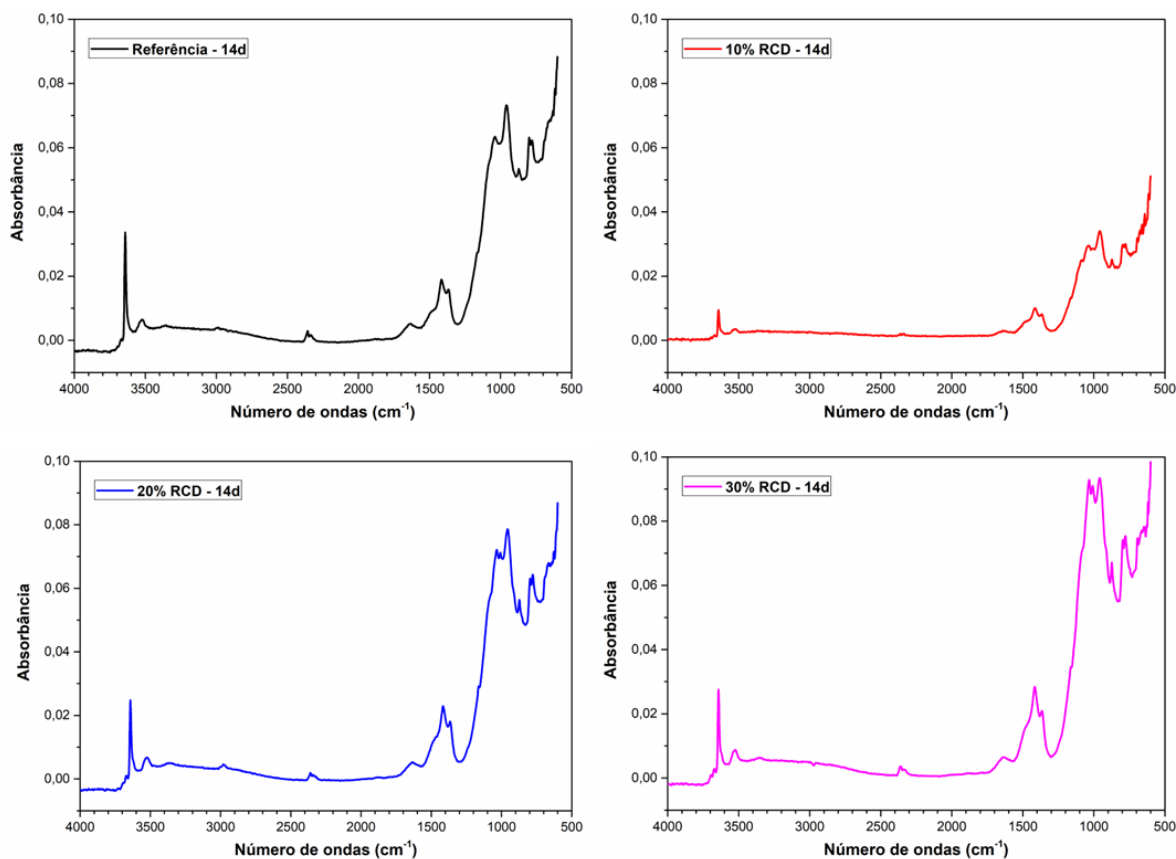
Fonte: O autor (2023).

4.3.1.3 Espectroscopia infravermelha

- 14 dias

Inicialmente, o infravermelho de cada uma das pastas aos 14 dias (Figura 41) apresenta várias bandas em posições semelhantes às aquelas apresentadas nas misturas no estado anidro (Figura 28). A banda localizada em $\approx 3642\text{cm}^{-1}$ se refere às ligações químicas entre O – H; as bandas de absorção em aproximadamente 1464, 1410, 1080 e 873cm^{-1} são atribuídas a diferentes vibrações de grupos carbonáticos C – O (CO_3^{2-}); as bandas de maior intensidade localizadas em ≈ 1040 , 1027 e 1005cm^{-1} são referentes à ligação Si-O e a banda em $\approx 775\text{cm}^{-1}$ se refere às ligações Al-O. De acordo com Costa (2020), a presença de uma banda espúria na faixa entre 2390 e 2310cm^{-1} é resultante da presença de CO_2 no porta-amostra do espectrômetro.

Figura 41 - IV das pastas com 14 dias de hidratação.

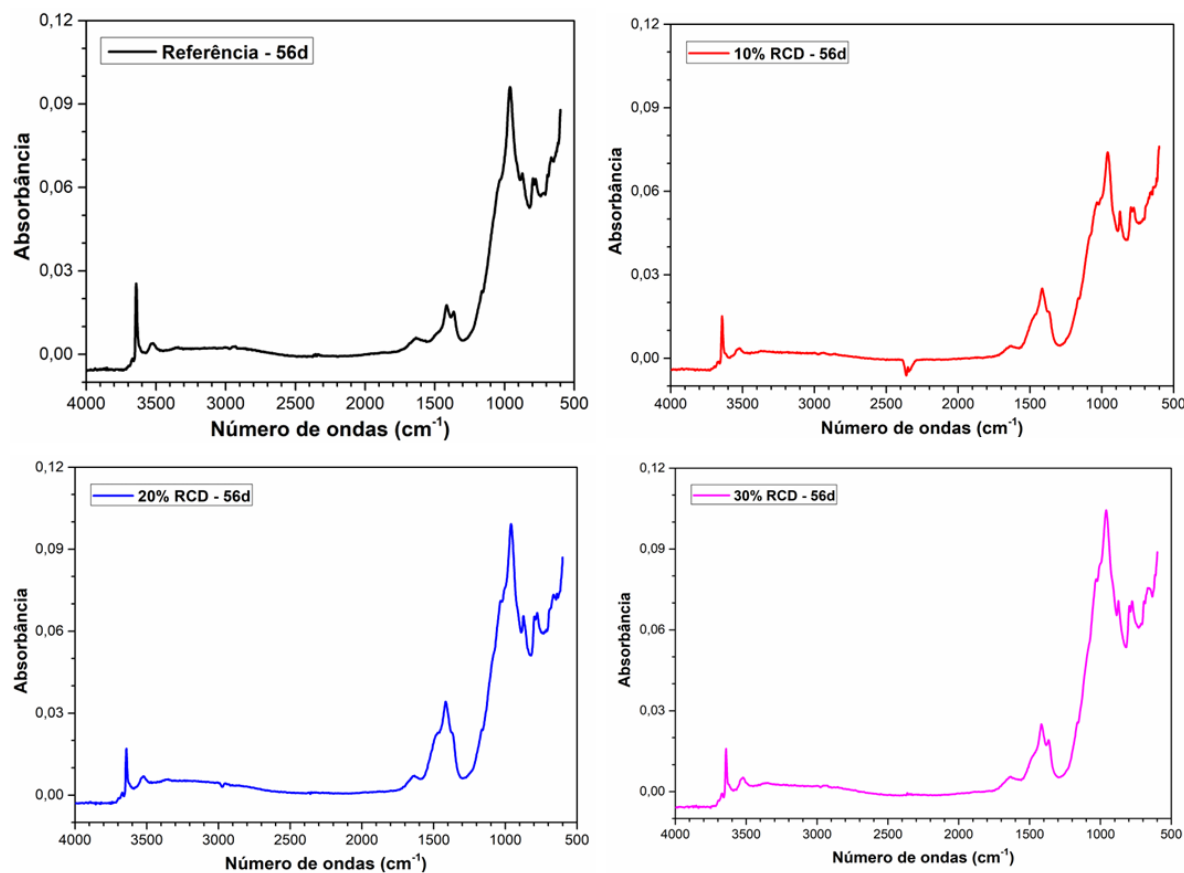


Fonte: O autor (2023).

- 56 dias

Nessa idade (Figura 42), as bandas apresentadas por todas as pastas são semelhantes às apresentadas nos gráficos aos 14 dias (razão pela qual foi suprimida a figura dos 28 dias). Comparando os resultados do IV aos 56 dias, eles são muito semelhantes, o que indica que as ligações químicas ocorridas até então são similares. A maior diferença entre eles nessa idade encontra-se nas bandas em $\approx 1400\text{cm}^{-1}$ relacionadas às diferentes vibrações de grupos carbonáticos $\text{C} - \text{O} (\text{CO}_3^{2-})$.

Figura 42 - IV das pastas com 56 dias de hidratação.

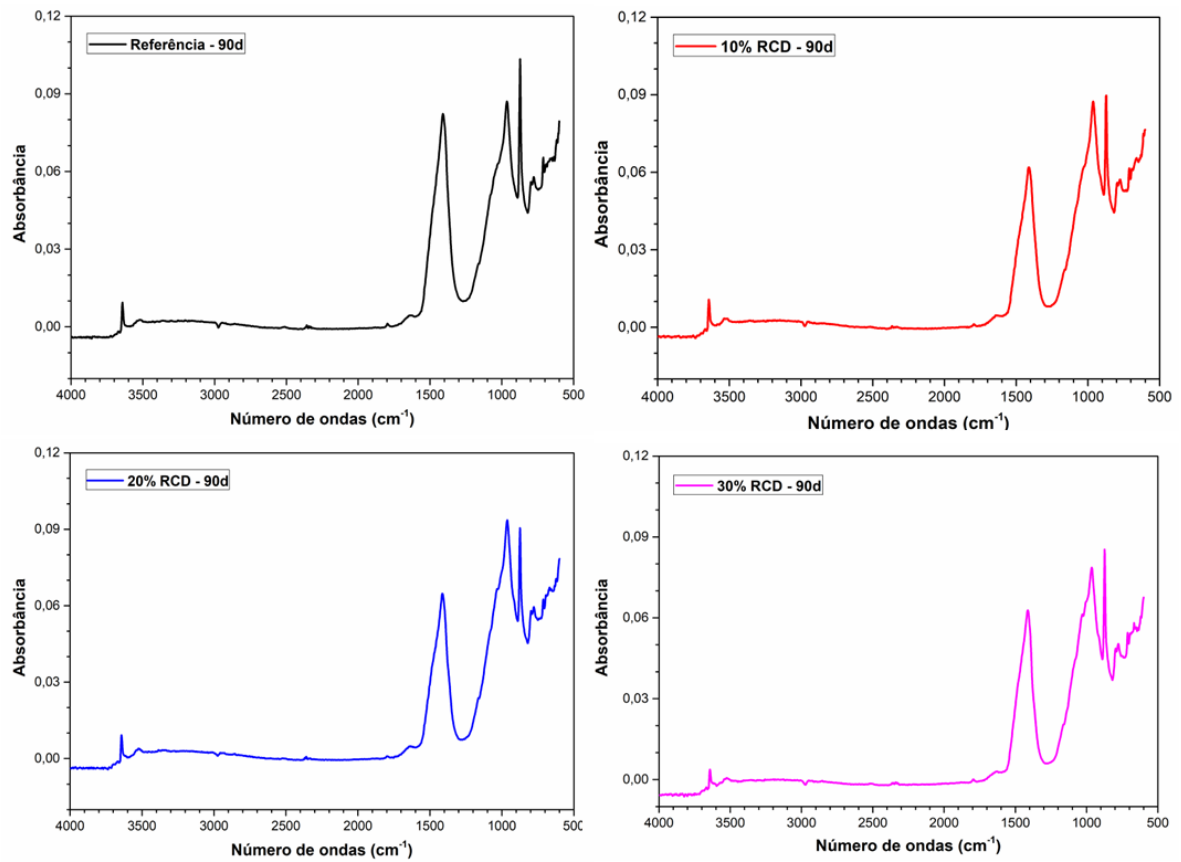


Fonte: O autor (2023).

- 90 dias

Nessa idade (Figura 43), a banda localizada em $\approx 3642\text{cm}^{-1}$ é reduzida consideravelmente em todas as pastas, o que indica uma redução da quantidade de ligações químicas entre O – H nas pastas, o que corrobora com os resultados da DRx e da ATD/TG que apresentam um teor reduzido de portlandita. Outras alterações que podem ser observadas são a elevação da banda em ≈ 1410 e 873cm^{-1} referentes às vibrações de grupos carbonáticos (carbonato de cálcio), o que também corrobora com a intensificação dos picos de calcita e aragonita nas difrações de raios-x e com o aumento da perda de massa na TG.

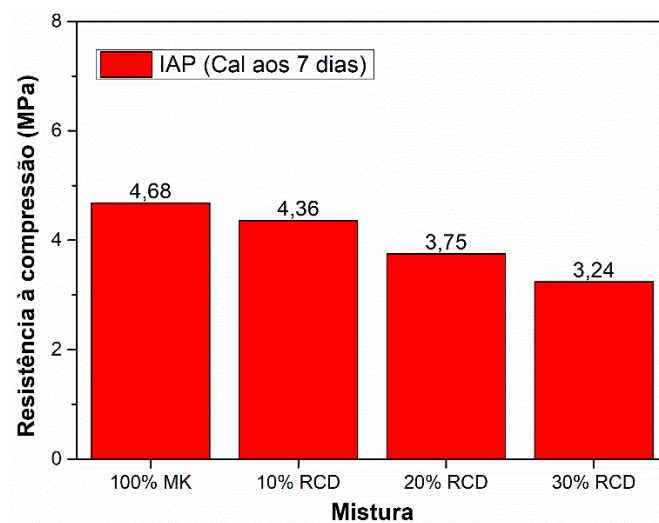
Figura 43 - IV das pastas com 90 dias de hidratação.



Fonte: O autor (2023).

4.3.2 Índice de atividade pozolânica (IAP) com a cal

Figura 44 - IAP com a cal aos 7 dias (5751/2015).



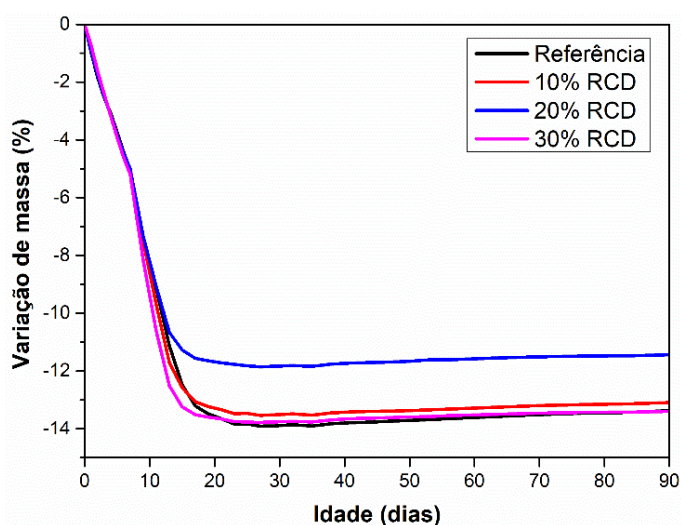
Fonte: O autor (2023).

A NBR 5751 (2015) estipula que para ser considerado como material pozolânico a resistência a ser alcançada após o ensaio deve ser superior a 6 MPa. Pela análise da Figura 44, nenhuma das misturas testadas, o que incluiu o próprio metacaulim sem nenhuma adição de RCD, alcançou o mínimo necessário para ser considerado um material pozolânico. Apesar desse ensaio não ser o mais adequado para o teste da pozolanicidade do metacaulim, várias outras pesquisas realizadas com outros metacaulins apresentaram resistências superiores ao sugerido pela norma supracitada (HOPPE FILHO *et al*, 2017; SOUZA, 2019; DE ARAÚJO, 2022; GONZAGA, 2022).

Esse resultado sugere que o metacaulim em questão não apresenta uma elevada reatividade quando utilizado em misturas ricas em cal, o que pode impactar as resistências mecânicas de argamassas provenientes dessas misturas. Contudo, levando em consideração que a compatibilidade com as argamassas previamente empregadas em construções históricas é o principal parâmetro a ser perseguido ao se realizar misturas com esses componentes, materiais que apresentem menores resistências mecânicas e um menor módulo de elasticidade são mais adequados a essa finalidade, o que pode viabilizar o emprego de pozolanas menos reativas nessas misturas ao invés das mais reativas cujo custo de beneficiamento é superior (ROCHA, 2005; AZERÊDO, 2012; GAMEIRO *et al.*, 2012; SOUZA, 2013; VEIGA, 2017).

4.3.3 Variação de massa (argamassas)

Figura 45 - Variação de massa nas idades.



Fonte: O autor (2023).

Dentre as quatro misturas avaliadas, a que possuiu a menor perda de massa ao longo dos 90 dias foi a de 20% RCD. As outras três misturas possuíram perda de massa semelhante ao longo do período analisado.

A variação de massa em porcentagem nas idades de 7, 15, 28, 56 e 90 dias de cada mistura são apresentadas na Tabela 38. Essa perda de massa está relacionada com a evaporação da água livre existente nos poros da argamassa. Consequentemente, quanto menos água disponível no sistema, menos reações pozolânicas continuam a ocorrer com o tempo, o que faz com que a cal hidratada disponível reaja com o CO_2 que ingressa no sistema, gerando CaCO_3 . Esse é o motivo pelo qual as DRXs das pastas aos 90 dias apresentaram uma acentuada redução nos picos de Portlandita (quando comparadas com as DRXs realizadas aos 56 dias) e um significativo aumento nos picos de calcita e aragonita.

Tabela 38 - Variação de massa (%) em idades específicas.

Argamassa	7 dias (desmoldagem)	15 dias	28 dias	56 dias	90 dias
Referência	-5,07	-12,48	-13,90	-13,65	-13,37
10% RCD	-5,14	-12,58	-13,53	-13,32	-13,09
20% RCD	-5,00	-11,27	-11,84	-11,61	-11,43
30% RCD	-5,19	-13,24	-13,76	-13,55	-13,39

Fonte: O autor (2023).

Da análise da tabela 38 é possível constatar que a partir do 28º dia o comportamento da variação de massa é modificado. Ao invés de perda de massa, é observado um ligeiro ganho de massa, devido a redução da evaporação, tendo em vista a menor disponibilidade de H_2O livre no sistema. Corroborando com essa análise, Carneiro (1999) cita que a perda de massa nas primeiras idades se deve à evaporação da água de amassamento, processo que é reduzido consideravelmente a partir do 28º dia. Além disso, ele também afirma que pelo fato de a carbonatação ser uma reação lenta em que ocorre a substituição de 1 mol de H_2O por 1 mol de CO_2 (sendo a massa molecular do dióxido de carbono superior a da água), o CaCO_3 formado possui uma massa maior que o Ca(OH)_2 , razão pela qual a partir do 28º dia a massa da argamassa começa a aumentar lentamente.

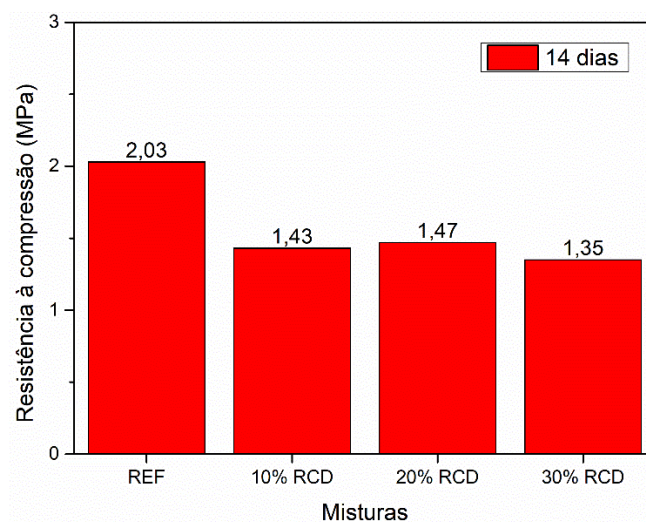
4.3.4 Resistência à compressão (argamassas)

Os resultados obtidos podem ser visualizados nos gráficos a seguir:

- **14 dias**

Aos 14 dias (Figura 46), a redução das resistências das misturas contendo RCD em relação à mistura de referência variaram de, aproximadamente, 27,5% (20% RCD) até 33,5% (30% RCD). Essa considerável diferença deve estar relacionada a uma maior ocorrência de reações pozolânicas na mistura de referência enquanto existia uma disponibilidade de H_2O no sistema para viabilizá-las. Por sua vez, as resistências das misturas contendo diferentes teores de RCD não diferiram significativamente entre si.

Figura 46 - Resistência à compressão das argamassas aos 14 dias.

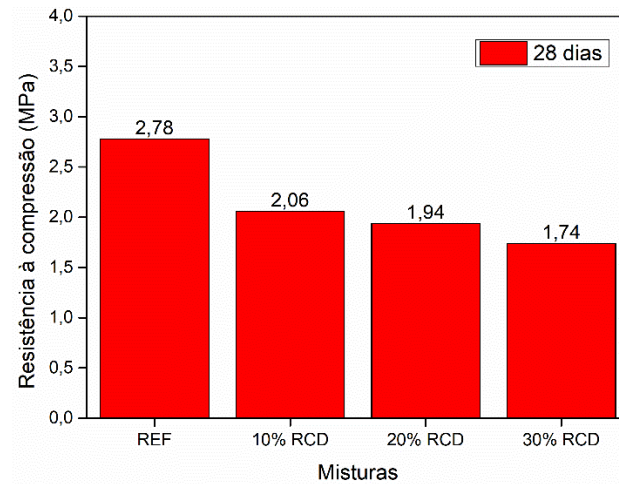


Fonte: O autor (2023).

Conforme Murat (1983), o tipo de cura impacta no processo de endurecimento oriundo das reações químicas nas misturas. Consequentemente, em temperatura ambiente o desenvolvimento da resistência é inferior a outros tipos de cura graças à evaporação de água do sistema e pela rápida carbonatação do hidróxido de cálcio. Esse pode ser um dos motivos pelos quais as resistências aqui encontradas sejam inferiores a outros estudos, especialmente aqueles realizados em cura úmida.

- 28 dias

Figura 47 - Resistência à compressão das argamassas aos 28 dias.

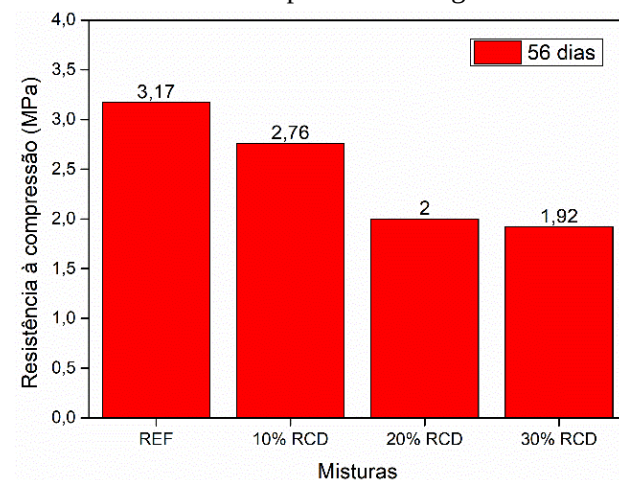


Fonte: O autor (2023).

Aos 28 dias, todas as resistências aumentaram quando comparadas com a idade anterior. Além disso, a resistência da mistura contendo 10% de RCD superou a de 20% RCD que havia sido ligeiramente superior aos 14 dias. Comparando a resistência de cada mistura contendo RCD com a mistura de referência, a diferença entre elas foram, aproximadamente, as seguintes: 26% (10% RCD); 30% (20% RCD); e 37,5% (30% RCD).

- 56 dias

Figura 48 - Resistência à compressão das argamassas aos 56 dias.



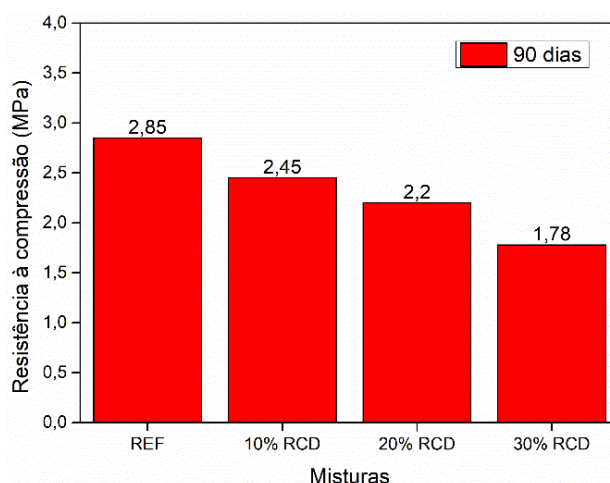
Fonte: O autor (2023).

Aos 56 dias, todas as resistências aumentaram em comparação com as obtidas na idade anterior. Contudo, a mistura que obteve uma maior porcentagem de crescimento no período foi a que contém 10% de RCD ($\approx 34\%$) seguido pela mistura de referência que foi $\approx 14\%$. Além disso, o aumento da resistência da mistura contendo 20% RCD foi muito pequena quando comparada à idade de 28 dias, o que fez com que a resistência de 30% RCD praticamente se igualasse.

Ao comparar a resistência de cada mistura com a obtida pela amostra de referência, os percentuais de redução foram os seguintes: 13% (10% RCD); 37% (20% RCD); e 39% (30% RCD).

- **90 dias**

Figura 49 - Resistência à compressão das argamassas aos 90 dias.



Fonte: O autor (2023).

Aos 90 dias, com exceção da amostra com 20% de RCD, todas apresentaram redução na resistência à compressão quando comparadas com as amostras que foram rompidas aos 56 dias. Esse comportamento também foi observado ao longo de alguns trabalhos citados por De Silva e Glasser (1993) que à época citaram como causa uma possível transformação da stratlingita e do aluminato tetracálcico hidratado em hidrogranada no longo prazo, o que acarretava em uma redução de volume e aumento da porosidade e perda da compactação microestrutural.

Com o objetivo de investigar essa hipótese, Gameiro *et al.*, (2012b) realizaram os ensaios de DRx, TG e MEV em pastas com variadas proporções em massa de cal com

metacaulim, o que incluiu a 1:1, até a idade de 90 dias. Como resultado, eles não identificaram a presença de hidrogranada, assim como Bakolas *et al.*, (2006) também não o fizeram até o tempo de cura de 270 dias em temperatura ambiente. Apesar de outros pesquisadores, identificarem a presença de hidrogranada ao se realizar a cura em elevadas temperaturas, é perceptível que em temperatura ambiente, a redução das resistências mecânicas não é decorrente da formação de hidrogranadas.

Ainda conforme Gameiro *et al.*, (2012b), a instabilidade de alguns produtos oriundos da reação pozolânica entre a cal e o metacaulim como o aluminato tetracálcico hidratado e o monocarboaluminato podem, em sua decomposição, voltar a disponibilizar mais Ca(OH)_2 ao sistema. Assim sendo, tendo em vista os resultados da DRx desta dissertação aos 56 e aos 90 dias, é provável que a substituição desses produtos de hidratação resultantes de reações pozolânicas que geram um maior ganho de resistência por CaCO_3 oriundo da carbonatação da cal seja o real motivo que causa essa redução das resistências mecânicas no longo prazo, o que conforme Velosa, Rocha e Veiga (2009), é potencializado por microfissuras formadas decorrentes da retração. Apesar disso, vale ressaltar que, de acordo com Souza (2019), esse comportamento é típico de argamassas de cal com metacaulim, o que não impacta a questão da compatibilidade.

No que concerne ao comparativo com a idade anterior, a redução/aumento (em %) nas resistências à compressão de cada mistura podem ser observadas na Tabela 39.

Tabela 39 - Variação da resistência à compressão (R_c) no período de 56 até 90 dias de cura ao ar.

Mistura	56 dias (R_c)	90 dias (R_c)	Incremento/decréscimo
Referência	3,17 MPa	2,85 MPa	- 10%
10% RCD	2,76 MPa	2,45 MPa	- 11%
20% RCD	2,00 MPa	2,20 MPa	+ 10%
30% RCD	1,92 MPa	1,78 MPa	- 7 %

Fonte: O autor (2023).

Por sua vez, no comparativo entre cada mistura contendo RCD com a de referência na idade de 90 dias, é possível constatar que as variações percentuais das resistências foram as seguintes: $\approx 14\%$ (10% RCD); $\approx 23\%$ (20% RCD); e $\approx 37,5\%$ (30% RCD). Além disso, o aumento de resistência apresentado por 20% RCD nessa idade, destoando das outras argamassas que apresentaram redução, pode estar relacionado com a menor perda de massa ao longo dos 90 dias, conforme foi apresentado na Figura 45.

De acordo com Veiga e Carvalho (2002), existem características e requisitos mecânicos a serem respeitados ao se formular argamassas para paredes de edifícios antigos, dentre os quais alguns podem ser visualizados na Tabela 40.

Tabela 40 - Requisitos mínimos para argamassas de revestimento de edifícios antigos (aos 90 dias).

Aplicação	Características mecânicas (MPa)	
	Rc	E
Reboco exterior	0,4 – 2,5	2000 – 5000
Reboco interior	0,4 – 2,5	2000 – 5000
Juntas	0,6 – 3	3000 – 6000

Fonte: adaptado de Veiga *et al.*, (2001).

Consequentemente, com a finalidade de serem aplicadas em assentamentos e revestimentos na conservação de construções históricas, as baixas resistências encontradas nas argamassas ao longo desta pesquisa são adequadas. Contudo, cabe ressaltar que outros aspectos relacionados à compatibilidade devem ser levados em consideração, o que deve ser avaliado caso a caso.

5 CONCLUSÕES

A proposta desta dissertação foi a inclusão do resíduo de construção e demolição em uma mistura tradicional na produção de pastas e argamassas, de maneira a contribuir com questões socioambientais. Com base nessa proposta, foram definidas as proporções de substituição em massa da cal com metacaulim por RCD em 10, 20 e 30%. Da análise dos dados obtidos, depreende-se que:

- Entre as misturas realizadas, a que se apresentou mais compatível com a de referência, com base em todos os resultados obtidos, foi a 10% RCD, o que é natural tendo em vista o menor teor de substituição quando comparada com as demais, as quais também podem ser úteis para finalidades diversas, o que inclui as obras de restauro caso as argamassas pré-existentes sejam compatíveis.
- Para que o RCD de origem híbrida seja adequado para uso como adição mineral, faz-se necessária uma triagem inicial de tamanho de partículas, seguida da moagem desse material por um tempo que assegure que a maior parte das partículas possua dimensão inferior a 75µm. Consequentemente, a metodologia aqui empregada com essa finalidade se mostrou satisfatória.
- Além do RCD a ser empregado nas misturas, o qual pode ter as mais variadas origens, a qualidade da cal e a reatividade do metacaulim também devem ser levados em consideração ao se buscar a compatibilidade com argamassas históricas ou ao se produzir pastas e argamassas com outras finalidades.
- O ensaio de resistência à compressão com as argamassas evidenciou que elas possuem baixas resistências mecânicas com o passar das idades quando comparado com outras pesquisas que também realizaram esse ensaio com argamassas de cal com metacaulim na proporção de 1:1. Isso sugere que o tipo de cura e a temperatura podem ter influenciado bastante a cinética de reação e ganho de resistência do produto, especialmente por viabilizar uma rápida evaporação de água que reduz consideravelmente as reações pozolânicas do sistema, favorecendo a carbonatação em idades superiores a 28 dias. Por sua vez, graças ao elevado pico de quartzo (SiO_2), observado no difratograma do RCD, além do ensaio de IAP com cal aos 7 dias, é possível inferir que o RCD não contribui significativamente com o ganho de resistência das argamassas, atuando essencialmente como filler. Contudo, devido a grande variedade de resíduos de construção e demolição existentes, é possível que alguns deles possuam uma maior amorficidade, tornando-os capazes de contribuir significativamente com reações pozolânicas ao longo do período de cura.

- No que concerne aos produtos formados ao longo do período de cura, verificou-se a formação de aluminato tetracálcico hidratado, monocarboaluminato, stratlingita, C-S-H e carbonato de cálcio. Assim como em outras pesquisas, por conta de sua baixa cristalinidade, o C-S-H não foi identificado através dos ensaios de difração de raios-X, sendo detectado apenas com a ATD/TG. A redução das resistências mecânicas observadas na idade de 90 dias e a redução da intensidade dos picos de aluminato tetracálcico hidratado e monocarboaluminato sugerem que ambos os acontecimentos estão associados. Caso ocorram reações químicas que desintegrem os compostos oriundos das reações pozolânicas e que contribuam com um maior ganho de resistência mecânica, é possível que mais Ca(OH)_2 volte a ser disponibilizado no sistema, o qual reagirá com o CO_2 formando mais CaCO_3 , razão pela qual as resistências diminuem gradativamente com o passar do tempo.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Tendo em vista que não foram identificadas outras pesquisas versando acerca da inserção de RCD em misturas contendo cal com metacaulim, são necessárias maiores investigações de modo a assegurar que o emprego desse produto seja compatível com o previamente utilizado em uma construção histórica a ser restaurada, assim como que atenda aos critérios de desempenho e durabilidade quando empregado com outras finalidades. Diante disso, seguem algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Investigar as propriedades de misturas contendo outros tipos de cal hidratada, pozolanas e resíduos de construção e demolição nas pesquisas. Tendo em vista a imensa variabilidade desses materiais no planeta, inúmeras são as possibilidades de combinações que podem resultar em produtos que atendam aos critérios de compatibilidade com construções históricas espalhadas pelo mundo, além de viabilizar outras possibilidades de aplicação.
- Variação das condições de cura (temperatura, UR, etc), do método de mistura e da relação A/L. Como visto ao longo desta pesquisa, esses fatores impactam no comportamento do material ao longo do tempo, especialmente a cinética de reação. Consequentemente, faz-se necessário um aprofundamento da análise do impacto desses fatores no resultado final das pastas e argamassas compostas de cal com metacaulim e RCD.
- Análise das resistências mecânicas no longo prazo. Além das sugestões supracitadas, faz-se necessária a investigação do comportamento das resistências mecânicas das argamassas em períodos maiores, como 180, 360 e 720 dias. Essa análise é essencial para verificar se o desempenho mecânico desses materiais, que possuem a tendência de perder resistência no longo prazo, torna-se estável a partir de determinada idade.
- Realização de maiores análises em idades contidas dentro do intervalo de 56 e 90 dias de cura. Visivelmente, houve uma radical modificação nos difratogramas das pastas devido a reações químicas ocorridas no intervalo entre 56 e 90 dias, o que acarretou na redução da resistência à compressão. Consequentemente, é fundamental uma maior investigação do que efetivamente ocorre dentro desse intervalo nas argamassas de Cal-MC-RCD para que, caso esse comportamento seja prejudicial às estruturas, sejam realizadas novas pesquisas com o intuito de mitigar esse comportamento.

REFERÊNCIAS

AÏTCIN, P-C. **Concreto de alto desempenho**. São Paulo: PINI, 2000.

ANGULO, S. C. **Caracterização de Agregados de Resíduos de Construção e Demolição Reciclados e a Influência de suas Características no Comportamento Mecânico dos Concretos**. São Paulo, 2005. Tese de Doutorado – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

ARANDIGOYEN, M. *et al.* Lime-pastes with different kneading water: Pore structure and capillary porosity. **Applied Surface Science**, 252 (5), p. 1449-1459, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2005.02.145>.

ARCOLAO, C. **Le ricette del restauro: malte, intonaci, stucchi dal XV al XIX secolo**. Venezia: Marcilio Editori, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5751**: Materiais pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias. 3 ed. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7175**: Cal hidratada para argamassas – requisitos. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15894**: Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta - Requisitos. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16372**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método Blaine). Rio de Janeiro, 2015.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

AZERÊDO, A. F. N. **Estudo do resíduo de caulim em argamassas a base de cal quanto às suas propriedades frescas, endurecidas e microestruturais**. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2012.

AZERÊDO, A. F. N.; STRUBLE, L. J.; CARNEIRO, A. M. P. Microstructural characteristics of lime-pozzolan pastes made from kaolin production wastes. **Materials and structures**, 48, p. 2123 – 2132, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0297-4>.

BAKOLAS, A. *et al.* Evaluation of pozzolanic activity and physico-mechanical characteristics in metakaolin-lime pastes. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, 84(1), p. 157 – 166, 2006. <https://doi.org/10.1007/s10973-005-7262-y>.

BARROS, F. B. M. **Caracterização dimensional, morfológica e estrutural de partículas de calcário e dolomito cominuídas em moinho planetário e o estudo da aglomeração de ultrafinos**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Nuclear) – Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção**. v. 1, 5.ed. revisada, [reimpr]. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

BERSCH, J. D. *et al.* Contribuição à análise de pastas de cal hidráulica e cal hidratada para reparos em revestimentos de fachadas de edificações históricas. In: Congresso Internacional sobre patologia e reabilitação das construções, XVII., 2021. **Anais [...]**. Fortaleza: CINPAR, 2021. P. 763 – 770. DOI: 10.4322/CINPAR.2021.096. Disponível em: <https://doi.editoracubo.com.br/10.4322/CINPAR.2021.096>. Acesso em 20 out. 2022.

BETIOLI, A. M. **Influência dos polímeros MHEC e EVA na hidratação e comportamento reológico de pastas de cimento Portland**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2007.

BETIOLI, A. M. *et al.* Caracterização reológica de pasta cimentícia: associação de técnicas complementares. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 9, n. 4, p. 37–48, 2009.

BRASILEIRO, L. L.; MATOS, J. M. E. Revisão bibliográfica: reutilização de resíduos da construção e demolição na indústria da construção civil. **Cerâmica**, v. 61, p. 178 - 189, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0366-69132015613581860>.

BS EN 459-1:2010. **Building lime. Definitions, specifications and conformity criteria**.

CARNEIRO, A. M. P. **Contribuição ao estudo da influência da distribuição granulométrica do agregado nas propriedades de argamassas dosadas por curva granulométrica**. 1999. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade de São Paulo. São Paulo, 1999.

CINCOTTO, M. A; QUARCIONI, V. A; JOHN, V. M. (2007). Cal na construção civil. In: Geraldo C Isaia. (Org.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo: IBRACON, 2007, v. 1, p. 695-726.

COELHO, A. Z. G; TORGAL, F. P; JALALI, S. **A cal na construção**. Universidade do Minho. Guimarães: TecMinho, 2009.

COSTA, L. F. **Estudo do bagaço de cana-de-açúcar como material para construção civil no estado de Pernambuco – Sistema ternário com metacaulim e cal hidratada**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2017.

COSTA, L. M. **Influência da pozolanicidade na ativação alcalina**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.

CRISTINO, L. S. **Materiais produzidos com cimento reciclado e RCD por carbonatação acelerada**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Beira Interior, Covilhã, 2021.

CUNHA, G. A. *et al.* (2009). **Influência da composição química dos resíduos de construção civil à pasta de cimento**. Disponível em: <https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/21513821>. Acesso em 07 maio 2023.

DE ARAÚJO, M. L. R. **Misturas ternárias baseadas em cal hidratada, metacaulim e cinza do bagaço de cana-de-açúcar**. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2022.

DE SILVA, P. S.; GLASSER, F. P. Phase relations in the system $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{H}_2\text{O}$ relevant to metakaolin-calcium hydroxide hydration. **Cement and Concrete Research**, v. 23, p. 627–639, 1993. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(93\)90014-Z](https://doi.org/10.1016/0008-8846(93)90014-Z).

FRANÇA, M. S. *et al.* Influence of mix process on mortars rheological behavior through rotational rheometry. **Construction and Building Materials**, v. 223, p. 81 – 90, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.213>.

FRÍAS, M. *et al.* Reactivity in cement pastes bearing fine fraction concrete and glass from construction and demolitions waste: Microstructural analysis of viability. **Cement and Concrete Research**, v. 148, 160531, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106531>.

GAMEIRO, A. L. *et al.* Hydration products of lime-metakaolin pastes at ambient temperature with ageing. **Thermochimica acta**, v. 535, p. 36 – 41, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2012.02.013>.

GAMEIRO, A. L. *et al.* Lime-metakaolin hydration products: a microscopy analysis. **Materials and technology**, v. 46 (2), p. 145 – 148, 2012b.

GARTNER, E.; HIRAO, H. A review of alternative approaches to the reduction of CO_2 emissions associated with the manufacture of the binder phase in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 78, p. 126 – 142, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.04.012>.

GÓES, P. B. B. **Estudo da utilização do pó reciclado híbrido em matrizes cimentícias e sua influência na passivação do aço**. 2019. Qualificação (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

GONZAGA, N. L. **Aprimoramento de um método acelerado para avaliação da pozolanicidade de materiais cimentícios suplementares com base na NBR 5751/2015.** 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2022.

KHACHANI, M. *et al.* Non-isothermal kinetic and thermodynamic studies of the dehydroxylation process of synthetic calcium hydroxide. **Journal of Materials and Environmental Science**, v. 5 (2), p. 615 – 624, 2014.

HOPPE FILHO, J. *et al.* (2017). Atividade pozolânica de adições minerais para cimento Portland (Parte I): Índice de atividade pozolânica (IAP) com cal, difração de raios-X (DRx), termogravimetria (TG/DTG) e Chapelle modificado. **Revista Matéria**, v. 22, n. 3, artigo e11872, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620170003.0207>.

JOHN, V. M.; CINCOTTO, M. A.; SILVA M. G. Cinzas e aglomerantes alternativos. In: FREIRE, W. J.; BERALDO, A. L. (Org.). **Tecnologias e materiais alternativos de construção**. Campinas: Editora UNICAMP, 2003. p. 145- 190.

KANTRO, D. L. Influence of Water-Reducing Admixtures on Properties of Cement Paste – A Miniature Slump Test. **Cement, Concrete and Aggregates**, v. 2, n. 2, p. 95 - 102, 1980.

LANGFORD, J. I.; WILSON, A. J. C. (1978). Scherrer after sixty years: a survey and some new results in the determination of crystallite size. **Journal of Applied Crystallography**, v. 11, 102 – 113. DOI: Disponível em: <https://doi.org/10.1107/S0021889878012844>.

MACHADO, L. B. B.; MATOS, J. R. Análise térmica diferencial e calorimetria exploratória diferencial. In: CANEVAROLO Jr, S. V. (Org.). **Técnicas de caracterização de polímeros**. São Paulo: Artiber, 2004. p. 229 - 261.

MACKENZIE, R. C. De calore: prelude to thermal analysis. **Thermochimica Acta**, v. 73, p. 251 – 306, 1984.

MAGALHÃES, A. C. A. **Argamassas de cal com adições pozolânicas: contribuição para o desenvolvimento de formulações para o restauro**. 2018. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) - Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2018.

MATOS, J. R.; MACHADO, L. B. B. (2004). Análise térmica: termogravimetria. In: CANEVAROLO Jr, S. V. (Org.). **Técnicas de caracterização de polímeros**. São Paulo: Artiber, 2004. p. 209 - 228.

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

MIRIELLO, D. *et al.* (2010). Effects of milling : a possible factor influencing the durability of historical mortars. **Archaeometry**, v. 52 (4), p. 668 – 679, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1475-4754.2009.00494.x>.

MORENO-JUEZ, J. *et al.* Laboratory-scale study and semi-industrial validation of viability of inorganic CDW fine fractions as SCMs in blended cements. **Construction and Building**

Materials, v. 271, 121823, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121823>.

MURAT, M. Hydration reaction and hardening of calcined clays and related minerals. I. Preliminary investigation on metakaolinite. **Cement and Concrete Research**, v. 13, p. 259-266, 1983. DOI:10.1016/0008-8846(83)90109-6.

NITA, C.; JOHN, V. M. Materiais Pozolânicos: O metacaulim e a sílica ativa. **Boletim técnico da Escola Politécnica da USP**. São Paulo: Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT/PCC/451, 2007.

NUNES, N. G. C. **Caracterização das interações soluto (ou substrato) – solvente – solvente em misturas ternárias**. 2010. Tese (Doutorado em química) – Universidade de Lisboa, Lisboa, 2010.

OLIVEIRA, E. A. **Confiabilidade metrológica na determinação de espécies químicas em materiais siderúrgicos por espectrometria de fluorescência de raios-X**. Dissertação (Mestrado em metrologia) – Programa de Pós-Graduação em Metrologia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

PACHECO-TORGAL, F. *et al.* **Handbook of recycled concrete and demolition waste**. Cambridge: Woodhead Publishing, 2013.

PAPAYIANNY, I.; STEFANIDOU, M. Strength-porosity relationships in lime-pozzolan mortars. **Construction and Building Materials**, v. 20, n. 9, p. 700 – 705, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.02.012>.

PINTO, T. P. P. **Metodologia para a Gestão Diferenciada de Resíduos Sólidos da Construção Urbana**. 1999. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

PINTO, T. P.; GONZALES, J. **Manejo e Gestão de Resíduos da Construção Civil: manual de orientação: como implantar um sistema de manejo e gestão nos municípios**. Brasília: Caixa, 2005.

RAGO, F.; CINCOTTO, M. A. Influência do tipo de cal hidratada na reologia de pastas. **Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP**. Departamento de Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

RAUCCI, J. S. *et al.* Efeito do método de mistura sobre o espalhamento mini-slump de pastas de cimento Portland. **Revista IBRACON de estruturas e materiais**, v. 11, n. 2, p. 410 – 431, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1983-41952018000200010>.

RIBEIRO, C. C.; PINTO, J. D. S.; STARLING, T. **Materiais de construção civil**. 2.ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, Escola de Engenharia da UFMG, 2002.

ROBAYO-SALAZAR, R. A.; VALENCIA-SAAVEDRA, W.; GUTIÉRREZ, R. M. Construction and Demolition Waste (CDW) Recycling – As Both Binder and Aggregates – In Alkali-Activated Materials: A Novel Re-Use Concept. **Sustainability**, v. 12 (14), 5775, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su12145775>.

ROCHA, G. G. N. **Caracterização Microestrutural do Metacaulim de Alta Reatividade**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.

ROMANO, R. C. O.; CARDOSO, F. A.; PILEGGI, R. G. Propriedades do concreto no estado fresco. In: **Concreto: ciência e tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011.

SANTIAGO, C. C. O restauro de argamassa de cal no Brasil. **Revista Construindo**, Belo Horizonte, v. 4, n. 1, p. 67-79, 2012. Disponível em: <http://revista.fumec.br/index.php/construindo/article/view/1696>. Acesso em: 28 dez. 2022.

SANTOS, A. R.; VEIGA, M. R. **Argamassas compatíveis para edifícios antigos**. Engenharia para a sociedade: investigação e inovação. Jornada LNEC. Lisboa, 2012.

SATO, V. Y. **Contribuição ao estudo reológico de pastas cimentícias com adição do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2015.

SALES, L. P. B. **Influência do cloreto de cálcio nas propriedades reológicas de pastas de cal com adições pozolânicas**. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Programa de Pós-Graduação e Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2022.

SCRIVENER, K.; SNELLINGS, R.; LOTHENBACH, B. **A practical guide to microstructural analysis of cementitious materials**. [s.l.] Crc Press, 2016.

SEABRA, M. P.; LABRINCHA, J. A.; FERREIRA, V. M. Rheological behaviour of hydraulic lime-based mortars. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 27 (2-3), p. 1735–1741, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2006.04.155>.

SEQUEIRA, A.C.; FRADE, D.; GONÇALVES, P. **Cal Hidráulica – Um ligante para a reabilitação**. 2007. 2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção, APFAC, Lisboa.

SERRY, M. A. *et al.* Metakaolin-lime hydration products. **Thermochimica Acta**, v. 79, p. 103 – 110, 1984. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0040-6031\(84\)87097-5](https://doi.org/10.1016/0040-6031(84)87097-5).

SIQUEIRA JÚNIOR, S. F.; NÓBREGA, A. F.; CARNEIRO, A. M. P. Avaliação exploratória da trabalhabilidade de pastas de cal com metacaulim e resíduos de construção e demolição. In: encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 19., 2022. **Anais [...]**. Porto Alegre: ANTAC, 2022. p. 1 – 11. DOI: 10.46421/entac.v19i1.2035. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/entac/article/view/2035>. Acesso em 15 jan. 2023.

SOUZA, F. S. *et al.* Mapping and recycling proposal for the construction and demolition waste generated in the Brazilian Amazon. **Resources, Conservation & Recycling**, v. 176, 105856, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105896>.

SOUZA, J. S. C. **A influência do metacaulim na cristalização das hidrogranadas nas pastas de cal**. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

SOUZA, J. S. C. **Estudo de argamassas à base de cal e metacaulim para intervenções em revestimento das edificações históricas**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

TAVARES, Q. E. S. *et al.* Identificação de locais de descarte irregular de resíduos de construção e demolição no bairro Distrito Industrial II no município de Manaus-AM. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 2, p. 6014 – 6024, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.34117/bjdv6n2-052>.

THAPA, V. B.; WALDMANN, D. Performance of lime-metakaolin pastes using gravel wash mud (GWM). **Cement and concrete composites**, v. 114, 103772, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103772>.

TORRES, R. A. (2018). **Materiales y metodos de construccion en la antigua Roma: OPUS ROMANUM**. Disponível em: https://www.academia.edu/37678437/MATERIALES_Y_M%C3%89TODOES_DE_CONSTRUCCION_EN_LA_ANTIQUA_ROMA. Acesso em: 14 de junho de 2022.

VEIGA, M. R. (2017). Air lime mortars: what else do we need to know to apply them in conservation and rehabilitations interventions? A review. **Construction and Building Materials**, v. 157, p. 132 – 140. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.080>.

VEIGA, M. R. *et al.* **Methodologies for characterisation and repair of mortars of ancient buildings**. Proceedings of the International Seminar Historical Constructions, Guimarães, Universidade do Minho, 2001.

VEIGA, M. R.; CARVALHO, F. **Argamassas de reboco para paredes de edifícios antigos. Requisitos e características a respeitar**. Lisboa: LNEC, Caderno de edifícios nº 2, 2002.

VELOSA, A. L. P. L. **Argamassas de cal com pozolanas para revestimento de paredes antigas**. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade de Aveiro, Aveiro, 2006.

VELOSA, A. L.; ROCHA, F.; VEIGA, M. R. Influence of chemical and mineralogical composition of metakaolin on mortars characteristics. **Acta Geodynamica et Geomaterialia**, v. 6, n. 1 (153), p. 121 – 126, 2009.

ZHANG, D. *et al.* (2020). Assessment of the thermal and microstructural properties of metakaolin-air lime-based materials at an early age. **Applied Clay Science**, v. 191, 105619. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2020.105619>.

APÊNDICE A – CÓDIGOS DOS MINERAIS IDENTIFICADOS NO DIFFRAC. EVA

Tabela 41 - Especificação dos códigos das fases cristalinas identificadas através da DRx.

MINERAL	CÓDIGO
ALBITA	9002198
ARAGONITA	9016526
BIOTITA	9001583
CALCITA	9009667
ILITA	9013732
MAGNETITA	9013535
MICA	9000819
MICROCLÍNIO	9004191
PORTLANDITA	1001768
QUARTZO	9010146

Fonte: O autor (2023).

APÊNDICE B – DETALHAMENTO DO ENSAIO DE IAP COM A CAL AOS 7 DIAS

Tabela 42 - Composição das misturas.

MISTURA	MASSA ESPECÍFICA DOS LIGANTES	CAL	MC	RCD	AREIA (IPT)	ÁGUA
REF	2,67g/cm ³ (100% MC)	104g	245,73g	0	936g	279,79g
10% RCD	2,66g/cm ³ (90% MC + 10% RCD)	104g	200,31g	44,50g	936g	279,05g
20% RCD	2,64g/cm ³ (80% MC + 20% RCD)	104g	161,99g	80,98g	936g	277,58g
30% RCD	2,63g/cm ³ (70% MC + 30% RCD)	104g	130,35g	111,70g	936g	276,84g

Fonte: O autor (2023).

Tabela 43 – Resultados do ensaio de IAP.

MISTURA	IC (mm)	Rc1 (MPa)	Rc2 (MPa)	Rc3 (MPa)	MÉDIA	DESVIO*
REF	225	4,46	4,85	4,74	4,68 MPa	4,7%
10% RCD	297	4,22	4,36	4,51	4,36 MPa	3,44%
20% RCD	301	3,73	3,84	3,67	3,75 MPa	2,4%
30% RCD	313	3,18	3,39	3,16	3,24 MPa	4,63%

Fonte: O autor (2023).

Nota: *desvio relativo máximo.

APÊNDICE C – DETALHAMENTO DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Tabela 44 - Composição das argamassas.

ARGAMASSA	CAL	MC	RCD	AREIA	ÁGUA
REF	312,50g	312,50g	0	1.875g	500g
10% RCD	281,25g	281,25g	62,50g	1.875g	500g
20% RCD	250,00g	250,00g	125,00g	1.875g	500g
30% RCD	218,75g	218,75g	187,50g	1.875g	500g

Fonte: O autor (2023).

Tabela 45 - Resultados do ensaio de resistência à compressão (valores em MPa).

ARGAMASSA	IDADE	Rc1	Rc2	Rc3	MÉDIA	DESVIO*
REF	14 dias	2,04	2,12	1,93	2,03	0,078
10% RCD	14 dias	1,44	1,43	1,41	1,43	0,013
20% RCD	14 dias	1,47	1,46	1,48	1,47	0,008
30% RCD	14 dias	1,36	1,38	1,33	1,35	0,022
REF	28 dias	2,79	2,76	2,79	2,78	0,014
10% RCD	28 dias	2,07	2,12	1,99	2,06	0,054
20% RCD	28 dias	1,95	1,89	1,97	1,94	0,035
30% RCD	28 dias	1,77	1,72	1,72	1,74	0,024
REF	56 dias	3,22	3,24	3,05	3,17	0,085
10% RCD	56 dias	2,80	2,78	2,70	2,76	0,044
20% RCD	56 dias	2,05	1,97	2,00	2,00	0,033
30% RCD	56 dias	1,92	1,97	1,87	1,92	0,041
REF	90 dias	2,85	2,78	2,91	2,85	0,053
10% RCD	90 dias	2,48	2,42	2,46	2,45	0,025
20% RCD	90 dias	2,20	2,21	2,18	2,20	0,013
30% RCD	90 dias	1,79	1,79	1,76	1,78	0,014

Fonte: O autor (2023).

Nota: *desvio padrão.