

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE ZOOTECNIA E ENGENHARIA DE ALIMENTOS

DANIELA OLIVEIRA DE LIMA

**Avaliação da incorporação de finos de resíduos de construção e demolição (RCD)
em matrizes cimentícias binárias e ternárias**

Pirassununga

2023

DANIELA OLIVEIRA DE LIMA

**Avaliação da incorporação de finos de resíduos de construção e demolição (RCD)
em matrizes cimentícias binárias e ternárias**

(Versão Corrigida)

Tese apresentada à Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutora em Engenharia e Ciências dos Materiais.

Área de Concentração: Desenvolvimento, Caracterização e Aplicação de Materiais Voltados à Agroindústria

Orientador: Prof. Dr. Holmer Savastano Júnior

Coorientador: Prof. Dr. Moisés Frías Rojas

Pirassununga

2023

Ficha catalográfica elaborada pelo
Serviço de Biblioteca e Informação, FZEA/USP,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

d278a de Lima, Daniela Oliveira
Avaliação da incorporação de finos de resíduos de construção e demolição (RCD) em matrizes cimentícias binárias e ternárias / Daniela Oliveira de Lima ; orientador Holmer Savastano Junior ; coorientador Moisés Frias Rojas. -- Pirassununga, 2023.
148 f.

Tese (Doutorado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais) -- Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo.

1. Resíduos de construção e demolição. 2. Cimentos alternativos. 3. Matrizes ecoeficientes. 4. Eco-compósitos. I. Savastano Junior, Holmer, orient. II. Rojas, Moisés Frias, coorient. III. Título.

AGRADECIMENTOS

Á Deus, por ser minha base e minha fortaleza. Obrigada Senhor por guiar meus passos e me proporcionar à força e coragem necessária para vencer os obstáculos durante esta jornada. Por fazer ver o quão forte sou, por me reerguer quando pensava em desistir, por lutar as batalhas comigo, pois só o senhor sabe de todas as dificuldades enfrentadas durante esta caminhada.

Agradeço a minha família pelo apoio emocional, aos meus pais Alzeia Marques e José Danilo por acreditarem na minha capacidade e me incentivarem a seguir firme durante esses anos. Obrigada pai por confiar em mim, pelas palavras de afeto e amor.

Ao meu noivo Klinsman Maia, pelo apoio e incentivo, principalmente pela paciência, compreendendo minha ausência e a distância. Obrigada por seu carinho, amor e dedicação. Sou grata por ter você em minha vida, Te Amo.

Ao Dr. Holmer Savastano Junior, orientador deste trabalho, obrigada por acreditar no meu trabalho, pela paciência, disponibilidade e orientações para o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao Dr. Moisés Frías Rojas, Coorientador desta pesquisa, obrigada pelos ensinamentos compartilhados, orientações e análises realizadas juntamente com seu Departamento de Materiais do Grupo de Investigação de Materiais Reciclados do Instituto de *Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja* (IETcc), localizado em Madri, Espanha.

Ao Dr. João de Almeida Melo Filho, meu supervisor de mestrado, que durante o doutorado concedeu-me valiosas orientações e incentivos.

Aos demais professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais pelos ensinamentos e por estarem sempre dispostos a ajudar.

Agradeço aos colegas e amigos do laboratório CONSTRAMBI, que foram como uma família durante minha estadia em Pirassununga. Obrigada Marzieh Kadivar, Douglas Sadalla, Lía Velásquez, Ana Paula, Alda Capelo, Juan Camilo, Katheryn, Rafael Filomeno, Taís Freitas, Igor Parente, Leo Amaral, Adrino Galvão e Carlos Fioroni. Desejo a cada um muito sucesso e saúde.

Um agradecimento especial a Marzieh Kadivar, minha Iraniana favorita, que se tornou uma grande irmã, fico muito feliz em ter ti conhecido, obrigada pelos conselhos, apoio, confiança e pelas palavras de encorajamento.

Aos amigos Douglas Sadalla e Lía Velázquez por não medirem esforços em ajudar no processo de hornificação do tecido, na produção e carbonatação das placas, por terem sido meu braço esquerdo e direito (rsrs), que trabalharam comigo de domingo a domingo quando foi preciso. Obrigada pelas seções de desabafo e pelas palavras de apoio, vocês são pessoas muito especiais. Que vocês tenham muito sucesso em sua carreira profissional e pessoal.

A minha amiga, professora de espanhol e “psicóloga” (rsrs), Armirys Méndez, por desde o início me incentivar, pelas palavras de carinho, ensinamentos, pelas orações, por ouvir meus desabafos e me aconselhar de forma sábia. *Díos te bendiga grandemente mí amiga, muchas gracias por todo lo que hiciste por mí.*

Aos técnicos, Zaqueu, Mariana, Leonardo e Rodrigo, por todo suporte técnico na realização das análises necessárias para o desenvolvimento desta pesquisa.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM) e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Bolsa TT3 – nº 2021/02962-0), que em seus respectivos períodos ajudaram a financiar minha estadia em Pirassununga e o desenvolvimento desta pesquisa.

A todos estes e aqueles não mencionados, que me apoiaram em diversos momentos no decorrer dos últimos anos, minha gratidão, que Deus abençoe a todos!

RESUMO

LIMA, D. O. **Avaliação da incorporação de finos de resíduos de construção e demolição (RCD) em matrizes cimentícias binárias e ternárias**. 2023. 148 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2023.

A geração de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) é um dos principais desafios enfrentados pelo desenvolvimento socioeconômico de um país, representando uma parcela significativa, entre 30% a 50%, do total de resíduos gerados em escala global. No Brasil, é comum encontrar o descarte clandestino desses materiais em aterros e margens de rios, o que demonstra a falta de gerenciamento por parte das empresas e ausência de fiscalização pelas autoridades competentes. Uma alternativa promissora consiste em reutilizar o RCD como substituto para materiais não renováveis, sendo esse um dos pilares essenciais da estratégia da economia circular e da iniciativa da ONU, para alcançar a neutralidade climática até 2050. O presente estudo tem como objetivo explorar a viabilidade do uso de finos de RCD ($< 5 \text{ mm}$), submetidos a processos de moagem e peneiramento para obtenção de partículas inferiores a $63 \mu\text{m}$, com a finalidade de empregá-las como pozolana ecoeficiente em matrizes cimentícias binárias e ternárias, destinadas à produção de placas finas delgadas. Os resultados obtidos demonstram a eficiência da utilização de finos de RCD como material de substituição parcial ao cimento *Portland*, melhorando as propriedades físicas, mecânicas e microestruturais. O RCD apresentou baixa pozolanicidade e características típicas de materiais cimentícios. Quando associado ao metacaulim (MK) em misturas ternárias (5-40%RCD, 50-10%MK), observou-se que é possível reduzir a absorção de água, refinar a estrutura dos poros e obter uma pasta cimentícia com classe de resistência compatível ao cimento comercial original (40 MPa). As propriedades mecânicas dos compósitos cimentícios reforçados com fibras foram melhoradas com o uso do RCD, reduzindo o efeito negativo ocasionado pelo processo de carbonatação acelerada, que tende a diminuir a capacidade de deformação do compósito, devido o aumento da rigidez da matriz, assim, a adição de RCD compensou essa fragilização.

Palavras-chave: Resíduos de construção e demolição; Cimentos alternativos; Matrizes ecoeficientes, Eco-compósitos.

ABSTRACT

LIMA, D. O. **Evaluation of the incorporation of construction and demolition waste (CDW) fines in binary and ternary cementitious matrices.** 2023. 148 p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2023.

The generation of Construction and Demolition Waste (CDW) is one of the main challenges for the socio-economic development of a country, representing a significant portion, between 30% and 50%, of the total waste generated on a global scale. In Brazil, it is common to find the illegal disposal of these materials in landfills and riverbanks, which demonstrates a lack of management on the part of companies and a lack of supervision by the competent authorities. A promising alternative is the reuse of CDW as a substitute for non-renewable materials, which is one of the main pillars of the circular economy strategy and the UN initiative to achieve climate neutrality by 2050. The present study aims to investigate the feasibility of using CDW fines (< 5 mm), subjected to grinding and screening processes to obtain particles smaller than $63 \mu\text{m}$, to be used as eco-efficient pozzolan in binary and ternary cement matrices intended for the production of thin slabs. The results obtained demonstrate the efficiency of using CDW fines as a partial replacement material for Portland cement, improving physical, mechanical and microstructural properties. The CDW presented low pozzolanicity and typical properties of cementitious materials. When associated with metakaolin (MK) in ternary mixtures (5-40% CDW, 50-10% MK), it was observed that it was possible to reduce water absorption, refine the pore structure and obtain a cement paste with a resistance class compatible with the original commercial cement (40 MPa). The mechanical properties of fiber-reinforced cementitious composites were improved with the use of CDW, reducing the negative effect caused by the accelerated carbonation process, which tends to reduce the deformation capacity of the composite, due to the increase in matrix stiffness, thus the addition of CDW compensated for this weakening.

Keywords: Construction and demolition waste; Alternative cement; Eco-efficient matrices, Eco-composites.

Sumário

Capítulo 1	15
1 INTRODUÇÃO.....	15
1.1 Motivação	16
1.2 Objetivos.....	19
1.2.1 Objetivo geral.....	19
1.2.2 Objetivos específicos.....	19
1.3 Estrutura da Tese	19
Capítulo 2	21
2 REFERENCIAL TEÓRICO	21
2.1 Resíduos de Construção e Demolição (RCD).....	21
2.2 Gestão e Beneficiamento do RCD	23
2.3 Aplicabilidade do RCD.....	24
2.4 Fração Fina de RCD – Características e Propriedades	28
2.4.1 Composição química e mineralógica	29
2.4.2 Distribuição granulométrica.....	31
2.4.3 Massa específica, absorção de água e superfície específica.....	32
2.5 Aplicação dos Finos Reciclados	32
2.6 Materiais Cimentícios	35
2.6.1 Mecanismo de hidratação do cimento Portland	35
2.6.2 Materiais cimentícios suplementares	37
2.8 Durabilidade de Matrizes Cimentícias com Adições.....	38
2.9 Alternativas de Cura para Matrizes Cimentícias	39
Capítulo 3	42
1 INTRODUÇÃO	43
2 MATERIAL E MÉTODOS	45
2.1 Material.....	45
2.2 Métodos	46
2.2.1 Composição e produção das matrizes de cimento.....	46
2.2.2 Técnicas instrumentais	47

2.2.3	Teste de pozolanicidade	49
2.2.4	Propriedades físicas e mecânicas	49
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
3.1	Caracterização dos materiais de partida.....	49
3.2	Teste de pozolanicidade.....	53
3.3	Caracterização química dos cimentos ecoeficientes	54
3.4	Caracterização física e mecânica	55
3.5	Produtos de hidratação das pastas cimentícias (TG e DRX)	58
3.6	Microestrutura.....	61
4	CONCLUSÃO	65
Capítulo 4		66
1	INTRODUÇÃO	67
2	MATERIAL	68
3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	70
3.1	Dosagem, produção e cura dos compósitos	70
3.2	Termogravimetria (TG), Grau de carbonatação (GC) e Difração de raios X (DRX)	73
3.3	Caracterização física e mecânica dos compósitos	73
3.4	Mecanismos de Fratura.....	74
3.5	Microestrutura.....	75
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	76
4.1	Termogravimetria (TG), Grau de carbonatação (GC) e Difração de raios X (DRX)	76
4.2	Comportamento físico e mecânico	80
4.3	Padrão de fratura e falha dos compósitos	84
4.4	Microestrutura dos compósitos.....	88
5	CONCLUSÃO	93
Capítulo 5		95
1	INTRODUÇÃO	96
2	MATERIAL	97
3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	98
3.1	Técnicas Instrumentais	98

3.2	Teste de pozolanicidade	99
3.3	Produção e cura do fibrocimento	99
3.4	Cura térmica e carbonatação acelerada.....	100
3.5	Método de envelhecimento acelerado.....	101
3.6	Ensaio de Caracterização física e mecânica	101
3.7	Evolução da microporosidade.....	102
3.8	Grau de carbonatação (GC), Termogravimetria (TG) e Difração de raios X (DRX)	103
3.9	Estabilidade dimensional (retração por secagem).....	103
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	104
4.1	Caracterização do material de partida.....	104
4.2	Teste de pozolanicidade.....	106
4.3	Desenvolvimento da matriz cimentícia.....	107
4.3.1	Caracterização físico-mecânica dos fibrocimentos	107
4.3.2	Área de superfície específica, porosidade e microestrutura.....	108
4.4	Fibrocimento submetido a carbonatação acelerada	111
4.4.1	Grau de carbonatação (GC), Termogravimetria (TG) e Difração de raios X (DRX).....	111
4.4.2	Caracterização físico-mecânica dos fibrocimentos carbonatados.....	113
4.4.3	Estabilidade dimensional (retração por secagem).....	116
4.4.4	Evolução da microporosidade	117
5	CONCLUSÃO	120
	Capítulo 6	122
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	122
6.1	Perspectivas para trabalhos futuros.....	123
	REFERÊNCIAS	125

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Classificação do RCD de acordo com a origem	21
Figura 2.2 - Aplicação do painel em escala real em casa unifamiliar	27
Figura 2.3 - Análise mineralógica de diferentes tipos de FRC.....	31
Figura 2.4 - Etapas de hidratação: C_3S – alita; C_2S – belita; C_3A – aluminato tricálcico; C_4AF – aluminoferrita tetracálcico; C-S-H – silicato de cálcio hidratado; AFt – etringita; AFm – mono-sulfoaluminato de cálcio hidratado	36
Figura 3.1 - Distribuição de tamanho de partículas das matérias-primas.....	51
Figura 3.2 - Difratoogramas de raios X das matérias-primas.....	52
Figura 3.3 - Micrografias: (a) grãos de RCD sob ampliação de 50 μ m, (b) RCD sob ampliação de 30 μ m, (c) partículas de CP, e (d) partículas de MK	52
Figura 3.4 - Atividade pozolânica do RCD e MK em um sistema pozolana/cal.....	54
Figura 3.5 - Resistência à compressão das pastas cimentícias	56
Figura 3.6 - Propriedades físicas: (a) densidade aparente versus índice de vazios, e (b) absorção de água	57
Figura 3.7 - Curvas de TG e DTG: (a) misturas binárias, e (b) misturas ternárias	58
Figura 3.8 - Difratoogramas: (a) misturas binárias, e (b) misturas ternárias.....	60
Figura 3.9 - Porosimetria das pastas: (a) misturas binárias, e (b) misturas ternárias	61
Figura 3.10 - Porosidade total versus absorção de água das misturas binárias e ternárias	63
Figura 3.11 - Micrografias: (a) matriz controle - REF; (b) pasta binária com 20% RCD; (c) mistura com 50%MK; (d) composição ternária com 15% RCD	64
Figura 4.1 - Tecido de juta com escala em mm: (a) sem tratamento; (b) hornificado ...	70
Figura 4.2 - Esquema de moldagem dos compósitos	71
Figura 4.3 - Etapas de cura dos compósitos sob cura térmica e cura com CO_2	72
Figura 4.4 - Amostra para análise DIC.....	75

Figura 4.5 - TG-DTG dos compósitos carbonatados e não carbonatados: (a) compósitos referência, (b) compósitos com matriz 5RCD/45MK, e (c) compósitos produzidos a partir de 5RCD/50MK.....	77
Figura 4.6 – Difractogramas dos compósitos: (a) amostras da matriz referência, (b) amostras do bloco 5RCD/45MK, e (c) amostras do bloco 5RCD/50MK.....	79
Figura 4.7 - Curvas típicas de tensão versus deflexão: (a) compósitos referências, (b) compósitos produzidos a partir da matriz 5RCD/45MK, e (c) compósitos produzidos a partir da matriz 5RCD/50MK.....	80
Figura 4.8 - Propriedade física dos compósitos.....	84
Figura 4.9 - Padrão de fissura dos compósitos produzidos com a matriz 5RCD/50MK	86
Figura 4.10 - Associação da curva tensão-deformação com o DIC da matriz 5RCD/50MK: (a) submetido à cura térmica, (b) sob cura com CO ₂ por 9h.....	87
Figura 4.11 - Microestrutura do compósito referência: (a) sob cura térmica com ampliação de 1 mm, (b) ampliação de 100 µm, e (c) ampliação de 30 µm	88
Figura 4.12 - Microestrutura dos compósitos produzidos com a matriz 5RCD/50MK: (a) submetido à cura térmica, (b) 6h de CO ₂ , (c) 9h de CO ₂ , e (d) 24h de CO ₂	89
Figura 4.13 - Microestrutura do compósito 5RCD/50MK_9h	91
Figura 4.14 – Microestrutura do compósito 5RCD/50MK_24h: (a) zona de transição ampliada a 500 µm, e (b) ampliação de 100 µm	92
Figura 4.15 – Microestrutura do compósito 5RCD/50MK_24h: (a) zona de transição, e (b) mapa EDS	92
Figura 5.1 - Procedimento experimental da pesquisa.....	98
Figura 5.2 - Curva granulométrica dos componentes do fibrocimento	105
Figura 5.3 - Análise de DRX para os componentes do fibrocimento.....	106
Figura 5.4 - Variação da cal fixa em relação ao tempo de reação	106
Figura 5.5 - Curvas típicas de tensão versus deflexão para fibrocimentos.....	107
Figura 5.6 - Distribuição do tamanho dos poros nos compósitos.....	109

Figura 5.7 - Micrografias da superfície polida dos fibrocimentos: (a) submetido à cura térmica, e (b) após 200 ciclos de imersão e secagem.....	110
Figura 5.8 - DRX de fibrocimentos carbonatados e não carbonatados	111
Figura 5.9 - Termogravimetria dos compósitos carbonatados e não carbonatados.....	112
Figura 5.10 - Curvas típicas tensão versus deformação dos fibrocimentos: (a) submetidos a cura térmica e a carbonatação acelerada, e (b) após os ciclos de envelhecimento acelerado	114
Figura 5.11 - Propriedade física dos fibrocimentos: (a) densidade aparente versus porosidade aparente, e (b) absorção de água versus porosidade aparente	115
Figura 5.12 - Curva de estabilidade dimensional dos fibrocimentos	116
Figura 5.13 - Distribuição de tamanho de poros de compósitos sem carbonatação e compósitos submetidos à carbonatação acelerada	117
Figura 5.14 - Micrografias da superfície polida dos fibrocimentos carbonatados: (a) amostra referência, e (b) amostra com 10% de RCD.....	118
Figura 5.15 - Micrografias dos fibrocimentos envelhecidos: (a) amostra com 10% de RCD sob cura térmica, (b) análise EDS do compósito FC10%_CT50, (c) MEV-EDS da amostra FC10%_CO ₂ 50, e (d) mineralização da fibra na amostra FC10%_CO ₂ 50.....	119

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Classificação dos resíduos da construção civil	22
Tabela 2.2 - Composição química da fração fina de RCD	29
Tabela 2.3 - Porcentagem da composição granulométrica de RCD	31
Tabela 2.4 - Composição do cimento Portland.....	35
Tabela 3.1 - Formulação das matrizes cimentícias.....	46
Tabela 3.2 - Composição química (% em massa) e física das matérias-primas.....	50
Tabela 3.3 - Composição química (%) das misturas de cimento obtidas por FRX.....	54
Tabela 3.4 - Teor de água quimicamente combinada com compostos de hidratação, CH e CC (% em peso).....	59
Tabela 3.5 - Propriedades físicas das pastas – dados da PIM	63
Tabela 4.1 - Composição química (% em massa) e física dos materiais de partida	69
Tabela 4.2 - Formulação dos compósitos em massa	71
Tabela 4.3 - Teor de CH, CC e grau de carbonatação (GC).....	78
Tabela 4.4 – Propriedade mecânica dos compósitos (média \pm desvio padrão).....	83
Tabela 4.5 - Dados de fissuração dos compósitos (média \pm desvio padrão).....	85
Tabela 5.1 - Formulação de compósitos de fibrocimento em massa.....	100
Tabela 5.2 - Composição química (% em peso) e física das matérias-primas	104
Tabela 5.3 - Propriedades físico-mecânicas do fibrocimento (média \pm desvio padrão).....	108
Tabela 5.4 - Área superficial e valores de poros obtidos por BET.....	109
Tabela 5.5 - Grau de carbonatação (GC) e teor de CH.....	113
Tabela 5.6 - Propriedades físicas e mecânicas dos fibrocimentos (média \pm desvio padrão).....	115

Capítulo 1

1 INTRODUÇÃO

As atividades de construção, renovação e demolição de estruturas geram uma enorme quantidade de resíduos de construção e demolição (RCD). Estes são considerados resíduos prioritários, dos quais são gerados milhões de toneladas mundialmente, tanto em países desenvolvidos, quanto nos em desenvolvimento.

Estima-se que de 30% a 50% dos resíduos sólidos a nível mundial é proveniente das atividades da construção civil (DE MATOS et al., 2021). A União Europeia, Estados Unidos e China são os maiores produtores de resíduos de construção e demolição. Estima-se que essas regiões gerem aproximadamente 924 milhões de toneladas, 534 milhões de toneladas e 2,36 bilhões de toneladas anualmente, respectivamente (RUIZ; RAMÓN; DOMINGO, 2020). A maior parte desses resíduos, em torno de 35%, é depositada em aterros sanitários, sem passar por nenhum processo de tratamento ou reaproveitamento posterior, constituindo sérios problemas econômicos, sociais, de saúde e ambientais. (MENEGAKI; DOMINGOS, 2018).

No Brasil, anualmente são produzidos aproximadamente 100 milhões de toneladas (ROSADO et al., 2019). Embora existam normas e leis vigentes, nota-se a precariedade de gestão de resíduos por parte das empresas e a falta de fiscalização dos órgãos responsáveis, levando o índice de reciclagem ser considerado mínimo (menos de 20%) (FAVARETTO et al., 2017). Esse valor é ainda menor ao se referir à fração de finos com partículas inferiores a 0,15 mm, que geram entre 5% a 20% de finos de concreto reciclado (FCR) que são gerados durante a produção dos agregados reciclados de concreto (WANG et al., 2022). A fração fina, normalmente é constituída por partículas de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), partículas de cimento não hidratado, hidróxido de cálcio (CH) e finos de agregado, como quartzo (XIAO et al., 2018).

No entanto, os resíduos finos apresentam enormes desvantagens, devido à presença de possíveis compostos expansivos (sulfatos, cloretos), e por apresentarem propriedades diferentes (físicas, mecânicas e reológicas) dependendo do tipo de agregado natural utilizado no concreto original (silício ou calcário). Porém, dependendo da origem, granulometria, composição química e mineralógica os finos podem atuar

como material de preenchimento (filler) ou material cimentício suplementar, pois podem apresentar partículas de cimento não hidratadas e CH que podem continuar hidratando e produzindo produtos de gel (WANG et al., 2022).

O cimento é uma das matérias-primas mais utilizadas, porém é responsável por emitir níveis elevados de CO₂ na atmosfera. Estudos tem verificado a eficiência da aplicação dos finos reciclados como material cimentício suplementar, substituindo parcialmente o cimento Portland por RCD (DUAN et al., 2020; FRÍAS et al., 2020; BENNET; VISINTIN; XIE, 2022; MONASTERIO et al., 2022; TOKAREVA; KAASSAMANI; WALDMANN, 2023; ZHANG et al., 2023). Neste cenário, a utilização de RCD para produção de materiais cimentícios suplementares possuem diversos benefícios, como minimizar a extração de matérias-primas não renováveis, colaborar com a diminuição da emissão de CO₂, melhorar características de argamassas e concretos (resistência, durabilidade, entre outros). Além de diminuir problemas ambientais e reforçar os princípios de economia circular, aumentando a sustentabilidade econômica, social e ambiental.

Neste contexto, o presente trabalho pretende desenvolver alternativas viáveis a esses resíduos indesejáveis, que por suas características e finura, os tornam potencialmente viáveis para reaproveitamento como cimento ecoeficiente para substituição parcial do cimento Portland, destinado à fabricação de placas finas delgadas.

1.1 Motivação

O setor da construção civil é considerado uma atividade de extrema importância na economia de um país. No entanto, esse setor é responsável por gerar mais de 3 bilhões de RCD por ano em todo o mundo (AKHTAR; SARMAH, 2018). No Brasil, segundo a pesquisa do Panorama de Resíduos Sólidos do Brasil de 2022 (ABRELPE, 2022) a quantidade de RCD gerados anualmente é de aproximadamente 48 milhões de toneladas. Porém, esta quantidade refere-se somente ao RCD administrado pelos municípios, descartados em vias e logradouros públicos. Assim, estima-se que este valor seja superior a 100 milhões de toneladas anualmente (ROSADO et al., 2019).

Estes resíduos são compostos geralmente por diferentes tipos de concretos, argamassas, blocos e ladrilhos, entre outros materiais secundários (papel, madeira,

plásticos e metais), representando mais de 50% do total de resíduos sólidos urbanos gerados no Brasil (VÁSQUEZ, 2013). Dentre este montante, aproximadamente 60% corresponde aos resíduos de concreto (GOMES *et al.*, 2015). Embora este valor possa ser maior, pois tais dados consideram somente à quantidade de resíduos coletados pelo município lançados em vias e logradouros públicos.

Segundo pesquisas realizadas pela Associação Brasileira de Reciclagem de Resíduos de Construção e Demolição (ABRECON, 2023), atualmente no Brasil, existem aproximadamente 400 usinas de reciclagem (públicas, privadas, móveis ou fixas) produzindo 25 milhões de metros cúbicos de agregado reciclado. Dentre estas, 82% são micro empresas, que recebem aproximadamente 2000 metros cúbicos de RCD por mês. Estas são unidades de reciclagem localizadas em Regiões Metropolitanas ou em cidades com população superior a 100 mil habitantes. Além disso, pesquisas realizadas em 2020, apontam que as unidades de reciclagem, em grande maioria, são carentes em equipamentos de limpeza e triagem dos RCD, resultando na produção de agregados com quantidade de impurezas acima do estabelecido (ABRECON, 2020).

Apesar de contar com empresas de reciclagem, no Brasil, grande parte do RCD são descartados incorretamente em aterros clandestinos ou sanitários, e pontos viciados, ou seja, apenas 21% de todos os resíduos coletados são reciclados nas usinas como agregados reciclados (cascalho, areia, pedregulho, entre outros) (ABRECON, 2020). Enquanto que em países como a Bélgica, Dinamarca e Holanda, por exemplo, a taxa de produção de agregados reciclados é superior a 80% (CORINALDESI; MORICONI, 2009).

Junto à questão da produção de RCD, observa-se o aumento da poluição ambiental por meio da emissão de CO₂, gerado durante o processo de fabricação do cimento (MENEGAKI; DOMINGOS, 2018). Estima-se que durante esse processo são liberados de 6 a 8% de dióxido de carbono e consumidos entre 12 a 15% de energia. O sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC, 2019) mostrou que no Brasil, em 2019, foram produzidos/consumidos aproximadamente 57 milhões de toneladas de cimento, sendo que para cada 1 kg de cimento Portland produzido são gerados 0,73 a 0,99 kg de CO₂ (GONÇALVES; TOLEDO FILHO; FAIRBAIRN, 2006; AREZOUMANDI *et al.*, 2013), ou seja, 0,73 x 57 milhões de CO₂ liberados na atmosfera.

Assim, pesquisas têm buscado novas alternativas sustentáveis para substituir os principais componentes na fabricação do concreto, a fim de impedir o esgotamento dos recursos naturais e alcançar uma redução das emissões de CO₂ (VILLAR-COCIÑA et al., 2020; ZHAO et al., 2020). Uma das estratégias eficazes para reduzir as emissões de CO₂ é substituir parte do clínquer do cimento Portland por adições minerais ou materiais cimentícios suplementares. Aspectos ecológicos quanto à utilização de subprodutos e técnicos como a melhoria das propriedades do concreto também são decorrentes da utilização de adições minerais. A substituição também é forçada pelos princípios da economia circular, na qual as políticas internacionais priorizam a reutilização de resíduos (ALNAHHAL et al., 2018; VILLAR-COCIÑA et al., 2018; SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2018; MEJIA-BALLESTEROS et al., 2019; MORAES et al., 2019; RAHLA; MATEUS; BRAGANÇA, 2019).

Tal como a produção do cimento, o uso de agregados naturais acarreta altos impactos ambientais, causados pela quantidade de emissões de CO₂ produzidos durante sua extração, além do esgotamento dos recursos naturais (BRAVO *et al.*, 2015). Estudos demonstram que o uso de agregado reciclado possibilita a redução de emissões globais, resultantes da fabricação das matérias-primas naturais entre 5,84% a 14,3% kg CO₂ eq./m³ (HOSSAIN *et al.*, 2016; ALNAHHAL *et al.*, 2018; JIMENEZ; DOMÍNGUEZ; VEGA-AZAMAR, 2018; KURDA; DE BRITO; SILVESTRE, 2020).

Assim, a reciclagem e reaproveitamento de resíduos na forma de agregados reciclados e substituição parcial do cimento tem se tornado uma solução sustentável para proteger o meio ambiente, reduzindo a poluição e lutando contra a severa exploração dos recursos naturais, reutilizando-os como matéria-prima secundária para substituir materiais antes extraídos da natureza.

Neste contexto, observa-se a necessidade urgente do Brasil estudar e implementar novos métodos de gestão ou tratamento dos resíduos de construção e demolição, de forma a dar uma destinação mais sustentável aos RCD. Sendo assim, esta pesquisa possui a finalidade de estudar a aplicabilidade de finos reciclados de concreto (< 63 µm) em matrizes binárias e ternárias ecologicamente corretas.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

O presente estudo possui o objetivo de avaliar a influência do resíduo de construção e demolição (finos de concreto) na produção de matrizes cimentícias binárias e ternárias, destinadas à fabricação de placas finas delgadas.

1.2.2 Objetivos específicos

- Investigar a sinergia do metacaulim e do resíduo de construção e demolição ($d < 63 \mu\text{m}$) em pastas cimentícias binárias e ternárias como materiais cimentícios suplementares;
- Produzir e caracterizar compósitos ternários reforçados com tecido têxtil de juta submetido à cura térmica e ao processo de carbonatação acelerada;
- Desenvolver e caracterizar fibrocimentos com substituição parcial do cimento *Portland* por RCD submetidos à cura térmica e à carbonatação acelerada.

1.3 Estrutura da Tese

Esta tese foi estruturada em 5 capítulos, no qual cada um destes serão descritos a seguir.

Capítulo 1: Este capítulo apresenta a introdução, a motivação e os objetivos para o desenvolvimento desta pesquisa.

Capítulo 2: aborda-se a revisão dos principais conceitos básicos e publicações relacionadas aos resíduos de construção e demolição aplicados em matrizes cimentícias.

Capítulo 3: Avaliação do potencial uso de finos de resíduos de construção e demolição (RCD) como eco-pozolana em cimentos binários e ternários – Neste capítulo apresenta-se a caracterização da fração fina de RCD ($63 \mu\text{m}$) e sua aplicabilidade em matrizes cimentícias binárias (5-20% RCD) e ternárias (5-40%RCD, 50-10%MK), avaliando o comportamento químico, físico, mecânico e microestrutural.

Capítulo 4: Desenvolvimento e caracterização de compósitos ternários reforçados com tecido de juta sob cura com CO₂ - Este capítulo refere-se a produção e a caracterização de compósitos ternários produzidos com cimento, RCD e metacaulim, reforçados com tecido bidirecional de juta na fração volumétrica de 5%. Os compósitos foram submetidos a ensaios de flexão em quatro pontos, testes físicos, análise microestrutural e o comportamento de fratura foi observado através da correlação de imagem digital (*Digital Image Correlation* - DIC).

Capítulo 5: Efeito da fração fina de resíduos de construção e demolição em fibrocimentos – Este capítulo concentra-se em avaliar a aplicação dos finos de RCD (63 µm) em fibrocimentos, substituindo parcialmente o cimento Portland nas frações de 0, 5, 10 e 15% em massa. A fração ótima foi submetida ao processo de carbonatação acelerada, como método de cura alternativa. Os compósitos foram avaliados quando suas propriedades físico-mecânicas, microestrutural, grau de carbonatação e estabilidade dimensional.

Capítulo 6: Neste capítulo abordam-se as considerações finais do estudo e as recomendações para estudos futuros.

Capítulo 2

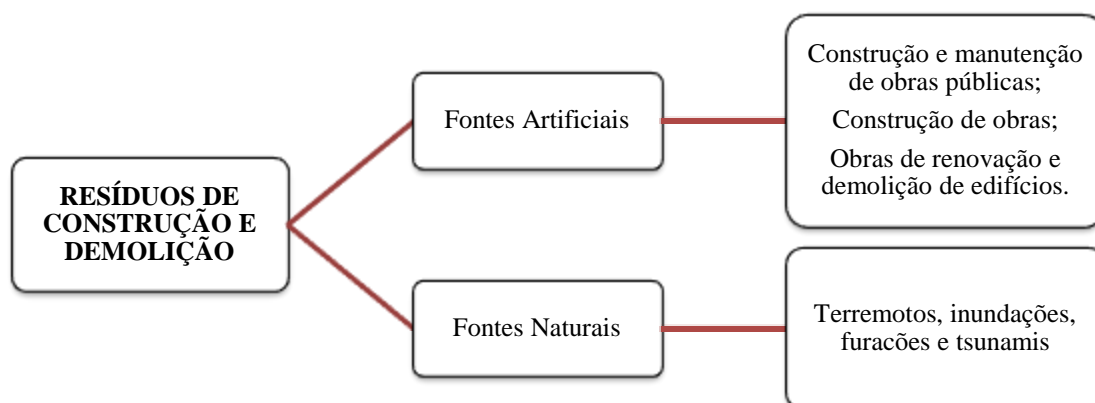
2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Resíduos de Construção e Demolição (RCD)

Segundo Art. 2º da Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 307 de 2002 (CONAMA, 2002) e a Norma Brasileira NBR 15116 (2021) os resíduos da construção civil podem ser definidos como todos os materiais provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos. Além disso, os RCD podem ser gerados por catástrofes naturais, como terremotos, inundações, furacões e tsunamis (UMAR *et al.*, 2017). Na Fig. 2.1 apresenta-se um esquema da classificação genérica dos resíduos de construção e demolição conforme sua origem.

Esse é um material que, a priori, é extremamente heterogêneo e de composição complexa, pois suas características variam conforme a região, técnicas construtivas ou destrutivas, matérias-primas utilizadas, idade, entre outros.

Figura 2.1 - Classificação do RCD de acordo com a origem



Fonte: Adaptado de Menegaki e Damingos, 2018.

Os resíduos de construção e demolição são compostos por fragmentos de blocos cerâmicos, tijolos, concreto, argamassa, vidros, solo, rochas, gesso, telhas,

madeira, plásticos, fiação elétrica, entre outros materiais, ou seja, é composto por diferentes materiais inertes, não inertes, resíduos não perigosos e perigosos.

A classificação desses resíduos é de extrema importância, pois este processo definirá o destino correto e manuseio desses materiais. A NBR 10004 (2004) classifica os resíduos quanto à periculosidade ambiental e à saúde pública, dividindo-se em: Classe I – resíduos perigosos e Classe II – resíduos não perigosos. Os resíduos da classe II são subdivididos em: classe II A – material não inerte e classe II B – material inerte.

A resolução do CONAMA nº 307 e a NBR 15116 (2021) também classificam dos resíduos da construção civil em quatro classes, conforme apresentadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Classificação dos resíduos da construção civil

Classificação	Características	Tipos de Resíduos	Destinação
A	Reutilizáveis ou recicláveis como agregados.	Componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, entre outros), argamassas, concreto (peças pré-moldadas ou não) e solos.	Deverão ser reutilizados ou reciclados na forma de agregados ou encaminhados a aterro de resíduos Classe A.
B	Recicláveis para outras destinações.	Plásticos, papelão, metais, vidros, madeiras, gesso, entre outros.	Deverão ser reutilizados, reciclados ou encaminhados a áreas de armazenamento temporário, de modo a permitir a sua utilização ou reciclagem futura.
C	Resíduos que não são economicamente viáveis ou aqueles para os quais não seja possível realizar sua reciclagem ou recuperação devido à falta de desenvolvimento de tecnologias.	-	Deverão ser armazenados, transportados e destinados em conformidade com as normas técnicas específicas
D	Resíduos perigosos provenientes do processo de construção.	Tintas, solventes, óleos, materiais contaminados que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde.	Deverão ser armazenados, transportados e destinados em conformidade com normas técnicas específicas

Fonte: Adaptado de CONAMA (2002) e NBR 15116 (2021).

Segundo a NBR 15116 (2021), os agregados provenientes de RCD podem ser classificados como:

- **Agregado de resíduo de concreto (ARC):** agregado obtido do beneficiamento de resíduo classe A, composto em sua fração graúda de no mínimo 90% em massa de componentes à base de cimento e rochas.
- **Agregado de resíduo misto (ARM):** agregado obtido do beneficiamento de resíduo classe A, composto em sua fração graúda com menos de 90% em massa de fragmentos à base de cimento e rochas.

2.2 Gestão e Beneficiamento do RCD

Nos últimos anos, governantes de diversos países aprovaram novas legislações sobre responsabilidades, despejo e reciclagem dos resíduos (EN 197-6, 2023; UNI 8520, 2022; NBR 15116, 2021). Com isso a situação nas grandes cidades está melhorando com a implantação de usinas de reciclagem, no entanto, apenas uma pequena parte de RCD é recuperada. Estatísticas apontam que com a criação de novas legislações diversos países passaram a realizar investimentos financeiros em projetos de pesquisa para desenvolver tecnologias de triagem de RCD, que são cada vez mais eficientes para gerar produtos reciclados de qualidade (NETO *et al.*, 2017).

Gerenciar o RCD de forma eficiente é um componente crítico para preservação do meio ambiente, recursos naturais, economia, entre outros. Neste quesito, existem diversos estudos na área de gerenciamento de resíduos com foco na hierarquia de gerenciamento de RCD, que incluem a redução, reutilização e estratégias de reciclagem, que possuem a capacidade de minimização de impactos ambientais e uso de recursos naturais (ZHANG *et al.*, 2022; HUANG *et al.*, 2018). No entanto, na maioria dos casos o processo de gestão de resíduos tem sido ineficiente, resultando em grandes volumes de resíduos dispostos em aterros, gerando impactos adversos ao meio ambiente, como poluição e degradação do solo, poluição do ar e da água, emissão de efeito estufa, aquecimento global e sérios problemas de saúde (KABIRIFAR *et al.*, 2020).

Segundo a resolução nº 307 do Conama (2002) o beneficiamento do resíduo pode ser caracterizado pelo ato de submeter o resíduo a operações ou processos que permitam que posteriormente sejam utilizados como matéria-prima ou produto. O processo de reciclagem trata-se assim do reaproveitamento do resíduo após o beneficiamento.

Segundo Hiete (2013) o processamento de resíduos em usinas de gestão de resíduos, possuem os principais objetivos:

- Separação dos resíduos por categoria, incluindo plástico, madeira, aço, concreto, entre outros, de forma a permitir seu reuso, reciclagem e armazenamento adequado;
- Trituração, moagem e classificação dos agregados reciclados para atingir tamanho de grãos que serão empregados com outros materiais de construção;
- Remoção de materiais contaminantes, como por exemplo, amianto, gesso e metais pesados.

As etapas de beneficiamento contemplam desde a coleta, o transporte do resíduo, passando pela separação manual por cores, fragmentação, separação granulométrica e concentração, até a estocagem para uso posterior. A seleção de diferentes metodologias e sua configuração afetam o tipo, a quantidade e a qualidade do beneficiamento dos materiais reciclados, e, portanto, a taxa de reciclagem.

2.3 Aplicabilidade do RCD

Apesar de ser um material de composição muito variável, estudos demonstram que através do beneficiamento e tratamento adequado o RCD pode ser utilizado como uma matéria-prima secundária, como agregado graúdo, miúdo, fíller ou pozolana ecoeficiente para produzir materiais destinados à construção civil. Podendo ser aplicados na produção de argamassas, concretos, obras de pavimentação (base e sub-base), obras de drenagem, de blocos de vedação, entre outros.

Favaretto *et al.* (2017), estudaram a aplicabilidade de resíduos de construção e demolição como agregado miúdo, substituindo 100% a areia natural, para a fabricação de blocos de concreto espumoso. O RCD foi obtido em uma instalação de triagem de construção e demolição, localizada em Passo Fundo, Rio Grande do Sul, Brasil. O resíduo foi processado pelos métodos de moagem e peneiramento, no qual foi pré-determinado três granulometrias de estudo: grosso (resíduo retido entre as peneiras 4,75 mm e 1,18 mm), médio (agregado retido entre as peneiras 1,18 e 0,6 mm) e fino (resíduo passante na peneira de 0,6 mm). O agente espumante utilizado foi água e amida 90 (conhecida como condensado de dietanolamina de óleo de coco), na proporção de

30:1. As propriedades físicas e químicas do RCD foram avaliadas. Além disso, a influência da granulometria e da quantidade de espuma na resistência à compressão, densidade aparente úmida e seca, absorção de água e vazios dos blocos de concreto foram determinadas. Com base nos resultados o RCD apresentou características adequadas para o desenvolvimento de espuma de concreto. Os corpos de prova com RCD graúdo apresentaram maiores valores de resistência à compressão do que aqueles com RCD médio e fino. Em médias, os grãos de tamanho médio apresentaram maior quantidade de vazio de ar, e menor variação na absorção de água.

Rocha e Sousa-Coutinho (2019) estudaram os efeitos dos resíduos de construção e demolição finamente moídos como substituição parcial para o cimento Portland em matrizes cimentícias e os efeitos causados na durabilidade do material. O resíduo foi fornecido por uma empresa especializada na gestão de resíduos, localizada em Portugal. O RCD consistia principalmente por concreto, tijolo e argamassa. O resíduo graúdo foi processado em laboratório, inicialmente em uma trituradora, seguido de moagem de moinho de bolas por 80 h. Foram produzidas pastas e argamassas com substituições de 0% (CTL), 5% (CDWg5) e 10% (CDWg10). Os diferentes tipos de argamassas foram testadas para verificar suas resistências com 7, 28 e 90 dias e as propriedades relacionadas à durabilidade, incluindo absorção capilar, difusão capilar, difusão de cloreto, carbonatação acelerada, resistência à reação álcali-sílica e ataque de sulfato foram analisados. Os resultados demonstraram que o RCD possui características químicas e físicas que permitem que o material seja considerado pozolânico, conforme os requisitos da NP 4220. Em relação à resistência mecânica, o uso de RCD resultou na perda de resistência com o aumento do teor de substituição, além de diminuir a resistência com o aumento da idade das amostras. O desempenho da carbonatação foi menos satisfatório nas argamassas contendo RCD. No entanto, esse é o comportamento esperado de um material pozolânico. A absorção aumentou conforme o teor de substituição, ou seja, as argamassas contendo RCD tornaram-se mais permeáveis. O uso do RCD reduziu a resistência ao cloreto, embora apenas marginalmente para a substituição de 5% do cimento. A expansão da resistência à reação álcali-sílica foi reduzida com o aumento da fração do RCD. A resistência ao sulfato diminuiu com o aumento da porcentagem de substituição do cimento, possivelmente devido ao alto teor de óxido de cálcio no RCD. No entanto, de maneira geral, observou-se que no CDWg5, as perdas de desempenho não foram significativas, indicando que o resíduo pode ser

usado para substituir parcialmente o cimento. Além disso, uma substituição de 10% pode ser considerada em concretos com níveis mais baixos de desempenho.

Zhang et al. (2020), produziram e aplicaram agregados reciclados de resíduos de construção e demolição como materiais de enchimento alternativos para subleitos de um anel viário, localizado no sul de Pequim, China. Foram realizados testes de campo para determinar o esquema de compactação adequada dos RCD no subleito por meio de testes de grau de compactação, observação de assentamento e testes de módulo do deflectômetro portátil de peso em queda. Ao mesmo tempo, verificaram-se os efeitos de diferentes espessuras de pavimentação solta e ciclos de vibração. Além disso, realizaram análises de nivelamento, testes de carga de placa, testes de viga Beckman para avaliar a qualidade da construção, detectar e monitorar a aplicabilidade de RCD com o solo comum na construção do subleito. Em complemento, foram realizadas avaliações do ciclo de vida (LCA) do RCD em dois esquemas de tratamento. Os resultados demonstraram que a reciclagem do RCD pode obter melhores benefícios ambientais e econômicos em comparação com sua deposição direta em aterros. Concluindo-se que sua utilização é um método recomendado com características ecologicamente corretas.

Bagarić, Pećur e Milovanović (2021), usaram resíduos de construção e demolição para produzir painéis externos pré-fabricados (tipo de painéis sanduíches) que podem ser desconstruídos, ou seja, separados e reciclados no final de seu ciclo de vida, promovendo a economia circular, reduzindo significativamente a pegada ambiental de edifícios e ajudando a preservar os recursos naturais. A primeira aplicação em escala real do painel foi para uma casa unifamiliar de três andares, localizada na cidade de Koprivnica, Croácia, como pode ser observada na Fig. 2.2. O painel é composto de quatro camadas: (I) camada interna produzido com agregado graúdo reciclado em substituição de 50% do agregado natural com 12 cm de espessura; (II) camada de isolamento térmico de lã mineral sem formaldeído (20 cm); (III) cavidade para circulação de ar (4 cm) e (IV) camada externa da fachada com agregado reciclado (6 cm). No estudo foram realizadas simulações higrotérmicas, juntamente com o monitoramento de campo do desempenho higrotérmico o qual foi realizado através do monitoramento de três painéis; consumo de energia; conforto interno e qualidade do ar em condições ambientais reais. As simulações higrotérmicas mostraram que a alta massa térmica do painel garantiu a temperatura do ar interno mais estável e a umidade

relativa. Além disso, confirmou o elevado desempenho energético, que se reflete na energia primária de 119,77 kWh/m², cobrindo a energia total consumida pelos ocupantes do edifício, sem qualquer contribuição de fontes renováveis de energia. Assim, o sistema comprovou a aplicabilidade do RCD em edifícios de alto desempenho energético, sustentável e seguro contra umidade.

Figura 2.2 - Aplicação do painel em escala real em casa unifamiliar



Fonte: Bagarić, Pečur e Milovanović, 2021.

Santos e Tubino (2021) avaliaram o processo de recuperação de solos degradados pela mineração a céu aberto no Brasil, utilizando resíduos de construção e demolição (RCD) e casca de eucalipto compostada (CEB). Três amostras de 20 kg de RCD foram coletadas em uma usina de reciclagem em Criciúma, Santa Catarina, na fração granulométrica de até 2 mm. Para o experimento, o potencial do RCD como elemento de recuperação do solo foi determinado a partir da geração de um substrato composto por solo natural, RCD na proporção de 10, 20 e 40% em massa de RCD, associado a 6 e 8 t ha⁻¹ de CEB. Os resultados demonstraram que o RCD apresentou características adequadas para a produção de solos para áreas degradadas. O substrato produzido proporcionou aprimoramento nos aspectos físico-químicos, desenvolvendo estrutura, textura e capacidade de infiltração. Aumentou a capacidade de troca catiônica e a saturação por bases, devido à presença de macro e micronutrientes essenciais para a qualidade do solo.

Robalo et al. (2021), desenvolveram e caracterizaram um concreto ecoeficiente com baixo teor de cimento e agregados reciclados de RCD, a fim de reduzir o impacto ambiental relacionado aos resíduos de construção e demolição, extração de agregados

naturais e a emissão de CO₂ gerado pelo cimento Portland. Para produção do concreto foi utilizado um cimento CEM I 52,5R e duas adições como filler (calcário e cinza volante classe F), água do abastecimento público e superplastificante à base éter-policarboxilato. O agregado reciclado foi usado na faixa granulométrica de 10 a 20 mm, variando a proporção entre 43% e 80%, buscando maximizar a substituição sem comprometer as propriedades mínimas exigidas para o concreto. As misturas foram caracterizadas no estado fresco, em relação a consistência e densidade, e no estado endurecido, em termos de resistência à compressão, flexão, módulo de Young e fissuração. Foi demonstrado que é possível desenvolver um concreto com baixa dosagem de cimento (até 175 kg / m³) e significativa taxa de substituição de agregados naturais por RCD (até 60%) para fins estruturais, com boa trabalhabilidade, desempenho e alta ecoeficiência.

2.4 Fração Fina de RCD – Características e Propriedades

Finos reciclados de concreto (FRC) são agregados finos com partículas abaixo de 5 mm proveniente de resíduos de construção e demolição de concretos velhos (LI; YANG, 2017). Esses finos representam entre 15 – 50% do concreto triturado e são formados principalmente por pasta e pequenas frações de agregados, além disso, contêm uma porção de clínquer não hidratado (PROSEK et al., 2020).

Ao contrário dos agregados graúdos reciclados, o FRC raramente é usado no concreto devido à sua maior absorção de água que pode comprometer as propriedades frescas e endurecidas do concreto. Isso é atribuído a grande área superficial e pasta velha aderida na superfície dos FRC, criando uma zona de transição de interface fraca, impedindo a ligação adequada entre a pasta nova e os finos reciclados (LI; YANG, 2017).

No entanto, no decorrer dos anos, estudos (KHATIB, 2005; EVANGELISTA; DE BRITO, 2010; ANASTASIOU; GEORGIADIS FILIKAS; STEFANIDOU, 2014) demonstram que a incorporação de finos de concreto reciclado podem ser viável se a mistura for devidamente projetada e contiver aditivos adequados.

Prosek et al. (2019) relatam que os FRC podem ser incorporados em compósitos cimentícios em grandes quantidades se combinados com outras adições minerais, como cinzas volantes ou escórias de alto-forno, melhorando a resistência mecânica, penetração dos cloretos, diminuindo as quantidades de cimento usadas e as emissões de

dióxido de carbono associadas a sua produção. Assim, o uso das pozolanas compensa o efeito negativo dos FRC nas propriedades das matrizes cimentícias (LIMA et al., 2013).

As propriedades dos FRC dependerão do tipo de processamento adotado durante o beneficiamento do resíduo, tipo de RCD e localização geográfica, estes influenciaram diretamente na composição química, granulométrica e na quantidade de finos produzidos (SCHOON et al., 2015). Sendo assim, a seguir são apresentadas algumas propriedades típicas dos finos reciclados de concreto.

2.4.1 Composição química e mineralógica

A Tabela 2.2 apresenta a composição de finos de RCD de estudos anteriores por Fluorescência de Raios-X (FRX). Observa-se que os principais componentes químicos são o óxido de cálcio (CaO), dióxido de silício (SiO₂) e óxido de alumínio (Al₂O₃). Os teores dos óxidos costumam variar dependendo da origem das matérias-primas e tipo de agregados utilizados no concreto original.

Tabela 2.2 - Composição química da fração fina de RCD

Óxidos (%)	Boudali <i>et al.</i> (2016)	Castaño-Cardoza <i>et al.</i> (2016)	Prosek <i>et al.</i> (2019)	Rangel <i>et al.</i> (2019)	Caneda-Martínez <i>et al.</i> (2021)
SiO ₂	18,37	45,97	40,5	46,0	9,34
Al ₂ O ₃	2,69	6,77	11,8	12,6	2,88
CaO	48,93	19,88	21,1	17,7	50,32
Fe ₂ O ₃	2,13	2,52	4,1	2,9	1,20
MgO	1,93	1,86	2,30	2,4	1,12
SO ₃	1,37	0,39	1,22	1,2	0,85
Na ₂ O	0,18	0,52	1,51	2,0	0,18
K ₂ O	0,42	1,73	1,83	2,4	0,47
P ₂ O ₅	-	0,12	-	0,25	<0,1
TiO ₂	0,19	0,32	-	0,45	0,14
MnO	-	<0,1	-	0,12	<0,1
Perda ao fogo	-	19,29	14,5	11,6	33,20

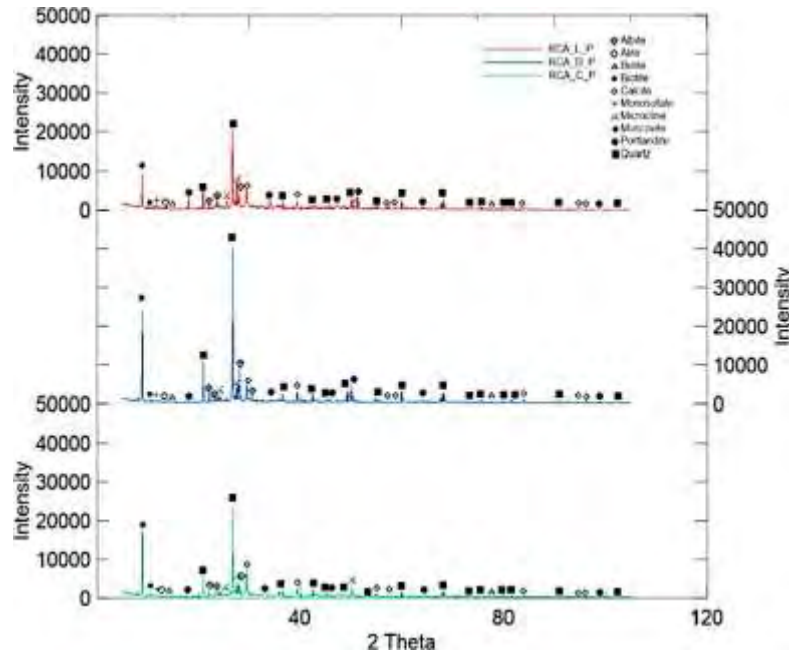
Para produção dos finos reciclados de concreto Boudali et al. (2016), utilizaram resíduos de concreto triturados, obtidos no Laboratório de Obras Públicas da Argélia Ocidental. Castaño-Cardoza et al. (2016), produziram finos reciclados obtidos a partir de resíduos mistos coletados em uma usina de reciclagem, localizada no sul da Alemanha. Prosek et al. (2019) fabricaram finos de concreto através da trituração de

peças transversais colocadas transversalmente em vias férreas (dormentes de ferrovia) com 20 anos de idade. Rangel et al. (2019) produziram finos reciclados utilizando três diferentes resíduos de concreto, o primeiro foi fabricado a partir de corpos de prova produzidos em laboratório, com envelhecimento precoce, com dosagem e propriedades controladas e sem contaminação; o segundo consiste em finos provenientes de resíduos de concreto fresco aderido a parede de caminhões betoneiras; o terceiro refere-se a resíduos coletados em usina de reciclagem de concreto, na Tabela 2.2 são apresentados somente a composição química deste último.

Caneda-Martínez et al. (2021) estudaram dois diferentes resíduos, resultados da britagem de concreto, o primeiro consiste em um resíduo silicioso, produzidos originalmente com agregados siliciosos, fornecidos pela empresa Tecrec (Madrid, Espanha) e o segundo é proviente de resíduos de concreto contendo agregados calcários, doados pela Gutram (País Basco, Espanha), estes cuja composição é apresentada na Tabela. Além disso, nota-se que os finos reciclados apresentam alta perda ao fogo.

A Fig. 2.3 apresenta a análise de difração de raios-x (DRX) de finos reciclados de concreto utilizado por Rangel et al. (2019). Nota-se que apesar de possuírem fontes distintas, os FRC apresentam o quartzo como principal fase cristalina. Além da presença de uma grande quantidade de picos referentes a minerais como a biotita, muscovita e microclina. Também observa-se, picos referentes a presença de grãos de cimento hidratados, como a portlandita, etringita e calcita. Além disso, a composição mineralógica mostra a presença de pequenas quantidades de compostos de cimento anidro (C_3S e C_2S).

Figura 2.3 - Análise mineralógica de diferentes tipos de FRC



Fonte: Rangel *et al.* (2019).

2.4.2 Distribuição granulométrica

Segundo De Lima (1999), a distribuição granulométrica é uma característica intrínseca que varia conforme o tipo de resíduo reciclado. Essa propriedade varia de acordo com a origem dos resíduos, tipo de processamento e os equipamentos utilizados, granulometria do resíduo original, entre outros fatores. Castro *et al.* (1997), estudaram a composição granulométrica de RCD oriundos da cidade de São Paulo. O material avaliado era composto majoritariamente por solo, areia e pedra (82,5%), concreto e argamassa (11,4%), materiais cerâmicos (2,6%), materiais de acabamento (1,0%) e madeira (0,8%). O estudo demonstrou que aproximadamente 81% do resíduo era composto por partículas inferiores a 5 mm, como apresentado na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Porcentagem da composição granulométrica de RCD

Granulometria (mm)	Quantidade (%)
> 15	6,13
Entre 15 - 10	3,37
Entre 10 - 5	9,8
< 5	81,43
Total	100

Fonte: Castro *et al.*, 1997.

2.4.3 Massa específica, absorção de água e superfície específica

Oksri-Nelfia et al. (2016), constaram em seus estudos que o processo de trituração e peneiramento proporcionam a densidade dos finos reciclados de concreto características próximas a massa específica do concreto original, a cerca de 2,44 g/cm³. Segundo Cantero et al. (2020), a densidade dos resíduos de concreto em pó variam entre 2,40 g/cm³ e 2,63 g/cm³.

Kim e Choi (2012), correlacionam a baixa massa específica com a presença de hidratos aderidos a superfície das partículas dos resíduos. Esses hidratos contêm poros capilares muito finos. Assim, esses hidratos concedem FRC às características de um material poroso.

Em relação à absorção de água, Lima et al. (2013), afirmam que os FRC possuem alta absorção de água por apresentarem em sua estrutura microfissuras e pasta de cimento residual aderida à camada externa do resíduo de concreto, ocasionando aumento da porosidade, resultando em uma absorção de água consideravelmente maior, que afeta a água livre, ou seja, a água disponível para as reações químicas, afetando a proporção real do fator água/aglomerante.

A morfologia dos FRC estudada por Li e Yang (2017) revelaram que a alta área superficial e a porosidade, levam a alta absorção de água. Por essas características, os FRC possuem aplicação limitada, uma vez que seu uso compromete as propriedades frescas e endurecidas do concreto.

2.5 Aplicação dos Finos Reciclados

Atualmente, na literatura existem diversos estudos sobre o uso dos FRC como pozolana ecoeficiente para substituição do cimento Portland. Assim, neste tópico, serão apresentados estudos sobre a influência dos finos reciclados de concreto em matrizes cimentícias.

Kim e Choi (2012) verificaram a qualidade de dois FRC como alternativa para substituir o cimento Portland. Para isso, pastas e argamassas foram produzidas com diferentes níveis de substituição de 0, 15, 30 e 45% em relação ao cimento e fator água/aglomerante de 0,55%. Os FRC possuíam diâmetro médio de partículas entre 176 e 90 µm, com alto teor de SiO₂, partículas angulares e produtos hidratados aderidos na superfície das partículas. Para verificar a fluidez das pastas, utilizou-se um viscosímetro

de Brookfield, enquanto o fluxo das argamassas frescas foi testado conforme a ASTM C1437. Além disso, testes de resistência à compressão foram realizados aos 3, 7 e 28 dias, de acordo com a ASTM C109. Os resultados indicaram que a viscosidade das pastas diminuiu até 62% em relação à pasta referência e o tempo de hidratação final atrasou cerca de 2 horas. O fluxo residual da argamassa diminuiu 30% em comparação a argamassa sem substituição. Quanto maior as taxas de substituição, menor era a resistência à compressão, aos 28 dias com teor de 45% de substituição a resistência diminuiu 73%. Deste modo, os pesquisadores sugerem que o teor de substituição deve ser inferior a 15%.

Prošek et al. (2019) investigaram o comportamento de pastas cimentícias ternárias contendo 50% de FRC, misturados com cal, cinza volante ou escória de alto-forno na tentativa de aumentar a hidraulicidade das pastas. Pastas referências foram produzidas com cimento Portland e com substituição de 50% do aglomerante por FRC. A partir da pasta CR realizou a substituição de 5, 10, 15 e 20% do cimento pelas demais adições, com fator água/aglomerante de 0,35%. As misturas foram avaliadas através de MEV, EDX, porosimetria, calorimetria, retração, testes de rigidez e resistência à compressão e flexão de três pontos. O estudo sugere que os FRC podem ser incorporados em matrizes cimentícias em maiores quantidades se misturados outras adições, especialmente cinzas volantes e escória de alto-forno. A pasta CR apresentou redução da resistência e rigidez, característica da estrutura menos compacta e mais porosa. No entanto, os FRC atuaram como microfiller que reforçou a matriz frágil aumentando a resistência à tração na flexão após 90 dias, ultrapassando a pasta referência e auxiliou na redução da retração. Verificou-se que a adição de cinza volante e escória, levou a maior formação de géis CHS/CASH próximo aos grãos de concreto reciclado, esse fator foi responsável pela redução da retração e aumento da resistência.

Frías et al. (2020) estudaram a pozolanicidade de seis tipos de resíduos de concreto (< 5 mm) proveniente de diferentes beneficiadoras, localizadas na Espanha. Três dos resíduos de concreto são originalmente produzidos com agregados siliciosos, e outros três com matérias-primas à base de calcário. No estudo, os finos foram moídos até obter um tamanho de partícula inferior a 63µm, tamanho considerado ideal para uso como adição ativa de cimento. No estudo, as propriedades químicas, mineralógicas, microestrutural e tamanho das partículas foram analisadas. Além disso, testes de pozolanicidade foram realizados através do método de dissolução em cal saturada, que

consiste na adição de 1g de resíduo em 75 mL de uma solução de cal saturada, os quais foram posteriormente armazenados a 40 °C por 1, 7, 28 e 90 dias. Apesar da composição original dos agregados silicioso e calcário e de sua origem distinta, a composição dos resíduos foram semelhantes. Todas as amostras apresentaram concentrações de calcita, quartzo, mica, feldspato, caulinita e fases de cimento anidro, porém, não foram identificados produtos típicos da hidratação do cimento, como por exemplo, a etringita e a portlandita. A reação pozolânica apresentou capacidade de fixação média-baixa, sendo maior nas amostras siliciosas do que na de calcário. Aos 90 dias o valor de fixação de cal variou de 60 a 67%. Gel de C-S-H e etringita formaram-se no início e ao longo da reação pozolânica. Os aluminatos de cálcio foram identificados pela primeira vez aos 7 e 28 dias. O estudo concluiu, que os resíduos reagem moderadamente com a portlandita, e possuem potencial como eco-pozolana.

Caneda-Martínez et al. (2021) estudaram o comportamento e as propriedades de pastas cimentícias ecológicas produzidas com pó de concreto reciclado de diferentes naturezas, calcária (HcG) e siliciosa (HsT), obtidas de resíduos de construção e demolição. As pastas foram produzidas com substituições parciais de 5, 7 e 10%, no total seis misturas diferentes foram confeccionadas. As pastas foram analisadas por DRX, a fim de determinar as alterações mineralógicas durante o processo de hidratação, ocasionadas pela adição dos resíduos. Aos 90 dias, os principais produtos de hidratação das pastas foram a etringita, portlandita, monocarboaluminato e géis de C-S-H. O comportamento mecânico analisado aos 2, 28 e 90 dias, por compressão uniaxial apresentou valores semelhantes à pasta referência aos 28 dias, mas inferiores aos 90 dias. Enquanto a resistência à flexão, os valores são similares em todas as idades de cura. Nas pastas, o uso do HsT provocou aumento na proporção de macroporos nas idades iniciais, o que resultou na perda moderada da resistência mecânica. Esse efeito é reduzido nas pastas de HcG devido a maior eficácia do efeito filler e na formação de carboaluminatos. Por fim, o estudo apresentou que a utilização de 10% de RCD pode proporcionar até 9,9% de redução das emissões de CO₂, podendo implicar em uma economia de até 0,42 milhões de toneladas de CO₂ eq./ano no setor do cimento.

2.6 Materiais Cimentícios

2.6.1 Mecanismo de hidratação do cimento Portland

O cimento Portland (CP) é o material mais consumido na construção civil com propriedades adesivas e coesivas. Ele é composto basicamente por matérias-primas ricas em Al, Si, Ca e Mg, tais como calcário e argila (SENFF; FOLGUERAS; HOTZA, 2005). Este aglomerante é produzido a partir da queima das matérias-primas a uma temperatura de 1450 °C até sua fusão formando o clínquer que é finamente moído com o gesso, para controlar a hidratação do aluminato tricálcico (AITCIN, 2016). Após esse processo de queima e moagem obtém-se o cimento Portland, cuja em sua composição são encontrados como principais componentes químicos o óxido de cálcio (60 a 67%), dióxido de silício (17 a 25%), óxido de alumínio (3 a 8%) e uma pequena fração de óxido de ferro (0,5 a 6%) (NBR 14656:2001).

A hidratação se inicia quando os componentes do cimento entram em contato com a água (A), dando origem a uma sequência de processos químicos e físicos entre os componentes do clínquer, sulfato de cálcio e água. A união entre as partículas sólidas promove a pega e o endurecimento, ocorrendo à transição da pasta fluida para o estado sólido (MEHTA; MONTEIRO, 2008). As duas principais reações de hidratação que originam o processo de pega e endurecimento são as fases de silicatos e aluminatos de cálcio apresentados na Tabela 2.4. A proporção destes compostos varia conforme o tipo de cimento produzido.

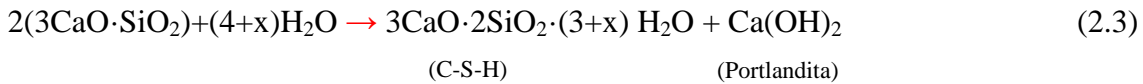
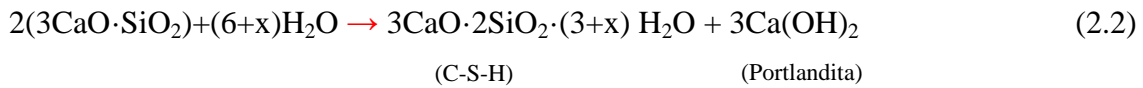
Tabela 2.4 - Composição do cimento Portland

Fases Principais	Nome do Composto	Abreviação	Teor médio de %
Silicatos	Alita ou silicato tricálcico	C ₃ S	45 a 60
	Belita ou silicato dicálcico	C ₂ S	15 a 30
Aluminatos de cálcio	Aluminato tricálcico	C ₃ A	6 a 12
	Aluminoferrita tetracálcico	C ₄ AF	6 a 8

Fonte: Marchon e Flatt, 2016.

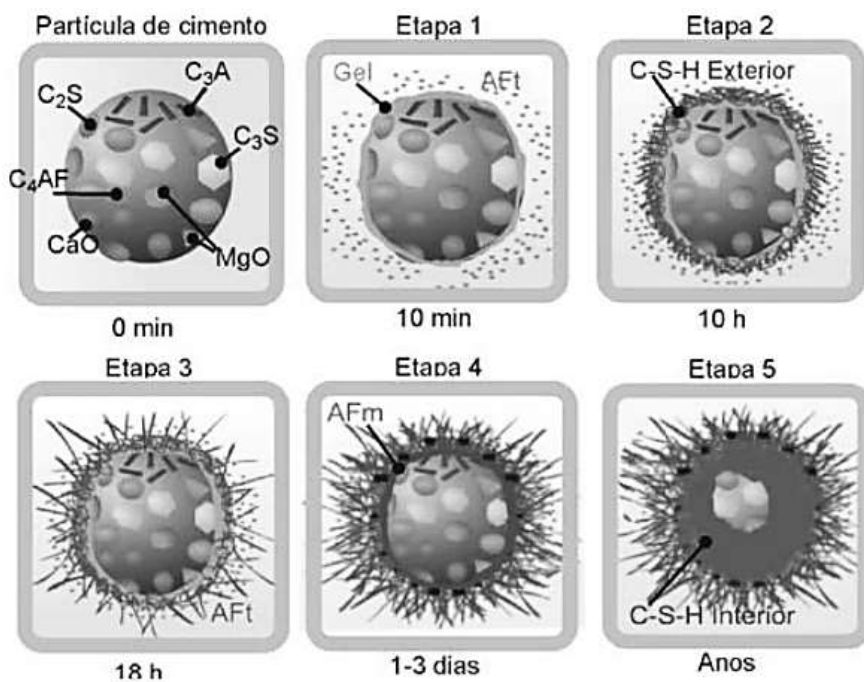
Segundo Dweck *et al.* (2016) as principais reações de hidratação são:





Este conjunto de reações acontece, resumidamente, em cinco etapas, sendo eles segundo Scrivener (1984). A Figura 2.4 ilustra as etapas de hidratação das partículas de cimento.

Figura 2.4 - Etapas de hidratação: C₃S – alita; C₂S – belita; C₃A – aluminato tricálcico; C₄AF – aluminoferrita tetracálcico; C-S-H – silicato de cálcio hidratado; AFt – etringita; AFm – mono-sulfoaluminato de cálcio hidratado



Fonte: Scrivener, 1984.

Etapa 1 – nos primeiros minutos ocorre a reação da água com o C₃A e a gipsita (gesso), liberando grande quantidade de calor, formando os cristais curtos de etringita (AFt); e também ocorre a reação da água o C₃S, formando um gel amorfo de C-S-H, que

se deposita na superfície da partícula, e hidróxido de cálcio $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$, que precipita nos espaços entre as partículas de cimento com um formato hexagonal.

Etapa 2 – prossegue a reação da água com os silicatos de cálcio (alita e belita), formando-se uma camada adicional de C-S-H em torno da partícula a uma distância de cerca 1 μm , que se designa comumente por “C-S-H exterior”. Uma quantidade significativa foi formada em 3 h, e os grãos são completamente cobertos em 4 h. Essa fase coincide com a velocidade máxima de liberação de calor e corresponde aproximadamente ao fim da pega.

Etapa 3 – ocorre uma reação de hidratação secundária dos aluminatos de cálcio (C_3A e C_4AF) formando-se compostos aciculares longos de etringita (AFt). O C-S-H que começa a se formar nesta etapa designa-se por “interior”, uma vez que, devido à mobilidade progressivamente mais reduzida dos produtos das reações, se deposita dentro da camada de hidratação formada nas etapas anteriores.

Etapa 4 – A hidratação prossegue a uma velocidade lenta, correspondente a reações em estado sólido. Quando o gesso é totalmente consumido na reação química, a etringita (AFt) reage com o aluminado de cálcio (C_3A), e aparece uma nova fase de aluminato, conhecido como mono-sulfoaluminato de cálcio hidratado (AFm).

Etapa 5 – As reações de hidratação continuam ao longo de anos, continuando essencialmente formando “C-S-H interior” adicional.

2.6.2 Materiais cimentícios suplementares

Materiais cimentícios suplementares (MCS) se tornaram uma alternativa promissora como substitutos parciais de clínquer em cimentos ou na substituição parcial de cimento Portland na produção de concretos. Essa prática resulta na produção de concretos mais duráveis, resistentes e sustentáveis, além de reduzir custos, emissões de carbono (CO_2) e energia (JUENGER; SIDDIQUE, 2015; BOSCARO; PALACIOS; FLATT, 2021; DABBAGHI et al., 2021; HIGUCHI et al., 2021; HOSSAIN; DONG; NG, 2021).

Os MCS têm sido usados com sucesso por décadas na produção de cimentos Portland compostos (CP II – E, CP II – Z e CP II - F) com adições de escória, pozolana e filler, respectivamente. No entanto, o estudo de MCS alternativos está se tornando cada vez mais importante, devido à disponibilidade limitada de matérias-primas. No

Reino Unido, por exemplo, com o desuso do carvão como fonte de energia, o fornecimento de cinzas volantes reduziu significativamente (PANESAR; ZHANG, 2020). Situações como essa vêm ocorrendo também nos Estados Unidos, que já desativou aproximadamente 40% das usinas termoelétricas a carvão nos últimos anos; Enquanto o Reino Unido planeja inativar todas as suas usinas a carvão até 2025 e os Países Baixos até 2030 (JUENGER; SNELLINGS; BERNAL, 2019).

Há uma grande variedade de adições sendo investigados atualmente provenientes de subprodutos industriais (como por exemplo, os finos de concreto reciclado), pozolanas naturais e materiais inertes (filler) que apresentam propriedades hidráulicas ou pozolânicas (SKIBSTED; SNELLINGS, 2019). A sílica ativa, cinza de casca de arroz, escória de alto-forno, metacaulim (SIDDIQUE; KLAUS, 2009), cinzas de resíduos agrícolas, tais como, cinza do bagaço de cana-de-açúcar, cinza de palha de trigo, cinza de sabugo de milho, são alguns exemplos de novos SCMs em estudo (RITHUPARNA; JITTIN; BAHURUDEEN, 2021).

Essas adições tornaram-se frequentes na composição de concretos de alta resistência, alto desempenho e autoadensável. Além de serem amplamente usados em concretos e/ou cimentos mistos binários, ternários e até quaternários ou incorporados separadamente à mistura de concreto (RANAIVOMANANA; LEKLOU, 2021). Além disso, muitos estudos empregam os materiais cimentícios suplementares como um tratamento para a matriz cimentícia, a fim de compatibilizar sua utilização com fibras vegetais e evitar sua degradação no meio alcalino.

2.8 Durabilidade de Matrizes Cimentícias com Adições

A durabilidade do concreto está fortemente relacionada a propriedades intrínsecas, como: forma e textura dos grãos, massa específica, porosidade, resistência, módulo de elasticidade, absorção de água, entre outros. Os concretos com adições minerais tem sua durabilidade associada à permeabilidade, que também está vinculada a porosidade.

A permeabilidade do concreto é proporcional ao fator água/cimento e inversamente proporcional aos finos presentes na mistura. A estrutura da pasta de cimento, agregados e interface pasta-agregado, determinam a permeabilidade de fluidos e gases no interior da estrutura (PIMENTEL et al., 2020). O processo de cura é outro

fator que afeta a permeabilidade, tendo em vista que falhas na cura podem gerar microfissuras (PIRES et al., 2017).

A redução da porosidade reduz a permeabilidade do material, consequentemente aumenta a durabilidade. Um concreto impermeável seria o ideal para evitar a penetração de agentes agressores, porém é impossível que todos os poros sejam preenchidos, todavia pode ser melhorada com o uso de pozolanas ou fillers, dosagem e fator água/cimento.

Adições minerais são reconhecidas por melhorar a durabilidade da estrutura do concreto. Em particular, devido ao seu efeito no refinamento de poros e na redução da alcalinidade da solução dos poros e do teor de portlandita nas matrizes cimentícias (SÁNCHEZ DE ROJAS et al., 2018). O uso de 30% de pozolana como substituição e relação a/c de 0,6 pode acarretar uma redução de 5% na permeabilidade à água (PACHECO-TORGAL; JALALI, 2010). Cassar e Camilleri (2012) mostraram que a substituição parcial do cimento Portland por 10-20% de pó de vidro resulta em um concreto com alta resistência à penetração de íons de cloreto.

Portanto, a durabilidade de materiais cimentícios com adições de materiais cimentícios suplementares está diretamente relacionada à densificação e ao refinamento dos poros.

2.9 Alternativas de Cura para Matrizes Cimentícias

Os métodos de cura para matrizes cimentícias são utilizados para promover a hidratação e conferir resistência, durabilidade e propriedades mecânicas ao material. Na literatura mundial existem diferentes métodos de cura para matrizes cimentícias, alguns dos métodos comumente mencionados na literatura serão apresentados a seguir.

A cura úmida convencional é o método mais comum e amplamente utilizado. Este processo de cura consiste em manter a matriz cimentícia úmida por um período prolongado, normalmente por 7, 28 a 91 dias. A umidade é fornecida por meio de cura em água, pulverização constante ou cobertura com tecidos úmidos, esse processo permite a hidratação contínua do cimento, desenvolvendo sua resistência total (ABNT 9479, 2006; ABNT, 14931, 2023).

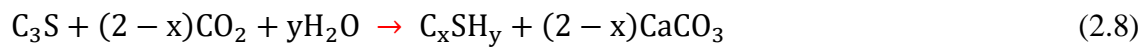
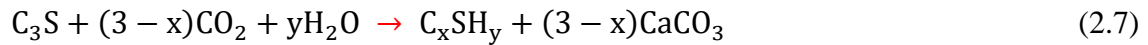
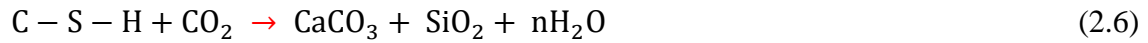
A cura térmica é um método que consiste na aplicação de calor controlado para acelerar o processo de cura e desenvolvimento de resistência do cimento. O uso de

temperatura acelera a reação de hidratação do cimento, o que acarreta uma cura mais rápida e um ganho de resistência em um curto período de tempo, otimizando os processos construtivos. A temperatura é um parâmetro crucial e precisa ser controlada, pois altas temperaturas podem acelerar a reação de hidratação, mas também podem levar a problemas como a formação de fissuras devido à expansão térmica excessiva (SBIA et al., 2017).

A cura a vapor é um método específico de cura térmica que envolve a aplicação de vapor de água em matrizes cimentícias. Essa é a técnica mais comum utilizada para acelerar a hidratação do cimento e, conseqüentemente, obter uma resistência inicial mais rápida, que exijam altas performances mecânicas em idades precoces (GONZALEZ-COROMINAS; ETXEBERRIA; POON, 2016). Este processo, geralmente é realizado em câmaras de cura a vapor, onde o material é colocado e exposto a altas temperaturas, geralmente entre 40 °C e 100 °C e níveis controlados de umidade, por um período limitado dependendo da característica do material (ZEYAD et al., 2022). O vapor de água aplicado na câmara envolve o material cimentício, fornecendo calor e umidade suficiente para promover a hidratação acelerada do cimento. Os parâmetros típicos deste processo de cura são o tempo de pré-cura, a temperatura máxima do vapor e a duração na temperatura máxima (BA et al., 2011). Este método é comumente utilizado na produção de concreto pré-moldado, blocos, painéis de fibrocimento, tubos de concreto, entre outros (ROSTAMI; SHAO; BOYD, 2012).

A cura de materiais cimentícios com CO₂ é um processo alternativo recente, conhecido como cura acelerada por CO₂ ou cura com CO₂. O método consiste em expor o material cimentício a uma atmosfera enriquecida com CO₂. No qual, o CO₂ reage com o hidróxido de cálcio para formar carbonato de cálcio. A realização do processo de carbonatação em idade precoce de hidratação faz com que, os silicatos de cálcio não reagidos e seus produtos iniciais de hidratação portadores de cálcio (Ca), reajam para converter o CO₂ dissolvido em CaCO₃, como por exemplo, a portlandita (ZHANG et al., 2021), conforme apresentado nas equações 2.5, 2.6, 2.7 e 2.8 (LI; WU, 2022). Esse processo bloqueia permanentemente o CO₂ e acelera o processo de hidratação e o endurecimento do material cimentício (ZHANG; LI; ELLIS, 2018).





Além disso, estudos demonstram que o processo de carbonatação aumenta a durabilidade dos materiais cimentícios quando expostos a ambientes de sulfato, ácido e a ciclos de molhagem e secagem (ZHANG; SHAO, 2018). Porém, existem fatores que podem afetar a cura por CO_2 como a umidade, tempo e intensidade de pressão, temperatura, duração da cura (ZHAN; POON; SHI, 2016; LU et al., 2022) e idade de pré-hidratação antecedendo o processo de carbonatação (ZHANG; CAI; JAWARSKA, 2020; XUE et al., 2022).

Capítulo 3

O artigo foi publicado na revista *Construction and Building Materials*, v. 411, 134320, 2024, (DOI: doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134320).

Avaliação do potencial uso de finos de resíduos de construção e demolição (RCD) como eco-pozolana em cimentos binários e ternários

Daniela Oliveira de Lima^a, Douglas Sadalla de Lira^a, Moisés Frías Rojas^b, Holmer Savastano Junior^a

^a Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, Brasil

^b Instituto de Ciências da Construção Eduardo Torroja (IETcc-CSIC), Madrid, Espanha
daniela.engcivil@usp.br

Resumo

Os resíduos de construção e demolição (RCD) constituem uma fração substancial do volume total de resíduos sólidos gerados globalmente, uma alternativa é utilizar a fração fina como eco-pozolana. O estudo tem como objetivo avaliar o uso de finos de RCD (< 63 µm) como material cimentício suplementar (MCS) em matrizes binárias (cimento e RCD) e ternárias (cimento, RCD e metacaulim). Misturas binárias foram preparadas com 5-20% de RCD, e ternárias com até 55% de substituição (5-40%RCD, 50-10%MK). Técnicas experimentais de fluorescência de raio X (FRX), distribuição granulométrica, difração de raios X (DRX), microscopia MEV-EDS, termogravimetria (TG) e porosimetria de intrusão de mercúrio (PIM) foram empregados. As propriedades físicas, mecânicas e microestrutural das pastas foram avaliadas. Os resultados demonstram que os finos de RCD podem ser utilizados em grandes quantidades em blends ternários, gerando o refinamento da estrutura dos poros, reduzindo a absorção de água e propriedades mecânicas na classe de 40 MPa.

Palavras-chave: Resíduo de concreto; Metacaulim; Cimentos alternativos; Matrizes ecoeficientes.

1 INTRODUÇÃO

O cimento Portland (CP) é um dos materiais de construção mais consumidos no mundo. Atualmente, mais de 4 bilhões de toneladas de cimento são utilizados por ano (MINERAL COMMODITY SUMMARIES, 2022). Porém, seu uso é responsável por emitir entre 5-8% de CO₂ no meio ambiente (KAJASTE; HURME, 2016). Com isso, para cada kg de cimento produzido é liberado 0,73 a 0,99 kg de CO₂ (AREZOUMANDI et al., 2013). Constituindo um dos pilares fundamentais da estratégia da economia circular e da ONU para atingir a chamada “*Race to Zero*” que visa eliminar as emissões de gases do efeito estufa até 2050, estudos exploram alternativas para reduzir o teor de clínquer através do uso de materiais cimentícios suplementares (ALNAHHAL et al., 2018; VILLAR-COCIÑA et al., 2018; SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2018; MORAES et al., 2019; RAHLA; MATEUS; BRAGANÇA, 2019).

Como uma alternativa de materiais cimentícios suplementares diferentes finos provenientes de resíduos de construção e demolição (< 5 mm) estão sendo estudados (EVANGELISTA et al., 2015; FRÍAS et al., 2020; CANEDA-MARTÍNEZ et al., 2021; MONASTERIO et al., 2022; OLIVEIRA et al., 2023; TOKAREVA; KAASSAMANI; WALDMANN, 2023). A geração de resíduos ultrapassa 3 bilhões de toneladas (AKHTAR; SARMAH, 2018) compostos predominantemente por resíduos de concreto (GETACHEW et al., 2023). Os finos reciclados podem conter grãos de cimento não hidratados que podem ocasionar um efeito pozolânico (SUI et al., 2020; ROCHA; TOLEDO FILHO; CAYO-CHILENO, 2022). Pesquisas mostram que este material possui uma reatividade média-baixa (FRÍAS et al., 2020; CANEDA-MARTÍNEZ et al., 2021). Porém, a fração fina de RCD ainda é pouco utilizada (PROŠEK et al., 2020) devido suas características intrínsecas, como alta absorção de água, heterogeneidade e contaminantes. Todavia, pesquisadores (PROSEK et al., 2019; FRÍAS et al., 2021; MORENO-JUEZ et al., 2021; MONASTERIO et al., 2022; OLIVEIRA et al., 2023) mostraram que a produção de ligantes ternários, combinando CP, RCD e adições minerais, como cinzas volantes, escórias de alto-forno e vidro reciclado proporcionam melhor resistência mecânica, penetração dos cloretos, diminuem as quantidades de cimento usadas e as emissões de dióxido de carbono. Assim, o uso de pozolanas compensa o efeito negativo do RCD nas propriedades das matrizes cimentícias.

PROŠEK et al. (2019) estudaram o efeito de pastas de cimento ternário contendo 50% de finos de concreto reciclado (FCR) associado a cinza volante, cal e escória de alto forno. Os resultados mostram que 50% de FRC e 5% de cinza volante reduz 44% da retração, 26% da resistência à tração na flexão, em contraparte reduz 53% do desempenho à compressão. WU et al. (2021) investigaram o efeito de diferentes resíduos provenientes de pasta reciclada, argamassa reciclada e concreto reciclado, em diferentes teores e tamanho de partículas, no transporte de água em compósitos cimentícios em matrizes binárias e ternárias (com metacaulim, sílica ativa, cinza volante e pó mineral). Os resultados demonstram que o uso de resíduos (20% em massa) com aditivos minerais (10% em massa de metacaulim ou sílica ativa) diminuem a absorção de água e aumenta a resistência à compressão, que é maior que a argamassa sem resíduos. Cantero et al. (2022) estudaram o efeito do RCD (5-10% em massa) e de cinzas volantes (10-20% em peso) em matrizes binárias e a sinergia da mescla em argamassas ternárias (5–10% em peso de RCD e 10–20% em peso de cinza). A pesquisa demonstrou que o uso combinado de 10% de RCD e 20% de cinza volante melhora a trabalhabilidade e o comportamento mecânico em relação às composições binárias. TOKAREVA; KAASSAMANI; WALDMANN (2023) e Oliveira et al. (2023) verificaram que substituindo 15-20% de CP por RCD é possível reduzir a emissão de CO₂ em aproximadamente 9-10%, tornando o RCD uma alternativa promissora para produção de ecocimentos.

Apesar disso, ainda existem lacunas em relação ao desempenho dessas novas matrizes cimentícias. Assim, esta pesquisa investiga o uso do RCD (63 µm) em matrizes binárias (CP e RCD) e ternárias (CP, RCD e MK) como material cimentício suplementar. Este estudo visa diminuir o consumo de clínquer garantindo as propriedades físicas, mecânicas e microestruturais das matrizes cimentícias. As matérias-primas foram caracterizadas por granulometria a laser, BET, FRX, DRX, MEV e a pozolanicidade do RCD e do MK foi avaliada. As composições binárias e ternárias foram analisadas quanto ao desempenho físico (absorção de água, densidade e índice de vazios), resistência à compressão, os produtos de hidratação foram identificados por DRX e TG e a microestrutura foi avaliada por PIM e MEV-EDS.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Material

As matrizes cimentícias foram produzidas com cimento Portland de alta resistência inicial (semelhante ao cimento tipo III segundo ASTM C150 [17]), metacaulim HP ULTRA e RCD com partículas inferiores a 63 μm . Além disso, foi utilizado um aditivo superplastificante (SP) Silicon Premix 40205 a base de policarboxilato, com massa específica de 1,07 g/cm^3 e fator água/material cimentício de 0,4, em massa.

O resíduo empregado neste estudo foi obtido em usina de beneficiamento de RCD, provenientes de diferentes locais de demolição. Este resíduo é caracterizado por sua composição heterogênea, constituído por diferentes tipos de concreto, com dosagens e propriedades desconhecidas e idade indefinida. O RCD é composto por partículas inferiores a 6 mm de diâmetro, constituído de aproximadamente 98% de resíduos de concreto e 2% de resíduos de cerâmica. Após receber o RCD no laboratório, ele foi seco em estufa a 60 °C por 24 horas, e em seguida foram processados nas seguintes etapas:

Homogeneização de partículas: Esta etapa teve como objetivo separar a fração referente ao agregado graúdo (> 5 mm) do agregado miúdo (< 5 mm). A separação foi realizada através do uso de uma peneira com abertura de malha de 4,75 mm.

Trituração e peneiramento: Esta fase teve como foco a redução das partículas do agregado miúdo (< 5 mm) em pó (< 63 μm). O resíduo foi triturado em um moinho de bolas, por aproximadamente 6 h. Em seguida, para garantir a granulometria inferior a 63 μm , o resíduo foi submetido a um processo de peneiramento utilizando uma peneira com abertura de malha de 250 Tyler/Mesh. A fração de finura do resíduo (<63 μm) foi adotada com base em referências anteriores (FRÍAS et al., 2020; CANEDA-MARTÍNEZ et al., 2021).

2.2 Métodos

2.2.1 Composição e produção das matrizes de cimento

O resíduo de construção e demolição (< 63 µm) foi utilizado em mistura binária, substituindo parcialmente o cimento nos teores de 5, 10, 15 e 20% em massa. As matrizes ternárias foram compostas por CP, RCD e MK, com até 55% de substituição, com o objetivo de avaliar a sinergia entre os materiais cimentícios suplementares em ecocimentos de baixa pegada de carbono. Para o estudo, foi adotado o fator água/materiais sólidos de 0,40 com base nos estudos de Lima (2019). A Tabela 1 apresenta as formulações analisadas.

Tabela 3.1 - Formulação das matrizes cimentícias

Misturas	Nomenclatura	CP (%)	RCD (%)	MK (%)	SP (%)	Mini slump (mm)*
Referência	REF	100	0	0	0,05	44,47
Binárias	5RCD	95	5	0	0,05	42,98
	10RCD	90	10	0	0,06	44,87
	15RCD	85	15	0	0,06	42,32
	20RCD	80	20	0	0,08	47,74
	50MK	50	0	50	0,60	52,34
Ternárias	5RCD/50MK	45	5	50	0,60	51,2
	5RCD/45MK	50	5	45	0,60	52,83
	10RCD/40MK	50	10	40	0,55	46,69
	15RCD/35MK	50	15	35	0,55	47,18
	20RCD/30MK	50	20	30	0,50	51,26
	30RCD/20MK	50	30	20	0,50	51,92
	40RCD/10MK	50	40	10	0,45	54,21

* O mini slump test foi realizado conforme Kantro (1980) .

Fonte: Própria autoria.

As misturas foram preparadas em misturador mecânico EMIC, modelo AG-5, com capacidade de 5l. Inicialmente, os materiais secos foram misturados manualmente para homogeneização; em seguida, na batedeira, foi misturado por 1 minuto em velocidade baixa; logo após, adicionou-se metade do superplastificante previamente diluído em água e misturou-se por 1 min; em sequência, o restante do superplastificante diluído foi incorporado e misturado por mais 1 minuto. Por fim, para homogeneizar a

mistura, deixou-se por mais 2 minutos em velocidade baixa. A fim de garantir o índice de consistência similar entre as misturas adotou-se a consistência média de $(44,47 \pm 10)$ mm (pertencente à pasta REF), como parâmetro de controle para as demais pastas. O teor de aditivo foi ajustado para obter a consistência média adotada.

2.2.2 Técnicas instrumentais

Técnicas instrumentais foram utilizadas para a caracterização química, mineralógica e microestrutural das matérias-primas e das pastas cimentícias, descritas a seguir.

A composição química das matérias-primas e do cimento misturado foram determinadas por um espectrômetro de fluorescência de raios X de dispersão de comprimento de onda (WDXRF) em um espectrômetro Bruker, modelo S8 TIGER. Foi utilizado um tubo de raios X com ânodo de ródio (Rh) com janela ultrafina de 75 μm e operando com tensão máxima de 60 kV e corrente máxima de 170 mA.

A finura e a distribuição do tamanho de partícula dos materiais foram analisadas por granulometria a laser, usando um analisador de tamanho de partícula a laser Malvern Mastersizer 3000, equipado com fontes vermelhas e azuis (He-Ne e LED) e capaz de medições de tamanho de partícula dentro de uma faixa de 0,01 e 3500 μm .

As análises mineralógicas das matérias-primas e matrizes cimentícias aos 28 dias foram obtidas por difração de raios X (DRX) de pó, em difratômetro de raios MiniFlex 600, Rigaku, com radiação de cobre, operando a 40 kV e 15 mA, em uma etapa de 0,02° por segundo e intervalo de medição entre os ângulos de Bragg (2θ) de 5° a 60°, com intensidades registradas por 1 segundo em cada passo. As fases cristalinas foram identificadas usando o software X'Pert HighScore Plus usando o banco de dados Powder Diffraction File (PDF 2). Fragmentos das pastas aos 28 dias foram coletados após o teste mecânico. As amostras foram imersas em álcool isopropílico durante 24 h e secas em estufa a 60 °C por 48 h para interromper o processo de hidratação. As amostras foram moídas manualmente e o pó resultante foi peneirado em malha de 0,075 mm. O pó resultante foi utilizado para os ensaios de DRX e TG.

A morfologia das partículas dos pós e das matrizes cimentícias foram analisadas em microscópio eletrônico de varredura (MEV) Hitachi, modelo TM3000. As imagens

foram obtidas por retroespalhamento de elétrons (BSE) operando em torno de 15 kV e 20 kV. Após a interrupção do processo de hidratação das matrizes cimentícias, amostras foram embebidas a vácuo em resina epóxi, seguindo os procedimentos propostos por TONOLI et al. (2016).

As análises termogravimétricas foram realizadas em pós das pastas aos 28 dias de idade utilizando um equipamento modelo SDT Q600 da TA Instrument, da marca NETZSCH, localizado do Departamento de Materiais do Grupo de Investigação de Materiais Reciclados do *Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja* (IETcc), localizado em Madri. O equipamento operou com uma taxa de aquecimento de 10 °C/min, da temperatura ambiente até 1000 °C, em atmosfera de nitrogênio e fluxo de 100 ml/min. A massa das amostras foi de aproximadamente 70 mg e utilizou-se um cadinho de platina. Neste estudo, a porcentagem em massa do hidróxido de cálcio (CH) e do carbonato cálcio (CaCO₃) das amostras foi calculada através das equações 3.1 e 3.2, conforme Mehdizadeh et al. (2021) e Li et al. (2023).

$$\text{CH (\%)} = m_{(380-480)} \times \frac{M_{\text{CH}}}{M_{\text{H}_2\text{O}}} \times 100\% \quad (3.1)$$

$$\text{CC (\%)} = m_{(540-780)} \times \frac{M_{\text{CaCO}_3}}{M_{\text{CO}_2}} \times 100\% \quad (3.2)$$

Onde, $m_{(380-480)}$ e $m_{(540-780)}$ são as porcentagens de massa das amostras na temperatura de 380 e 480 °C, 540 e 780 °C, respectivamente; e M_{CH} , $M_{\text{H}_2\text{O}}$, M_{CaCO_3} e M_{CO_2} referem-se a massa molecular do CH, H₂O, CaCO₃ e CO₂. As perdas de massa foram corrigidas para a mesma base de não voláteis, conforme Taylor (1997).

A porosimetria por intrusão de mercúrio (MIP) foi adotada para avaliar a distribuição e o tamanho dos poros das pastas aos 28 dias. O ensaio foi realizado utilizando um equipamento AutoPore IV 9500 V1.09., da marca Micromeritics. Amostras de 1 cm³ foram analisadas sob tensão superficial de 0,485 g/cm² e uma densidade de 13.544 kg/m³ com ângulo de contato de avanço/recuo considerado de aproximadamente de 141°. O tempo de equilíbrio de alta e baixa pressão foi de 10 s e a quantidade de mercúrio introduzido em cada intervalo de pressão foi registrado.

2.2.3 Teste de pozolanicidade

A pozolanicidade do RCD e do MK foi avaliada pelo método de análise química acelerada em um sistema puro de pozolana/hidróxido de cálcio, realizado no *Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (IETcc)*, localizado em Madri. O método consiste em adicionar 1g de resíduo a 75 mL de solução saturada de hidróxido de sódio e manter armazenada a 40 °C por 1, 7, 28 e 90 dias. Nas idades definidas, as soluções foram filtradas e a concentração de cálcio remanescente na solução foi determinada por titulação volumétrica com EDTA. A quantidade de cal fixada foi definida pela diferença entre a cal presente em uma solução referência (VILLAR-COCIÑA et al., 2006).

2.2.4 Propriedades físicas e mecânicas

Para os testes de resistência à compressão axial foram produzidos corpos de prova cilíndricos com dimensões de 50 mm x 25 mm (altura x diâmetro). O processo de moldagem dos espécimes seguiu as prescrições da NBR 7215 (2019). Os espécimes foram desmoldados após 24 h e mantidos em câmara com umidade relativa de ~ 60% a uma temperatura de 23 °C até a realização do ensaio nas idades de 7, 28 e 90 dias. Os corpos de prova foram testados em máquina universal de ensaios Emic, modelo DL3000, equipada com célula de carga de 300 kN, a uma velocidade constante de 0,5 mm/min, até a ruptura do corpo de prova.

Os valores de absorção de água (AA), densidade aparente (DA) e índice de vazios (I_v) foram realizados aos 28 dias de idade, de acordo com os procedimentos estabelecidos pela ABNT NBR 9778 (2009).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização dos materiais de partida

Na Tabela 3.2 são apresentados a composição física e química das matérias-primas. O RCD é composto majoritariamente por CaO (38.93%) e SiO₂ (26.68%), característica do concreto original a base de calcário, segundo estudos anteriores a composição do RCD dependerá da matéria-prima utilizada no concreto original

(FRÍAS et al., 2020; CANEDA-MARTÍNEZ et al., 2021). Além disso, a maior quantidade de CaO pode ser relacionado a alta concentração da pasta de cimento nas frações finas do RCD (ULSEN et al., 2013; GASTALDI et al., 2015; BOUDALI et al., 2016). O MK possui natureza silicoaluminosa ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 = 94\%$), seguido do óxido de ferro (2,33%) e óxido de titânio (1,92%) em concentrações minoritárias. Considerando a norma americana (ASTM C618, 2022), o MK atende ao requisito químico (soma de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq 70\%$); enquanto o RCD estaria fora do padrão. No entanto, a recente norma europeia (EN 197-6, 2023) permite que frações finas de concreto sejam incorporadas como adições ativas ao cimento até 35% (cimento binário) e misturadas com outras pozolanas até 29%, dependendo do tipo de cimento (CEM II/A /B/C-M e CEM VI).

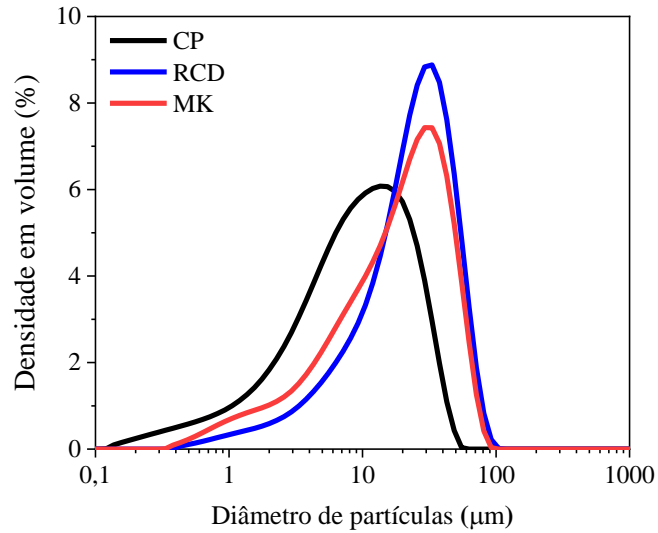
Tabela 3.2 - Composição química (% em massa) e física das matérias-primas

	CP	RCD	MK
SiO_2	18,88	26,68	63,91
Al_2O_3	4,55	9,19	29,30
CaO	63,25	38,93	0,171
Fe_2O_3	2,66	9,19	2,33
MgO	2,47	2,76	0,19
SO_3	3,77	1,95	0,11
Na_2O	0,40	0,48	-
K_2O	0,91	1,21	0,39
P_2O_5	0,16	0,15	-
TiO_2	0,22	0,58	1,92
MnO	<0,10	0,15	<0,10
Perda ao fogo	2,0	14,4	1,5
Densidade (g/cm^3)	3,09	2,44	2,55
BET (m^2/g)	1,47	13,55	20,29

Fonte: Própria autoria.

As curvas de densidade de distribuição das matérias-primas por granulometria a laser são mostradas na Fig. 3.1. Todas as amostras apresentam um único pico com distribuição de tamanho de partícula máxima em torno de 13 μm para o cimento e 30 μm para as amostras RCD e MK. Os valores de D_{50} (peneira pela qual passam 50% das partículas) são 9,07 μm , 24,0 μm e 19,3 μm , respectivamente. O processo de moagem adotado para os resíduos de construção e demolição proporcionaram uma distribuição granulométrica compatível com as demais matérias-primas da matriz cimentícia.

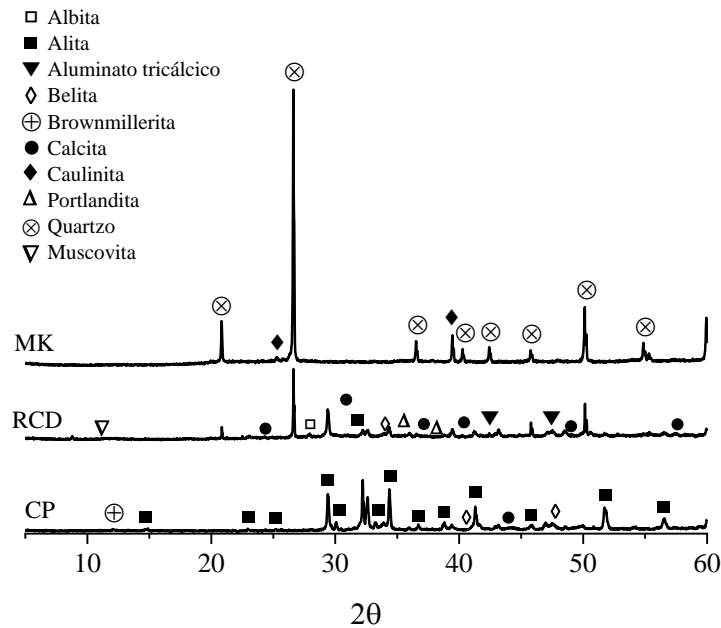
Figura 3.1 - Distribuição de tamanho de partículas das matérias-primas



Fonte: Própria autoria.

Os difratogramas de raios X das matérias-primas são apresentados na Figura 3.2. O RCD apresentou uma grande quantidade de picos referente ao quartzo, composto característico de britas e areias naturais, utilizados na produção do concreto original. Picos referentes à fase anidra (C_2S e C_3S) foram detectados em menor proporção. A presença de minerais nesta fração foi quase nula, identificando apenas um pico referente à albita e a muscovita, sua presença pode estar associada à contaminação tanto por agregados siliciosos originais quanto por resíduo cerâmico presente nos finos de RCD. Picos relacionados à calcita podem ser observados em grandes quantidades, podendo ser parcialmente vinculada à carbonatação da fase hidratada do cimento (MARANGU; THIONG’O; WACHIRA, 2019). O difratograma do MK apresentou picos típicos correspondentes às fases de quartzo (SiO_2) como principal fase mineralógica cristalina e resíduos de caulinita não desidroxilada ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$).

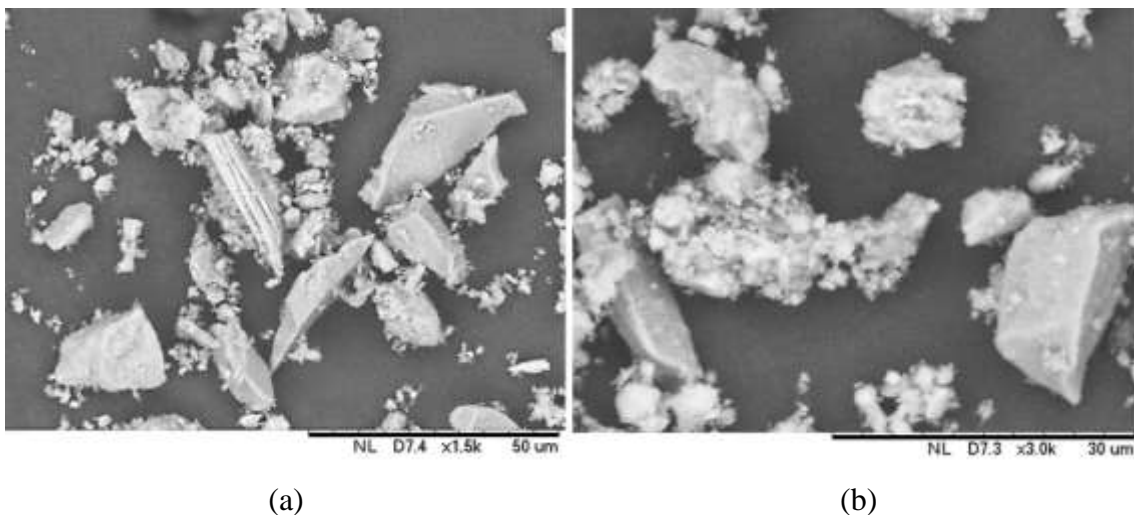
Figura 3.2 - Difratomogramas de raios X das matérias-primas

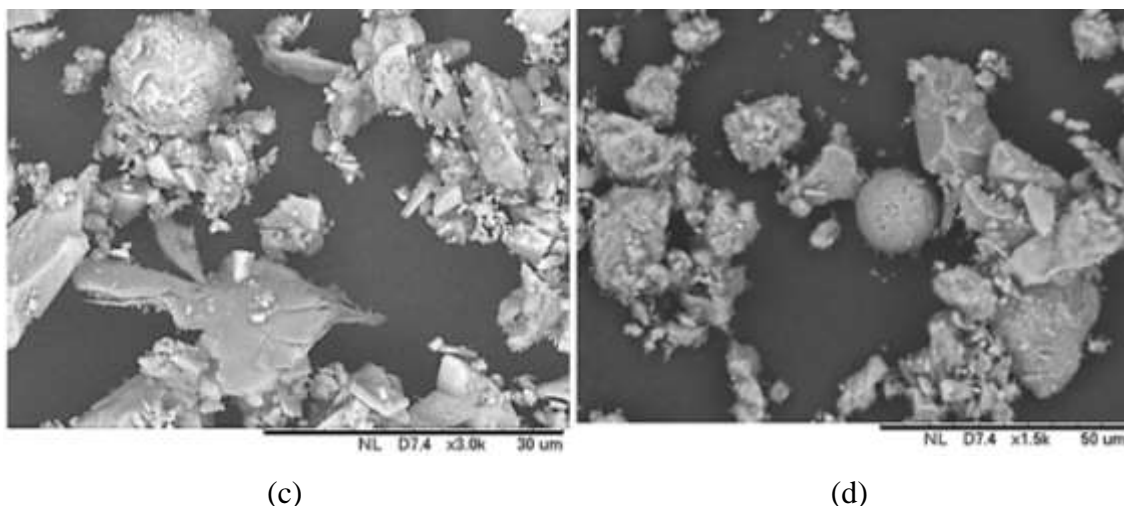


Fonte: Própria autoria.

A Figura 3.3 apresenta a morfologia das matérias-primas obtidas por microscopia eletrônica de varredura. O RCD (Fig. 3.3 a,b) apresenta grãos irregulares, grande maioria em formato angular com diversos tamanhos. Essa irregularidade pode ser atribuída à quebra das partículas durante o processo de beneficiamento do RCD, que envolve as etapas de britagem, moagem e peneiramento. Além disso, o resíduo é formado por grãos de cimento hidratados e não hidratados, partícula de agregados, como quartzo, o que pode justificar a diversidade das partículas.

Figura 3.3 - Micrografias: (a) grãos de RCD sob ampliação de 50 μm, (b) RCD sob ampliação de 30 μm, (c) partículas de CP, e (d) partículas de MK





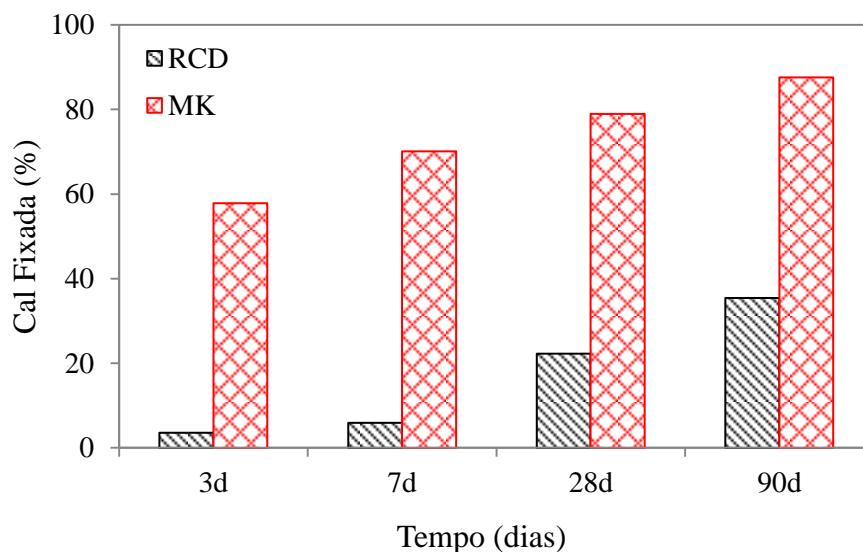
Fonte: Própria autoria.

Observa-se que as partículas além de apresentarem formato irregular, apresentam alta rugosidade, aparentemente áspera e porosa (Fig. 3.3b), possivelmente devido a camadas de cimento hidratado e apresentam alta área superficial, conforme observado em estudos anteriores (EVANGELISTA et al., 2015; FERREIRA et al., 2019). A área superficial BET do RCD (13,55 m²/g) e do MK (20,29 m²/g) confirmam a porosidade aberta, que em proporções inadequadas podem gerar maior porosidade, absorção de água e permeabilidade nos materiais cimentícios (MUCSI et al., 2021). Os níveis elevados da área superficial está associado ao processo de moagem utilizado para reduzir as partículas do RCD.

3.2 Teste de pozolanicidade

A Fig. 3.4 apresenta a atividade pozolânica em um sistema pozolana/cal. O RCD consumiu aproximadamente 35% da cal disponível, apresentando baixa reatividade após 90 dias de exposição. Esse comportamento pozolânico estaria relacionado principalmente à presença de partículas de argila presente no RCD, e não à presença de resíduos de concreto não hidratado, conforme observado em estudos anteriores (FRÍAS et al., 2020; CANEDA-MARTÍNEZ et al., 2021). O MK por ser conhecido por sua alta reatividade pozolânica, consumiu aproximadamente 60% e 88% da cal disponível aos 3 dias e 90 dias respectivamente.

Figura 3.4 - Atividade pozolânica do RCD e MK em um sistema pozolana/cal



Fonte: Própria autoria.

3.3 Caracterização química dos cimentos ecoeficientes

A Tabela 3.3 apresenta a composição química dos cimentos binários e ternários determinados por FRX. Os resultados são comparados com as propriedades químicas do cimento Portland pozolânico (CP IV) exigidos pela NBR 16697 (2018). As principais diferenças entre as misturas podem ser observadas principalmente para os óxidos de silício e cálcio.

Tabela 3.3 - Composição química (%) das misturas de cimento obtidas por FRX

	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	MnO	LOI
REF	18,88	4,55	63,25	2,66	2,47	3,77	0,40	0,91	0,16	0,22	<0,10	2,0
5RCD	15,97	3,46	63,02	2,17	1,32	5,40	0,59	1,09	0,22	0,21	<0,10	6,27
10RCD	17,90	3,46	60,49	2,13	1,38	5,47	0,66	1,14	0,11	0,50	<0,10	6,52
15RCD	19,42	3,91	59,11	2,17	1,35	5,28	0,67	1,21	0,11	0,22	<0,10	6,21
20RCD	21,98	4,31	56,08	2,17	1,45	5,11	0,72	1,27	0,19	0,22	<0,10	6,22
50MK	38,73	15,82	32,67	2,13	0,70	3,47	0,28	0,73	<0,10	1,15	<0,10	3,97
5RCD/50MK	26,85	16,0	26,76	2,44	0,79	2,12	0,23	0,64	0,12	1,21	<0,10	18,35
5RCD/45MK	38,28	15,07	33,51	2,17	0,79	3,43	0,33	0,79	<0,10	1,15	<0,10	4,12
10RCD/40MK	38,12	14,17	33,94	2,17	0,84	3,54	0,42	0,89	<0,10	1,05	<0,10	4,52
15RCD/35MK	35,72	13,61	36,11	2,25	0,94	3,69	0,48	0,98	<0,10	0,92	<0,10	4,87
20RCD/30MK	35,12	12,49	37,34	2,27	0,99	3,57	0,56	1,07	<0,10	0,91	<0,10	5,1
30RCD/20MK	36,72	10,37	37,09	2,12	1,22	3,62	0,71	1,24	0,11	0,68	<0,10	5,86
40RCD/10MK	33,93	8,03	40,78	2,28	1,41	3,64	0,87	1,48	0,11	0,49	<0,10	6,66

Fonte: Própria autoria.

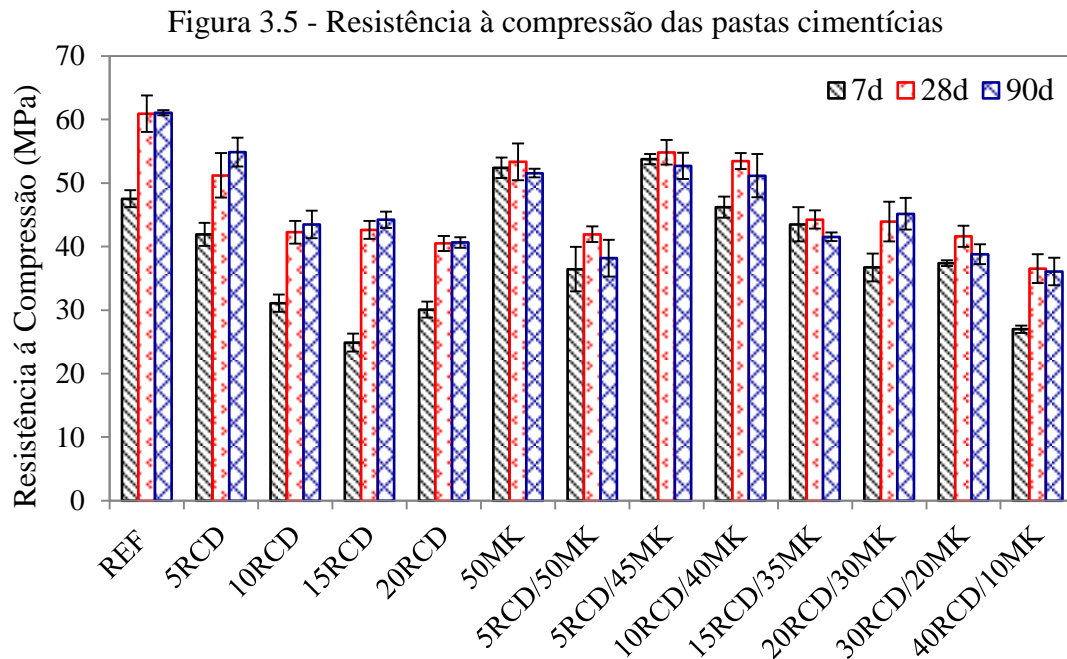
Quanto maior o teor de MK menor a porcentagem de CaO na composição. De acordo com as exigências do padrão brasileiro, as misturas binárias com RCD apresentaram trióxido de enxofre superior, sendo maior que $\leq 4,5$. Em contrapartida, todas as misturas ternárias estão em conformidade com a NBR 16697 (2018). Todas as amostras apresentaram o LOI superior ao CP, isso pode estar associado ao teor de calcita na composição do RCD (FRÍAS et al., 2021; MONASTERIO et al., 2022). Além disso, a presença de compostos orgânicos no RCD ocasiona o aumento na perda ao fogo (LOI) devido à combustão ou decomposição térmica dos componentes orgânicos.

3.4 Caracterização física e mecânica

Os resultados de resistência à compressão são apresentados na Figura 3.5 para as idades de 7, 28 e 90 dias. Todas as pastas cimentícias apresentaram decréscimo na resistência mecânica em relação à matriz de referência, apresentando diferenças estatísticas. Nas composições binárias, a desempenho mecânico variou de 51-40 MPa (5-20% RCD) aos 28 dias. A redução da resistência ocorre gradativamente com o aumento do teor de substituição de cimento por RCD, no qual, a resistência variou de aproximadamente 16% (5RCD) a 33% (20RCD) aos 28 dias de cura em relação à matriz controle. Essa característica também foi observada em estudos anteriores (PROŠEK et al. 2019; OLIVEIRA; DEZEN; POSSAN, 2020; CANEDA-MARTÍNEZ et al., 2021; SZABÓ et al. 2023).

As composições ternárias apresentaram resistência mecânica variando de 55-36 MPa aos 28 dias. Apesar de conterem até 45% de cimento Portland, o efeito pozolânico do MK compensou o efeito negativo, resultante das altas taxas de substituição do CP por materiais cimentícios suplementares. Notou-se uma redução significativa na resistência à compressão da pasta ternária produzida com teor de 40% de RCD (40RCD/10MK) que atingiu em média 36 MPa, inferior ao cimento Portland comercial utilizado, acarretando uma redução de aproximadamente 60% na resistência à compressão. Kim e Choi (2012) obtiveram resultados similares ao utilizarem a substituição de cimento por 45% de RCD. As composições ternárias com 5-10% de RCD (5RCD/45MK e 10RCD/45MK) apresentaram resistência mecânica estatisticamente igual a formulação 50MK, cuja resistência é em média de 50 MPa. A NBR 16697, prevê a adição de pozolanas em até 50%, com classe de resistência de 25,

32 ou 40 MPa. Neste caso, os cimentos ternários atendem às regulamentações brasileiras, com elevados teores de RCD, demonstrando seu potencial como material de enchimento ou pozolana ecoeficiente quando associados a outros materiais cimentícios complementares e conforme a aplicabilidade desejada.



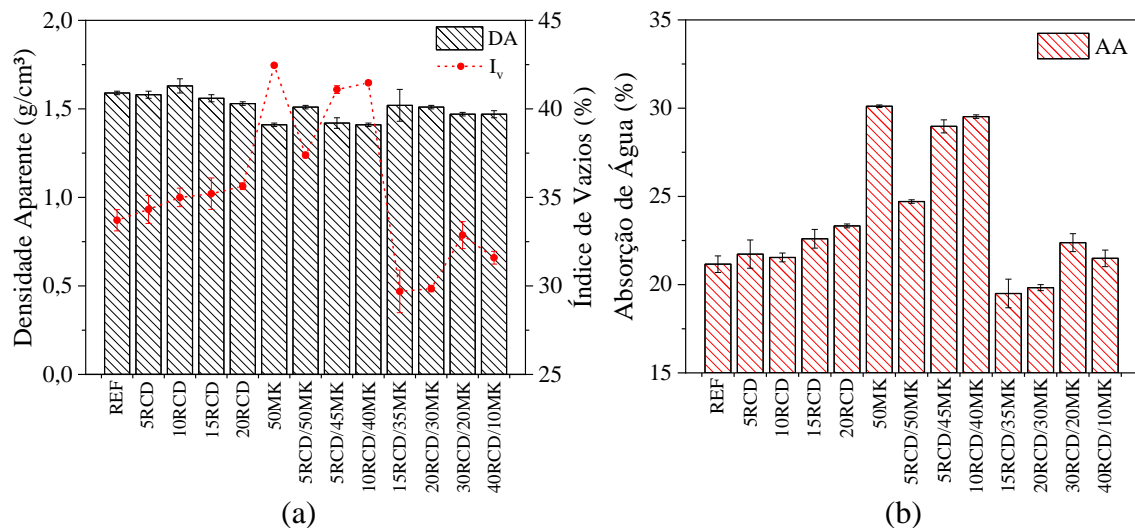
Fonte: Própria autoria.

Em geral, o decréscimo de resistência mecânica nas pastas cimentícias era esperado devido à redução da quantidade de cimento, pois os produtos de hidratação diminuem com o aumento do teor de RCD, devido seus componentes inertes (MOON et al., 2005). Esta característica é notória principalmente nas matrizes binárias, onde o RCD atuou como material de preenchimento e não como pozolana. Em contrapartida, a resistência à compressão foi maior para matrizes ternárias com elevados teores de MK, isso pode estar associado à reatividade pozolânica do MK e seu efeito de enchimento. Isto ocorre pela reação do MK com o CH, formando silicatos (C-S-H) e aluminatos de cálcio hidratados (C_2ASH_8 , C_3AH_6 , C_4AH_{13}), promovendo o desenvolvimento de resistência (DUAN et al., 2020). Portanto, a incorporação do RCD misturado com MK auxilia nas propriedades das pastas cimentícias.

A Figura 3.6 apresenta os resultados referentes às propriedades físicas, como absorção de água (AA), densidade aparente (DA) e índice de vazios (I_v) das matrizes cimentícias aos 28 dias. As pastas cimentícias (50MK, 5RCD/45MK e 10RCD/40MK) apresentaram menor densidade, este comportamento pode ser associado ao menor peso

específico do RCD e do MK, que são menos densos que o cimento Portland. Tanto o RCD quanto o MK apresentam uma área superficial maior e uma estrutura granular rugosa, quando comparados com os grãos do cimento Portland. Consequentemente, quando incorporados em matrizes cimentícias, esses poros podem permanecer, proporcionando a penetração de água, o que resulta no aumento da porosidade e, consequentemente da absorção de água. Além disso, a diminuição dos produtos de hidratação nas pastas cimentícias gera uma microestrutura mais solta e porosa, principalmente em elevados teores de RCD, fazendo com que ocorra o aumento do transporte de água (WU et al., 2021).

Figura 3.6 - Propriedades físicas: (a) densidade aparente versus índice de vazios, e (b) absorção de água



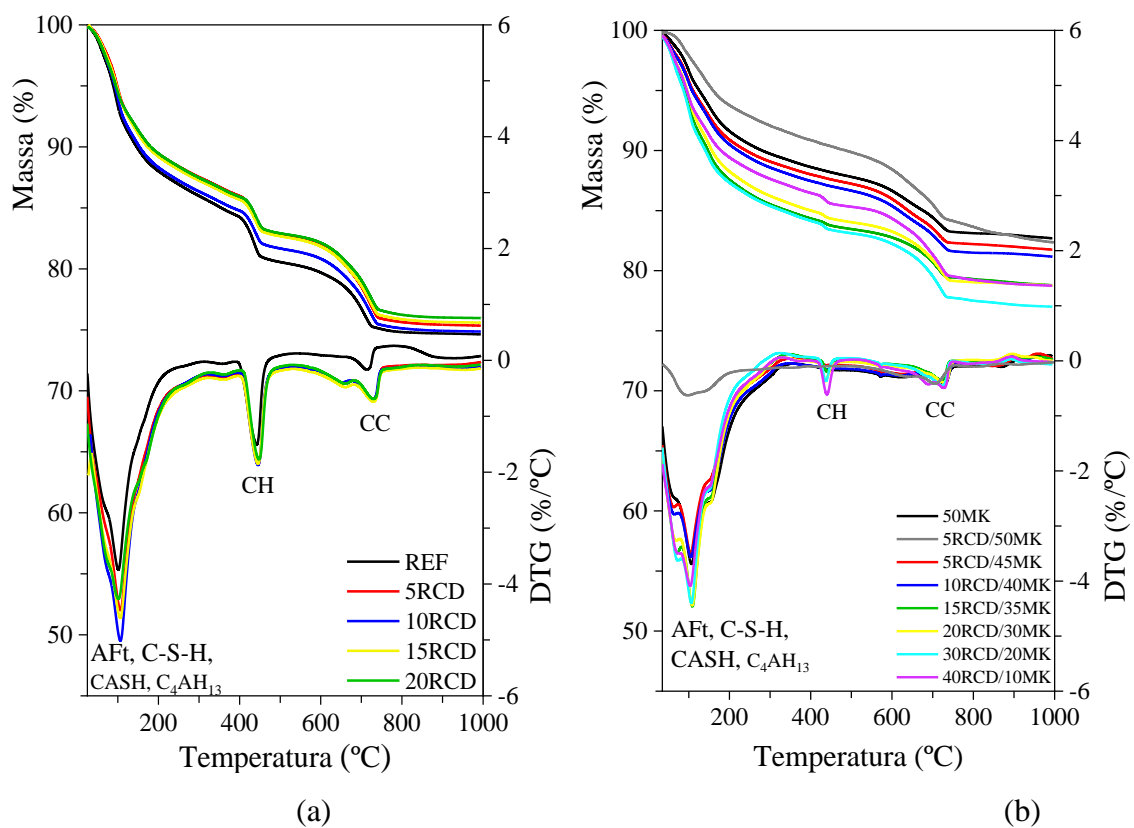
Fonte: Próprio autor.

As composições 15RCD/35MK e 20RCD/30MK apresentaram propriedades estatisticamente iguais, reduzindo aproximadamente 6% a AA e 11% o I_v, em relação à matriz controle. No geral, a combinação do RCD e MK otimiza a distribuição do tamanho das partículas, gerando redução do índice de vazios e da absorção de água entre as formulações 15RCD/35MK – 40RCD/10MK. Associando as propriedades físicas e mecânicas as matrizes 15RCD/35MK e 20RCD/30MK demonstram um grande potencial, embora seu desempenho mecânico tenha sido inferior a matriz controle, a tensão máxima foi aproximadamente 45 MPa, comparável ao cimento comercial utilizado.

3.5 Produtos de hidratação das pastas cimentícias (TG e DRX)

A Figura 3.7 (a,b) apresenta as curvas de TG/DTG das amostras de pastas cimentícias aos 28 dias. Três transições principais foram identificadas. A primeira transição ocorreu entre 35 °C a 350 °C, relacionada à água quimicamente combinada e desidroxilação das fases hidratadas típicas da reação de hidratação do cimento e reação pozolânica, como C-S-H gel, etringita (AFt), C_2ASH_8 , C_4AH_{13} e C_4AcH_{11} (DWECK et al., 2013; FRANKEOVÁ; SLÍŽKOVÁ, 2016; VIGIL DE LA VILLA MENCÍA et al., 2022). A segunda transição é característica da desidroxilação do hidróxido de cálcio (CH), com pico máximo aproximadamente a temperatura de 445 °C nas curvas de DTG. As composições binárias apresentaram perdas de massa de CH inferiores à referência, em até aproximadamente 20%. Esse comportamento também foi observado em estudos anteriores (CHEN et al., 2022; REN et al., 2022).

Figura 3.7 - Curvas de TG e DTG: (a) misturas binárias, e (b) misturas ternárias



Fonte: Própria autoria.

Nas composições ternárias, o teor de CH reduziu em aproximadamente 81% em relação a matriz controle. Este comportamento, indica que a substituição parcial do cimento Portland por 50% por materiais cimentícios suplementares auxilia no consumo da Portlandita. A terceira transição ocorreu entre 540 °C a 780 °C, referente à decomposição do carbonato de cálcio. Na Tabela 3.4 são apresentados os resultados referente à água quimicamente combinada, hidróxido de cálcio e carbonato de cálcio das composições estudadas.

Tabela 3.4 - Teor de água quimicamente combinada com compostos de hidratação, CH e CC (% em peso)

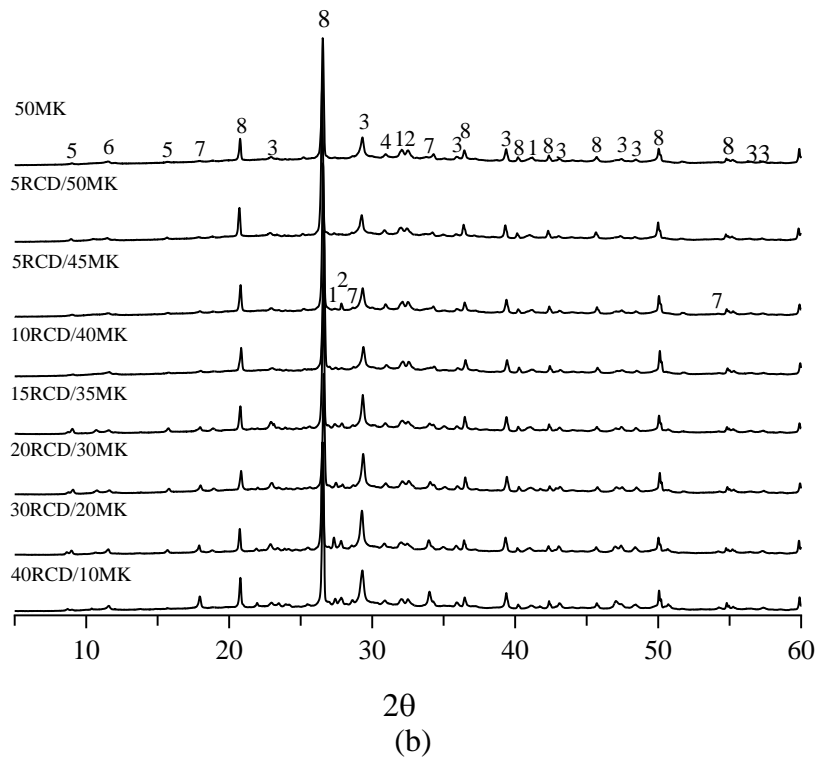
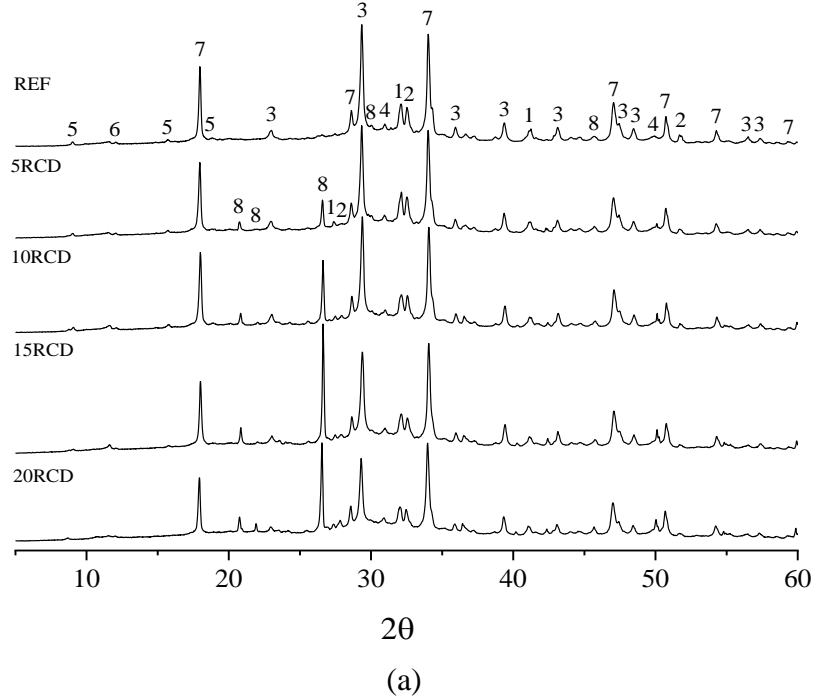
Misturas	Água combinada com AFt, C-S-H, C4AH ₁₃ (%)	CH (%)	CC (%)
REF	20,07	21,30	16,69
5RCD	17,82	18,05	20,45
10RCD	19,51	17,68	18,84
15RCD	18,13	16,99	19,42
20RCD	17,98	16,87	18,96
50MK	13,28	4,27	11,82
5RCD/50MK	10,80	3,98	17,49
5RCD/45MK	14,17	4,11	12,86
10RCD/40MK	14,93	4,27	13,32
15RCD/35MK	19,19	5,10	11,19
20RCD/30MK	18,21	5,55	13,63
30RCD/20MK	19,58	6,09	15,56
40RCD/10MK	16,33	6,53	16,66

Fonte: Própria autoria.

Os padrões de difração de raios X das pastas binárias e ternárias aos 28 dias são apresentados na Figura 3.8 (a,b). Foram identificados picos relacionados a compostos de cimento hidratado, como portlandita (CH), etringita ((CaO)₆(Al₂O₃)(SO₃)₃.32H₂O), silicato de cálcio hidratado (C-S-H: Ca₂SiO₃(OH)₂), e cálcio monossulfato hidratado (Ca₄Al₂(SO₄)(OH).12H₂O). Também foram identificados picos referentes às fases anidras do PC (C₂S e C₃S). Segundo Amer e Hoseny (2017), esses picos tendem a diminuir de acordo com o tempo de hidratação da matriz. Além disso, fases calcílicas foram detectadas, o que pode ser atribuído à carga calcária que compõe o cimento anidro e uma parcela pode está associado à carbonatação natural do RCD devido à exposição às intempéries ao longo do tempo (CONTRERAS et al, 2016).

Figura 3.8 - Difratomogramas: (a) misturas binárias, e (b) misturas ternárias

1 - Alita; 2 - Belita; 3- Calcita; 4 - C-S-H; 5 - Etringita; 6 - Monossulfato de cálcio hidratado; 7 - Portlandita; 8 - Quartzzo



Fonte: Próprio autor.

Comparando as pastas binárias com a pasta REF, não há novos produtos de hidratação gerados pelo RCD (CHEN et al., 2021). A diferença encontra-se na

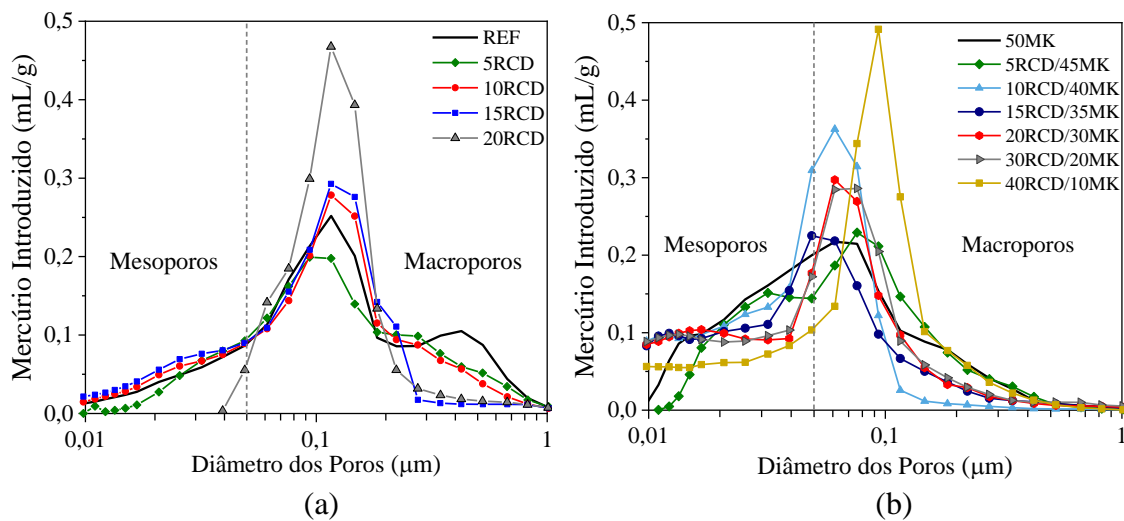
intensidade dos picos de CH e Aft, que diminuem na proporção que aumenta a taxa de substituição de CP por RCD. De acordo com a avaliação pozolânica, o RCD utilizado apresenta uma pequena fração de fases amorfas, o que podem ter reagido com o hidróxido de cálcio, reduzindo a intensidade dos picos de CH durante o processo de hidratação do cimento, igualmente observado nos resultados de TG das pastas binárias (ZHANG et al., 2023). Também foram detectados picos referentes ao quartzo, característico do agregado natural do concreto original (OLIVEIRA et al., 2020).

As composições ternárias apresentam um teor elevado de sílica, devido a composição química do MK, majoritariamente composto por SiO_2 . Em contraparte, os difratogramas mostram que a redução da intensidade dos picos de portlandita (CH) devido à reação pozolânica do metacaulim com CH, o que é consistente com os resultados do TG.

3.6 Microestrutura

A porosimetria por intrusão de mercúrio das pastas cimentícias binárias e ternárias são apresentadas na Figura 3.9 (a,b). As pastas apresentam poros predominantemente capilares, localizados entre as áreas dos mesoporos (tamanho de poros na faixa de 0,01 a 0,05 μm) e macroporos (tamanho de poros maior que 0,05 μm) (WU et al., 2020), com porosidade total variando de 31,05% a 26,45%.

Figura 3.9 - Porosimetria das pastas: (a) misturas binárias, e (b) misturas ternárias



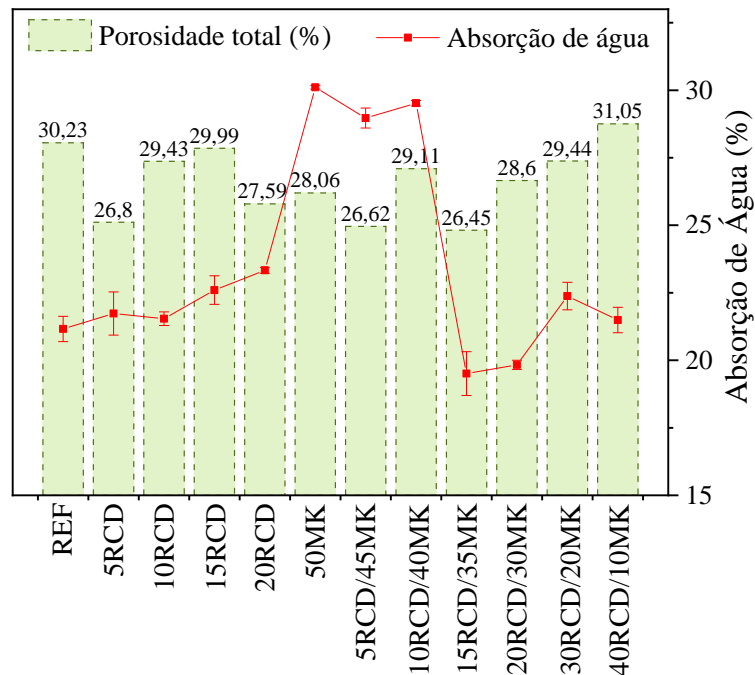
Fonte: Própria autoria.

Avaliar a estrutura dos poros é uma característica microestrutural muito importante, que influencia as propriedades físicas e mecânicas do material, além de desempenhar um papel determinante na durabilidade (PIPILIKAKI; BEAZI-KATSIOTI, 2009). Embora algumas formulações possuam o volume de poros similares, o desempenho sob tensões mecânicas é completamente diferente, variando com a estrutura dos poros, especificamente, poros pequenos e grandes.

A composição binária 5RCD apresentou um leve refinamento dos poros em relação às demais formulações binárias. A matriz 20RCD proporcionou redução na porosidade total, em contraparte os poros encontram-se majoritariamente na região dos macroporos, corroborando com a diminuição da resistência mecânica e maior absorção de água. Poros maiores atuam como pontos fracos na matriz, tornando-os mais frágeis e suscetíveis a falhas sob tensão. Além de contribuírem para o aumento da permeabilidade, permitindo a entrada de água e agentes agressivos (íons de cloreto, dióxido de carbono e sulfatos) comprometendo a durabilidade.

As formulações ternárias apresentaram um refinamento na estrutura dos poros devido à adição do metacaulim, reduzindo o diâmetro médio dos poros caracterizado pela reação pozolânica e empacotamento das partículas, como apresentado na Tabela 3.5. Todavia, elevados teores de MK aumentaram a absorção de água, esta é uma característica resultante da área superficial grande governada pela estrutura porosa das partículas. Em contrapartida, o *blend* do metacaulim com o RCD, além de melhorar a estrutura dos poros, tornando-o mais uniforme, reduziu a absorção de água, sendo estatisticamente iguais nas composições 15CDW/35MK e 20CDW/30MK. Esse comportamento pode estar associado principalmente à morfologia e o efeito de preenchimento que estas matérias-primas proporcionam as pastas cimentícias (ZHAO; KHOSHNAZAR, 2020; CHEN et al., 2021). A Figura 3.10 mostra a associação da absorção de água em relação à porosidade total das pastas cimentícias.

Figura 3.10 - Porosidade total versus absorção de água das misturas binárias e ternárias



Fonte: Própria autoria.

Ao combinar RCD e MK, é possível reduzir o volume total de poros em cerca de 12% e o tamanho médio dos poros em comparação com matrizes binárias. Porém, altos teores de finos de RCD em relação ao metacaulim (40RCD/10MK) resultaram em um aumento de cerca de 3% no volume de poros localizados majoritariamente na região dos macroporos, tornando-a uma matriz frágil ao impacto mecânico.

Tabela 3.5 - Propriedades físicas das pastas – dados da PIM

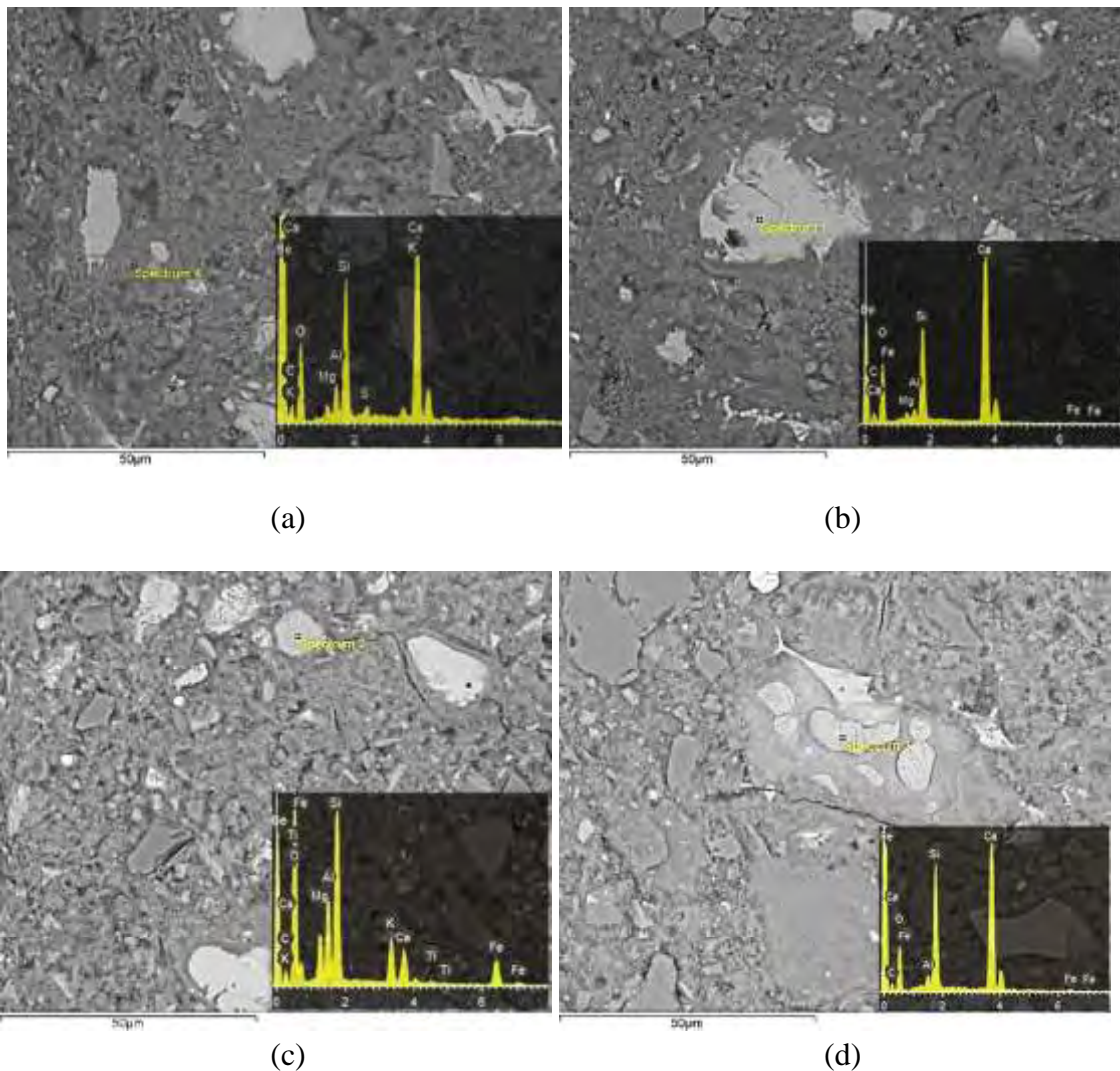
Misturas	Porosidade total (%)	Densidade aparente (g/mL)*	Diâmetro médio dos poros (4V/A) (µm)
REF	30,23	2,27	0,072
5RCD	26,80	2,23	0,084
10RCD	29,43	2,26	0,066
15RCD	29,99	2,26	0,059
20RCD	27,59	2,10	0,112
50MK	28,06	2,01	0,042
5RCD/45MK	26,62	2,01	0,049
10RCD/40MK	29,11	2,07	0,031
15RCD/35MK	26,45	2,11	0,031
20RCD/30MK	28,60	2,11	0,029
30RCD/20MK	29,44	2,10	0,030
40RCD/10MK	31,05	2,15	0,041

*Apparent (skeletal) Density

Fonte: Própria autoria.

As mudanças na microestrutura de superfície polida das composições binárias e ternárias em relação à matriz controle foram investigadas por análise MEV-EDS e os resultados são apresentados na Figura 3.11. Com o teste foi possível avaliar visualmente a diferença microestrutural entre as composições. Os resultados MEV-EDS na superfície mostram a identificação dos elementos O, Si, Ca, Mg, C, Al, K e Ti.

Figura 3.11 - Micrografias: (a) matriz controle - REF; (b) pasta binária com 20% RCD; (c) mistura com 50%MK; (d) composição ternária com 15% RCD



Fonte: Próprio autor.

A incorporação do metacaulim resultou em alterações significativas na microestrutura da pasta de cimento. Uma observação importante é o refinamento da estrutura de poros devido à introdução do MK, o que resulta em uma microestrutura mais densa e compacta, devido ao melhor empacotamento das partículas (ZHAO;

KHOSHNAZAR, 2020). As micrografias confirmam o refinamento dos poros quantificados pela porosimetria por intrusão de mercúrio. No qual, pode-se observar a Fig. 3.11d o melhor empacotamento das partículas associando o RCD e o MK.

4 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo investigar a incorporação de resíduos de construção e demolição em cimentos binários e ternários com diferentes relações cimento/material cimentício suplementar. A fração fina de RCD (63 μm) apresentou baixa reatividade pozolânica e composição química e mineralógica típica de materiais cimentícios. Algumas conclusões específicas são destacadas.

- Apenas a composição química dos pós ternários atendem os critérios pré-estabelecidos pela NBR 16697 e ASTM C150.
- O aumento da taxa de substituição de CP pela fração fina de RCD gerou decréscimo na resistência à compressão em todas as formulações. Contudo, apresentaram resistência compatível com o cimento comercial original, com exceção da matriz 40RCD/10MK, que devido o alto teor de RCD tornou o material poroso e frágil, apresentando resistência de aproximadamente 36 MPa.
- Resultados de caracterização (TG e DRX) das pastas corroboram que o RCD possui baixa reatividade pozolânica, capaz de consumir baixos teores de CH da matriz.
- A pesquisa demonstra que os finos de RCD podem ser utilizados como MCS em maiores quantidades em *blends* ternários, proporcionando refinamento da estrutura dos poros, diminuição de absorção de água e resistência à compressão em média de 40 MPa, utilizando taxas de 15-30%RCD e 35-20%MK.

As características das matrizes variam com os teores de substituição de CP por MCS, assim é necessário definir as propriedades pretendidas conforme a aplicabilidade de estudo. Devido à importância da durabilidade das composições, estudos adicionais devem ser realizados para avaliar o desempenho do cimento a longo prazo (> 90 dias).

Capítulo 4

Desenvolvimento e caracterização de compósitos cimentícios de baixo carbono reforçados com tecido de juta submetidos à cura com CO₂

Daniela Oliveira de Lima¹, Douglas Sadalla de Lira¹, Lía Ethel Velásquez Castillo¹, Ana Paula de Lima Mendes Campos¹, Moisés Frías Rojas², Holmer Savastano Junior¹

¹ Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, Brasil

² Instituto de Ciências da Construção Eduardo Torroja (IETcc-CSIC), Madrid, Espanha
daniela.engcivil@usp.br

Resumo

O uso de metacaulim (MK) e resíduos de construção e demolição (RCD) em materiais à base de cimento é atraente para reciclar os resíduos e reduzir as emissões de dióxido de carbono geradas durante a fabricação de cimento. O estudo tem como objetivo desenvolver e caracterizar placas delgadas utilizando RCD e MK como material cimentício suplementar (MCS), reforçados com 5% de tecido de juta hornificado, submetidos à cura térmica (CT) e ao processo de carbonatação acelerada (cura com CO₂) durante 6, 9 e 24 h. Foram analisados o grau de carbonatação e as propriedades físicas, mecânica, microestrutural e o padrão de fratura dos compósitos. Elevados teores de MCS associados à cura com CO₂ produziram uma matriz compacta e densificada, isenta de hidróxido de cálcio (CH), com baixa porosidade próxima à zona interfacial, melhorando a interface fibra-matriz verificada por análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV), ocasionando acréscimos significativos no módulo de ruptura, energia específica e tensão de primeira fissura.

Palavras-chave: Resíduo de construção e demolição; Metacaulim; Cimentos ecoeficientes, Carbonatação acelerada; Tecido de juta.

1 INTRODUÇÃO

As matrizes cimentícias (pastas, argamassas e concretos) são amplamente utilizadas por possuírem baixos custos, de fácil acesso e amplamente aplicáveis em infraestruturas na construção civil. No entanto, o cimento é o principal componente dessas matrizes que é responsável por emitir aproximadamente 6-7% de CO₂ para atmosfera (SCHNEIDER, 2019). A cada tonelada de cimento produzido é liberado 0,8 toneladas de CO₂ (BENHELAL et al., 2013; HE et al., 2020). Assim, a fim de atender às necessidades de crescimento da construção de maneira mais sustentável, pesquisas estão sendo desenvolvidas em busca de aglutinantes alternativos para serem aplicados nas matrizes de cimento (RODIER; SAVASTANO Jr., 2018; BOUCHIKHI et al., 2019; HENRÍQUEZ et al., 2021; MALJAEI et al., 2021; ÖZKAN; CEYLAN, 2022; RUVIARO et al., 2023).

Além disso, as matrizes cimentícias quando submetidas a esforços de tração, flexão e impacto apresentam comportamento frágil, ou seja, rompem-se de maneira abrupta (BALAGOPAL et al., 2022). Uma alternativa eficiente para superar esta problemática é a inserção de fibras naturais ou sintéticas como reforço.

A incorporação de fibras naturais em compostos cimentícios proporciona maior tenacidade, ductilidade, maior capacidade de deformação até a fratura total, resistência a fissuras em comparação com a matriz sem reforço (ARDANUY; CLARAMUNT; TOLEDO FILHO, 2015). Além disso, as fibras naturais são amplamente reconhecidas por suas características ecologicamente corretas, econômicas, leves, renováveis e suas propriedades térmicas aprimoradas, bem como sua capacidade de resistência à corrosão (SONG et al., 2021; ABEDI et al., 2023). Tratando-se do tecido como reforço, ele suporta cargas que apenas a matriz é capaz de resistir. De tal maneira, se a interface fibra-matriz não for eficiente poderá ocorrer a delaminação do compósito. Em contraparte, quando ocorre a interação ideal entre matriz e fibra, a falha ocorre por esgotamento da resistência à tração do tecido (MERCEDÉS; GIL; BERNAT-MASO, 2018).

No entanto, existem duas problemáticas ao usar fibras naturais em matrizes cimentícias de cimento puro. A primeira está relacionada a mineralização das fibras devido a alcalinidade da matriz cimentícia, devido aos produtos de hidratação, principalmente o hidróxido de cálcio (CH) que migram para o lúmen, parede e vazios da fibra (BEYENE et al., 2023). A segunda é ocasionada pela hidrofobicidade da fibra, devido

à sua alta absorção de umidade, ocasionando seu inchamento, podendo resultar na falha prematura do compósito (PARVEEN; RANA; FANGUEIRO, 2017). Estes problemas podem ser resolvidos pela utilização de materiais cimentícios suplementares, a fim de reduzir a alcalinidade presente na matriz, e por tratamentos físicos e químicos na fibra natural (ZHOU; FAN; CHEN, 2016; DA SILVA, 2023; EZUGWU; CALABRIA-HOLLEY; PAINE, 2023). O processo de carbonatação acelerada é outra alternativa para reduzir a alcalinidade da matriz de cimento e reduzir o teor de CH da solução, resultando em um solução menos agressiva para as fibras naturais (NEVES JUNIOR et al., 2019).

Neste contexto, a pesquisa produziu matrizes com baixos teores de cimento Portland, substituindo-o parcialmente por metacaulim e finos de resíduos de construção e demolição (63 µm) destinadas a fabricação de placas delgadas reforçadas com tecido hornificado de juta. Os compósitos produzidos foram submetidos à cura térmica e ao processo de carbonatação acelerada (cura com CO₂) durante 6, 9 e 24 horas, como uma alternativa de cura acelerada, a fim de otimizar e reduzir o tempo de cura dos compósitos, diminuir o teor de hidróxido de cálcio e melhorar a adesão fibra-matriz, que é uma grande problemática para estes tipos de compósito. A influência de diferentes matrizes e do processo de cura foram avaliadas através do comportamento físico, mecânico e microestrutural, o padrão de fratura foi analisado com base na correlação de imagem digital (*digital image correlation* - DIC).

2 MATERIAL

Os compósitos foram produzidos com cimento *Portland* de alta resistência inicial CP V-ARI (similar ao cimento tipo III de acordo com ASTM C150); Metacaulim fornecido pela empresa Metacaulim do Brasil Indústria e Comércio LTDA. O resíduo de concreto foi concedido pela empresa Eco-X, localizada em Guarulhos – SP. O resíduo é composto majoritariamente por resíduos de concreto (98%) e uma pequena fração de resíduos cerâmicos, aproximadamente 2%. Para o beneficiamento do resíduo, inicialmente o material foi seco em estufa a 60 °C durante 24 h. Em seguida, foi fragmentado para obtenção de partículas de 63 µm. Para a produção dos compósitos, as matrizes cimentícias devem atender exigências especiais em relação à reologia, devendo ser fluidas o suficiente para haver sua inserção na abertura do tecido têxtil, caso contrário poderá ocorrer à segregação dos constituintes da matriz e delaminação, que

consiste na separação das camadas constituintes do compósito. Assim, para garantir a reologia ideal utilizou-se o aditivo superplastificante (SP) Silicon Premix 40205 à base de policarboxilato, com densidade de 1,07 g/cm³ e fator água/material cimentício de 0,4, em massa. Na Tabela 4.1 é apresentado a composição física e química das matérias-primas.

Tabela 4.1 - Composição química (% em massa) e física dos materiais de partida

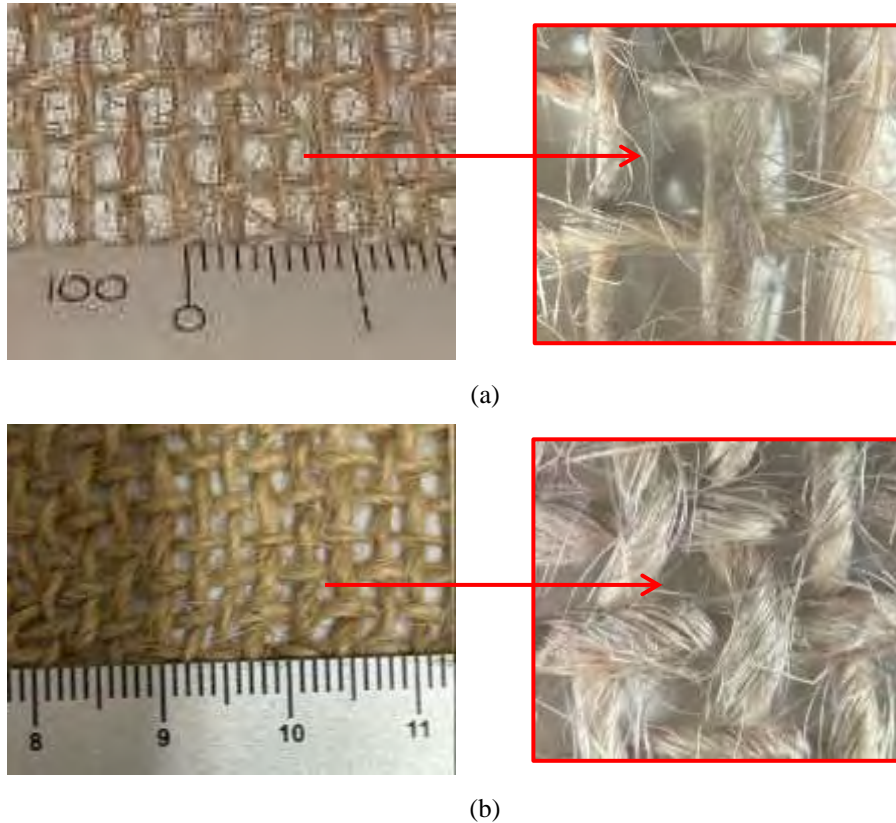
	CP	RCD	MK
SiO ₂	18,88	26,68	63,91
Al ₂ O ₃	4,55	9,19	29,30
CaO	63,25	38,93	0,171
Fe ₂ O ₃	2,66	9,19	2,33
MgO	2,47	2,76	0,19
SO ₃	3,77	1,95	0,11
Na ₂ O	0,40	0,48	-
K ₂ O	0,91	1,21	0,39
P ₂ O ₅	0,16	0,15	-
TiO ₂	0,22	0,58	1,92
Perda ao fogo	2,0	14,4	1,5
Densidade (g/cm ³)	3,09	2,44	2,55
BET (m ² /g)	1,47	13,55	20,29
D ₅₀ (µm)	9,07	24,0	19,3

Fonte: Própria autoria.

Como reforço, usou-se um tecido bidirecional de juta da empresa Castanhal, contendo abertura média entre os cordões de 3 mm (Fig. 4.1). Segundo informações técnicas fornecidas pela empresa, o tecido é composto por 75% fibras de juta e 25% fibras de malva, e sua gramatura é de 245 g/m³ (CASTANHAL, 2023). A fim de garantir a estabilidade dimensional do tecido, melhorar a adesão fibra-matriz e a durabilidade, adotou-se o processo de ciclos de imersão e secagem, denominado de hornificação. O procedimento foi adaptado de Claramunt et al. (2011), Ferreira et al. (2017) e Cavalcante (2017). Os tecidos foram lavados previamente com água, a uma temperatura de 40 °C, durante 30 min, a fim de remover possíveis amidos usados durante a produção do tecido. Em seguida, foram acondicionados em estufa a 60°C por 24h. Após a etapa inicial, o tecido foi imerso em água a temperatura ambiente por 3h. Após esse período, foram colocados em estufa a temperatura de 80°C, com taxa de aquecimento de 2°C/min, por 16h. O processo se repetiu até completarem 10 ciclos de molhagem e secagem. Após o processo, os tecidos foram armazenados em sacos

plásticos selados até a sua utilização. Na Fig. 4.1 pode-se observar o aspecto do tecido sem tratamento (Fig. 4.1a) e submetido ao processo de hornificação (4.1b).

Figura 4.1 - Tecido de juta com escala em mm: (a) sem tratamento; (b) hornificado



Fonte: Própria autoria.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 Dosagem, produção e cura dos compósitos

Os compósitos foram produzidos com três matrizes diferentes, uma matriz referência e duas matrizes ternárias, conforme apresentado na Tabela 4.2. As matrizes ternárias (5RCD/50MK e 5RCD/45MK) são produzidas com elevados teores de material cimentício suplementar, a fim de reduzir o teor de hidróxido de cálcio e garantir a integridade da fibra dentro do ambiente alcalino.

A fluidez das pastas foi ajustada para garantir a inserção da matriz entre as tramas do tecido. Assim, o aditivo superplastificante foi dosado através do mini slump de Kantro (KANTRO, 1980), a fim de garantir um espalhamento médio de (150 ± 10)

mm. Através do ensaio foi possível avaliar a fluidez e verificar a presença de exsudação e segregação nas pastas cimentícias.

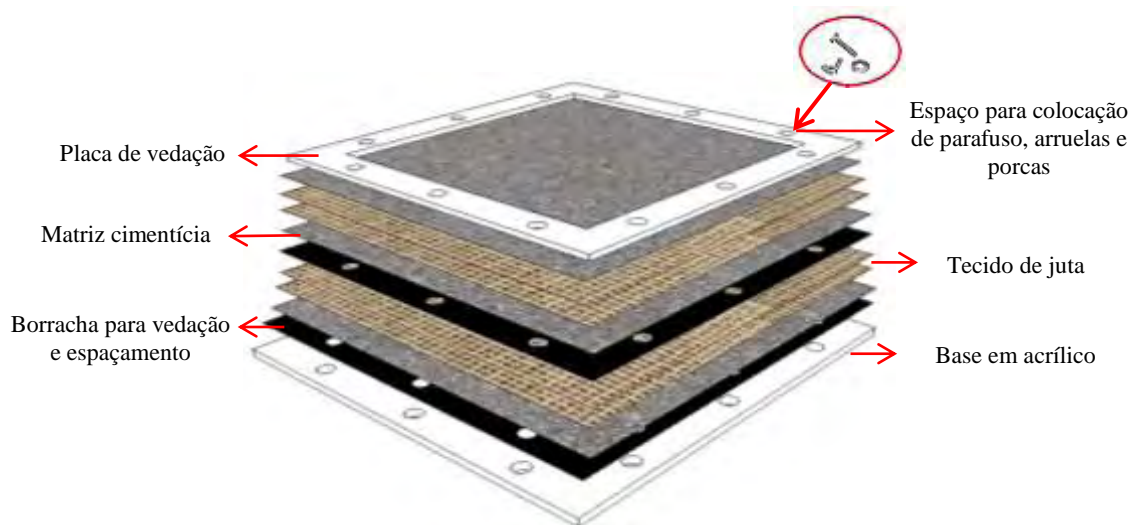
Tabela 4.2 - Formulação dos compósitos em massa

Misturas	Código	CP (%)	RCD (%)	MK (%)	SP (%)	Mini slump (mm)
Referência	REF	100	0	0	0,50	143,80
Ternária	5RCD/45MK	50	5	45	0,80	149,50
	5RCD/50MK	45	5	50	0,80	146,70

Fonte: Própria autoria.

As placas cimentícias foram reforçadas com 4 camadas de tecido de juta (fração volumétrica de 5%) e produzidas pelo método *casting*, com dimensões de (400 x 400 x 10) mm³ (comprimento x largura x espessura). Os compósitos foram fabricados em multicamadas, sendo formado por três camadas de matriz cimentícia e duas de tecido, onde o reforço é composto por uma dupla camada de tecido, conforme o esquema apresentado na Fig. 4.2. Inicialmente, despejou-se a primeira camada de matriz cimentícia, em sequência o reforço foi tracionado com o auxílio de parafusos. Borrachas foram utilizadas para garantir a vedação e o espaçamento entre as camadas. O processo se repetiu até a última camada de pasta cimentícia. Durante o processo de moldagem, uma mesa vibratória foi utilizada para garantir a introdução e compactação da matriz cimentícia através das tramas do tecido.

Figura 4.2 - Esquema de moldagem dos compósitos



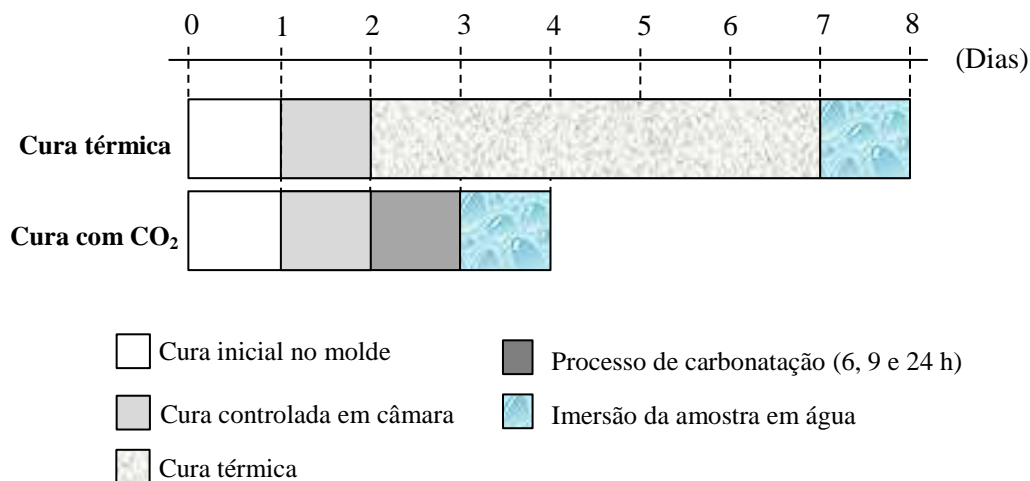
Fonte: Própria autoria.

Após a moldagem, os compósitos foram cobertos com saco plástico, mantendo-se nesta condição durante 24 h. Após este período, os compósitos foram desmoldados e acondicionados em câmara climática com umidade relativa de ~ 60% e temperatura de 23 °C por 24 h (BORGES et al., 2012). Após este período, as amostras foram submetidas a dois processos de cura: (I) cura térmica, e (II) processo de carbonatação acelerada. As amostras do grupo I foram embaladas em sacos plásticos e encaminhadas à cura térmica, onde foram mantidas em ambiente controlado do banho-térmico, com umidade relativa de ~ 90% a uma temperatura de 60°C, o processo teve duração de 5 dias.

O grupo II foi submetido ao processo de carbonatação acelerada durante 6, 9 e 24 horas. A carbonatação acelerada ocorreu em câmara de laboratório a 60°C, pressão de 5 bar, com saturação de CO₂ e umidade da amostra de 80%. Para obter o teor de umidade específico nas amostras, testes iniciais foram realizados, onde inicialmente amostras foram secas em estufa a 60 °C ± 5 °C até obter peso contante. Em seguida, foram submersas em água até apresentarem peso constante. A partir deste processo, calculou-se o peso necessário para atingir as condições de umidade de 80%.

Após os processos de cura, as placas foram cortadas com um disco diamantado refrigerado com água para obtenção dos corpos de prova com dimensões de (180 x 40 x 10) mm³. Em seguida, foram imersas em água por 24 h. As amostras foram testadas em condição saturada. A Figura 4.3 demonstra de maneira simplificada as etapas de cura dos compósitos.

Figura 4.3 - Etapas de cura dos compósitos sob cura térmica e cura com CO₂



Fonte: Própria autoria.

3.2 Termogravimetria (TG), Grau de carbonatação (GC) e Difração de raios X (DRX)

A caracterização termogravimétrica foi realizada utilizando um analisador térmico simultâneo modelo STA 449 F3 Júpiter, fabricado pela marca NETZSCH. As análises foram realizadas sob atmosfera de nitrogênio com vazão de 100 mL/min, sob uma taxa aquecimento de 10 °C/min, partindo da temperatura ambiente até 1000 °C. A quantificação da captura de CO₂ nas amostras carbonatadas foi baseada no estudo de Tonoli et al. (2019), enquanto o grau de carbonatação foi determinado pela equação 4.1, proposta por Matsushita et al. (2000).

$$CD = \frac{C - C_0}{C_{\max} - C_0} \cdot 100 \quad (4.1)$$

A quantidade de CO₂ absorvida foi determinada pela perda de massa entre 500 °C e 1000 °C, depois multiplicada pela massa residual (após 1000 °C) e dividida por 100 para obter os valores na equação de base não volátil (Eq. 4.2) assume que todo CaO, MgO, Na₂O e K₂O formados na matriz cimentícia reagem com CO₂ para formar carbonatos. Excluindo a quantidade de CaO combinado com carbonato de cálcio e sulfatos.

$$C_{\max}(\%) = 0.785 (CaO - 0.56CaCO_3 - 0.7SO_3) + 1.091MgO + 0.71Na_2O + 0.468K_2O \quad (4.2)$$

Onde C é a quantidade de CO₂ na amostra, C₀ é a quantidade de CO₂ na amostra carbonatada e C_{max} é o CO₂ necessário para reagir com os óxidos disponíveis na amostra para formar CaCO₃.

A difração de raios X das amostras foi determinada utilizando um difratômetro de DRX-04 Empyrean da Panalytical, com radiação de cobre, operando a 40 kV e 50 mA, em passo angular de 0,02° por segundo e intervalo de medição entre os ângulos de Bragg (2θ) de 5° a 60°.

3.3 Caracterização física e mecânica dos compósitos

A propriedade mecânica dos compósitos foi avaliada sob flexão em quatro pontos. Para isso, utilizou-se uma máquina de testes Universal EMIC, modelo DL-

30000, com célula de carga de 50 kN, com uma deflexão de 1,5 mm/min e distância entre os apoios de 135 mm. A partir dos resultados obtidos foram determinados os valores de módulo de ruptura (MOR), limite de proporcionalidade (LOP), módulo de elasticidade (MOE) e energia específica (EE), conforme descrito por Tonoli et al. (2007).

$$\text{MOR} = \frac{P_{\max} \cdot L_v}{b \cdot h^2} \quad (4.3)$$

$$\text{LOP} = \frac{P_{\text{lop}} \cdot L_v}{b \cdot h^2} \quad (4.4)$$

$$\text{MOE} = \frac{276 \cdot L_v^3}{1296 \cdot b \cdot h^3} \cdot (m) \quad (4.5)$$

$$\text{EE} = \frac{EA}{b \cdot h} \quad (4.6)$$

Em que, P_{\max} é a carga máxima, L_v é o maior vão entre os apoios, b e h são a largura e a profundidade dos corpos de prova, respectivamente, P_{lop} é a carga no ponto superior da porção linear da carga versus flecha curva, e m é a tangente do ângulo de inclinação do gráfico de carga versus deflexão no comportamento elástico. EA corresponde à energia absorvida durante o ensaio, calculada pela integração da área sob a curva carga-deflexão.

As propriedades físicas dos compósitos de absorção de água (AA), densidade aparente (DA) e porosidade aparente (PA) foram determinados seguindo os protocolos da ASTM C 948-81.

Os resultados das propriedades físicas e mecânicas foram tratados estatisticamente através do software estatístico SAS 9.4 (Statistical Analysis System). A análise de variância foi utilizada com nível de significância de 5% ($p < 0,05$) pelo teste de Tukey.

3.4 Mecanismos de Fratura

Com base nos resultados de flexão em quatro pontos dos valores de tensão de primeira fissura (σ_{1f}), número de fissuras localizadas no vão médio e espaçamento médio de fissuras dos compósitos foram analisados.

O compósito com melhor desempenho mecânico foi adotado para realizar a correlação de imagem digital, utilizando um sistema de aquisição de imagens, composto por duas câmeras CCD monocromáticas com sensores de 1/2" e resolução de 5 megapixels. O equipamento foi programado para capturar uma foto a cada 2 segundos. As câmeras foram acopladas de modo que pudessem capturar a formação das fissuras no decorrer do ensaio mecânico.

Os softwares de aquisição e análise de imagens fornecidos pela Correlated Solutions funcionam de forma integrada. Após a captura das imagens de calibração, as imagens dos corpos de prova foram obtidos usando o software VIC-Snap 2009. As imagens adquiridas foram exportadas diretamente para o VIC-3D 2008. No VIC-3D 2008, a calibração do sistema e as correlações das imagens dos corpos de prova avaliados são realizadas.

As amostras foram preparadas rapidamente para garantir que fossem testadas de maneira saturada. Assim, inicialmente após saturação dos corpos de prova por 24 horas, foram secas superficialmente e pintadas com tinta spray branca de secagem rápida. Após aproximadamente 15 min, na área a ser analisada, foi criado o padrão speckle, que corresponde a pontos pretos distribuídos aleatoriamente sobre o fundo branco da amostra (Fig. 4.4). Em seguida, os espécimes foram submetidos à flexão em quatro pontos.

Figura 4.4 - Amostra para análise DIC



Fonte: Própria autoria.

3.5 Microestrutura

A análise microestrutural foi realizada por microscopia eletrônica de varredura (MEV) com imagem eletrônica de retroespalhamento, modelo TM3000 da Hitachi, operando em torno de 15 kV. A análise possui o objetivo de avaliar a porosidade da

matriz, interface fibra-matriz e a zona de transição na superfície polida dos compósitos. Além disso, foi analisado o efeito dos diferentes tempos de cura com CO₂ (6, 9 e 24 h) da matriz com melhor desempenho físico e mecânico. As amostras foram embutidas a vácuo em resina epóxi e polidas com lixas abrasivas de carboneto de silício com gramaturas de 600, 1200 e 2000 durante 5 min cada, utilizando álcool como lubrificante. Em seguida, um polimento foi realizado utilizando lixas diamantadas com gramaturas de 6, 3 e 1 µm, por durante 5 cada. Em cada troca de lixa, as amostras foram submetidas a uma imersão em banho ultrassônico durante 5 min, a fim de remover possíveis sujidades ou contaminantes das superfícies polidas.

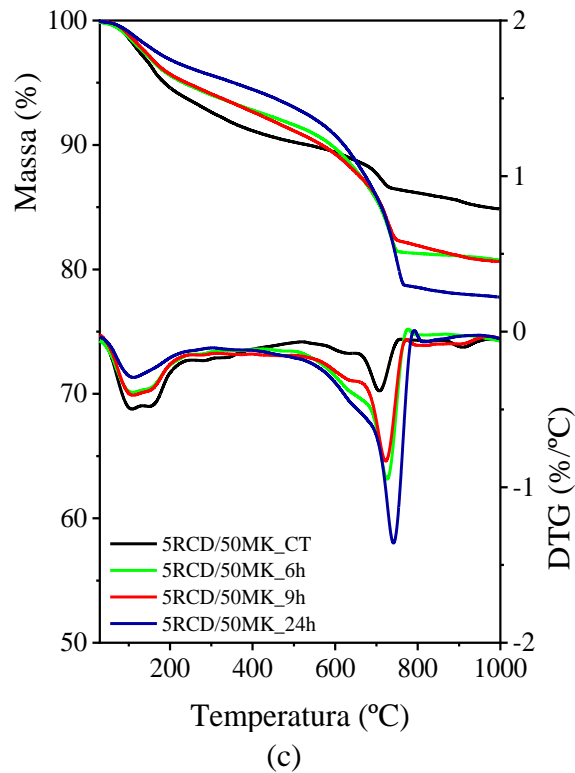
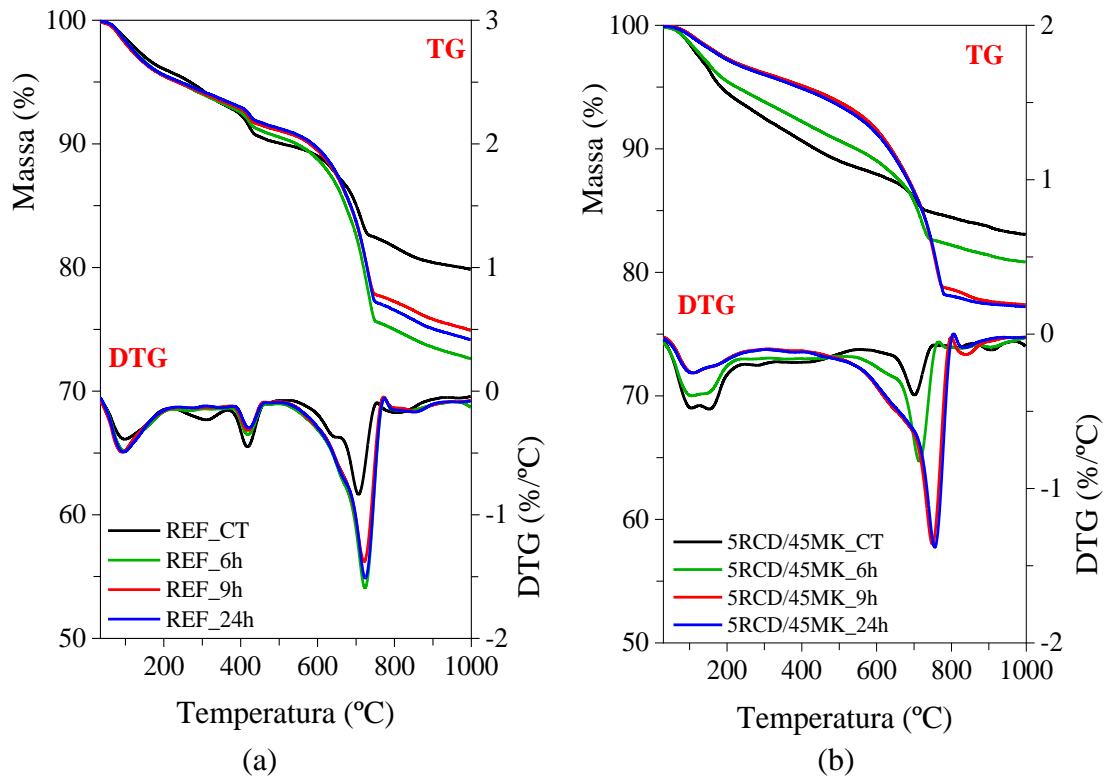
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Termogravimetria (TG), Grau de carbonatação (GC) e Difração de raios X (DRX)

A evolução dos produtos de hidratação e a evolução do processo de carbonatação dos compósitos podem ser observadas nas curvas de TG-DTG na Fig. 4.5 (a, b e c) divididas em blocos conforme o tipo de matriz cimentícia. A primeira perda de massa pode ser observada entre 35-365 °C, correspondente à decomposição das fases de C-S-H, AFt e AFm. A intensidade do pico nesta faixa de temperatura diminuiu com o processo de carbonatação, indicando a carbonatação dessas fases (SHAH et al., 2018). Isso ocorre principalmente nas matrizes de cimento misturado, onde há menos portlandita disponível e a maior parte do CaCO₃ é formado a partir da carbonatação do C-S-H, o que altera a cinética e a natureza do processo (ŠAVIJA; LUKOVIĆ, 2016).

O pico endotérmico entre 365-465 °C refere-se à desidroxilação do hidróxido de cálcio (CH). A terceira transação ocorreu entre 465-930 °C, indicando a formação de carbonato de cálcio (CC) (HE et al., 2019).

Figura 4.5 - TG-DTG dos compósitos carbonatados e não carbonatados: (a) compósitos referência, (b) compósitos com matriz 5RCD/45MK, e (c) compósitos produzidos a partir de 5RCD/50MK



Fonte: Própria autoria.

Na Tabela 4.3 apresenta-se os resultados obtidos através da análise termogravimétrica. Observa-se um acréscimo no teor de carbonato de cálcio nos compósitos após o processo de carbonatação. Isso ocorre, pois a cura com CO₂ em idade precoce de hidratação faz com que, os silicatos de cálcio não reagidos e seus produtos iniciais de hidratação portadores de cálcio (Ca), reajam para converter o CO₂ dissolvido em CaCO₃.

Tabela 4.3 - Teor de CH, CC e grau de carbonatação (GC)

Formulação	CH (%)	CC (%)	GC (%)
REF_CT	13,66	28,82	-
REF_6h	12,21	55,28	23,9
REF_9h	10,39	48,07	18,4
REF_24h	10,09	51,54	21,3
5RCD/45MK_CT	4,31	16,68	-
5RCD/45MK_6h	2,56	28,20	7,1
5RCD/45MK_9h	-	49,79	20,80
5RCD/45MK_24h	-	49,87	21,4
5RCD/50MK_CT	2,25	14,11	-
5RCD/50MK_6h	1,97	31,02	14,5
5RCD/50MK_9h	-	30,42	15,1
5RCD/50MK_24h	-	45,59	25,3

Fonte: Própria autoria.

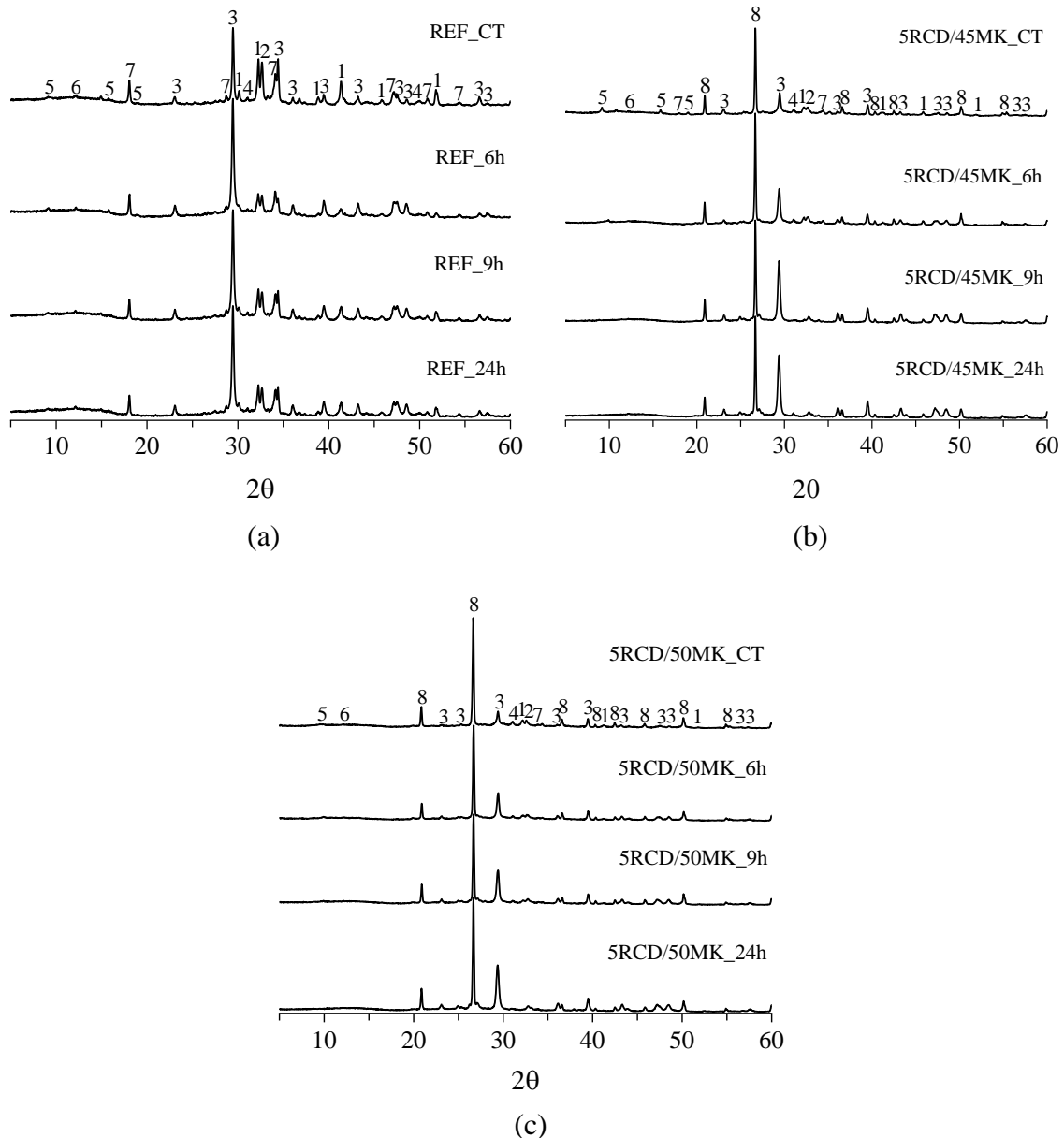
O resultado do grupo das amostras referência, demonstram que o alto teor de umidade prejudicou a difusão do CO₂, devido a água presente nos poros da matriz, acarretando no baixo consumo de CH, tornando os tempos de carbonatação estatisticamente iguais, com grau de carbonatação de aproximadamente 20%.

Para os compósitos ternários, o processo de carbonatação ocorreu gradativamente, conforme indicado pelo grau de carbonatação. O tempo de carbonatação de 9 e 24 h para as amostras do bloco B (5RCD/45MK) foram de aproximadamente 20% (estatisticamente iguais). As amostras sob 6 e 9h de cura com CO₂ do bloco C (5RCD/50MK) se apresentam estatisticamente iguais, com grau de carbonatação de ~15%, aumento para 25% após 24 h de carbonatação acelerada. Além disso, as matrizes ternárias tornam-se isentas de hidróxido de cálcio quando submetidas a 9 e 24 h de cura com CO₂. A utilização de uma matriz livre de CH resulta em benefícios ao compósitos reforçados com fibras vegetais, principalmente em relação a tenacidade do material (MELO FILHO; SILVA; TOLEDO FILHO 2013).

Na Figura 4.6 (a,b,c) são apresentados os difratogramas dos compósitos submetidos à cura térmica e ao processo de carbonatação acelerada.

Figura 4.6 – Difratogramas dos compósitos: (a) amostras da matriz referência, (b) amostras do bloco 5RCD/45MK, e (c) amostras do bloco 5RCD/50MK

1 - Alita; 2 - Belita; 3 - Calcita; 4 - C-S-H; 5 - Etringita; 6 - Ferrita; 7 - Portlandita; 8 - Quartzzo



Fonte: Própria autoria.

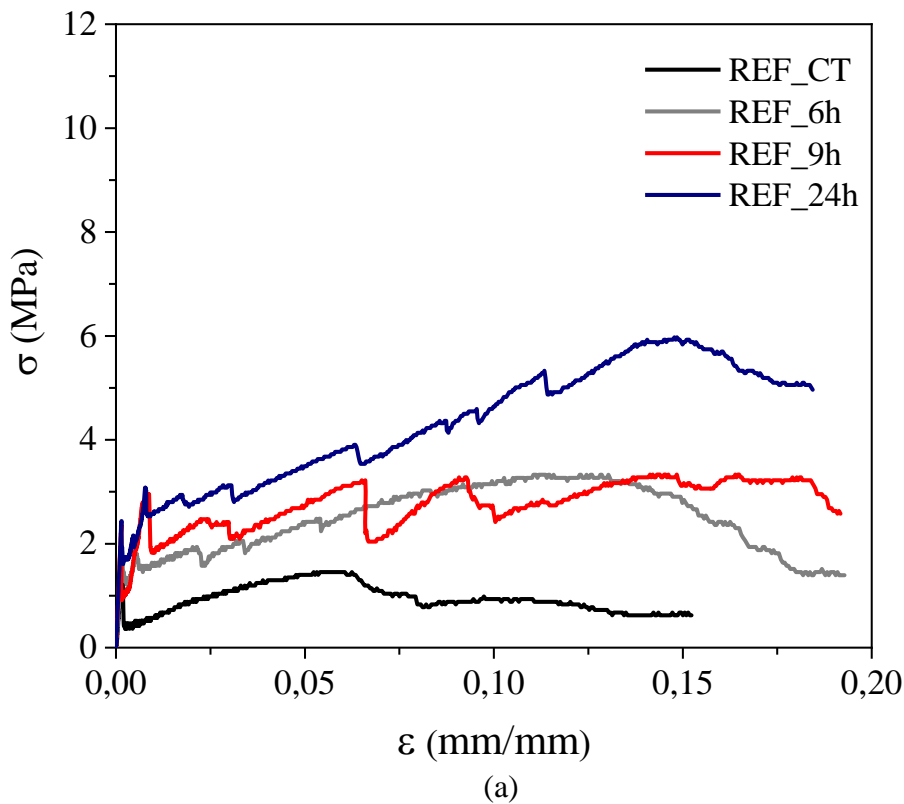
O consumo total de CH nos compósitos produzidos com matrizes ternárias sob 9 e 24 horas de cura com CO_2 , corroborando com os resultados de TG/DTG. Assim Os picos de CH e dos demais produtos de hidratação, como etringita

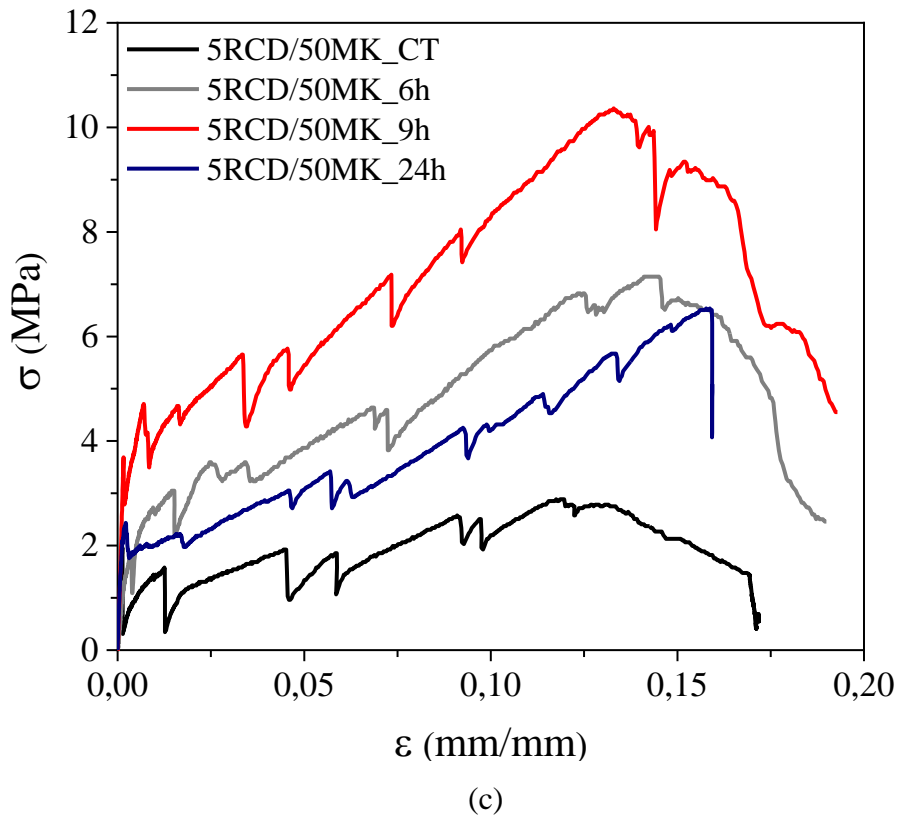
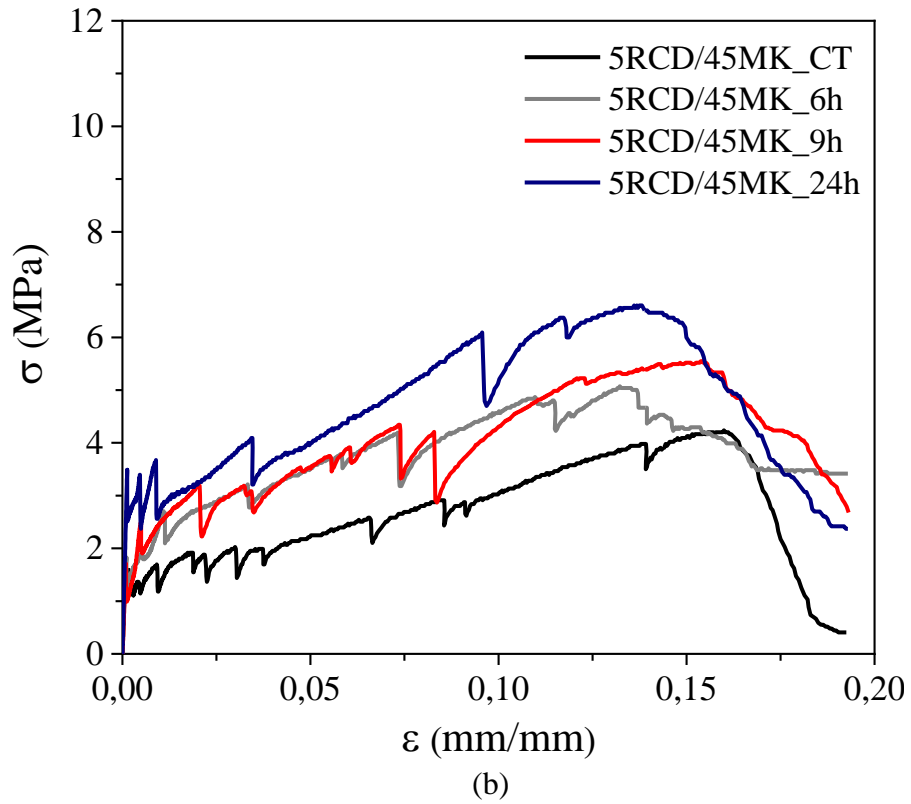
$((\text{CaO})_6(\text{Al}_2\text{O}_3)(\text{SO}_3)_3 \cdot 32\text{H}_2\text{O})$ e C-S-H ($\text{Ca}_2\text{SiO}_3(\text{OH})_2$) diminuem, enquanto o respectivo pico de calcita (CaCO_3) aumenta gradativamente (PIZZOL et al., 2014). A análise de DRX demonstra o aumento na intensidade dos picos de calcita principalmente em 23,08, 29,43, 36,01, 43,18, 47,50 e 48,51 em relação às amostras submetidas à cura térmica (PRANEETH et al., 2020).

4.2 Comportamento físico e mecânico

A Fig. 4.7 mostra as curvas típicas de tensão versus deformação para os compósitos submetidos à cura térmica (CT) e ao processo de carbonatação acelerada durante 6, 9 e 24 h, agrupados conforme a composição cimentícia.

Figura 4.7 - Curvas típicas de tensão versus deflexão: (a) compósitos referências, (b) compósitos produzidos a partir da matriz 5RCD/45MK, e (c) compósitos produzidos a partir da matriz 5RCD/50MK





Fonte: Própria autoria.

Os resultados demonstram a eficiência da carbonatação como cura alternativa em idade precoce e tempo de cura reduzido. Apesar do processo de carbonatação ter a tendência em diminuir a capacidade de deformação, as curvas mostram que os compósitos carbonatados obtiveram uma alta absorção de energia, tendo um comportamento *strain hardening* com grande capacidade de deflexão, apresentando a formação de múltiplas fissuras. De modo geral, o tratamento com CO₂ gerou acréscimo nas propriedades mecânicas de todos os compósitos, independente do tempo de carbonatação. Foi observado o aumento na resistência à primeira fissura e na capacidade de deformação, quando comparado com a referência não carbonatada. Neves Junior et al. (2019) também observou o mesmo comportamento em seus compósitos reforçados com fibras de sisal.

Entre as diferentes composições estudadas, o processo de carbonatação acelerado demonstrou ter maior eficiência no compósito 5RCD/50MK_9h, composto por um alto teor de materiais cimentícios suplementares e mantidos a 9 horas de cura com CO₂. Através desse processo, foi possível obter um módulo de ruptura de 10,98 MPa, o que representa um acréscimo significativo em relação à matriz referência submetida a cura térmica. Essa diferença é estatisticamente significativa em relação aos demais compósitos estudados. Além disso, o processo de carbonatação acelerada auxiliou na redução da absorção de água e da porosidade aparente em comparação com a sua contraparte não carbonatada. Esses resultados indicam que a carbonatação acelerada pode melhorar significativamente as propriedades mecânicas e a durabilidade do compósito 5RCD/50MK_9h, proporcionando um desempenho superior em relação às demais composições experimentadas. É importante destacar que esses resultados são específicos para o compósito 5RCD/50MK_9h e podem variar dependendo das proporções das matérias-primas e condições de cura utilizadas.

A matriz referência quando submetido à 24 h de cura com CO₂ apresentou módulo de ruptura estatisticamente superior a sua contraparte não carbonatada e aos demais tempos de cura com CO₂. Este comportamento diverge do compósito 5RCD/50MK_24h, que apresentou desempenho inferior quando exposto a 24 h de CO₂. Este comportamento pode ser associado a carbonatação dos produtos de C-S-H devido ao tempo excessivo de exposição ao CO₂, comprometendo a estrutura da matriz cimentícia (NEVES JUNIOR et al., 2013; NEVES JUNIOR et al., 2015).

Isso demonstra que o processo de carbonatação mesmo em condições operacionais semelhantes, produz efeitos diferentes nas propriedades do compósito, variando de acordo com a composição da matriz cimentícia, proporções de materiais cimentícios suplementares e tempo de cura com CO₂, como pode ser observado nos resultados apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Propriedade mecânica dos compósitos (média ± desvio padrão)

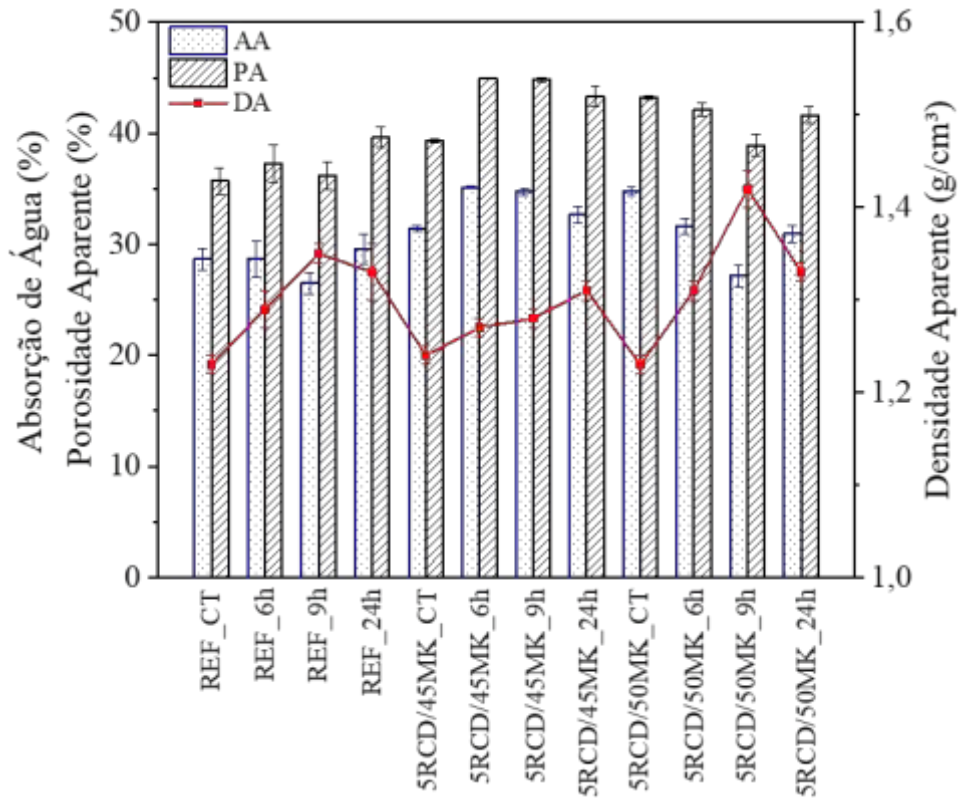
Formulação	MOR (MPa)	LOP (MPa)	MOE (GPa)	EE (kJ/m ²)
REF_CT	1,47 ± 0,18h	1,40 ± 0,20b	3,51 ± 0,52a	0,55 ± 0,38g
REF_6H	3,88 ± 0,81fg	1,80 ± 0,20ba	4,43 ± 1,0a	4,92 ± 0,91fe
REF_9H	3,51 ± 0,22fg	1,94 ± 0,38ba	4,17 ± 1,05a	4,74 ± 0,37fe
REF_24H	6,15 ± 0,48cbd	2,45 ± 0,34ba	3,75 ± 0,48a	7,81 ± 1,05cbd
5RCD/45MK_CT	4,21 ± 0,04feg	1,21 ± 0,32b	3,80 ± 0,64a	5,56 ± 0,17fed
5RCD/45MK_6h	4,94 ± 0,60fed	1,35 ± 0,34ba	4,32 ± 0,41a	6,34 ± 1,38cbd
5RCD/45MK_9h	5,78 ± 0,45ced	2,56 ± 0,82ba	5,62 ± 1,35a	9,24 ± 0,54cb
5RCD/45MK_24h	6,78 ± 0,44cb	3,13 ± 0,87ba	6,87 ± 1,0a	9,0 ± 0,28cb
5RCD/50MK_CT	2,92 ± 0,23hg	1,93 ± 0,45ba	3,64 ± 0,99a	3,64 ± 0,45f
5RCD/50MK_6h	7,67 ± 0,38b	3,27 ± 0,84a	3,82 ± 1,09a	10,12 ± 1,23b
5RCD/50MK_9h	10,98 ± 0,58a	3,21 ± 0,72a	5,57 ± 1,79a	13,12 ± 1,25a
5RCD/50MK_24h	6,12 ± 1,10cbd	2,42 ± 0,35ba	4,06 ± 0,05a	6,81 ± 1,01ced

*As letras na mesma coluna representam a diferença estatística do teste de Tukey (p < 0,05).

Fonte: Própria autoria.

Conforme pode ser observado na Fig. 4.8, a porosidade aparente das composições ternárias sob cura térmica e dos compósitos submetidos a cura com CO₂ foram superiores a matriz referência. Segundo Wu e Ye (2017) a carbonatação da portlandita causa a diminuição da porosidade. Logo, a matriz referência carbonatada possuirá menor porosidade. No entanto, matrizes com material cimentício suplementar tendem a possuir o aumento da porosidade após a carbonatação, devido a carbonatação do C-S-H com baixa relação Ca/Si produzidas a partir das reações pozolânicas, o que pode gerar maior quantidade de fissuras. Assim, nestas matrizes de cimento misturado a maior parte do CaCO₃ é formado a partir da carbonatação do C-S-H (MORANDEAU; THIÉRY; DANGLA, 2015).

Figura 4.8 - Propriedade física dos compósitos



Fonte: Própria autoria.

É importante destacar a variabilidade na porosidade aparente dos compósitos. Estudos demonstram que a porosidade tende a diminuir devido ao adensamento da matriz cimentícia, pois o carbonato de cálcio preenche os poros da matriz cimentícia. Esta variação pode estar relacionada diretamente a presença de microfissuras na matriz cimentícia, produzidas durante o processo de carbonatação. Estudos adicionais serão necessários para verificar se a exposição excessiva ao CO₂ está relacionada com a produção de microfissuras e/ou trata-se somente da carbonatação do C-S-H, como observado em estudos anteriores (BORGES et al., 2010; YU; YE, 2017).

4.3 Padrão de fratura e falha dos compósitos

O padrão de fissuração dos compósitos foi determinado com base em fissuras que cruzam uma linha horizontal central traçado nas amostras. Os padrões de fissuração foram observados, incluindo a tensão de primeira fissura (σ_{1f}), número médio de fissuras no vão central das amostras e o espaçamento médio entre as fissuras, cujo os dados são apresentados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Dados de fissuração dos compósitos (média ± desvio padrão)

Compósitos	σ_{1f} (MPa)	nº de Fissuras	Espaçamento médio (mm)
REF_CT	1,56 ± 0,17c	1,0 ± 0,0e	-
REF_6h	2,15 ± 0,17bc	7,5 ± 2,0bdc	9,20 ± 1,21bdc
REF_9h	2,14 ± 0,29bc	10,50 ± 2,0bac	8,20 ± 1,97dc
REF_24h	2,57 ± 0,31bac	10,75 ± 1,25bac	8,07 ± 1,17dc
5RCD/45MK_CT	1,62 ± 0,10c	14,50 ± 2,0a	6,85 ± 1,19d
5RCD/45MK_6h	1,86 ± 0,19bc	5,75 ± 1,25d	13,81 ± 2,30ba
5RCD/45MK_9h	2,64 ± 0,85bac	8,50 ± 1,0bdc	10,92 ± 1,05bdac
5RCD/45MK_24h	2,47 ± 0,97bac	6,33 ± 1,11dc	15,07 ± 1,38a
5RCD/50MK_CT	2,48 ± 0,24bac	6,25 ± 1,0d	12,23 ± 1,61bac
5RCD/50MK_6h	3,35 ± 0,77ba	11,25 ± 0,75ba	8,35 ± 0,44dc
5RCD/50MK_9h	3,86 ± 0,28a	13,75 ± 0,88a	7,44 ± 0,40d
5RCD/50MK_24h	2,61 ± 0,29bac	10,75 ± 1,73bac	9,43 ± 1,73bdc

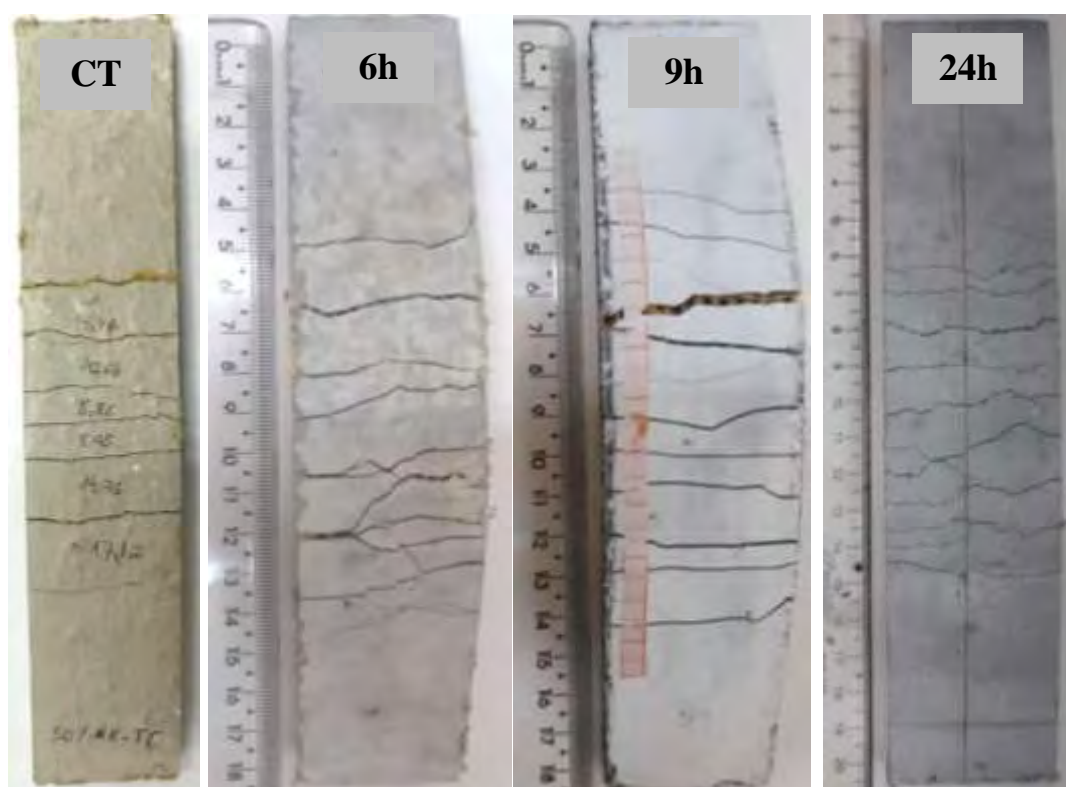
*As letras na mesma coluna representam a diferença estatística do teste de Tukey ($p < 0,05$).

Fonte: Própria autoria.

A carbonatação gerou acréscimo na tensão de primeira fissura gerando um aumento estatisticamente significativo em relação ao compósito referência submetido à cura térmica. Após o aparecimento da primeira fissura, nota-se à formação de múltiplas fissuras dos compósitos até atingirem a tensão máxima pós-fissuração. Exceto o compósito REF_CT, este apresentou um comportamento strain softening (amolecimento de tensão), caracterizado pela formação de uma única fissura com o comportamento pós-pico frágil, apresentando comportamento de abertura e alargamento da fissura, até a falha total da amostra.

A Figura 4.9 apresenta a diferença do padrão de fissuras dos compósitos produzidos a partir da matriz 5RCD/50MK. Visualmente observa-se a diferença no padrão de fissuração da amostra submetida à cura térmica e ao processo de carbonatação acelerada. No qual, as amostras submetidas à cura com CO₂ apresentaram tensão de primeira fissura, número e espaçamento entre as fissuras estatisticamente iguais.

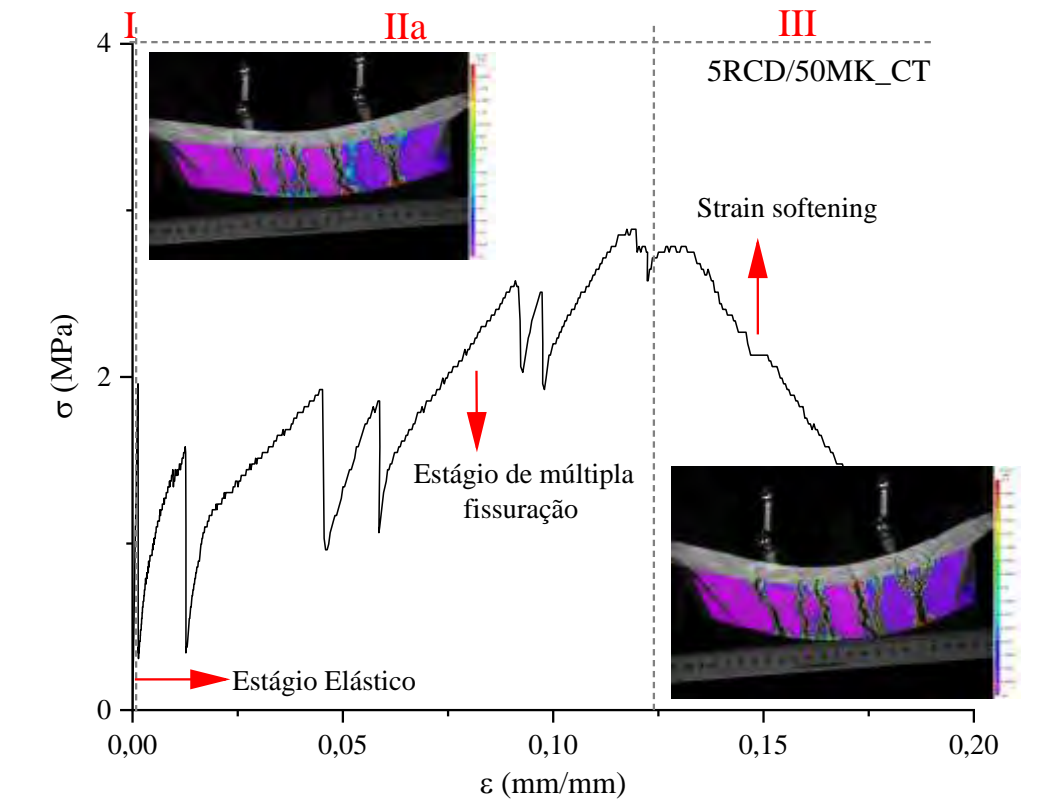
Figura 4.9 - Padrão de fissura dos compósitos produzidos com a matriz 5RCD/50MK



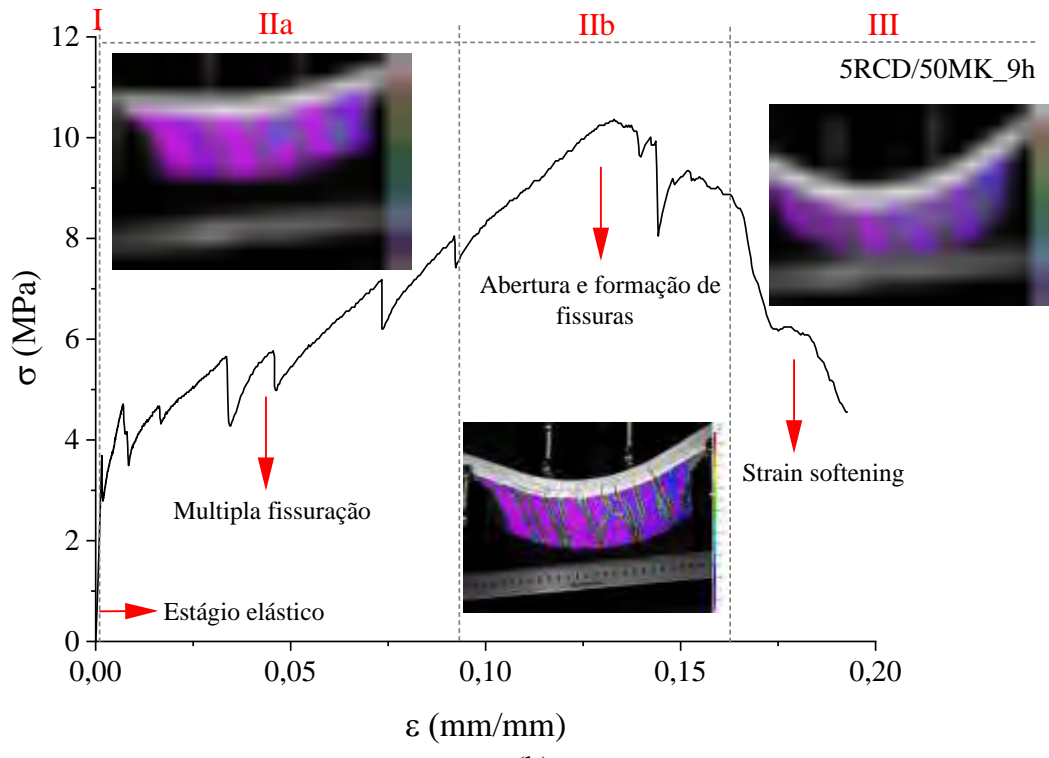
Fonte: Própria autoria.

O comportamento de fissuração da amostra 5RCD/50MK _CT (Fig. 4.10a) e sua contraparte carbonatada 5RCD/50MK _9h (Fig. 4.10b) foram analisadas através da associação da curva tensão versus deformação e as imagem adquiridas através da correlação de imagem digital. Três zonas principais foram identificadas. A resposta tensão versus deformação inicial do sistema compósito foi caracterizada por uma faixa de zona linear elástica, onde a resistência do compósito foi predominantemente governada pelas propriedades da matriz (designada como zona elástica I). E como pode ser observado, o comportamento dessa região foi melhorado quando submetido ao processo de carbonatação acelerada. A zona linear elástica chegou ao fim com a formação da primeira fissura, porém, a capacidade de carga contínua aumenta devido à habilidade do reforço em intercalar e conter as fissuras. Após a formação da primeira fissura outras surgiram na matriz em intervalos aproximadamente regulares e se propagam ao longo do comprimento do espécime (estágio de múltipla fissuração IIa). O estágio IIb é caracterizado pela formação de novas fissuras e pelo alargamento das fissuras existentes na matriz e conseqüentemente o carregamento adicional do tecido, nesse estágio o tecido suporta a maior parte da carga.

Figura 4.10 - Associação da curva tensão-deformação com o DIC da matriz 5RCD/50MK: (a) submetido à cura térmica, (b) sob cura com CO₂ por 9h



(a)



(b)

Fonte: Própria autoria.

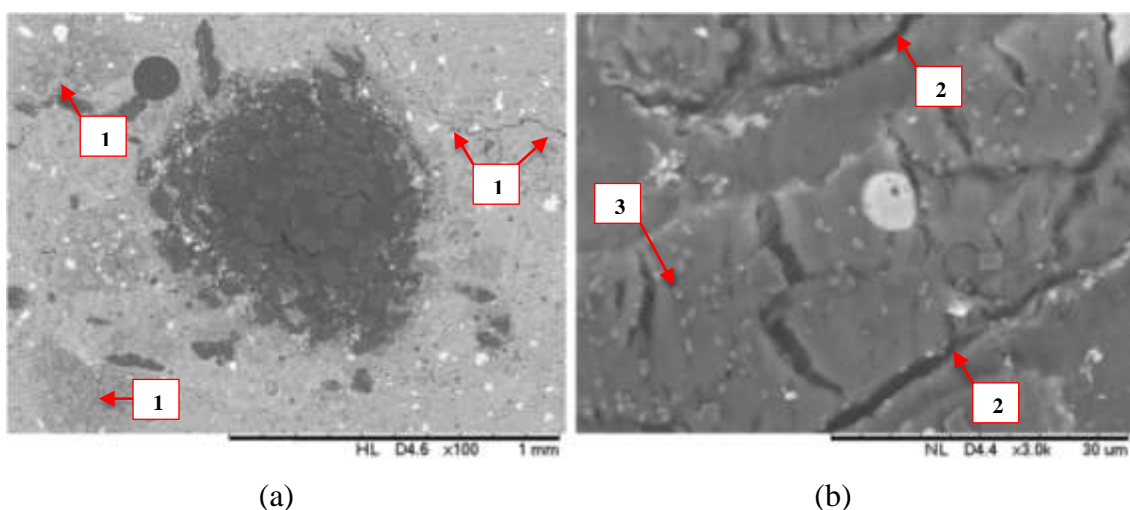
No estágio final da curva tensão-deformação (zona III), as trincas existentes tornaram-se mais largas até a falha final do compósito, que está potencialmente associada à falha pelo deslizamento do tecido da matriz, devido ao amolecimento de tensão (*strain softening*) (PARISI; MENNA; PROTA, 2019). Este comportamento de falha foi observado em todos os compósitos.

Através da técnica DIC foi possível acompanhar a evolução da deformação e identificar a zona de maior concentração de tensão, caracterizada pela cor vermelha, o que pode indicar os locais propensos ao aparecimento das fissuras.

4.4 Microestrutura dos compósitos

Na Figura 4.11 é apresentada a microestrutura de superfície polida do compósito referência submetido à cura térmica. O compósito apresenta microfissuras na região próxima à zona de transição entre a matriz e o cordão do tecido (seta 1). A seta número 2 indica alguns pontos com a falta de aderência entre a fibra e a matriz cimentícia. A seta 3 indica a presença de produtos de hidratação sobre a superfície da fibra, que pode gerar a mineralização, prejudicando o desempenho dos compósitos no decorrer do tempo.

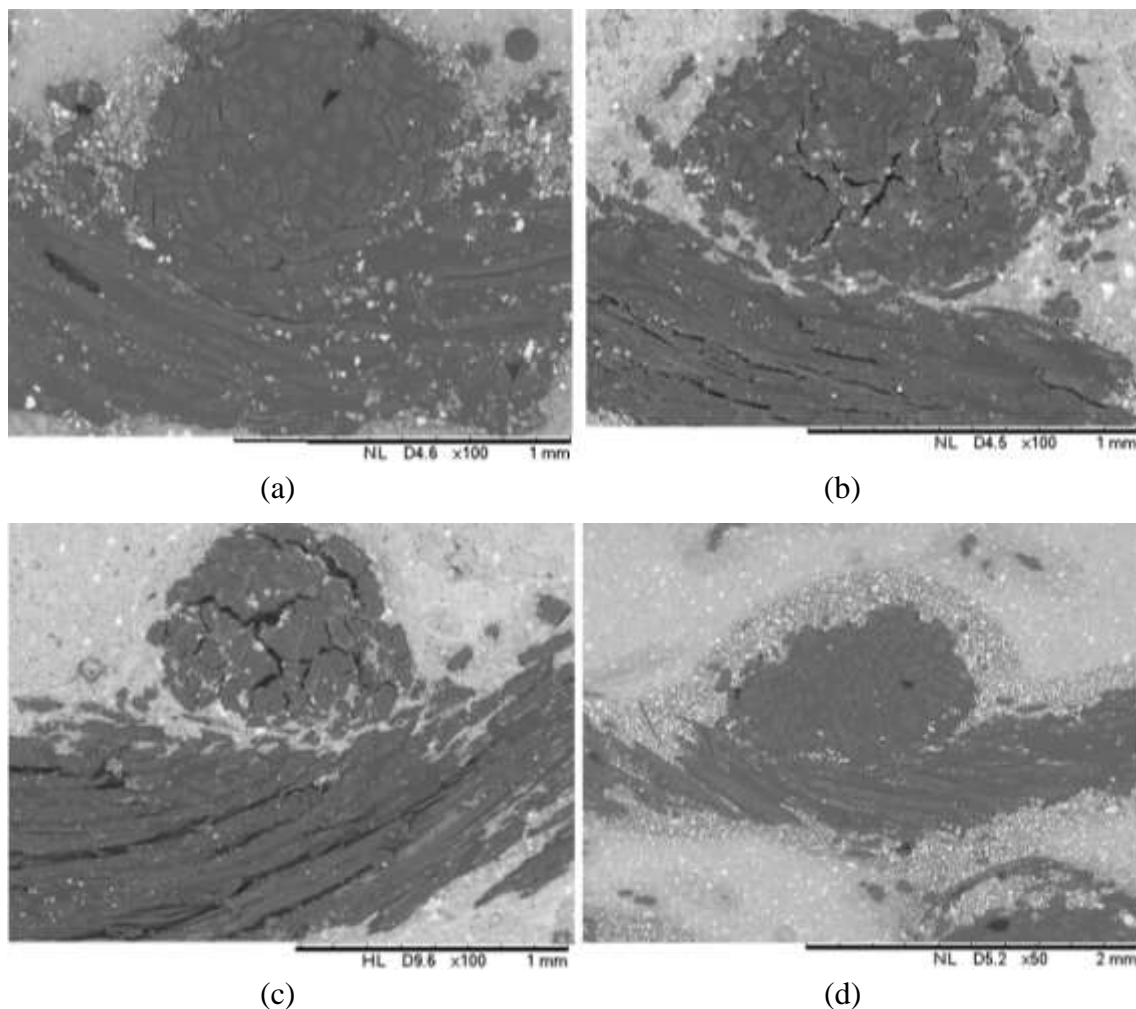
Figura 4.11 - Microestrutura do compósito referência: (a) sob cura térmica com ampliação de 1 mm, (b) ampliação de 100 μm , e (c) ampliação de 30 μm



Fonte: Própria autoria.

Na Figura 4.12 é apresentada a microestrutura de superfície polida dos compósitos produzidos a partir da matriz 5RCD/50MK submetido ao processo de carbonatação acelerada sob 6, 9 e 24 horas em relação a sua contraparte não carbonatada. Através das micrografias é possível observar que a utilização do RCD e do metacaulim proporcionou maior empacotamento entre as partículas (Fig. 12a). Na medida em que ocorreu o processo de carbonatação, observa-se maior densificação na zona de transição fibra e matriz.

Figura 4.12 - Microestrutura dos compósitos produzidos com a matriz 5RCD/50MK: (a) submetido à cura térmica, (b) 6h de CO₂, (c) 9h de CO₂, e (d) 24h de CO₂



Fonte: Própria autoria.

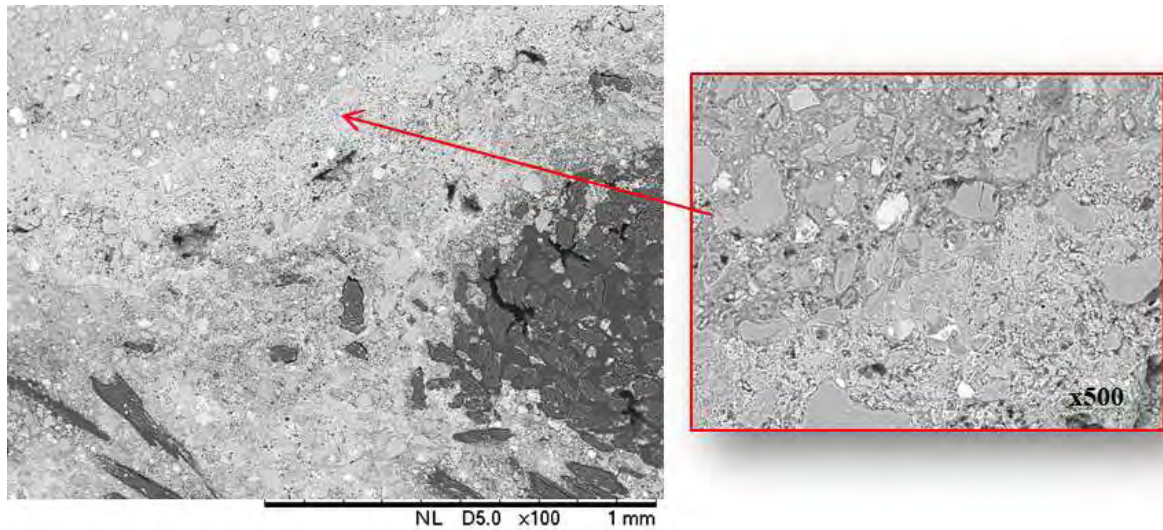
Segundo Marphou et al. (2023) amostras com elevados teores de umidade, durante a carbonatação, a remoção da água ocorre em maior e mais rápido no lúmen do que para a matriz cimentícia. De tal modo, que os lúmens da fibra atuam como canais

para o transporte de CO_2 , proporcionando maior carbonatação da matriz adjacente a fibra, enquanto a capacidade de difusão do gás na matriz será muito baixa devido à saturação de água dos poros. Esse fator explica o baixo grau de carbonatação dos compósitos. Em contraponto, a metodologia adotada permite melhorar a zona de adesão matriz cimentícia e tecido vegetal, que por suas características intrínsecas, tende a afetar esta região, comprometendo as propriedades do compósito. Assim, observa-se que o processo garantiu melhor transferência de tensões entre fibra e matriz, como pode-se observar nos resultados mecânicos, o que pode estar associado a melhor interface fibra-matriz.

Nos compósitos ternários, tanto as reações pozolânicas, quanto o processo de carbonatação corroboram para o consumo do CH. Como a disponibilidade do hidróxido de cálcio é menor, a reação de carbonatação resulta na carbonatação do C-S-H. Assim, é importante ressaltar, que em contraste com a carbonatação do CH, a carbonatação do C-S-H não densifica a estrutura dos poros (VISSER, 2014; MARANGU; THIONG'O; WACHIRA, 2019).

O compósito 5RCD/50MK_9h (Fig. 4.12c) apresentou uma estrutura matriz compacta em relação à referência na zona de transição. Esse comportamento corrobora com a diminuição da porosidade aparente do compósito submetido a 9 h de cura com CO_2 , o que conseqüentemente resultou na diminuição de absorção de água (Fig. 4.13). A redução da porosidade na zona de união interfacial melhorou a interface fibra-matriz, fazendo com que as fibras e a matriz trabalhem em conjunto, o que justifica o desempenho mecânico do compósito (SAVASTANO Jr., 2000; SANTOS et al., 2015). A microestrutura do compósito 5RCD/50MK_9h comprova o melhor desempenho físico e mecânico do compósito. Esse fator pode estar relacionado muito mais com o fator de empacotamento, ocasionado pela nucleação dos produtos de hidratação, do que pela densificação da matriz cimentícia. Pois, como exposto anteriormente, nas misturas ternárias o processo de carbonatação acelerada ocorre em maior proporção pela carbonatação do C-S-H, o que não gera a densificação da matriz.

Figura 4.13 - Microestrutura do compósito 5RCD/50MK_9h

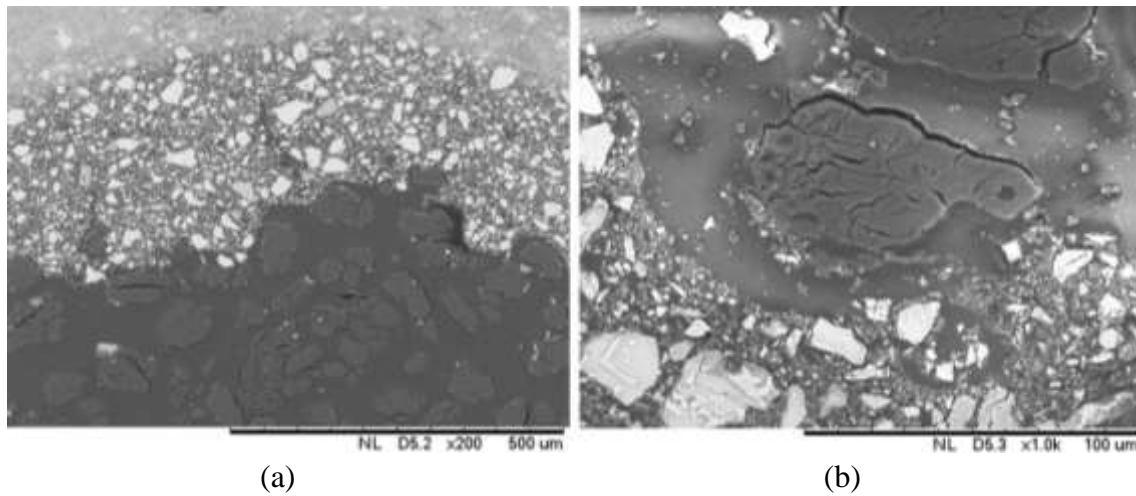


Fonte: Própria autoria.

A Fig. 4.14 mostra a microestrutura do compósito 5RCD/50MK_24h, exposto a 24 h de cura com CO_2 . A mistura incorpora um teor de metacaulim e resíduos de construção e demolição de 55%, levando à distribuição de partículas finas de MK e RCD não hidratados para a zona de transição e a superfície da fibra (Fig. 4.12b). Wang et al. (2023) observaram o mesmo comportamento quando avaliaram a microestrutura de compósitos cimentícios com teores de cinzas volantes e sílica ativa superior a 50%. As partículas finas aderidas a superfície das fibras podem funcionar como pontos de nucleação para a formação de produtos de hidratação, devido à elevada área superficial e a reação pozolânica (LOTHENBACH; SCRIVENER; HOOTON, 2011) e propiciar a formação de cristais carbonatos de cálcio durante o processo de carbonatação (PRANEETH et al., 2020). Tal como a grande área superficial específica da fibra, devido sua estrutura porosa.

Com a presença dos finos, a nucleação de cristais de carbonatado de cálcio é facilitada, pois ocorre a adsorção de íons presentes na solução de carbonatação. A reação dos íons de cálcio (Ca^{2+}) e os íons de carbonato (CO_3^{2-}) provenientes de reações anteriores começam a se combinar para formar cristais de carbonato de cálcio, através da nucleação e subsequente crescimento de cristais (BERUTO; BARBERIS, BOTTER, 2005; CIZER et al., 2012). Esses fatores, associado à exposição excessiva ao CO_2 possivelmente propiciaram a formação de uma zona mais porosa próxima às fibras vegetais.

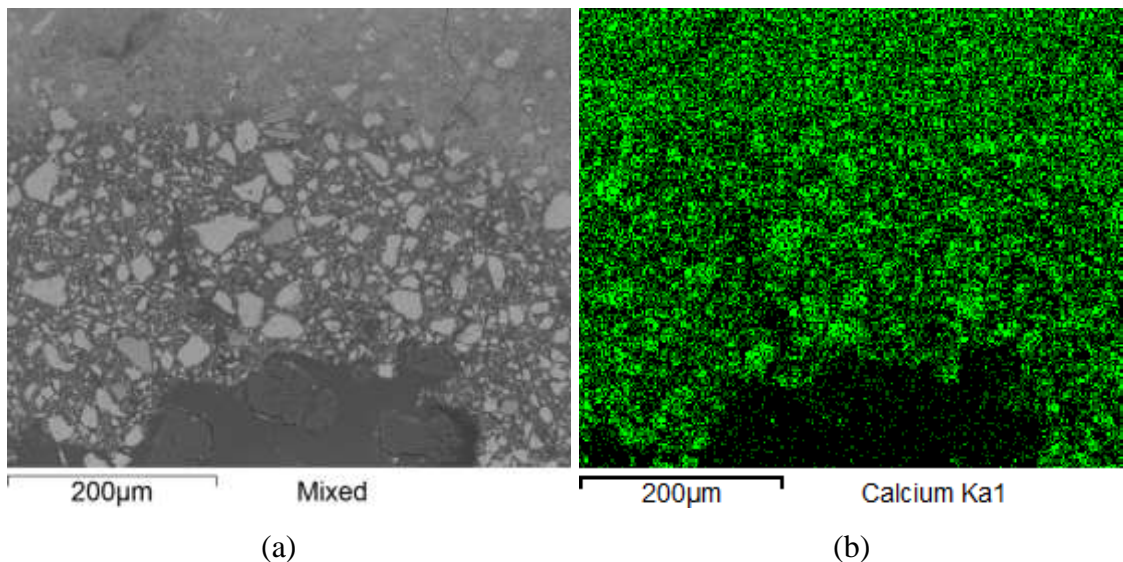
Figura 4.14 – Microestrutura do compósito 5RCD/50MK_24h: (a) zona de transição ampliada a 500 μm , e (b) ampliação de 100 μm



Fonte: Própria autoria.

Na Figura 4.15 apresentada-se o Mapa EDS da zona de transição do compósito 5RCD/50MK_24h. A imagem mostra os íons de cálcio na superfície do agregado atuaram como pontos de nucleação dos carbonatos.

Figura 4.155 – Microestrutura do compósito 5RCD/50MK_24h: (a) zona de transição, e (b) mapa EDS



Fonte: Própria autoria.

Através da microestrutura dos compósitos, observa-se que quando aplicado na medida adequada, o processo de carbonatação pode levar à redução dos poros, tornando a matriz mais densa e compacta. No entanto, quando o compósito é submetido

excessivamente ao CO₂, resultar na expansão volumétrica, criando microfissuras na zona carbonatada ou vazios na matriz cimentícia próxima às fibras, o que, resulta no aumento da porosidade do material (JOHANNESSON; UTGENANNT, 2001). Além disso, o ingresso excessivo de CO₂ ataca o C-S-H, resultando em sua desintegração e subsequente perda de resistência do compósito. Esses fatores, podem explicar a camada espessa formada ao redor dos cordões do tecido e a tendência ao aumento da porosidade, observada nos testes físicos, comprometendo assim a resistência mecânica do material, especialmente quando este apresenta elevado teor de finos.

Este comportamento demonstra que o maior tempo de carbonatação não necessariamente resultará no melhor desempenho das propriedades dos compósitos. Assim, observa-se que o resultado mecânico do compósito 5RCD/50MK_24h foi afetado negativamente devido ao tempo excessivo de exposição ao CO₂, ocasionando o decréscimo no módulo de ruptura e na energia específica estatisticamente significativa.

Devido às interações complexas entre as fibras, as partículas finas, a matriz e as condições de cura com CO₂, outros estudos são necessários para comprovar que trata-se da formação de cristais de carbonato, e de que maneira as fibras vegetais influenciam durante a carbonatação de compósitos cimentícios. Pois, as propriedades como resistência mecânica, tenacidade e permeabilidade ao CO₂, podem variar conforme a composição do material, afetando a cinética de carbonatação.

5 CONCLUSÃO

Os efeitos das diferentes formulações e tipos de cura (cura térmica e cura com CO₂) testado nos compósitos cimentícios reforçados com 5% de tecido de juta foram avaliados. As curvas tensão versus deformação, o padrão de fissuração e a microestrutura dos compósitos foram investigados. Algumas conclusões podem ser retiradas dos resultados experimentais:

- A avaliação dos produtos de hidratação e do grau de carbonatação demonstram o processo de carbonatação acelerada contribuiu para diminuição do teor de hidróxido de cálcio presente nos compósitos. Os compósitos produzidos com as matrizes ternárias sob 9 e 24 h de cura com CO₂ não apresentaram CH, ou seja, tornaram-se isentos de hidróxido de cálcio. Além disso, observou-se o aumento do teor de carbonato de cálcio (CC) devido a exposição ao CO₂.

- Os diferentes tipos de cura afetam significativamente o comportamento mecânico dos compósitos. O processo de carbonatação acelerada proporcionou um incremento significativo no módulo de ruptura e na capacidade de absorção de energia do material. Pode-se dizer que, a carbonatação acelera o processo de cura, resultando no melhor desempenho mecânico em idade reduzida. De modo geral, observou-se que 9 horas de cura com CO₂ auxilia no incremento das propriedades físicas, mecânicas e microestruturais dos compósitos. Ressalta-se que o tempo de cura sofrerá variação conforme a matriz adotada, como por exemplo, o compósito referência sob 24 h de cura com CO₂ obteve melhor desempenho em relação aos demais períodos de carbonatação. Todavia, para os compósitos ternários 9 h de cura com CO₂ foi suficiente para garantir as propriedades do compósito.

- Os experimentos indicaram, que os compósitos exibem o comportamento de múltiplas fissuras quando produzidos com matrizes ternárias e quando submetidos ao processo de carbonatação acelerada. A falha dos compósitos ternários tanto sob cura térmica quanto curados com CO₂ apresentaram a falha devido ao deslizamento do tecido na matriz, apresentando amolecimento de tensão. Com exceção do compósito referência submetidos à cura térmica, que apresentou um única fissura e um comportamento pós-pico frágil. A técnica DIC permitiu acompanhar a deformação dos compósitos e prever o aparecimento de fissuras devido ao acúmulo de tensões.

- As microestruturas dos compósitos comprovam a eficiência do processo de carbonatação acelerada, auxiliando na diminuição da porosidade próximo a zona interfacial, além disso, o processo contribuiu para melhor interface fibra-matriz.

Com base neste estudo, pode-se observar que é possível utilizar elevados teores de material cimentício suplementar e melhorar as propriedades do produto final. Colaborando para a redução da emissão de carbono, economia de energia, estímulo à economia circular pela reutilização dos resíduos de construção e demolição e a redução da degradação ambiental, ocasionado pelo depósito dos resíduos que geram impactos a fauna e a flora. Pesquisas futuras devem aumentar a sustentabilidade e enfatizar a vida útil dos compósitos.

Capítulo 5

Efeito da fração fina de resíduos de construção e demolição em fibrocimentos

Daniela Oliveira de Lima¹, Rafael Henrique Filomeno¹, Moisés Frías Rojas², Holmer Savastano Junior¹

¹ Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, Brasil

² Instituto de Ciências da Construção Eduardo Torroja (IETcc-CSIC), Madrid, Espanha
daniela.engcivil@usp.br

Resumo

Os resíduos de construção e demolição (RCD) são os mais abundantes em vários países do mundo. Uma alternativa é reaproveitar esse resíduo como material cimentício suplementar (MCS). O estudo visa avaliar a aplicabilidade do RCD (<63 μm) para substituir parcialmente o cimento (0, 5, 10 e 15% em massa) na produção de fibrocimentos (FC). A formulação ótima foi submetida ao processo de carbonatação acelerada (CA), e suas propriedades foram avaliadas em termos de desempenho físico-mecânico e microestrutural, grau de carbonatação e estabilidade dimensional. Os resultados demonstram que o RCD atuou positivamente nas propriedades do compósito, aumentando o módulo de ruptura em aproximadamente 40%. Além disso, embora haja uma tendência da carbonatação em diminuir a capacidade de deformação, a adição de RCD compensou essa fragilização, dobrando o valor da energia específica, devido ao melhor empacotamento das partículas e otimização da interface das fibras.

Palavras-chave: Resíduos de construção e demolição; Cimento ecoeficiente; Fibrocimento; Carbonatação acelerada.

1 INTRODUÇÃO

O aumento da população levou à construção progressiva de infraestruturas e edifícios. Esta questão causa graves problemas ambientais, principalmente associados à produção de cimento, incluindo altas emissões de CO₂; em segundo lugar, porque produz um grande volume de RCD, um material não biodegradável que representa entre 30-50% do total de resíduos gerados, e cuja grande maioria se acumula em instalações de gestão própria ou em aterros sanitários, constituindo graves problemas económicos, sociais, problemas de saúde e ambientais; e, em terceiro lugar, pelo elevado consumo de matérias-primas não renováveis, utilizadas na composição de materiais de construção.

O RCD é geralmente composto principalmente por componentes, como concreto, cerâmica e agregados naturais, além de outros materiais secundários (papel, madeira, plástico, vidro e metais) (MEDINA et al., 2014), representando mais de 50% do total de resíduos sólidos urbanos no Brasil (VÁZQUEZ, 2013). Desta fração, 60% correspondem a resíduos de cimento (GOMES et al., 2015). Atualmente, agregados reciclados são comumente utilizados em diversos países como Bélgica, Dinamarca e Holanda, que possuem uma taxa de produção de agregados reciclados acima de 80% (CORINALDESI; MARCONI, 2009).

No Brasil, é comum encontrar esses materiais descartados clandestinamente em lixões e encostas de rios, o que indica a falta de gestão por parte das empresas e a falta de fiscalização dos órgãos responsáveis. O setor de construção civil no país produz anualmente aproximadamente 48 milhões de toneladas de RCD (ABRELPE, 2022). Embora se estime que esse valor seja ainda maior, em torno de 100 milhões de toneladas por ano (ROSADO et al., 2019), tais dados referem-se apenas à quantidade de resíduos coletados pelo município descartados em vias e logradouros públicos. Em São Paulo, que é o estado mais industrializado do Brasil, com 44 milhões de habitantes, a produção de resíduos ultrapassa 20 milhões de toneladas por ano (ABNT NBR 15116; BEJA; MOTTA; BERNUCCI, 2020). Embora existam leis relacionadas à reciclagem de resíduos, a taxa ainda é considerada mínima, inferior a 20% (BEJA; MOTTA; BERNUCCI, 2020), principalmente em aplicações industriais como agregado reciclado (concreto e misturas) até 100% de substituição para a fabricação de novos concretos não estruturais (FAVARETTO et al., 2017). Essa quantidade é ainda menor quando se refere a finos reciclados (menos de 5 mm de tamanho, que é 20-50% do RCD total) (ZHANG et al., 2018). Pois, atualmente não há aplicação industrial devido à presença

de possíveis compostos expansivos (sulfatos, cloretos, partículas finas de cimento, por exemplo), e dependendo do agregado natural utilizado no concreto original (silício ou calcário), podem ter diferentes comportamentos (físicos, mecânicos e reológicos), isso constitui a desvantagem em muitos cenários para a reciclagem de RCD.

Estudos recentes mostram que, dependendo da origem, granulometria, composição química e mineralógica, os finos de concreto reciclado gerados durante a produção de agregados reciclados de concreto podem ser utilizados como carga, bem como material cimentício suplementar (SCM), pois as frações finas podem possuir propriedades cimentícias, devido à presença de grãos de cimento não hidratados e adições pozolânicas em sua composição (MEDINA; SANCHES DE ROJAS; FRÍAS 2013; FRÍAS et al., 2020).

No entanto, estudos sob a influência e o efeito de finos de concreto reciclado de diferentes origens nas propriedades de matrizes cimentícias são atualmente limitados (LIU et al., 2014; MORENO-JUEZ et al., 2021). Segundo Corinaldesi e Mariconi (2009), isso ocorre porque a fração fina prejudica tanto o desempenho mecânico quanto a durabilidade do concreto. Portanto, os estudos estão mais focados na produção de concreto usando agregado graúdo reciclado (VEGAS et al., 2011; VIEIRA; CORREIA; DE BRITO, 2011; PEPE et al., 2014; AMARIO et al., 2017; RANGEL et al., 2017; CHINZORIHT et al., 2020; RANGEL et al., 2020; ZHANG et al., 2020).

Nesse contexto, o presente trabalho aborda uma nova linha de pesquisa para utilizar a fração fina do concreto como material pozolânico na fabricação de novos ecocompósitos. Para tanto, o estudo tem como objetivo avaliar o comportamento físico-mecânico e microestrutural de fibrocimento reforçado com polpas celulósicas branqueadas de eucalipto. O cimento *Portland* foi parcialmente substituído por finos reciclados de concreto ($< 63 \mu\text{m}$), nos teores de 0, 5, 10 e 15%, em massa. A formulação ótima foi determinada através de testes preliminares e foi submetida ao processo de carbonatação acelerada.

2 MATERIAL

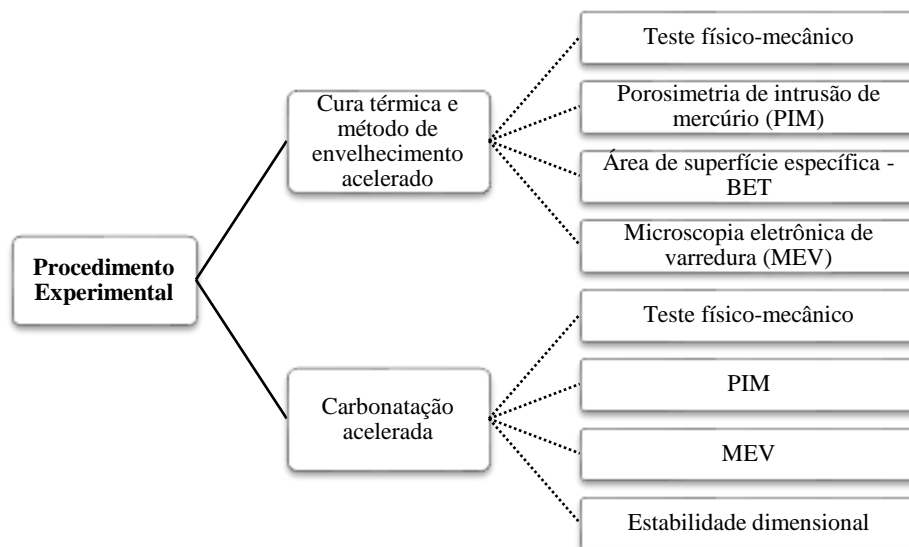
Os compósitos foram produzidos com cimento *Portland* de alta resistência inicial CP V-ARI (similar ao cimento tipo III de acordo com ASTM C150); calcário moído e polpa branqueada de eucalipto (produzida pelo processo kraft), doados pela empresa Infibra, localizada em Leme - SP, Brasil. O RCD foi doado pela usina de

reciclagem de concreto (Eco-X), localizada em Guarulhos - SP, Brasil. O RCD é composto por aproximadamente 98% de resíduos de concreto e 2% de resíduos de cerâmica. Após receber o RCD no laboratório, ele foi seco em estufa a 60 °C por 24 h, depois triturado para fragmentar as partículas a 63 µm, semelhante ao cimento Portland comercial.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O estudo foi dividido em duas etapas (Fig. 5.1). A primeira fase da pesquisa consistiu em definir o teor ótimo de RCD (0, 5, 10 e 15% em massa) em substituição ao cimento Portland em uma matriz de fibrocimento. A segunda etapa consistiu em avaliar o comportamento do RCD em fibrocimento submetido à carbonatação acelerada na formulação pré-definida.

Figura 5.1 - Procedimento experimental da pesquisa



Fonte: Própria autoria.

3.1 Técnicas Instrumentais

Os principais óxidos foram determinados por fluorescência de raios X por dispersão de comprimento de onda (WDXRF) em um espectrômetro Bruker, modelo S8 TIGER. Foi utilizado um tubo de raios X com ânodo de ródio (Rh) com janela ultrafina de 75 µm e operando com tensão máxima de 60 kV e corrente máxima de 170 mA.

As amostras foram analisadas por difração a laser no modo de dispersão seca usando um analisador de partículas Malvern Mastersizer 3000 equipado com fontes de luz vermelha e azul (He-Ne e LED) com capacidades de detecção entre 0,01 μm e 3500 μm .

A análise mineralógica das amostras foi determinada por difração de raios X em pó (DRX), utilizando um difratômetro de raios Lynxeye ultra-fast Detector RX, com radiação de cobre, operando a 40 kV e 30 mA, a um passo de 0,02° por segundo e intervalo de medição entre os ângulos de Bragg (2θ) de 5° a 60°, com intensidades registradas por 1 segundo a cada passo.

3.2 Teste de pozolanicidade

A pozolanicidade do RCD foi avaliada pela análise química acelerada em um sistema puro de pozolana/hidróxido de cálcio. O método consiste em adicionar 1g do resíduo a 75 mL de solução saturada de hidróxido de sódio e mantê-lo armazenado a 40 °C por 1, 7, 28 e 90 dias. Em seguida, as soluções foram filtradas e a concentração de cálcio remanescente na solução foi determinada por titulação volumétrica com EDTA. A quantidade de cal fixada foi definida pela diferença entre a cal presente em uma solução de referência.

3.3 Produção e cura do fibrocimento

Placas planas de fibrocimento (200 x 200 x 5) mm³ foram produzidas em laboratório pelo método de sucção e prensagem (SAVASTANO JUNIOR; WARDEN; COUTTS, 2000). As formulações foram ajustadas de acordo com estudos anteriores (TONOLI et al., 2009, 2010) e estão apresentadas na Tabela 5.1.

Inicialmente, o processo consistia em dispersar a polpa celulósica branqueada em 1600 ml de água, a 3000 rpm por 5 min. Em seguida, os demais materiais foram adicionados e agitados por 2 min a 2500 rpm.

A mistura foi transferida para a câmara de moldagem com aplicação de vácuo, sob pressão de 80 kPa. A consolidação manual foi realizada, de forma a obter uma superfície lisa. Por fim, os compósitos foram prensados a 3,2 MPa por 5 min, para compactação e formação do fibrocimento. Ao final do processo, o fibrocimento foi

submetido ao processo de cura pré-estabelecido, em condição saturada por 48 h, como cura inicial.

Tabela 5.1 - Formulação de compósitos de fibrocimento em massa

Formulação	Composição do fibrocimento (%)			
	CP	Calcário	Polpa Celulósica	RCD
REF	77,2	12,8	10,0	-
FC5%	72,2	12,8	10,0	5,0
FC10%	67,2	12,8	10,0	10,0
FC15%	62,2	12,8	10,0	15,0

Fonte: Própria autoria.

3.4 Cura térmica e carbonatação acelerada

Após a cura inicial, as placas planas de fibrocimento foram submetidas à cura térmica, que consistiu em manter as amostras em ambiente controlado do banho térmico, com umidade relativa de ~ 90% a uma temperatura de 60 °C (vapor de água a 55 °C), durante 5 dias.

O processo de carbonatação acelerada foi utilizado como um processo de cura alternativo, para reduzir o tempo de cura do material baseado na reação química entre o dióxido de carbono (CO₂) e os componentes do cimento, como o hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂). Este método foi utilizado no compósito com conteúdo ótimo de RCD e matriz de referência. Neste processo, após a cura inicial, o fibrocimento foi colocado em câmara de laboratório por 24 h sob temperatura de 60 °C, a 5 bar com saturação de CO₂ e umidade de 60% (FILOMENO et al., 2020).

Após as etapas de cura, as placas de fibrocimento foram cortadas para obtenção dos corpos de prova (160 x 40 x 5) mm³ (comprimento x largura x espessura). Em seguida, as amostras foram imersas em água por 24 h para serem testadas em condições saturadas nos ensaios físico-mecânicos. Em resumo, a condição de referência usou 7 dias para a cura do fibrocimento, enquanto a condição com carbonatação acelerada usou 3 dias para o processo de cura (FILOMENO et al., 2023).

3.5 Método de envelhecimento acelerado

A durabilidade dos compósitos cimentícios foi avaliada através do procedimento de envelhecimento acelerado baseado em ensaios de imersão e secagem. As amostras foram submetidas a esta metodologia para estudar o efeito do RCD na durabilidade do fibrocimento ao longo do tempo. O teste foi realizado em câmara de envelhecimento acelerado automático, marca Marconi, modelo MA 035. As amostras foram imersas em água a 20 ± 5 °C por 170 min, seguido de um intervalo de 10 min, e então expostas a uma temperatura de 70 °C por 170 min em estufa ventilada. Para evitar choque térmico entre as etapas de imersão e secagem, foi adotado um intervalo de 10 minutos antes do próximo ciclo. Os corpos de prova foram submetidos a 200 ciclos de umedecimento e secagem. Este ensaio seguiu a metodologia proposta por Tonoli et al. (2009).

A durabilidade dos fibrocimentos submetidos ao processo de carbonatação foi avaliada em relação a amostra não carbonatada. Os compósitos foram submetidos a 50 ciclos de molhagem e secagem.

3.6 Ensaios de Caracterização física e mecânica

As propriedades mecânicas foram obtidas por meio de um ensaio de flexão em quatro pontos realizado em uma máquina de ensaios universal EMIC, modelo DL-30000, equipada com uma célula de carga de 1kN, operando com uma deflexão de 1,5 mm/min e uma distância entre os suportes de 135 mm. Através da análise, os valores do módulo de ruptura (MOR) (Eq. 5.1), limite de proporcionalidade (LOP) (Eq. 5.2), módulo de elasticidade (MOE) (Eq. 5.3) e energia específica (EE) (Eq. 5.4) foram analisados, conforme descrito em Tonoli et al. (2007).

$$\text{MOR} = \frac{P_{\text{max}} \cdot L_v}{b \cdot h^2} \quad (5.1)$$

$$\text{LOP} = \frac{P_{\text{lop}} \cdot L_v}{b \cdot h^2} \quad (5.2)$$

$$\text{MOE} = \frac{276 \cdot L_v^3}{1296 \cdot b \cdot h^3} \cdot (\text{m}) \quad (5.3)$$

$$\text{EE} = \frac{EA}{b \cdot h} \quad (5.4)$$

Em que, P_{\max} é a carga máxima, L_v é o maior vão entre os apoios, b e h são a largura e a profundidade dos corpos de prova, respectivamente, P_{lop} é a carga no ponto superior da porção linear da carga versus flecha curva, e m é a tangente do ângulo de inclinação do gráfico de carga versus deflexão no comportamento elástico. EA corresponde à energia absorvida durante o ensaio, calculada pela integração da área sob a curva carga-deflexão.

Os valores de absorção de água (AA), densidade aparente (DA) e porosidade aparente (PA) foram determinados a partir da média de 5 corpos de prova, de acordo com os procedimentos estabelecidos pela ASTM C 948-81.

Os resultados das análises físico-mecânicas foram tratados estatisticamente por meio do software estatístico SAS 9.4 (Statistical Analysis System). A análise de variância foi utilizada com nível de significância de 5% ($p < 0,05$) pelo teste de Tukey.

3.7 Evolução da microporosidade

A área superficial específica do fibrocimento foi determinada pelo método de Brunauer, Emmett e Teller (BET), utilizando um aparelho ASAP 2010 (Micromeritics) dirigido por adsorção de nitrogênio.

A distribuição e o tamanho dos poros de compósitos de fibrocimento foram avaliados pela técnica MIP. O teste foi realizado no equipamento AutoPore IV 9500 V1.09 da Micromeritics. Amostras cúbicas de aproximadamente 1 cm^3 foram retiradas da parte central dos corpos de prova após a realização dos ensaios mecânicos. Para a realização do ensaio, foi utilizada uma tensão superficial de $0,485 \text{ g/cm}^2$ e uma densidade de $13,544 \text{ kg/m}^3$ com um ângulo de contato de avanço/recuo de aproximadamente 141° . O tempo de equilíbrio de alta e baixa pressão foi de 10 s, e a quantidade de mercúrio introduzida em cada intervalo de pressão foi registrada.

A análise microestrutural foi realizada por microscopia eletrônica de varredura com imagem eletrônica de retroespalhamento, para avaliar a interface fibra-matriz e a zona de transição na superfície polida do fibrocimento. A análise foi realizada em microscopia Hitachi, modelo TM3000, operando em torno de 15 kV e 20 kV. As amostras foram embutidas a vácuo em resina epóxi, seguindo Tonoli et al. (2016).

3.8 Grau de carbonatação (GC), Termogravimetria (TG) e Difração de raios X (DRX)

As análises termogravimétricas foram realizadas em analisador térmico simultâneo modelo STA 449 F3 Júpiter, marca NETZSCH, sob atmosfera de nitrogênio com vazão de 40 mL/min, a uma taxa de aquecimento de 10 °C/min desde a temperatura ambiente até 1000 °C. A análise da captura de CO₂ no fibrocimento carbonatado foi avaliada segundo Tonoli et al. (2019), e o grau de carbonatação foi determinado pela equação (Eq. 5.5), apresentada por Matsushita; Aono; Shibata (2000).

$$CD = \frac{C - C_o}{C_{\max} - C_o} \cdot 100 \quad (5.5)$$

A quantidade de CO₂ absorvida foi determinada pela perda de massa entre 500 °C e 1000 °C, depois multiplicada pela massa residual (após 1000 °C) e dividida por 100 para obter os valores na equação de base não volátil (Eq. 5.6) assume que todo CaO, MgO, Na₂O e K₂O formados na matriz cimentícia reagem com CO₂ para formar carbonatos. Excluindo a quantidade de CaO combinado com carbonato de cálcio e sulfatos.

$$C_{\max}(\%) = 0.785 (CaO - 0.56CaCO_3 - 0.7SO_3) + 1.091MgO + 0.71Na_2O + 0.468K_2O \quad (5.6)$$

Onde C é a quantidade de CO₂ na amostra, C_o é a quantidade de CO₂ na amostra carbonatada e C_{max} é o CO₂ necessário para reagir com os óxidos disponíveis na amostra para formar CaCO₃.

A difração de raios X das amostras foi determinada utilizando um difratômetro de raios miniFlex 600, Rigaku, com radiação de cobre, operando a 40 kV e 30 mA, em passo de 0,02° por segundo e intervalo de medição entre os ângulos de Bragg (2θ) de 10° a 60°, com intensidades registradas por 2°/min.

3.9 Estabilidade dimensional (retração por secagem)

O ensaio de estabilidade dimensional foi realizado em amostras prismáticas de (160 x 40 x 5) mm³ de fibrocimento carbonatado e suas respectivas referências sem carbonatação. Inicialmente, as amostras foram imersas em água por 24 horas, durante as quais foi realizada a primeira medição (medição de referência). Em seguida, as amostras foram armazenadas em câmara Espec, modelo EPL-4H, a 23 °C e 60% UR. Medições

diárias avaliaram as mudanças no comprimento do fibrocimento ao longo de 20 dias. Para as medições, foi utilizado um relógio comparador da Mitutoyo, Japão, conforme metodologia de Souza (2014), calculado pela equação (Eq. 5.7).

$$DS = \frac{L_i - L_d}{1000L_i} \quad (5.7)$$

Onde DS é a contração por secagem, L_i é o comprimento inicial da amostra (mm), e L_d é a medição diária da amostra (mm), no denominador (1000) é aplicado para converter o resultado em mm/m.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização do material de partida

A Tabela 5.2 apresenta as propriedades físicas e a composição química (% em massa de óxidos) determinadas por fluorescência de raios-X. Os altos teores de CaO (32,02%) e MgO (15,65%) indicam que o calcário possui características de calcário dolomítico com presença de quartzo (SiO_2). O RCD apresenta um teor de CaO de 38,93% e SiO_2 de 26,68%, relacionado à presença de fases carbonáticas e à natureza dos agregados originais (FRÍAS et al., 2020; CANEDA-MARTÍNEZ et al., 2021).

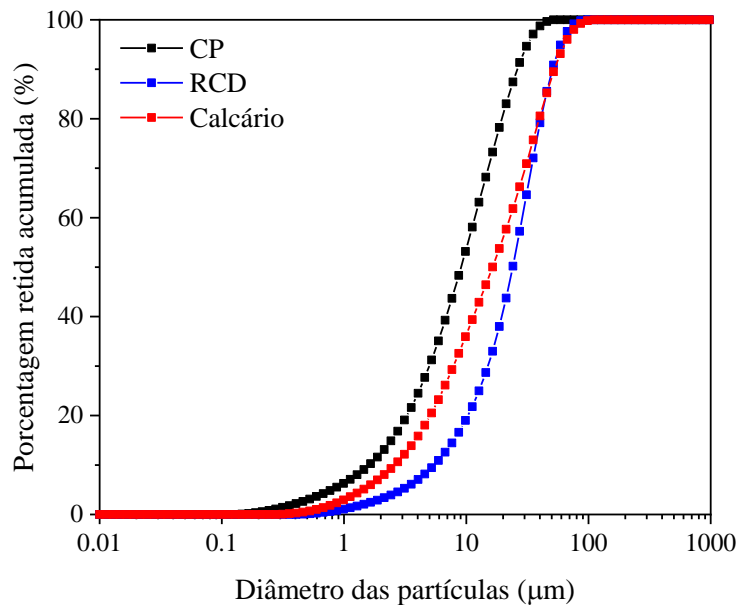
Tabela 5.2 - Composição química (% em peso) e física das matérias-primas

	CP	RCD	Calcário
SiO_2	18,88	26,68	6,01
Al_2O_3	4,55	9,19	2,18
CaO	63,25	38,93	32,02
Fe_2O_3	2,66	9,19	0,75
MgO	2,47	2,76	15,65
SO_3	3,77	1,95	0,28
Na_2O	0,40	0,48	-
K_2O	0,91	1,21	0,51
P_2O_5	0,16	0,15	<0,10
TiO_2	0,22	0,58	0,08
MnO	<0,10	0,15	<0,10
Perda ao fogo	2,00	14,40	42,4
Densidade (g/cm^3)	3,09	2,44	2,86
BET (m^2/g)	1,47	13,55	1,11

Fonte: Própria autoria.

A distribuição granulométrica dos materiais de partida é apresentada na Fig. 5.2. Observa-se que os MCS possuem granulometria próxima à faixa granulométrica do cimento. As amostras têm D_{50} de 9,07 μm , 24,0 μm e 16,4 μm para CP, RCD e calcário, respectivamente.

Figura 5.2 - Curva granulométrica dos componentes do fibrocimento

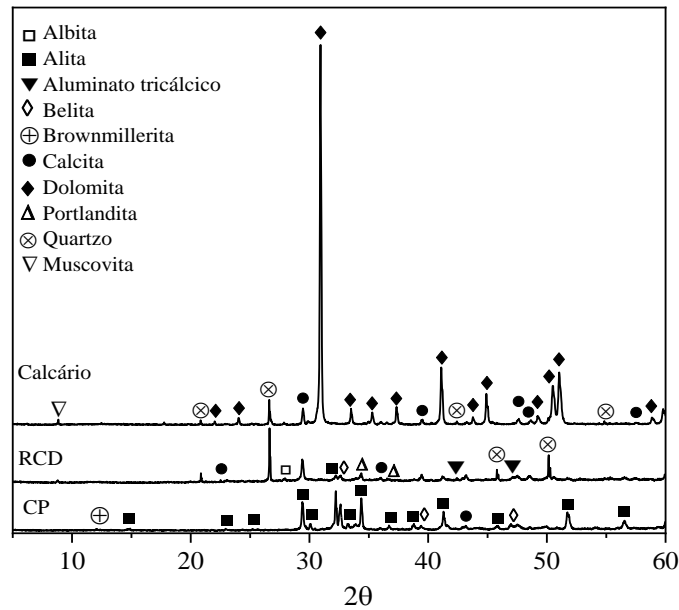


Fonte: Própria autoria.

No difratograma do CP (Fig. 5.3), foram identificadas fases cristalinas típicas do cimento, como o silicato tricálcico (C_3S) e o silicato dicálcico (C_2S). O calcário apresentou dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), como principal fase cristalina, além de pequenas proporções de carbonato de cálcio (CaCO_3), quartzo (SiO_2) e muscovita ($\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH}, \text{F})_2$).

Na composição mineralógica do RCD, há um grande número de picos referentes ao quartzo, composto característico de agregados siliciosos naturais, utilizado na produção dos concretos originais. No difratograma também é possível observar a presença de picos referentes à presença de compostos anidros do cimento, como C_2S , C_3S e C_3A , que são compostos não hidratados. Porém, esses componentes estão em menor quantidade, assim como a presença de picos minerais referentes à albita e muscovita, cuja origem pode ser proveniente de impurezas presentes em agregados naturais. A análise não mostrou a presença de fases hidratadas cristalinas, como silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e sulfoaluminatos de cálcio hidratados (Etringita), que são esperados em resíduos de concreto (BULLARD et al., 2011).

Figura 5.3 - Análise de DRX para os componentes do fibrocimento

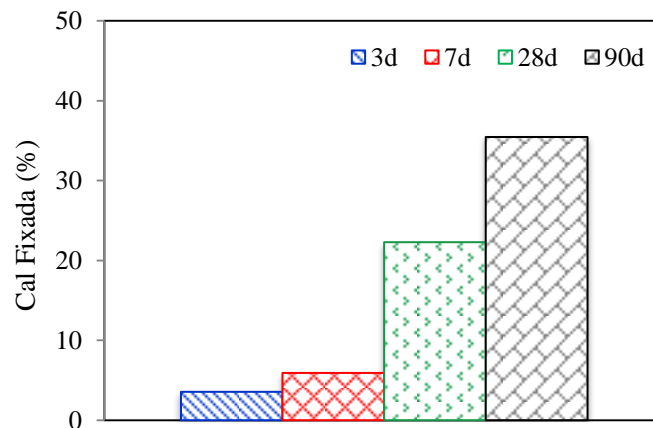


Fonte: Própria autoria.

4.2 Teste de pozolanicidade

A Fig. 5.4 apresenta a atividade pozolânica do resíduo em um sistema pozolana/cal. Observa-se que o RCD consumiu aproximadamente 35% da cal disponível, apresentando baixa reatividade após 90 dias de exposição. Esse comportamento pozolânico estaria relacionado principalmente à presença de material cerâmico no RCD e não à presença de resíduos de concreto hidratado, como já observado em estudos anteriores (FRÍAS et al., 2020; CANEDA-MARTÍNEZ et al., 2021).

Figura 5.4 - Variação da cal fixada em relação ao tempo de reação



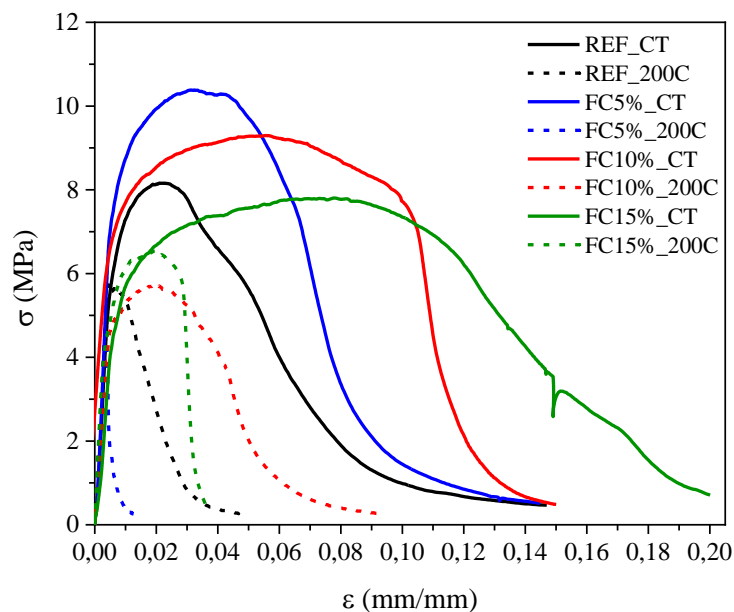
Fonte: Própria autoria.

4.3 Desenvolvimento da matriz cimentícia

4.3.1 Caracterização físico-mecânica dos fibrocimentos

A Figura 5.5 mostra as curvas típicas de tensão versus deformação para os fibrocimentos com 0, 5, 10 e 15% de RCD em massa, para compósitos submetidos à cura térmica (CT) e após 200 ciclos de molhagem e secagem (200C). Os resultados demonstram que a ductilidade dos compósitos aumentou gradativamente com o aumento do teor de substituição parcial de CP por RCD. No entanto, o envelhecimento acelerado causou uma diminuição na resistência e na ductilidade dos compósitos. Esse comportamento se deve à degradação das fibras celulósicas causada pela matriz alcalina, causando a quebra da cadeia molecular da celulose e a mineralização do lúmen da fibra devido à migração do hidróxido de cálcio livre (RODIER; DA COSTA CORREIA; SAVASTANO Jr., 2020).

Figura 5.5 - Curvas típicas de tensão versus deflexão para fibrocimentos



Fonte: Própria autoria.

A Tabela 5.3 apresenta os valores médios e o respectivo desvio padrão para as propriedades físicas e mecânicas dos compósitos submetidos à cura térmica e ao envelhecimento acelerado. Nota-se que a absorção de água (AA) e a porosidade aparente (PA) aumentam gradativamente, conforme o aumento no teor de RCD, principalmente após os ciclos de imersão e secagem. Gerando um acréscimo de

aproximadamente 15% na AA e de 11% na PA. Isto ocorre devido à característica típica do RCD (grão ásperos, porosos e com alta área superficial) que em elevados teores resultam no aumento da porosidade aparente e, conseqüente na absorção de água.

Tabela 5.3 - Propriedades físico-mecânicas dos fibrocimentos (média ± desvio padrão)

Formulação	MOR (MPa)	LOP (MPa)	MOE (GPa)	EE (kJ/m ²)	AA%	DA (g/cm ³)	PA (%)
REF_CT	8,68 ± 0,91ba	5,02 ± 0,50ba	6,02 ± 0,42a	3,69 ± 0,89bc	22,76 ± 1,0c	1,47 ± 0,04a	33,68 ± 0,65d
REF_200C	5,94 ± 0,59c	4,61 ± 0,69ba	5,74 ± 56a	1,09 ± 0,76c	23,98 ± 0,95bc	1,45 ± 0,02ba	35,08 ± 0,92bdc
FC5%_CT	8,96 ± 0,71a	5,11 ± 0,92ba	5,88 ± 1,01a	4,78 ± 0,90b	22,42 ± 1,24c	1,48 ± 0,03a	33,38 ± 1,06d
FC5%_200C	5,67 ± 0,54c	3,91 ± 0,53ba	5,08 ± 0,86a	2,20 ± 1,04dc	24,84 ± 0,85bac	1,44 ± 0,02ba	36,18 ± 0,76bac
FC10%_CT	9,74 ± 0,89a	5,40 ± 0,71a	4,93 ± 0,77a	5,49 ± 0,44ba	23,86 ± 0,62bc	1,43 ± 0,03ba	34,44 ± 0,96dc
FC10%_200C	5,78 ± 0,39c	4,58 ± 0,32ba	5,14 ± 0,74a	1,36 ± 0,65dc	26,05 ± 0,40ba	1,42 ± 0,01ba	37,33 ± 0,48ba
FC15%_CT	8,38 ± 0,40ba	4,49 ± 0,38ba	4,93 ± 0,32a	7,63 ± 0,64a	26,19 ± 0,68ba	1,41 ± 0,03ba	37,39 ± 1,03ba
FC15%_200C	6,51 ± 0,77bc	3,49 ± 0,58b	4,81 ± 0,84a	1,49 ± 0,83dc	26,90 ± 0,63a	1,38 ± 0,02b	37,61 ± 0,70a

*As letras na mesma coluna representam a diferença estatística do teste de Tukey (p < 0,05).

Fonte: Própria autoria.

4.3.2 Área de superfície específica, porosidade e microestrutura

A Área de superfície específica e a estrutura macroporosa são geralmente importantes para compósitos à base de cimento. Portanto, as características dos poros do fibrocimento foram investigadas por BET e porosimetria de intrusão de mercúrio. A Tabela 5.4 mostra as características da estrutura de poros BET do fibrocimento.

Os valores de área superficial específica de BET variam entre 4,79 – 6,35 m²/g para os fibrocimentos sem envelhecimento acelerado. Enquanto as amostras submetidas aos ciclos de imersão e secagem apresentaram áreas superficiais maiores, variando entre 6,37 – 9,39 m²/g. Observa-se que quanto maior o teor de RCD, maior a área superficial específica do compósito. A área superficial é inversamente proporcional ao diâmetro médio dos poros, o que significa que, uma superfície específica grande indica a presença de poros pequenos, enquanto valores pequenos são característicos de materiais macroporosos e não porosos (RAABE et al., 2018). Essa característica foi observada principalmente para o compósito FC15%_200C, o qual apresentou uma área superficial de 9,39 m²/g e a área de microporos de 1,09 m²/g.

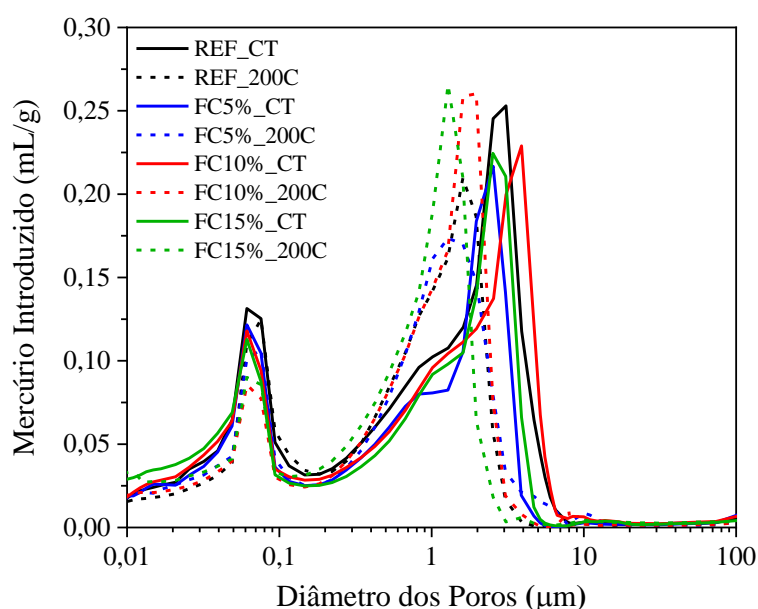
Tabela 5.4 - Área superficial e valores de poros obtidos por BET

Formulação	BET - área superficial (m ² /g)	Área de microporos (m ² /g)	Volume de Microporos (cm ³ /g)	Largura média dos poros (nm)
REF_CT	5,27	0,39	0,00019	19,03
REF_200C	6,88	0,62	0,00021	7,53
FC5%_CT	4,79	0,62	0,00029	19,98
FC5%_200C	6,37	0,32	0,00017	7,00
FC10%_CT	5,83	0,90	0,00042	17,27
FC10%_200C	6,93	0,49	0,00023	7,03
FC15%_CT	6,35	0,59	0,00028	18,97
FC15%_200C	9,39	1,09	0,00052	6,54

Fonte: Própria autoria.

A técnica de determinação de porosimetria de intrusão de mercúrio foi usada para avaliar a distribuição de tamanho de vazios nos compósitos (Fig. 5.6). Observa-se que a adição de RCD com partículas menores que 63 µm reduziu a porosidade total e os fibrocimentos apresentaram porosidade total praticamente equivalentes, concentrada principalmente na região dos macroporos (< 0,05 µm). Sabe-se que a presença desses poros influencia fortemente as propriedades dos materiais cimentícios (CHEN; WU; ZHOU, 2013).

Figura 5.6 - Distribuição do tamanho dos poros nos compósitos



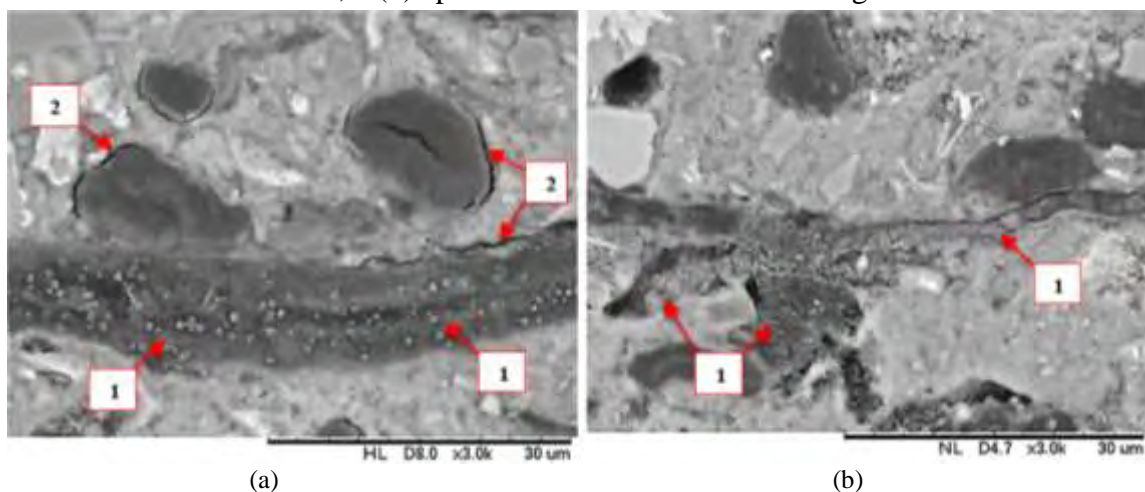
Fonte: Própria autoria.

A mistura FC5%_CT teve um maior refinamento dos poros, ou seja, apresentou uma rede de poros conectados, composta principalmente por poros menores,

demonstrando o aumento da resistência mecânica desta formulação e uma diminuição no teor de mercúrio introduzido. Os ciclos de envelhecimento acelerado resultaram em uma diminuição no tamanho médio dos poros e na porosidade total dos fibrocimentos, comportamento semelhante foi observado por Almeida et al. (2013). O volume total de poros com redução mais significativa foi observada no compósito REF_200C e FC10%_200C.

As micrografias de superfície polida dos fibrocimentos antes e depois dos 200 ciclos de imersão e secagem são apresentadas na Fig. 5.7 (a,b). Nas micrografias é possível observar a presença de produtos de hidratação do cimento na superfície das fibras (indicado pela seta 1), dentre eles a precipitação do hidróxido de cálcio. Não pode-se constatar a presença de CH no lumén das fibras. Todavia, após os 200 ciclos de imersão e secagem, as fibras celulósicas apresentaram o processo de mineralização (Fig. 5.7b). Isso ocorre devido à migração de íons da solução alcalina para o interior das fibras, o que resulta em sua mineralização (SOROUSHIAN; WON; HASSAN, 2012; SANTOS et al., 2015). As setas indicadas pelo número 2 correspondem à interface entre a fibra vegetal e a matriz cimentícia, onde observa-se a falta de aderência em algumas regiões. Tais condições, como a mineralização e a ausência de uma interface coesa, são fatores que impactam negativamente as propriedades mecânicas do compósito ao longo do tempo, acarretando na perda de resistência e na tenacidade do material. Esse efeito pode ser observado no desempenho mecânico dos fibrocimentos após os ciclos de molhagem e secagem.

Figura 5.7 - Micrografias da superfície polida dos fibrocimentos: (a) submetido à cura térmica, e (b) após 200 ciclos de imersão e secagem



Fonte: Própria autoria.

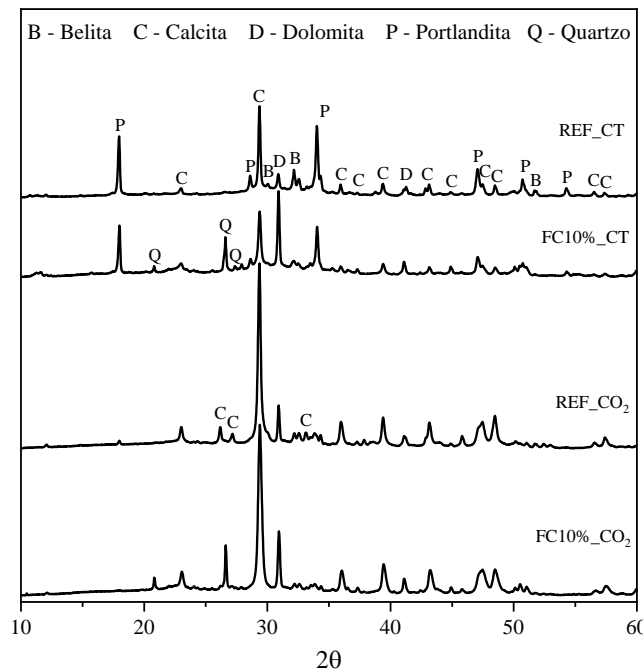
De acordo com os resultados apresentados, observa-se que o fibrocimento apresentou propriedades semelhantes com teores de substituição de 5, 10 e 15% em massa de RCD, garantindo melhor empacotamento das partículas e interface fibra/matriz. Por meio desses testes iniciais, o estudo prosseguirá com a formulação contendo o teor de 10% de RCD.

4.4 Fibrocimento submetido a carbonatação acelerada

4.4.1 Grau de carbonatação (GC), Termogravimetria (TG) e Difração de raios X (DRX)

A difração de raios X (Fig. 5.8) mostra mudanças na estrutura da matriz cimentícia devido às condições de cura (cura térmica e cura com CO₂). O DRX mostra um aumento na intensidade dos picos de calcita após o processo de carbonatação, devido à reação que ocorre principalmente entre CO₂ dissolvido e hidróxido de cálcio, resultando na dissolução da portlandita e precipitação de CaCO₃ (FRÍAS; GOÑI, 2013; PIZZOL et al., 2014; HUNNICUTT; STRUBLE; MONDAL, 2017).

Figura 5.8 - DRX de fibrocimentos carbonatados e não carbonatados

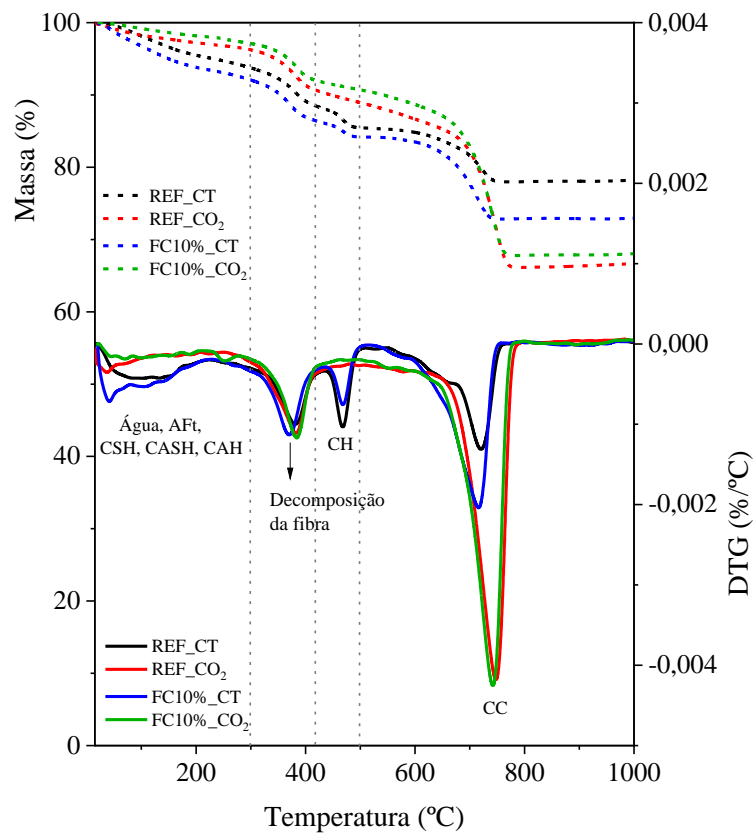


Fonte: Própria autoria.

A presença de CO₂ durante o processo de carbonatação acelerada levou ao desaparecimento do hidróxido de cálcio (CH) ($2\theta = 28,6^\circ, 50,7^\circ$ e $54,3^\circ$) e a uma redução significativa da intensidade dos picos localizados a $2\theta = 18^\circ, 34^\circ$ e 47° (TONOLI et al., 2016; FIORONI et al., 2020). Picos relacionados à belita (C₂S) foram detectados em proporções menores (TONOLI et al., 2016). A dolomita também foi detectada em $2\theta = 31^\circ$ e 41° , proveniente do calcário dolomítico utilizado na fabricação de fibrocimento. Na composição dos compósitos com RCD, foram identificados picos relacionados ao quartzo, devido ao uso primário de areia e brita do concreto original.

A Fig. 5.9 apresenta as curvas TG-DTG dos compósitos carbonatados e não carbonatados. Quatro principais transições de perda de massa foram identificadas. A primeira ocorreu entre 23-300 °C, e foi observada uma perda de peso mínima, que pode corresponder a água adsorvida e vestígios de fases hidratadas do cimento como géis C-S-H, C₄AH₁₃, gesso, etc., que não foram identificados por DRX (TONOLI et al., 2019).

Figura 5.9 - Termogravimetria dos compósitos carbonatados e não carbonatados



Fonte: Própria autoria.

A segunda transição entre 300-415 °C é característica da decomposição das fibras celulósicas (BUI et al., 2021). O pico endotérmico entre 415-500 °C refere-se à

desidroxilação do hidróxido de cálcio (CH). No caso do fibrocimento carbonatado, observa-se que o CH foi consumido durante a reação do processo de carbonatação (SIDDIQUE; NAQI; JANG, 2020). A quarta transação ocorreu entre 596-850 °C, indicando a formação de carbonato de cálcio (CC), tornando-se a fase dominante no fibrocimento carbonatado (HE et al., 2019). A perda de massa entre 596-650 °C está relacionada com CC amorfo ou mal cristalizado (PAN et al., 2017; MENG et al., 2019). Entre a temperatura de 650-850 °C, o CC cristalizado se decompõe (LU et al., 2022). Além disso, o DTG da amostra FC10%_CT possui um teor de CC maior que o de referência, isso está associado aos carbonatos existentes no RCD do concreto original.

As quantidades de carbonato de cálcio foram utilizadas para definir o grau de carbonatação de acordo com as equações (5.5) e (5.6). A Tabela 5.5 apresenta os resultados referentes ao grau de carbonatação e ao teor de hidróxido de cálcio.

Tabela 5.5 - Grau de carbonatação (GC) e teor de CH

	REF_CT	REF_CO ₂	FC10%_CT	FC10%_CO ₂
GC (%)	-	47,60	-	41,90
CH (%)	12,82	7,18	9,58	5,37

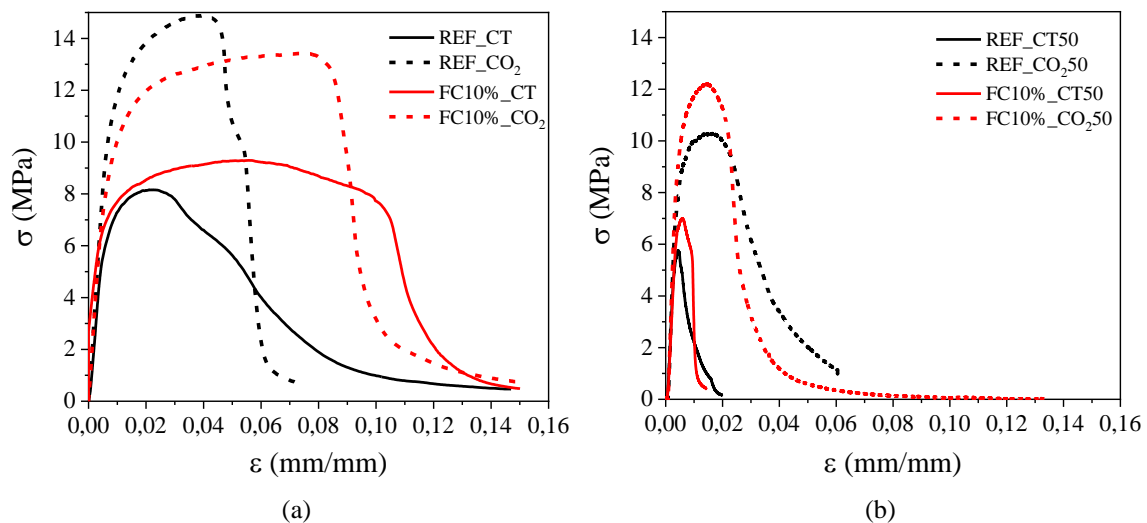
Fonte: Própria autoria.

4.4.2 Caracterização físico-mecânica dos fibrocimentos carbonatados

O comportamento à flexão em quatro pontos das amostras submetidas ao processo de carbonatação acelerada (cura com CO₂) e a cura térmica (CT) são apresentadas na Figura 5.10a. As amostras carbonatadas (REF_CO₂ e FC10%_CO₂) apresentaram ganho de resistência em relação as suas contrapartes submetidas à cura térmica (REF_CT e FC10%_CT). As amostras de FC10%_CO₂ mostraram um aumento de aproximadamente 40% na resistência à flexão em comparação com sua contraparte não carbonatada (FC10%_CT). Além disso, embora haja uma tendência da carbonatação em diminuir a capacidade de deformação do fibrocimento, pelo aumento da rigidez da matriz, a adição de RCD compensou essa fragilização, proporcionando um aumento de aproximadamente 95% na energia específica, em relação ao compósito de referência sem RCD (REF_CT) e de aproximadamente 54% em relação ao compósito REF_CO₂.

O envelhecimento acelerado (50 ciclos de imersão e secagem) gerou uma redução significativa nas propriedades mecânicas dos compósitos submetidos à cura térmica (Figura 5.10b). Quando submetidos ao processo de carbonatação acelerada, os valores médios do módulo de ruptura foram estatisticamente iguais para os fibrocimentos com RCD (FC10%_CO₂ e FC10%_CO₂50). Como observado em estudos anteriores (FILOMENO et al., 2020; 2023) a energia específica de fibrocimentos tende a reduzir após os ciclos de imersão e secagem, devido a degradação das fibras celulósicas. Embora o processo de carbonatação possibilite a diminuição do CH presente na matriz cimentícia, novas precipitações de CH podem enfraquecer a estrutura das fibras vegetais, comprometendo as propriedades mecânicas, como a resistência e a elasticidade do fibrocimento, como pode ser observado na Tabela 5.6.

Figura 5.10 - Curvas típicas tensão versus deformação dos fibrocimentos: (a) submetidos a cura térmica e a carbonatação acelerada, e (b) após os ciclos de envelhecimento acelerado

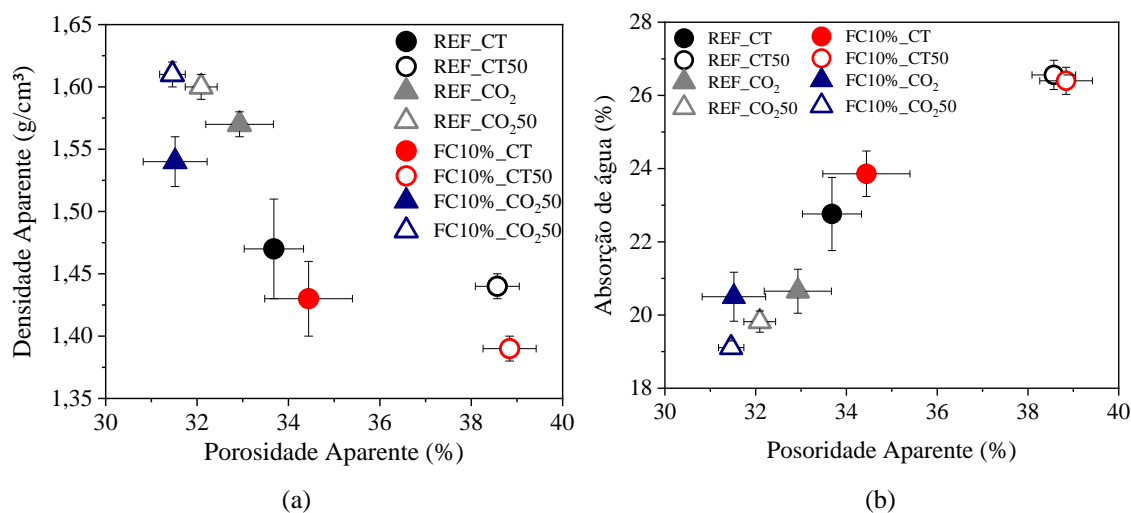


Fonte: Própria autoria.

O processo de carbonatação diminuiu a porosidade aparente do material devido à precipitação de CaCO₃ nas paredes dos poros (Fig.5.11). Esse comportamento ocorre devido às mudanças estruturais do gel C-S-H como principal componente ligante do cimento, gera-se uma diminuição da porosidade enquanto ocorre uma reorganização microestrutural em pequena escala, tornando a pasta cimentícia mais rígida e macroscopicamente resistente devido ao processo de carbonatação (QIU, 2020). A densidade aparente e a porosidade aparente estão inter-relacionadas (Fig.5.11a). Pois, à

medida que os poros são preenchidos, a densidade aumenta, devido o CaCO_3 produzido durante o processo de carbonatação que é mais denso que o CH.

Figura 5.11 - Propriedade física dos fibrocimentos: (a) densidade aparente versus porosidade aparente, e (b) absorção de água versus porosidade aparente



Fonte: Própria autoria.

Após os ciclos de imersão e secagem, observou-se que as amostras submetidas a cura térmica apresentam um acréscimo de aproximadamente 16% na absorção de água e de 14% na porosidade aparente. Em contrapartida, as amostras carbonatadas mantiveram-se estatisticamente iguais.

Tabela 5.6 - Propriedades físicas e mecânicas dos fibrocimentos (média \pm desvio padrão)

Formulação	MOR (MPa)	LOP (MPa)	MOE (GPa)	EE (kJ/m ²)	AA%	DA (g/cm ³)	PA (%)
REF_CT	8,68 \pm 0,91dc	5,02 \pm 0,50c	6,02 \pm 0,42dc	3,69 \pm 0,89bcd	22,76 \pm 1,0b	1,47 \pm 0,04c	33,68 \pm 0,65cb
REF_CT50	5,75 \pm 0,10e	4,87 \pm 0,36c	6,16 \pm 0,94dc	0,23 \pm 0,07f	26,56 \pm 0,40a	1,44 \pm 0,01dc	38,63 \pm 0,48a
REF_CO ₂	14,37 \pm 1,21a	9,21 \pm 1,06ac	5,94 \pm 0,42dc	4,69 \pm 0,61bc	20,95 \pm 0,60c	1,57 \pm 0,01ba	32,93 \pm 0,74cbd
REF_CO ₂ ,50	10,29 \pm 0,21bc	6,25 \pm 0,34bc	8,82 \pm 0,76a	2,50 \pm 0,64ed	19,82 \pm 0,29dc	1,60 \pm 0,01a	32,10 \pm 0,36cd
FC10%_CT	9,74 \pm 0,89c	5,40 \pm 0,71c	4,93 \pm 0,77d	5,49 \pm 0,44ba	23,86 \pm 0,40b	1,43 \pm 0,03dc	34,44 \pm 0,96b
FC10%_CT50	7,01 \pm 0,16de	5,56 \pm 0,56c	6,76 \pm 0,62bdc	0,70 \pm 0,08fe	26,41 \pm 0,37a	1,39 \pm 0,01d	37,02 \pm 0,25a
FC10%_CO ₂	13,64 \pm 1,10a	5,41 \pm 0,60c	7,09 \pm 0,49bac	7,20 \pm 0,95a	20,50 \pm 0,67dc	1,54 \pm 0,02b	31,52 \pm 0,70d
FC10%_CO ₂ ,50	12,43 \pm 0,56ba	7,65 \pm 0,32ba	8,28 \pm 0,31ba	3,0 \pm 0,39cd	19,12 \pm 0,18d	1,62 \pm 0,01a	31,33 \pm 0,16d

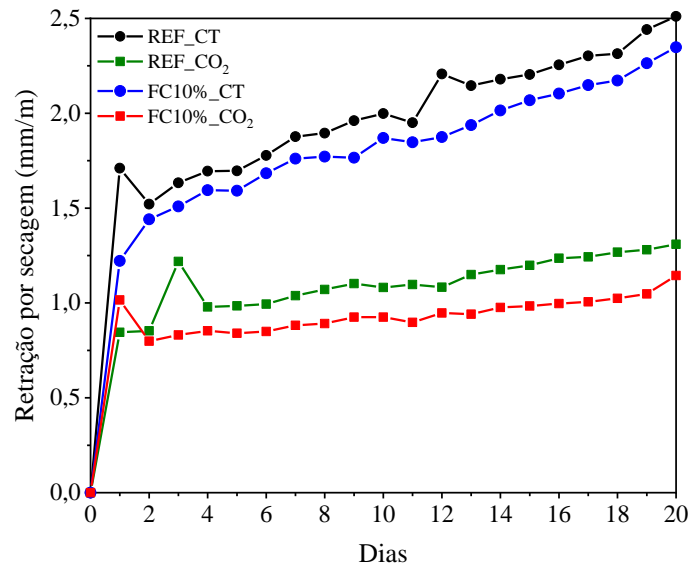
*As letras na mesma coluna representam a diferença estatística do teste de Tukey ($p < 0,05$).

Fonte: Própria autoria.

4.4.3 Estabilidade dimensional (retração por secagem)

Os resultados da estabilidade dimensional para os fibrocimentos são apresentados na Fig. 5.12. A retração foi menor para os compósitos com RCD, proporcionando maior estabilidade no decorrer dos dias em relação ao compósito de referência. Valores menores para a retração podem estar associados a cura interna em função da adição do RCD. A alta porosidade deste material confere maior absorção inicial de água e com o passar do tempo esta água é liberada durante o processo de cura do compósito. Assim, a umidade relativa interna sofre pequenas variações e a retração pode ser reduzida (MENG et al., 2021).

Figura 5.12 - Curva de estabilidade dimensional dos fibrocimentos



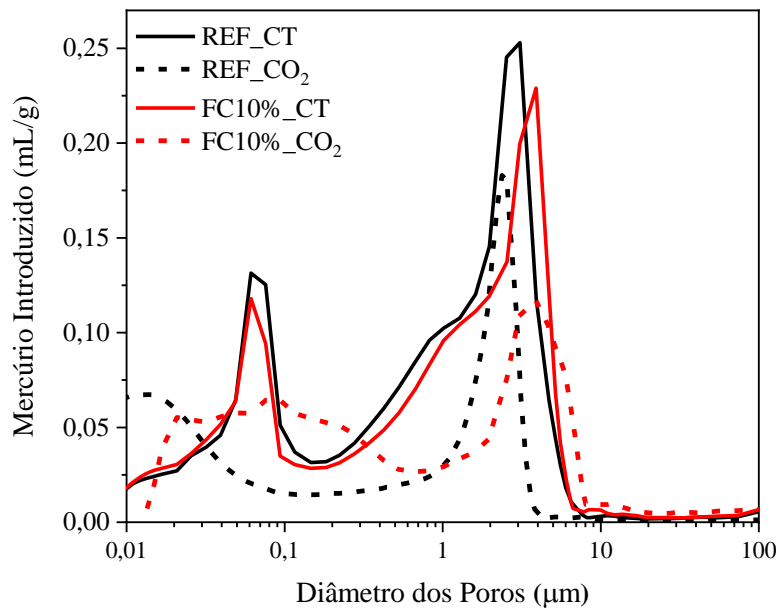
Fonte: Própria autoria.

A retração também foi reduzida pela metade para os compósitos carbonatados. Segundo Bertos et al. (2004), isso pode ser justificado devido ao processo de encolhimento que ocorre durante o processo de carbonatação. Assim, o processo de cura por carbonatação acelerada torna-se uma vantagem por garantir a integridade das propriedades após o processo. Além disso, a dimensão máxima pode aumentar a homogeneidade e melhorar a zona de ligação interfacial, um ótimo empacotamento entre as partículas tende a melhorar a densificação do esqueleto granular do compósito, resultando na redução do encolhimento causadas pelo aumento da finura (LI et al., 2021).

4.4.4 Evolução da microporosidade

A distribuição de tamanho de poros após o processo de carbonatação acelerada e suas contrapartes não carbonatadas são mostradas na Fig. 5.13. A referência carbonatada apresentou uma diminuição significativa na porosidade na faixa de 0,01 - 1 μm , devido ao refinamento dos poros da matriz cimentícia, causada por produtos de hidratação durante o processo de carbonatação que formaram o CaCO_3 , que é mais denso e precipita nos poros capilares (SOROUSHIAN; WON; HASSAN, 2012). A substituição parcial do CP pelo RCD resultou na redução da porosidade total de 32,4% para 31%, quando submetido ao processo de carbonatação, reduziu para 25,6%.

Figura 5.13 - Distribuição de tamanho de poros de compósitos sem carbonatação e compósitos submetidos à carbonatação acelerada



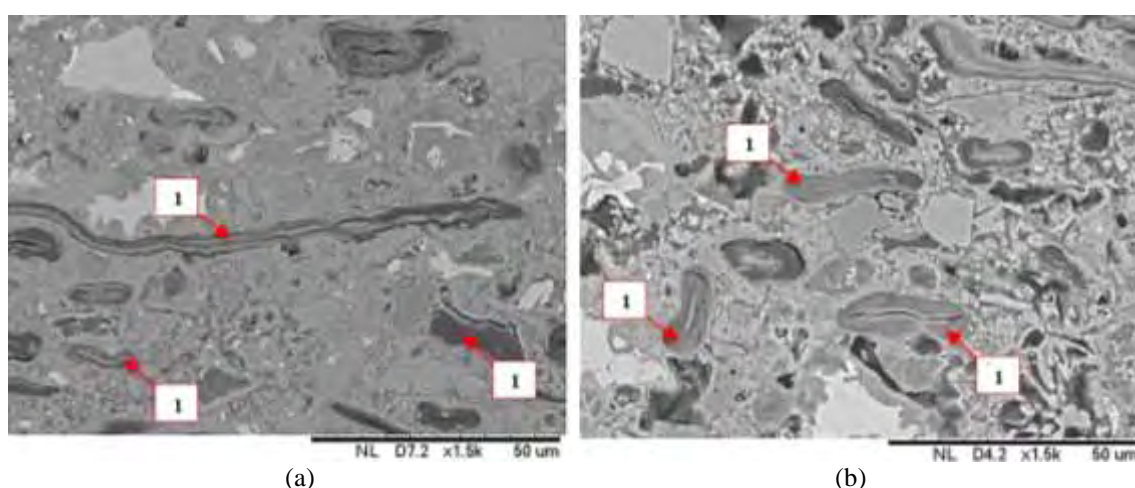
Fonte: Própria autoria.

Por outro lado, a amostra carbonatada com RCD apresentou maior redução de poros na região dos macroporos (1-10 μm). Isso proporciona ao material com menos vias de entrada de água e íons no material, melhorando sua impermeabilidade e, conseqüentemente, pode aumentar sua vida útil. A porosidade parcial de FC10%_CO₂ na região entre 0,01-1 μm foi de aproximadamente 52%. A maior quantidade de vazios nesta região pode permitir maior absorção de energia por deformação e fratura progressiva, aumentando a resistência do material a cargas dinâmicas, isso reforça a

capacidade de absorção de energia do material sob flexão, mesmo após o processo de carbonatação.

As micrografias de superfície polida dos compósitos submetidos ao processo de carbonatação acelerada antes e depois dos ciclos de imersão e secagem são mostradas na Fig. 5.14. O fibrocimento com RCD carbonatado apresenta uma estrutura mais compacta e densificada em relação à referência. Através da micrografia é possível comparar que o uso do RCD proporcionou maior empacotamento das partículas entre os grãos (Fig. 5.14b) quando comparado com o REF_CO₂ (Fig. 5.14a). Esse comportamento corrobora com a diminuição da porosidade total e maior estabilidade dimensional dos compósitos submetidos ao processo de carbonatação acelerada, apresentados nos resultados anteriores. Além disso, não há presença de manchas brancas nas fibras referentes a produtos de hidratação (indicados pela seta 1). Isso ocorre porque o processo de carbonatação consome o hidróxido de cálcio disponível, garantindo a integridade da fibra (FILOMENO et al., 2020). A cura em atmosfera de CO₂ também fornece ao compósito uma porosidade reduzida na zona de transição interfacial, melhorando a interface fibra-matriz (SANTOS et al., 2015). Isso ocorre, pois o carbonato de cálcio formado durante o processo de carbonatação preenche os poros insaturados da matriz cimentícia.

Figura 5.14 - Micrografias da superfície polida dos fibrocimentos carbonatados: (a) amostra referência, e (b) amostra com 10% de RCD

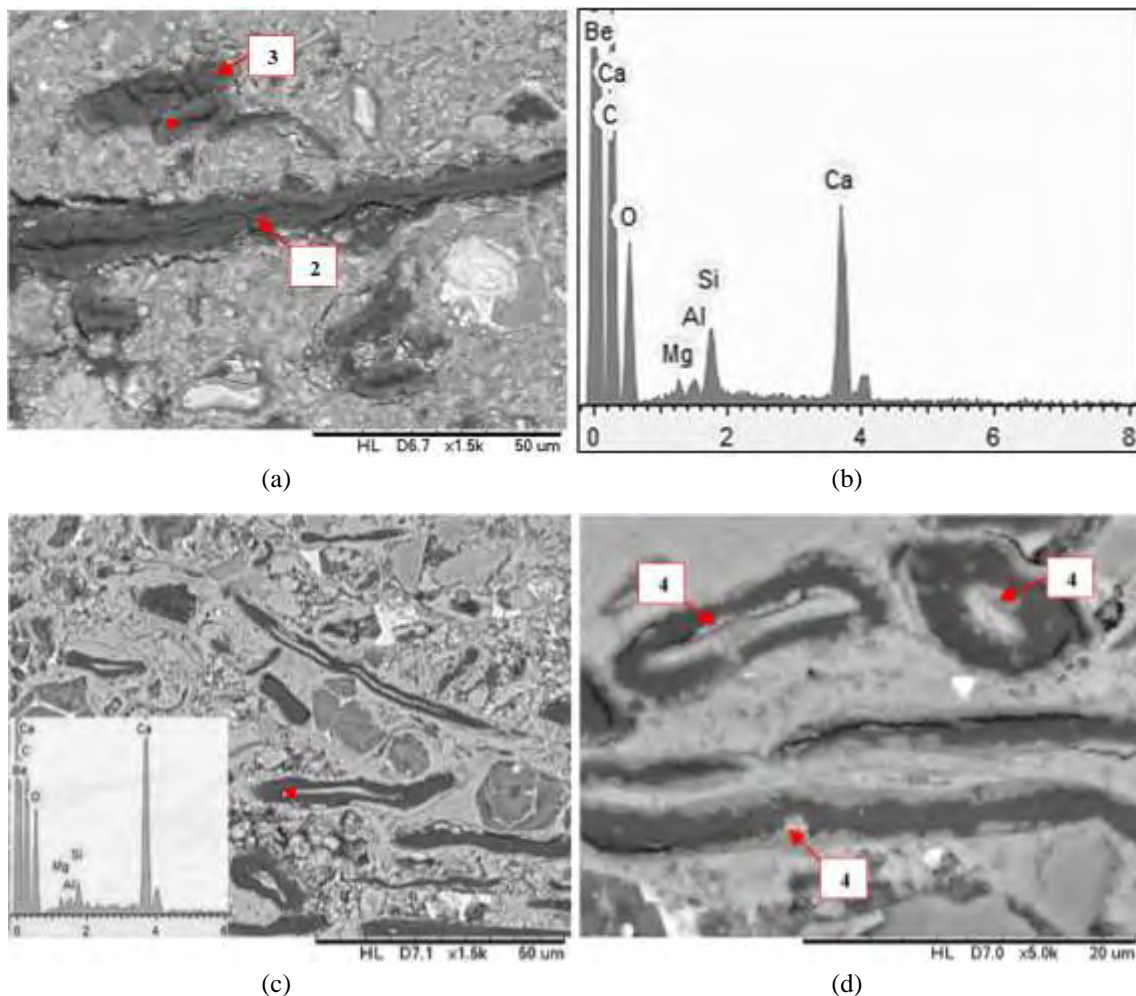


Fonte: Própria autoria.

No entanto, as micrografias após os 50 ciclos de imersão e secagem (Fig. 5.15) demonstram a deterioração da fibra por mineralização, devido a migração do hidróxido

de cálcio para o interior do lúmen. As setas 2 e 3 indicam a presença de produtos de hidratação na superfície das fibras e o aspecto degradado da fibra, respectivamente. Essa incidência ocorreu com maior intensidade nos compósitos submetidos à cura térmica (Fig. 5.15a).

Figura 5.15 - Micrografias dos fibrocimentos envelhecidos: (a) amostra com 10% de RCD sob cura térmica, (b) análise EDS do compósito FC10%_CT50, (c) MEV-EDS da amostra FC10%_CO₂50, e (d) mineralização da fibra na amostra FC10%_CO₂50



Fonte: Própria autoria.

Para confirmar a presença de CH na superfície e no lúmen das fibras, foi realizado mapeamento por espectroscopia de energia dispersiva (EDS) (Fig. 15b,c), onde foram identificados elementos químicos (O, C, Ca, Si) que sugerem a existência de hidratos e carbonatos (SAVASTANO JR.; WARDEN; COUTTS, 2005). Embora o processo de carbonatação proporcione a redução do hidróxido de cálcio, os resultados evidenciam a presença do CH no lúmen da fibra, indicado pela seta 4 (Figura 5.15d).

Isso ocorre pois a carbonatação acelerada não é suficiente para gerar uma matriz isenta de hidróxido de cálcio, ou seja, ele proporciona redução e não isenção de CH à matriz cimentícia.

5 CONCLUSÃO

Através do estudo, pode-se concluir que o uso do RCD e o processo de carbonatação acelerada são eficientes para melhorar as propriedades do fibrocimento. Assim, podemos concluir que:

- RCD apresentou baixa reatividade pozolânica devido ao alto teor de sílica cristalina da areia siliciosa original. No entanto, seu uso em níveis baixos não afetam as propriedades do fibrocimento.

- Os difratogramas de raios X mostraram que o processo de carbonatação acelerada levou ao desaparecimento e redução da intensidade dos picos referentes ao CH, além do aumento do teor de CaCO_3 . O uso do RCD reduziu o teor de CH em 25% nos compósitos submetidos à cura térmica. Quando submetido à carbonatação acelerada, o teor diminuiu aproximadamente 58% em relação ao compósito de referência. Além disso, o grau de carbonatação foi de aproximadamente 40%.

- O desempenho mecânico do fibrocimento sob cura térmica foi melhorado com a introdução do RCD, aumentando o módulo de ruptura (MOR) e a tenacidade do material. O processo de carbonatação acelerada tornou o fibrocimento mais rígido em relação ao compósito não carbonatado. Assim, esse comportamento resultou no aumento da resistência à flexão, apresentando um aumento de 40% para o MOR em comparação com sua contraparte não carbonatada. O uso do RCD proporcionou um aumento na energia específica com diferenças estatísticas, demonstrando que seu uso possibilita melhorar as propriedades do fibrocimento. Embora o processo de carbonatação acelerada contribua para a redução da tenacidade, o RCD compensou a fragilização, garantindo estabilidade na deformação do fibrocimento. De maneira geral, a substituição de 10% do CP por RCD não comprometeu o comportamento físico-mecânico do fibrocimento.

- A porosidade total do fibrocimento foi reduzida em aproximadamente 30%, devido ao melhor empacotamento das partículas geradas pelo uso de finos de concreto reciclado com partículas menores que $63\mu\text{m}$. Além disso, o processo de carbonatação

acelerada reduziu a porosidade do fibrocimento devido ao adensamento da matriz cimentícia, principalmente na faixa entre 0,01 e 1 μm para o compósito de referência. Por outro lado, o RCD com carbonatação possibilitou uma maior redução dos poros localizados na região dos macroporos. Conseqüentemente, a retração por secagem foi reduzida pela metade em comparação com sua contraparte não carbonatada para aproximadamente 1 mm/m. A utilização do RCD garantiu menor variação dimensional ao longo dos dias em relação ao REF_CO₂. Isso se deve ao empacotamento das partículas que tende a melhorar a densificação do esqueleto granular do fibrocimento.

- Assim, como ponto de partida, este estudo demonstra o efeito benéfico da utilização de RCD com granulometria reduzida, a fim de melhorar as propriedades do fibrocimento submetido à cura térmica e carbonatação acelerada. De maneira geral, o uso do RCD e o processo de carbonatação acelerada apresentaram resultados eficientes na melhoria do desempenho do fibrocimento com alto teor de polpa celulósica.

Capítulo 6

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base na pesquisa realizada, pode-se concluir que os finos de resíduo de construção de demolição ($< 63 \mu\text{m}$) possuem potencial técnico para ser utilizado como matéria-prima secundária, na forma de material cimentício suplementar.

O estudo demonstrou que o RCD, composto majoritariamente por resíduos de concreto, apresentou baixa reatividade pozolânica após 91 dias ao sistema pozolana/cal e suas propriedades são típicas de materiais cimentícios. O processo de moagem utilizado para reduzir o diâmetro partículas, resultou em uma maior exposição de superfície, ocasionando uma área superficial específica maior.

Os resultados comprovam que em misturas ternárias, o RCD proporciona maior refinamento da estrutura dos poros, que conseqüentemente resulta na diminuição da absorção de água, mantendo a resistência à compressão em média de 40 MPa, como exposto no capítulo 3. Este capítulo demonstra a versatilidade e a viabilidade técnica em utilizar o RCD em diferentes composições cimentícias binárias e ternárias, possibilitando empregá-las de acordo com a aplicação pretendida. Porém, as propriedades das matrizes modificadas devem ser consideradas antecedendo a finalidade desejada, seja para aplicação em placas, concretos, entre outros.

Após o estudo das pastas cimentícias, matrizes cimentícias ternárias foram adotadas e empregadas na fabricação de placas delgadas reforçadas com tecido de juta hornificado (Capítulo 4). As placas foram submetidas à cura térmica e ao processo de carbonatação acelerada. A redução do cimento Portland em até 55% possibilita a produção de matrizes mais ecoeficientes, e as tornam mais sensíveis ao processo de carbonatação, devido à quantidade limitada de CH disponível. O que afetou de formas diferentes a estrutura granular das matrizes cimentícias ternárias.

Observou-se que a interação entre os componentes da matriz modificada é complexa. Pois, a presença do metacaulim pode alterar a cinética da carbonatação e dos produtos formados, impactando o resultado final da densificação da matriz. Além disso, o processo de carbonatação foi parcialmente prejudicado pelo alto teor de umidade

(80% UR) presente nas amostras. Porém, o processo de carbonatação mostrou-se uma técnica com potencial, a fim de otimizar e reduzir o tempo de cura dos compósitos. Além de melhorar a adesão fibra-matriz, principalmente quando exposto a 9 h de carbonatação acelerada, promovendo acréscimos no módulo de ruptura e na capacidade de absorção de energia antes da falha do compósito. Os resultados das placas ternárias submetidas à cura térmica demonstram que as propriedades físicas, mecânicas e microestruturais foram melhoradas em relação ao compósito referência.

A aplicabilidade do RCD em matrizes de fibrocimentos comerciais também foi avaliada. Baixos teores de RCD (5-15%) não comprometem o desempenho mecânico dos compósitos. Porém, devido à característica intrínseca do RCD (grão áspero, poroso e com alta área superficial) a porosidade e a absorção de água aumentam gradativamente, em aproximadamente 11% e 15% respectivamente, após os ciclos de molhagem e secagem. O compósito com 10% de RCD submetido à carbonatação acelerada tornou-se mais rígido e, embora o processo de carbonatação contribua para a redução da ductilidade, o RCD compensou a fragilização e gerou um aumento de 95% na energia específica. Além disso, o processo de carbonatação acelerada proporcionou aos compósitos redução da absorção de água, menor variação dimensional e melhor interface fibra-matriz, ocasionado pela densificação da estrutura dos poros da matriz cimentícia.

De modo geral, a conclusão desta pesquisa demonstra o potencial positivo do uso do RCD para minimização dos resíduos de construção e demolição em aterros e sua utilização como matéria-prima secundária, preservando recursos naturais. Além disso, o uso do RCD pode promover a redução da pegada de carbono e a promoção da sustentabilidade ambiental na indústria da construção civil.

6.1 Perspectivas para trabalhos futuros

Visando a possibilidade da continuidade do trabalho, sugere-se:

- Estudar a influência do processo de carbonatação acelerada na cinética de hidratação das matrizes com material cimentício suplementar. No qual, as mudanças na microestrutura são ocasionadas principalmente pela carbonatação

do C-S-H. Pois, os dados publicados na literatura são limitados e não há um consenso verdadeiro.

- Estudar o efeito do RCD previamente carbonatado em misturas binárias e ternárias, como alternativa para ativar sua reatividade química e como forma de encapsular CO₂, antes de adicioná-lo à matriz cimentícia.
- Analisar diferentes frações volumétricas de fibra de juta nos compósitos, com o intuito de aumentar a resistência de primeira e última fissura.
- Avaliar a durabilidade dos compósitos reforçados com tecidos de juta, a fim de verificar a degradação do material com o decorrer do tempo.
- Estudar a retração de secagem dos compósitos reforçados com tecido de juta.
- Avaliar a viabilidade técnica da utilização do RCD como substituto ao calcário, a fim de fornecer as empresas um novo material de preenchimento para os fibrocimentos.
- Analisar o efeito da mercerização (tratamento químico a base de hidróxido de sódio), a fim de preservar a integridade da polpa celulósica no ambiente alcalino.
- Avaliar os benefícios ambientais (CO₂), energéticos e sociais dos eco-compósitos produzidos.

REFERÊNCIAS

ABEDI, M.; HASSANSHAHI, O.; RASHIDDEL, A.; ASHTARI, H.; MEDDAH, M. S.; DIAS, D.; ARJOMAND, M. A.; CHOONG, K. K. A sustainable cementitious composite reinforced with natural fibers: An experimental and numerical study. **Construction and Building Materials**, v. 378, 131093, 2023.

AİTCİN, P.-C. Portland cement. **Science and Technology of Concrete Admixtures**, p. 27–51, 2016.

AMER, A. A.; EL-HOSEN, S. Properties and performance of metakaolin pozzolanic cement pastes. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 129, n. 1, p. 33–44, 2017.

AKHTAR, A.; SARMAH, A. K. Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective. **Journal of Cleaner Production**, v. 186, p. 262–281, 2018.

ALNAHHAL, M. F.; ALENGARAM, U. J.; JUMAAT, M. Z.; ABUTAHA, F.; ALQEDRA, M. A.; NAYAKA, R. R. Assessment on engineering properties and CO₂ emissions of recycled aggregate concrete incorporating waste products as supplements to Portland cement. **Journal of Cleaner Production**, v. 203, p. 822–835, 2018.

AMARIO, M.; RANGEL, C. S.; PEPE, M.; TOLEDO FILHO, R. D. Optimization of normal and high strength recycled aggregate concrete mixtures by using packing model. **Cement and Concrete Composites**, v. 84, p. 83–92, 2017.

ANASTASIOU, E.; GEORGIADIS FILIKAS, K.; STEFANIDOU, M. Utilization of fine recycled aggregates in concrete with fly ash and steel slag. **Construction and Building Materials**, v. 50, p. 154–161, 2014.

ARDANUY, M.; CLARAMUNT, J.; TOLEDO FILHO, R. D. Cellulosic fiber reinforced cement-based composites: A review of recent research. **Construction and Building Materials**, v. 79, p. 115–128, 2015

AREZOUMANDI, M.; VOLZ, J. S.; ORTEGA, C. A.; MYERS, J. J. Effect of total cementitious content on shear strength of high-volume fly ash concrete beams. **Materials & Design**, v. 46, p. 301–309, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE), 2022. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2021**, São Paulo, Brasil.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7215**: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 2019.

ABNT. **NBR 9479**: Argamassa e concreto – Câmeras úmidas e tanques para cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2006.

ABNT. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.

ABNT. **NBR 10004**: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT. **NBR 14656**: Cimento Portland e matérias-primas – Análise química por espectrometria de raios X - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2001.

ABNT. **NBR 14931**: Execução de estruturas de concreto armado, protendido e com fibras - Requisitos. Rio de Janeiro, 2023.

ABNT. **NBR 15116**: Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland – Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2021.

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

ALMEIDA, A. E. F. S.; TONOLI, G. H. D.; SANTOS, S. F.; SAVASTANO Jr., H. Improved durability of vegetable fiber reinforced cement composite subject to accelerated carbonation at early age. **Cement and Concrete Composites**, v. 42, p. 49–58, 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C150**: Standard Specification for Portland Cement. USA, 2022.

ASTM – **C618**: Standard Specification for Coal Fly Ash and or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. USA, 2022.

ASTM – **C948**: Standard Test Method for Dry and Wet Bulk Density, Water Absorption and Apparent Porosity of Thin Sections of Glass-Fiber Reinforced Concrete. USA, 1981.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA RECICLAGEM DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL E DEMOLIÇÃO (ABRECON), 2020. **Encontro Nacional das**

Usinas de Reciclagem de RCD apresenta dados inéditos sobre a reciclagem de entulho no Brasil. Disponível em: < <https://abrecon.org.br/encontro-nacional/>>. Acesso em: 28 de Dezembro de 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA RECICLAGEM DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL E DEMOLIÇÃO (ABRECON), 2021. **Quem somos?** Disponível em: < <https://abrecon.org.br/a-abrecon> >. Acesso em: 24 de Junho de 2023.

BA, M.; QIAN, C.; GUO, X.; HAN, X. Effects of steam curing on strength and porous structure of concrete with low water/binder ratio. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 1, p. 123–128, 2011.

BAGARIĆ, M.; PEČUR, I. B.; MILOVANOVIĆ, B. **Application of developed facade panel from recycled CDW: A case study.** 8th International Building Physics Conference (IBPC 2021). Journal of Physics: Conference Series, 2069, 012187, 2021.

BALAGOPAL, V.; PANICKER, A. S.; ARATHY, M. S.; SANDEEP, S.; PILLAI, S. K. Influence of fibers on the mechanical properties of cementitious composites – a review. **Materialstoday: Proceedings**, v. 65, n. 2, p. 1846-1850, 2022.

BASU, D.; PAL, P.; PRAKASH, A. Utilization of waste sludge in cementitious Matrix: A feasibility study. **Materialstoday Proceedings**, v. 65, part. 2, p. 1375-1381, 2022.

BEJA, I. A.; MOTTA, R.; BERNUCCI, L. B. Application of recycled aggregates from construction and demolition waste with Portland cement and hydrated lime as pavement subbase in Brazil. **Construction and Building Materials**, v. 258, 119520, 2020.

BENNETT, B.; VISINTIN, P.; XIE, T. Global warming potential of recycled aggregate concrete with supplementary cementitious materials. *Journal of Building Engineering*, v. 52, 104394, 2022.

BENHELAL, E.; ZAHEDI, G.; SHAMSAEI, E.; BAHADORI, A. Global strategies and potentials to curb CO₂ emissions in cement industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 51, p. 142–161, 2013.

BERTOS, M. F.; SIMONS, S.; HILLS, C.; CAREY, P. A review of accelerated carbonation technology in the treatment of cement-based materials and sequestration of CO₂. **Journal of Hazardous Materials**, v. 112, n. 3, p. 193–205, 2004.

BERUTO, D. T.; BARBERIS, F.; BOTTER, R. Calcium carbonate binding mechanisms in the setting of calcium and calcium–magnesium putty-limes. **Journal of Cultural Heritage**, v. 6, n. 3, p. 253–260, 2005.

BEYENE, M. T. et al., Effect of matrix modification on the durability of cementitious composites reinforced with aligned Ensete fibre. **Construction and Building Materials**, v. 362, 129706, 2023.

BRAVO, M.; DE BRITO, J.; PONTES, J.; EVANGELISTA, L. Mechanical performance of concrete made with aggregates from construction and demolition waste recycling plants. **Journal of Cleaner Production, Elsevier**, v. 99, p. 59-74, 2015.

BORGES, P. H. R.; COSTA, J. O.; MILESTONE, N. B.; LYNSDALE, C. J.; STREATFIELD, R. E. Carbonation of CH and C–S–H in composite cement pastes containing high amounts of BFS. **Cement and Concrete Research**, v. 40, n. 2, p. 284–292, 2010.

BORGES, P. H. R.; MILESTONE, N. B.; COSTA, J. O.; LYNSDALE, C. J.; PANZERA, T. H.; CHRISTOPHORO, A. L. Carbonation durability of blended cement pastes used for waste encapsulation. **Materials and Structures**, v. 45, n.5, p. 663–678, 2012.

BOSCARO, F.; PALACIOS, M.; FLATT, R. J. Formulation of low blended cements and concrete with enhanced fresh hardened properties. **Cement and Concrete Research**, v. 150, 106605, 2021.

BOUDALI, S.; KERDAL, D. E.; AYED, K.; ABDULSALAM, B.; SOLIMAN, A. M. Performance of self-compacting concrete incorporating recycled concrete fines and aggregate exposed to sulphate attack. **Construction and Building Materials**, v. 124, p. 705-713, 2016.

BOUCHIKHI, A.; BENZERZOUR, M.; ABRIAK, N.-E.; MAHERZI, W.; MAMINDY-PAJANY, Y. Study of the impact of waste glasses types on pozzolanic activity of cementitious matrix. **Construction and Building Materials**, v. 197, p. 626–640, 2019.

BUI, H.; BOUTOUIL, M.; LEVACHER, D.; SEBAIBI, N. Evaluation of the influence of accelerated carbonation on the microstructure and mechanical characteristics of

coconut fibre-reinforced cementitious matrix. **Journal of Building Engineering**, v. 39, 102269, 2021.

BULLARD, J. W. et al. Mechanisms of cement hydration. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 12, p. 1208-1223, 2011.

CANEDA-MARTÍNEZ, L.; MONASTERIO, M.; MORENO-JUEZ, J.; MARTÍNEZ-RAMÍREZ, S.; GARCÍA, R.; FRÍAS, M. Behaviour and properties of eco-cement pastes elaborated with recycled concrete powder from construction and demolition wastes. **Materials**, v. 14, 1299, 2021.

CANTERO, B.; BRAVO, M.; DE BRITO, J.; SÁEZ DEL BOSQUE, I. F.; MEDINA, C. Mechanical behaviour of structural concrete with ground recycled concrete cement and mixed recycled aggregate. **Journal of Cleaner Production**, v. 275, 122913, 2020.

CANTERO, B.; BRAVO, M.; DE BRITO, J.; DEL BOSQUE, I. F. S.; MEDINA, C. The influence of fly ash on the mechanical performance of cementitious materials produced with recycled cement. **Applied Sciences**, v. 12, 2257, 2022.

CASSAR, J.; CAMILLERI, J. Utilisation of imploded glass in structural concrete. **Construction and Building Materials**, v. 29, p. 299–307, 2012.

CASTANHAL COMPANHIA TÊXTIL. **Informações técnicas da tela P9**. Disponível em: < <https://www.castanhhal.com.br/produtos-telas-p9natural.php/>>. Acesso em: 26 de junho de 2023.

CASTRO, M. C. A. A.; SCHALCH, V.; FERNANDES JÚNIOR, J. L.; LEITE, W. C. A. Caracterização física e granulométrica dos entulhos gerados na construção civil na cidade de São Paulo. In: **19º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, Foz do Iguaçu, 1997.

CASTAÑO-CARDOZA, T.; LINSEL, S.; DIAZ, A. A.; MORALES, O. R.; HERNÁNDEZ, M. F. J. Influence of very fine fraction of mixed recycled aggregates on the mechanical properties and durability of mortars and concretes. **Revista Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia**, n. 81, p. 81-92, 2016.

CAVALCANTE, D. G. **Estudo das características física, mecânica e química de compósitos cimentícios reforçados com tecido de juta e malva tratado e adição de materiais pozolânicos**. p. 123, 2017. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2017.

- CHEN, X.; WU, S.; ZHOU, J. Influence of porosity on compressive and tensile strength of cement mortar. **Construction and Building Materials**, v. 40, p. 869–874, 2013.
- CHEN, X.; LI, Y.; BAI, H.; MA, L. Utilization of recycled concrete powder in cement composite: strength, microstructure and hydration characteristics. **Journal Renewable Materials**, v. 9, p. 2189-2208, 2021.
- CHEN, X.; LI, Y.; ZHU, Z.; MA, L. Evaluation of waste concrete recycled powder (WCRP) on the preparation of low-exothermic cement. **Journal of Building Engineering**, v. 53, 104511, 2022.
- CHINZORIGT, G.; LIM, M. K.; YU, M.; LEE, H.; ENKBOLD, O.; CHOI, D. Strength, shrinkage and creep and durability aspects of concrete including CO₂ treated recycled fine aggregate. **Cement and Concrete Research**, v. 136, 106062, 2020.
- CIZER, Ö.; VAN BALEN, K.; ELSEEN, J.; VAN GEMERT, D. Real-time investigation of reaction rate and mineral phase modifications of lime carbonation. **Construction and Building Materials**, v. 35, p. 741–751, 2012.
- CLARAMUNT, J.; ARDANUY, M.; GARCÍA-HORTAL, J. A.; FILHO, R. D. T. The hornification of vegetable fibers to improve the durability of cement mortar composites. **Cement and Concrete Composites**, v. 33, n. 5, p. 586–595, 2011.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução CONAMA nº 307, 5 de julho de 2002.
- CORINALDESI, V.; MORICONI, G. Behaviour of cementitious mortars containing different kinds of recycled aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 1, p. 289–294, 2009.
- DABBAGHI, F.; SADEGHI-NIK, A.; LIBRE, N. A.; NASROLLAHPOUR, S. Characterizing fiber reinforced concrete incorporating zeolite and metakaolin as natural pozzolans. **Structures**, v. 34, p. 2617-2627, 2021.
- DA SILVA, T. R. et al. A review on the performance of açai fiber in cementitious composites: Characteristics and application challenges. **Journal of Building Engineering**, v. 71, 106481, 2023.
- DE LIMA, J. A. R. **Proposição de diretrizes para produção e normalização de resíduo de construção reciclado e de suas aplicações em argamassas e concretos.** p.

246. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 1999.

DE MATOS, P. R.; SAKATA, R. D.; ONGHERO, L.; ULIANO, V. G.; DE BRITO, J.; CAMPOS, C. E. M.; GLEIZE, P. J. P. Utilization of ceramic tile demolition waste as supplementary cementitious material: An early-age investigation. **Journal of Building Engineering**, v. 38, 102187, 2021.

DUAN, Z.; HOU, S.; XIAO, J.; LI, B. Study on the essential properties of recycled powders from construction and demolition waste. **Journal of Cleaner Production**, v. 253, 119865, 2020.

DWECK, J.; MELCHERT, M. B. M.; VIANA, M. M.; CARTLEDGE, F. K.; BUCHLER, P. M. Importance of quantitative thermogravimetry on initial cement mass basis to evaluate the hydration of cement pastes and mortars. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 113, p. 1481-1490, 2013.

ENTE ITALIANO DI NORMAZIONE – UNI 8520-1. Agregati per calcestruzzo - Istruzioni complementari per l'applicazione della EN 12620 - Parte 1: Designazione e criteri di conformità, 2022.

EUROPEAN STANDARD - EN 197-6. Cement Part 6. Cement with recycled building materials, 2023.

EVANGELISTA, L.; DE BRITO, J. Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, n. 1, p. 9–14, 2010.

EVANGELISTA, L.; GUEDES, M.; DE BRITO, J.; FERRO, A. C.; PEREIRA, M. F. Physical, chemical and mineralogical properties of fine recycled aggregates made from concrete waste. **Construction and Building Materials**, v. 86, p. 178–188, 2015.

EZUGWU, E. K.; CALABRIA-HOLLEY, J.; PAINE, K. Physico-mechanical and morphological behavior of hydrothermally treated plant fibers in cementitious composites. **Industrial Crops and Products**, v. 200, Part B, 116832, 2023.

FAVARETTO, P.; HIDALGO, G.; SAMPAIO, C.; SILVA, R.; LERMEN, R. Characterization and use of construction and demolition waste from south of Brazil in the production of foamed concrete blocks. **Applied Sciences**, v. 7, n. 10, 1090, 2017.

FERREIRA, S. R.; SILVA, F. A.; LIMA, P. R. L.; TOLEDO FILHO, R. D. Effect of hornification on the structure, tensile behavior and fiber matrix bond of sisal, jute and curauá fiber cement based composite systems. **Construction and Building Materials**, v. 139, p. 551-561, 2017.

FERREIRA, R. L. S.; ANJOS, M. A. S.; NÓBREGA, A. K. C.; PEREIRA, J. E. S.; LEDESMA, E. F. The role of powder content of the recycled aggregates of CDW in the behaviour of rendering mortars. **Construction and Building Materials**, v. 208, p. 601–612, 2019.

FILOMENO, R. H.; RODIER, L. B.; BALLESTEROS, J. E. M.; ROSSIGNOLO, J. A.; SAVASTANO JR., H. Optimizing the modified atmosphere parameters in the carbonation process for improved fiber-cement performance. **Journal of Building Engineering**, v. 32, 101676, 2020.

FILOMENO, R. H.; FIORONI, C. A.; AZEVEDO, A.G.S.; SAVASTANO JR., H. Influence of different curing regimes and accelerated carbonation on the physical, mechanical, and aging performances of fiber cement. **Journal of Building Engineering**, v. 78, 107791, 2023.

FIORONI, C. A.; INNOCENTINI, M. D. DE M.; DE LOS DOLORES, G. M.; TONOLI, G. H. D.; DE PAULA, G. R.; SAVASTANO Jr., H. Cement-based corrugated sheets reinforced with polypropylene fibres subjected to a high-performance curing method. **Construction and Building Materials**, v. 262, 120791, 2020.

FRANKEOVÁ, D.; SLÍŽKOVÁ, Z. Determination of the pozzolanic activity of mortar's components by thermal analysis. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 125, n. 3, p. 1115–1123, 2016.

FRÍAS, M.; GOÑI, S. Accelerated carbonation effect on behaviour of ternary Portland cements. **Composites Part B: Engineering**, v. 48, p. 122–128, 2013.

FRÍAS, M., et al. Multi-Technique Characterization of a Fine Fraction of CDW and Assessment of Reactivity in a CDW/Lime System. **Minerals**, v. 10, n. 7, 590, 2020.

FRÍAS, M.; MARTÍNEZ-RAMÍREZ, S.; DE LA VILLA, R. V.; FERNÁNDEZ-CARRASCO, L.; GARCÍA, R. Reactivity in cement pastes bearing fine fraction concrete and glass from construction and demolition waste: Microstructural analysis of viability. **Cement and Concrete Research**, v. 148, 106531, 2021.

- GASTALDI, D.; CANONICO, F.; CAPELLI, L.; BUZZI, L.; BOCCALERI, E.; IRICO, S. An investigation on the recycling of hydrated cement from concrete demolition waste. **Cement and Concrete Composites**, v. 61, p. 29–35, 2015.
- GETACHEW, E. M.; YIFRU, B. W.; TAFSESE, W. Z.; YEHUALAW, M. D. Enhancing mortar properties through thermoactivated recycled concrete cement. **Building**, v. 13, 2209, 2023.
- GONÇALVES, P. J.; TOLEDO FILHO, D. R.; FAIRBAIRN R. M. E. Estudo da hidratação de pastas de cimento Portland contendo resíduo cerâmico por meio de análise térmica. **Ambiente Construído**. v. 6, n. 4, p. 83-94, 2006.
- GOMES, P. C. C.; ULSEN, C.; PEREIRA, F. A.; QUATTRONE, M.; ANGULO, S. C. Comminution and sizing processes of concrete block waste as recycled aggregates. **Waste Management**, v. 45, p. 171–179, 2015.
- GONZALEZ-COROMINAS, A.; ETXEBERRIA, M.; POON, C. S. Influence of steam curing on the pore structures and mechanical properties of fly-ash high performance concrete prepared with recycled aggregates. **Cement and Concrete Composites**, v. 71, p. 77–84, 2016.
- HE, Z.; JIA, Y.; WANG, S.; MAHOUTIAN, M.; SHAO, Y. Maximizing CO₂ sequestration in cement-bonded fiberboards through carbonation curing. **Construction and Building Materials**, v. 213, p. 51–60, 2019.
- HE, Z.; SHEN, A.; LYU, Z.; LI, Y.; WU, H.; WANG, W. Effect of wollastonite microfibers as cement replacement on the properties of cementitious composites: A review. **Construction and Building Materials**, v. 261, 119920, 2020.
- HENRÍQUEZ, P. A.; APONTE, D.; IBÁÑEZ-INSA, J.; BARRA BIZINOTTO, M. Ladle furnace slag as a partial replacement of Portland cement. **Construction and Building Materials**, v. 289, 123106, 2021.
- HIETE, M. Waste management plants and technology for recycling construction and demolition (C&D) waste: state-of-the-art and future challenges. **Handbook of Recycled Concrete and Demolition Waste**, p. 53–75, 2013.
- HIGUCHI, A. M. D.; MARQUES, M. G. S.; RIBAS, L. F.; VASCONCELOS, R. P. Use of glass powder residue as an eco-efficient supplementary cementitious material. **Construction and Building Materials**, v. 304, 124640, 2021.

HOSSAIN, M. U.; POON, C. S.; LO, I. M. C.; CHENG, J. C. P. Comparative environmental evaluation of aggregate production from recycled waste materials and virgin sources by LCA. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 109, p. 67–77, 2016.

HOSSAIN, M. U.; DONG, Y.; NG, S. T. Influence of supplementary cementitious materials in sustainability performance of concrete industry: A case study in Hong Kong. **Case Studies in Construction Materials**, v. 15, e00659, 2021.

HUANG, B.; WANG, X.; KUA, H.; GENG, Y.; BLEISCHWITZ, R.; REN, J. Construction and demolition waste management in China through the 3R principle. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 129, p. 36–44, 2018.

HUNNICUTT, W.; STRUBLE, L.; MONDAL, P. Effect of synthesis procedure on carbonation of calcium-silicate-hydrate. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 100, n. 8, p. 3736–3745, 2017.

JIMÉNEZ, L. F.; DOMÍNGUEZ, J. A.; VEGA-AZAMAR, R. E. Carbon footprint of recycled aggregate concrete. **Advances in Civil Engineering**, v. 2018, p. 1–6, 2018.

JUENGER, M. C. G.; SNELLINGS, R.; BERNAL, S. A. Supplementary cementitious materials: New sources, characterization, and performance insights. **Cement and Concrete Research**, v. 122, p. 257–273, 2019.

KABIRIFAR, K.; MOJTAHEDI, M.; CHANGXIN WANG, C.; VIVIAN W.Y., T. A conceptual foundation for effective construction and demolition waste management. **Cleaner Engineering and Technology**, v. 1, 100019, 2020.

KAJASTE, R.; HURME, M. Cement industry greenhouse gas emissions – management options and abatement cost. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 4041–4052, 2016.

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, 1980.

KHATIB, J. M. Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 4, p. 763–769, 2005.

KIM, Y. J.; CHOI, Y. W. Utilization of waste concrete powder as a substitution material for cement. **Construction and Building Materials**, v. 30, p. 500–504, 2012.

KURDA, R.; DE BRITO, J.; SILVESTRE, J. D. A comparative study of the mechanical and life cycle assessment of high-content fly ash and recycled aggregates concrete. **Journal of Building Engineering**, v. 29, 101173, 2020.

KHUDYAKOVA, L. I.; KISLOV, E. V.; PALEEV, P. L.; KOTOVA, I. Y. Nephrite-Bearing Mining Waste As a Promising Mineral Additive in the Production of New Cement Types. **Minerals**, v. 10, n. 5, 394, 2020.

LI, J.; YANG, E.-H. Macroscopic and microstructural properties of engineered cementitious composites incorporating recycled concrete fines. *Cement and Concrete Composites*, v. 78, p. 33–42, 2017.

LI, S.; GAO, J.; LI, Q.; ZHAO, X. Investigation of using recycled powder from the preparation of recycled aggregate as a supplementary cementitious material. **Construction and Building Materials**, v. 267, 120976, 2020.

LI, L.; WU, M. An overview of utilizing CO₂ for accelerated carbonation treatment in the concrete industry. **Journal of CO₂ Utilization**, v. 60, 102000, 2022.

LI, Y.; HAN, D.; WANG, H.; LYU, H.; ZOU, D.; LIU, T. Carbonation curing of mortars produced with reactivated cementitious materials for CO₂ sequestration. **Journal of Clean Production**, v. 383, 135501, 2023.

LIMA, C.; CAGGIANO, A.; FAELLA, C.; MARTINELLI, E.; PEPE, M.; REALFONZO, R. Physical properties and mechanical behaviour of concrete made with recycled aggregates and fly ash. **Construction and Building Materials**, v. 47, p. 547–559, 2013.

LIMA, D. O. **Desenvolvimento e caracterização física e mecânica de compósitos cimentícios reforçados com tecido têxtil de fibras de algodão**. p. 107. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em engenharia civil, Universidade Federal do Amazonas. Manaus, 2019.

LIU, Q.; TONG, T.; LIU, S.; YANG, D.; YU, Q. Investigation of using hybrid recycled powder from demolished concrete solids and clay bricks as a pozzolanic supplement for cement. **Construction and Building Materials**, v. 73, p. 754–763, 2014.

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

LU, B.; DRISSI, S.; LIU, J.; HU, X.; SONG, B.; SHI, C. Effect of temperature on CO₂ curing, compressive strength and microstructure of cement paste. **Cement and Concrete Research**, v. 157, 106827, 2022.

MALJAEI, H.; PAIVA, H.; MADADI, R.; TARELHO, L. A. C.; MORAIS, M.; FERREIRA, V. M. Effect of cement partial substitution by waste-based biochar in mortars properties. **Construction and Building Materials**, v. 301, 124074, 2021.

MARANGU, J. M.; THIONG'O, J. K.; WACHIRA, J. M. Review of Carbonation Resistance in Hydrated Cement Based Materials. **Journal of Chemistry**, v. 2019, p. 1–6, 2019.

MARCHON, D.; FLATT, R. J. Mechanism of cement hydration. **Science and Technology of Concrete Admixtures**, p. 129-145, 2016.

MAHPOUR, A. R.; VENTURA, H.; ARDANUY, M.; ROSELL, J.R.; CLARAMUNT, J. The effect of fibres and carbonation conditions on the mechanical properties and microstructure of lime/flax composites. **Cement and Concrete Composites**, v. 138, 104981.

MATSUSHITA, F.; AONO, Y.; SHIBATA, S. Carbonation degree of autoclaved aerated concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 30, n. 11, p. 1741–1745, 2000.

MEDINA, C.; SÁNCHEZ DE ROJAS, M. I.; FRÍAS, M. Properties of recycled ceramic aggregate concretes: Water resistance. **Cement and Concrete Composites**, v. 40, p. 21–29, 2013.

MEDINA, C.; ZHU, W.; HOWIND, T.; SÁNCHEZ DE ROJAS, M. I.; FRÍAS, M. Influence of mixed recycled aggregate on the physical – mechanical properties of recycled concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 68, p. 216–225, 2014.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais*, São Paulo: **IBRACON**, 2008.

MEHDIZADEH, H.; LING, T.; CHENG, X.; PAN, S.; MO, K. H. Treatment of hydrated cement powder: characterization and application consideration. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 33, n. 4. p. 1-13, 2021.

MEJIA-BALLESTEROS, J. E.; SAVASTANO, H.; FIORELLI, J.; ROJAS, M. F. Effect of mineral additions on the microstructure and properties of blended cement

matrices for fibre-cement applications. **Cement and Concrete Composites**, v. 98, p. 49–60, 2019.

MELO FILHO, J. DE A.; SILVA, F. DE A.; TOLEDO FILHO, R. D. Degradation kinetics and aging mechanisms on sisal fiber cement composite systems. **Cement and Concrete Composites**, 40, 30–39, 2013.

MENEGAKI, M.; DAMIGOS, D. A review on current situation and challenges of construction and demolition waste management. **Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry**, v. 13, p. 8–15, 2018.

MENG, Y.; LING, T.-C.; MO, K. H.; TIAN, W. Enhancement of high temperature performance of cement blocks via CO₂ curing. **Science of The Total Environment**, v. 671, p. 827–837, 2019.

MENG, T.; LIAN, S.; YING, K.; YU, H. Feasibility study of cement-stabilized materials using 100% mixed recycled aggregates from perspectives of mechanical properties and microstructure. **Reviews on Advanced Materials Science**, v. 60, n. 1, 490–502, 2021.

MERCEDES, L.; GIL, L.; BERNAT-MASO, E. Mechanical performance of vegetal fabric reinforced cementitious matrix (FRCM) composites. **Construction and Building Materials**, v. 175, p. 161-173, 2018.

MONASTERIO, M.; CANEDA-MARTÍNEZ, L.; VEGAS, I.; FRÍAS, M. Progress in the influence of recycled construction and demolition mineral-based blends on the physical-mechanical behaviour of ternary cementitious matrices. **Construction and Building Materials**, v. 344, 128169, 2022.

MOON, D.-J.; MOON, H.-Y.; KIM, Y.-B. Fundamental properties of mortar containing waste concrete powder. **Geosystem Engineering**, v. 8, p. 95–100, 2005.

MORAES, M. J. B.; MORAES, J. C. B.; TASHIMA, M. M.; AKASAKI, J. L.; SORIANO, L.; BORRACHERO, M.V.; PAYÁ, J. Production of bamboo leaf ash by auto-combustion for pozzolanic and sustainable use in cementitious matrices. **Construction and Building Materials**, v. 208, p. 369–380, 2019.

MORANDEAU, A.; THIÉRY, M.; DANGLA, P. Impact of accelerated carbonation on OPC cement paste blended with fly ash. **Cement and Concrete Research**, v. 67, p. 226–236, 2015.

MORENO-JUEZ, J.; VEGAS, I. J.; FRÍAS, M. R.; VIGIL DE LA VILLA, R.; GUEDE-VÁZQUEZ, E. 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.

MUCSI, G.; PAPNÉ, N. H.; ULSEN, C.; FIGUEIREDO, P. O.; KRISTÁLY, F. Mechanical activation of construction and demolition waste in order to improve its pozzolanic reactivity. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 9, p. 3416–3427, 2021.

NETO, R. O.; GASTINEAU, P.; CAZACLIU, B. G.; LE GUEN, L.; PARANHOS, R. S.; PETTER, C. O. An economic analysis of the processing technologies in CDW recycling platforms. **Waste Management**, v. 60, p. 277–289, 2017.

NEVES JUNIOR, A.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. DE M. R.; DWECK, J. A study of the carbonation profile of cement pastes by thermogravimetry and its effect on the compressive strength. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 116, n. 1, p. 69–76, 2013.

NEVES JUNIOR, A.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. DE M. R.; DWECK, J. The effects of the early carbonation curing on the mechanical and porosity properties of high initial strength Portland cement pastes. **Construction and Building Materials**, v. 77, p. 448–454, 2015.

NEVES JUNIOR, A.; FERREIRA, S. R.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. DE M. R.; DWECK, J. Effect of early age curing carbonation on the mechanical properties and durability of high initial strength Portland cement and lime-pozolan composites reinforced with long sisal fibres. **Composites Part B: Engineering**, v. 163, p. 351-362, 2019.

OKSRI-NELFIA, L.; MAHIEUX, P. -Y.; AMIRI, O.; TURCRY, P.; LUX, J. Reuse of recycled crushed concrete fines as mineral addition in cementitious materials. **Materials and Structures**, v. 49, n. 8, p. 3239–3251, 2016.

OLIVEIRA, T. C. F.; DEZEN, B. G. S.; POSSAN, E. Use of concrete fine fraction waste as a replacement of portland cement. **Journal Cleaner Production**, 273, 123126, 2020.

OLIVEIRA, D. R. B.; LEITE, G.; POSSAN, E.; MARQUES FILHO, J. Concrete powder waste as a substitution for Portland cement for environment-friendly cement production. **Construction and Building Materials**, v. 397, 132382, 2023.

ÖZKAN, Ş.; CEYLAN, H. The effects on mechanical properties of sustainable use of waste andesite dust as a partial substitution of cement in cementitious composites. **Journal of Building Engineering**, v. 58, 104959, 2022.

PACHECO-TORGAL, F.; JALALI, S. Reusing ceramic waste in concrete. **Construction and Building Materials** v. 24, p. 832-838, 2010.

PAN, X.; SHI, C.; HU, X.; OU, Z. Effects of CO₂ surface treatment on strength and permeability of one-day-aged cement mortar. **Construction and Building Materials**, v. 154, p. 1087–1095, 2017.

PANESAR, D. K.; ZHANG, R. Performance comparison of cement replacing materials in concrete: Limestone fillers and supplementary cementing materials – A review. **Construction and Building Materials**, v. 251, 118866, 2020.

PARVEEN, S.; RANA, S.; FANGUEIRO, R. **Macro- and nanodimensional plant fiber reinforcements for cementitious composites**. In: Sustainable and Nonconventional Construction Materials using Inorganic Bonded Fiber Composites, Woodhead Publishing, p. 343-382, 2017.

PARISI, F.; MENNA, C.; PROTA, A. Fabric-Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) composites. In Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, **Failure Analysis in Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites**, p. 199–227, 2019.

PEPE, M.; TOLEDO FILHO, R. D.; KOENDERS, E. A. B.; MARTINELLI, E. Alternative processing procedures for recycled aggregates in structural concrete. **Construction and Building Materials**, v. 69, p. 124–132, 2014.

PIMENTEL, L. L.; RIZZO, G. F.; JACINTO, A. E. P. G. A.; FONTININI, P. S. P. Concrete produced with recycled aggregate: a durability analysis for structural use. **Revista IBRACON Estrutura e Materiais**, v. 13, n. 6, e13613, 2020.

PIPILIKAKI, P.; BEAZI-KATSIOTI, M. The assessment of porosity and pore size distribution of limestone Portland cement pastes. **Construction and Building Materials**, v. 23, p. 1966–1970, 2009.

PIRES, D. M.; SOARES, F. D. N.; DESSUY, T. Y.; BRESSAM, G. S. C.; DE OLIVEIRA, D. D.; KRUG, L. F. Permeabilidade e durabilidade de concretos com substituição parcial do agregado graúdo por resíduos da construção. In: **XXV Seminário de Iniciação Científica**. Salão do conhecimento, 2017.

PIZZOL, V. D.; MENDES, L. M.; SAVASTANO JR., H.; FRIAS, M., DAVILA, F. J. CINCOTTO, M. A.; JOÃO, V. M.; TONOLI, G. H. D. Mineralogical and microstructural changes promoted by accelerated carbonation and ageing cycles of hybrid fiber–cement composites. **Construction and Building Materials**, v. 68, p. 750–756, 2014.

PRANEETH, S.; GUO, R.; WANG, T.; DUBEY, B. K.; SARMAH, A. K. Accelerated carbonation of biochar reinforced cement-fly ash composites: Enhancing and sequestering CO₂ in building materials. **Construction and Building Materials**, v. 244, 118363, 2020.

PROŠEK, Z.; NEŽERKA, V.; HLŮŽEK, R.; TREJBAL, J.; TESÁREK, P.; KARRA’A, G. Role of lime, fly ash, and slag in cement pastes containing recycled concrete fines. **Construction and Building Materials**, v. 201, p. 702–714, 2019.

PROŠEK, Z.; TREJBAL, J.; NEŽERKA, V.; GOLIÁŠ, V.; FALTUS, M.; TESÁREK, P. Recovery of residual anhydrous clinker in finely ground recycled concrete. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 155, 104640, 2020.

QIU, Q. A state-of-the-art review on the carbonation process in cementitious materials: Fundamentals and characterization techniques. **Construction and Building Materials**, v. 247, 118503, 2020.

RAABE, J.; DOS SANTOS, L. P.; DEL MENEZZI, C. H. S.; TONOLI, G. H. D. Effect of Nano-silica Deposition on Cellulose Fibers on the Initial Hydration of the Portland Cement. **BioResources**, v. 13, n. 2, p. 3525-3544, 2018.

RAHLA, K. M.; MATEUS, R.; BRAGANÇA, L. Comparative sustainability assessment of binary blended concretes using Supplementary Cementitious Materials (SCMs) and Ordinary Portland Cement (OPC). **Journal of Cleaner Production**, v. 220, p. 445-459, 2019.

RAKSH MAHPOUR, A.; VENTURA, H.; ARDANUY, M.; ROSELL, J. R.; CLARAMUNT, J. The effect of fibres and carbonation conditions on the mechanical

properties and microstructure of lime/flax composites. **Cement and Concrete Composites**, v. 138, 104981, 2023.

RANAIVOMANANA, H., LEKLOU, N. Investigation of microstructural and mechanical properties of partially hydrated Asbestos-Free fiber cement waste (AFFC) based concretes: Experimental study and predictive modeling. **Construction and Building Materials**, v. 277, 121943, 2021.

RANGEL, C. S.; AMARIO, M.; PEPE, M.; YAO, Y.; MOBASHER, B.; TOLEDO FILHO, R. D. Tension stiffening approach for interface characterization in recycled aggregate concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 82, p. 176–189, 2017.

RANGEL, C. S., et al. Generalized quality control parameter for heterogenous recycled concrete aggregates: A Pilot scale case study. **Journal of Cleaner Production**. v. 208, p. 589-601, 2019.

REN, J.; XUE, Y.; ZHANG, J.; LIU, B.; LUO, S.; XU, S.; XING, F.; LIU, M. Pre-treatment of reclaimed concrete slurry waste for substituting cementitious materials: Effect of treatment approach and substitution content. **Journal of Cleaner Production**, v. 380, n. 2, 134987, 2022.

RITHUPARNA, R.; JITTIN, V.; BAHURUDEEN, A. Influence of different processing methods on the recycling potential of agro-waste ashes for sustainable cement production: A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 316, 128242, 2021.

ROBALO, K.; COSTA, H.; DO CARMO, R.; JÚLIO, E. Experimental development of low cement content and recycled construction and demolition waste aggregates concrete. **Construction and Building Materials**, v. 273, 121680, 2021.

ROCHA, S.; SOUSA-COUTINHO, J. Construction and demolition waste as partial cement replacement. **Advances in Cement Research**, v. 31, n. 9, p. 411–422, 2019.

ROCHA, J. H. A.; TOLEDO FILHO, R. D.; CAYO-CHILENO, N. G. Sustainable alternatives to CO₂ reduction in the cement industry: A short review. **Materials Today Proceedings**, v. 57, p. 436-439, 2022.

RODIER, L.; SAVASTANO JR., H. Use of glass powder residue for the elaboration of eco-efficient cementitious materials. **Journal of Cleaner Production**, v. 184, p. 333–341, 2018.

- RODIER, L.; DA COSTA CORREIA, V.; SAVASTANO JUNIOR, H. Elaboration of eco-efficient vegetable fibers reinforced cement-based composites using glass powder residue. **Cement and Concrete Composites**, v. 110, 103599, 2020.
- ROSADO, L. P.; VITALE, P.; PENTEADO, C. S. G.; ARENA, U. Life cycle assessment of construction and demolition waste management in a large area of São Paulo State Brazil. **Waste Management**, v. 85, p. 477-489, 2019.
- ROSTAMI, V.; SHAO, Y.; BOYD, A. J. Carbonation curing versus steam curing for precast concrete production. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 24, n. 9, 1221–1229, 2012.
- RUIZ, L. A. L.; RAMÓN, X. R.; DOMINGO, S. G. The circular economy in the construction and demolition waste sector – a review and an integrative model approach. **Journal of Cleaner Production**, v. 248, 119238, 2020.
- RUVIARO, A. S. et al. Characterization and investigation of the use of oat husk ash as supplementary cementitious material as partial replacement of Portland cement: Analysis of fresh and hardened properties and environmental assessment. **Construction and Building Materials**, v. 363, 129762, 2023.
- SÁNCHEZ DE ROJAS, M. I.; FRÍAS, M.; SABADOR, E.; ASENSIO, E.; JULIÁN, R.; MEDINA, C. Durability and chromatic behavior in cement pastes containing ceramic industry milling and glazing by-products. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 102, p. 1971-1981, 2018.
- SANTANA RANGEL, C.; AMARIO, M.; PEPE, M.; MARTINELLI, E.; TOLEDO FILHO, R. D. Durability of Structural Recycled Aggregate Concrete Subjected to Freeze-Thaw Cycles. **Sustainability**, v. 12, n. 16, 6475, 2020.
- SANTOS, S. F.; SCHMIDT, R.; ALMEIDA, A. E. F. S.; TONOLI, G. H. D.; SAVASTANO Jr., H. Supercritical carbonation treatment on extruded fibre–cement reinforced with vegetable fibres. **Cement and Concrete Composites**, v. 56, p. 84–94, 2015.
- SANTOS, R. P.; TUBINO, R. Potential evaluation of the use of construction and demolition waste (CDW) in the recovery of degraded soils by mining in Brazil. **Resources, Conservation & Recycling Advances**, v. 12, 200060, 2021.

SAVASTANO JR., H.; WARDEN, P.; COUTTS, R. S. Brazilian waste fibres as reinforcement for cement-based composites. **Cement and Concrete Composites**, v. 22, n. 5, p. 379–384, 2000.

SAVASTANO JR., H. **Materiais à base de cimento reforçados com fibra vegetal: reciclagem de resíduos para a construção de baixo custo**. 2000. 144 f. Tese (LivreDocência) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

SAVASTANO JR., H.; WARDEN, P. G.; COUTTS, R. S. P. Microstructure and mechanical properties of waste fibre–cement composites. **Cement and Concrete Composites**, v. 27, n. 5, p. 583–592, 2005.

ŠAVIJA, B.; LUKOVIĆ, M. Carbonation of cement paste: Understanding, challenges, and opportunities. **Construction and Building Materials**, v. 117, p. 285–301, 2016.

SBIA, L. A.; PEYVANDI, A.; HARSINI, I.; LU, J.; UL ABIDEEN, S.; WEERASIRI, R. R.; BALACHANDRA, A. M.; SOROUSHIAN, P. Study on field thermal curing of ultra-high-performance concrete employing heat of hydration. **ACI Materials Journal**, v. 114, n. 5, p. 1-12, 2017.

SCHNEIDER, M. The cement industry on the way to a low-carbon future. **Cement and Concrete Research**, v. 124, 105792, 2019.

SCHOON, J.; DE BUYSSER, K.; VAN DRIESSCHE, I.; DE BELIE, N. Fines extracted from recycled concrete as alternative raw material for Portland cement clinker production. **Cement and Concrete Composites**, v. 58, p. 70–80, 2015.

SCRIVENER, K. L. **The development of microstructure during the hydration of portland cement**. PhD Thesis. University of London, 1984.

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

SEFFF, L.; FOLGUERAS, M. V.; HOTZA, D. Hidratação do cimento CP V ARI – RS: Influência da água nas reações de hidratação. In: **49º Congresso Brasileiro de Cerâmica**, São Pedro, São Paulo.

SHAH, V.; SCRIVENER, K.; BHATTACHARJEE, B.; BISHNOI, S. Changes in microstructure characteristics of cement paste on carbonation. **Cement and Concrete Research**, v. 109, p. 184–197, 2018.

SIDDIQUE, R.; KLAUS, J. Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review. **Applied Clay Science**, v. 43, n. 3-4, p. 392–400, 2009.

SIDDIQUE, S.; NAQI, A.; JANG, J. G. Influence of water to cement ratio on CO₂ uptake capacity of belite-rich cement upon exposure to carbonation curing. **Cement and Concrete Composites**, v. 111, 103616, 2020.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (SNIC). **Número das indústrias**. Consumo Regional 2019. Disponível em: <<http://snic.org.br/numeros-industria.php>>. Acesso em: Janeiro, 2021.

SKIBSTED, J.; SNELLINGS, R. Reactivity of supplementary cementitious materials (SCMs) in cement blends. **Cement and Concrete Research**, v. 124, 105799, 2019.

SONG, H.; LIU, J.; HE, K.; AHMAD, W. A comprehensive overview of jute fiber reinforced cementitious composites. **Case Studies in Construction Materials**, v. 15, e00724, 2021.

SOROUSHIAN, P.; WON, J.-P.; HASSAN, M. Durability characteristics of CO₂-cured cellulose fiber reinforced cement composites. **Construction and Building Materials**, v. 34, p. 44–53, 2012.

SOUZA, R.B. **Estudo da retração em fibrocimento reforçado com fibra polimérica**. 244 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2014.

SUI, Y.; OU, C.; LIU, S.; ZHANG, J.; TIAN, Q. Study on properties of waste concrete powder by thermal treatment and application in mortar. **Applied Sciences**, v. 10, 998, 2020.

SZABÓ, R.; SZŰCS, M.; AMBRUS, M.; MUCSI, G. Increasing the pozzolanic reactivity of recovered CDW cement stone by mechanical activation. **Materials Proceedings**, v. 13, 27, 2023.

TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry**, 2. ed. London: Thomas Telford, 1997, 459 p.

- TOKAREVA, A.; KAASSAMANI, S.; WALDMANN, D. Fine demolition wastes as Supplementary cementitious materials for CO₂ reduced cement production. **Construction and Building Materials**, v. 392, 131991, 2023.
- TONOLI, G. H. D.; JOAQUIM, A. P.; ARSÈNE, M.-A.; BILBA, K.; SAVASTANO, H. Performance and durability of cement based composites reinforced with refined sisal pulp. **Materials and Manufacturing Processes**, v. 22, n. 2, p. 149–156, 2007.
- TONOLI, G. H. D.; FUENTE, E.; MONTE, C.; SAVASTANO, H.; LAHR, F. A. R.; BLANCO, A. Effect of fibre morphology on flocculation of fibre–cement suspensions. **Cement and Concrete Research**, v. 39, n. 11, p. 1017–1022, 2009.
- TONOLI, G. H. D.; SAVASTANO, H.; FUENTE, E.; NEGRO, C.; BLANCO, A.; ROCCO LAHR, F. A. Eucalyptus pulp fibres as alternative reinforcement to engineered cement-based composites. **Industrial Crops and Products**, v. 31, n. 2, p. 225–232, 2010.
- TONOLI, G. H. D., et al. Rationalizing the impact of aging on fiber-matrix interface and stability of cement-based composites submitted to carbonation at early ages. **Journal of Materials Science**, v. 51, p. 7929-7943, 2016.
- TONOLI, G. H. D., et al. Influence of the initial moisture content on the carbonation degree and performance of fiber-cement composites. **Construction and Building Materials**, v. 215, p. 22–29, 2019.
- ULSEN, C.; KAHN, H.; HAWLITSCHKE, G.; MASINI, E. A.; ANGULO, S. C.; JOHN, V. M. Production of recycled sand from construction and demolition waste. **Construction and Building Materials**, v. 40, p. 1168–1173, 2013.
- UMAR, U. A.; SHAFIQ, N.; MALAKAHMAD, A.; NURUDDIN, M. F.; KHAMIDI, M. F. A review on adoption of novel techniques in construction waste management and policy. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 19, n. 4, p. 1361–1373, 2017.
- U. S. Geological Survey. **Mineral Commodity Summaries 2022**. (2022), p. 202.
- VÁZQUEZ, E. (2013). Recycled concrete. In: Vázquez E. (eds) Progress of recycling in the built environment. **RILEM Stat-of-the-Arts Reports**, v. 8. Springer, Dordrecht.

- VEGAS, I.; IBAÑEZ, J. A.; LISBONA, A.; SÁEZ DE CORTAZAR, A.; FRÍAS, M. Pre-normative research on the use of mixed recycled aggregates in unbound road sections. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 5, p. 2674–2682, 2011.
- VIEIRA, J. P. B., CORREIA, J. R., DE BRITO, J. Post-fire residual mechanical properties of concrete made with recycled concrete coarse aggregates. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 5, p. 533–541, 2011.
- VIGIL DE LA VILLA MENCÍA, R.; FRÍAS, M.; RAMÍREZ, S. M.; CARRASCO, L. F.; GIMÉNEZ, R. G. Concrete/Glass construction and demolition waste (CDW) synergies in ternary eco-cement-paste mineralogy. **Materials (Basel, Switzerland)**. v. 15, n. 13, 4661, 2022.
- VILLAR-COCIÑA, E.; SAVASTANO, H.; RODIER, L. et al. Pozzolanic characterization of cuban bamboo leaf ash: Calcining temperature and kinetic parameters. **Waste Biomass**, v. 9, p. 691-699, 2018.
- VILLAR-COCIÑA, E.; RODIER, L.; SAVASTANO, H.; LEFRÁN, M.; ROJAS, M. F. A comparative study on the pozzolanic activity between bamboo leaves ash and silica fume: Kinetic Parameters. **Waste and Biomass Valorization**. v. 11, p. 1627-1534, 2020.
- VISSER, J.H.M. Influence of the carbon dioxide concentration on the resistance to carbonation of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 67, p.8-13, 2014.
- WANG, L.; WANG, J.; WANG, H.; FANG, Y.; SHEN, W.; CHEN, P; XU, Y. Eco-friendly treatment of recycled concrete fines as supplementary cementitious materials. **Construction and Building Materials**, v. 322, 126491, 2022.
- WANG, X.; WU, Y.; ZHU, P.; YANG, J.; LI, H.; WANG, F.; YAN, X. Improvement of mechanical properties and carbonation durability of recycled fine aggregate engineered cementitious composites for structural strengthening. **Journal of Building Engineering**, v. 76, 107277, 2023.
- WU, B.; YE, G. Development of porosity of cement paste blended with supplementary cementitious materials after carbonation. **Construction and Building Materials**, v. 145, p. 52–61, 2017.

WU, S.; YANG, J.; YANG, R.; ZHU, J. Preparation and Properties of Engineered Cementitious Composites Incorporating a High Volume of Fly Ash. **Transportation Research Record**, v. 2674, p. 653-662, 2020.

WU, H.; YANG, D.; XU, J.; LIANG, C.; MA, Z. Water transport and resistance improvement for the cementitious composites with eco-friendly powder from various concrete wastes. **Construction and Building Materials**, v. 290, 123247, 2021.

XIAO, J.; MA, Z.; SUI, T.; AKBARNEZHAD, A.; DUAN, Z. Mechanical properties of concrete mixed with recycled powder produced from construction and demolition waste. **Journal of Cleaner Production**, v. 188, p. 720–731, 2018.

XUE, K.; WAN, C.; XU, Y.; JIANG, Y.; CHENG, Y. Effect of pre-hydration age on phase assemblage, microstructure and compressive strength of CO₂ cured cement mortar. **Construction and Building Materials**, v. 325, 126760, 2022.

ZHAO, D.; KHOSHNAZAR, R. Microstructure of cement paste incorporating high volume of low-grade metakaolin. **Cement and Concrete Composites**, v. 106, 103453, 2020.

ZEYAD, A. M.; TAYEH, B. A.; ADESINA, A.; DE AZEVEDO, A. R. G.; AMIN, M.; HADZIMA-NYARKO, M.; AGWA, I. S. Review effect of steam curing on behaviour of concrete. **Cleaner Materials**, v. 3, 100042, 2022.

ZHAN, B. J.; POON, C. S.; SHI, C. J. Materials characteristics affecting CO₂ curing of concrete blocks containing recycled aggregates. **Cement and Concrete Composites**, v. 67, p. 50–59, 2016.

ZHANG, D.; LI, V. C.; ELLIS, B. R. Optimal Pre-hydration Age for CO₂ Sequestration through Portland Cement Carbonation. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 6, n. 12, p. 15976-15981, 2018.

ZHANG, D.; SHAO, Y. Surface scaling of CO₂ -cured concrete exposed to freeze-thaw cycles. **Journal of CO₂ Utilization**, v. 27, p 137–144, 2018.

ZHANG, J.; WANG, J.; LI, X.; ZHOU, T.; GUO, Y. Rapid-hardening controlled low strength materials made of recycled fine aggregate from construction and demolition waste. **Construction and Building Materials**, v. 173, p. 81–89, 2018.

ZHANG, C., et al. Upgrading construction and demolition waste management from downcycling to recycling in the Netherlands. **Journal of Cleaner Production**, 121718, 2020.

ZHANG, D.; CAI, X.; JAWORSKA, B. Effect of pre-carbonation hydration on long-term hydration of carbonation-cured cement-based materials. **Construction and Building Materials**, v. 231, 117122, 2020.

ZHANG, J.; DING, L.; LI, F.; PENG, J. Recycled aggregates from construction and demolition wastes as alternative filling materials for highway subgrades in china. **Journal of Cleaner Production**, v. 255, 120223, 2020.

ZHANG, D.; ELLIS, B. R.; JAWORSKA, B.; HU, W.; LI, V. C. Carbonation curing for precast engineered cementitious composites. **Construction and Building Materials**, v. 313, 125502, 2021.

ZHANG, C.; HU, M.; DI MAIO, F.; SPRECHER, B.; YANG, X.; TUKKER, A. An overview of the waste hierarchy framework for analyzing the circularity in construction and demolition waste management in Europe. **Science of the Total Environment**, v. 803, 149892, 2022.

ZHANG, H.; ZHANG, C.; HE, B.; YI, S.; TANG, L. Recycling fine powder collected from construction and demolition wastes as partial alternatives to cement: A comprehensive analysis on effects, mechanism, cost and CO₂ emission. **Journal of Building Engineering**, v. 71, 106507, 2023.

ZHOU, Y.; FAN, M.; CHEN, L. Interface and bonding mechanisms of plant fibre composites: An overview. **Composites Part B: Engineering**, v. 101, p. 31–45, 2016.

ZHAO, D.; KHOSHNAZAR, R. Microstructure of cement paste incorporating high volume of low-grade metakaolin. **Cement and Concrete Composites**, v. 106, 103453, 2020.