UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

HANDELLON KLEYTON DE JESUS SANTOS

EFEITO DA POROSIDADE, DA MORFOLOGIA SUPERFICIAL E DO FÍLER CARBONÁTICO NA CARBONATAÇÃO DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS REFORÇADOS COM FIBRA DE CELULOSE

SÃO CRISTÓVÃO/SE
2026

HANDELLON KLEYTON DE JESUS SANTOS

EFEITO DA POROSIDADE, DA MORFOLOGIA SUPERFICIAL E DO FÍLER CARBONÁTICO NA CARBONATAÇÃO DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS REFORÇADOS COM FIBRA DE CELULOSE

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

Orientador: Dr. Rui Barbosa de Souza
Coorientador: Dr. Hericles Campos dos Santos
Agência Financiadora: CNPq

SÃO CRISTÓVÃO/SE
2026

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE

Santos, Handellon Kleyton de Jesus
S237a Efeito da porosidade, da morfologia superficial e do fíler carbonático na carbonatação de compósitos cimentícios reforçados com fibra de celulose / Handellon Kleyton de Jesus Santos ; orientador Rui Barbosa de Souza. - São Cristóvão, 2026.
135 f. : il.

Dissertação (mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Sergipe, 2026.

1. Dióxido de carbono. 2. Cinética química. 3. Poluição ambiental. 4. Cimento portland. I. Souza, Rui Barbosa de Orient. II. Título.

CDU 625

EFEITO DA POROSIDADE, DA MORFOLOGIA SUPERFICIAL E DO FÍLER CARBONÁTICO NA CARBONATAÇÃO DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS REFORÇADOS COM FIBRA DE CELULOSE

HANDELLON KLEYTON DE JESUS SANTOS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE E APROVADA EM 26 DE AGOSTO DE 2026

BANCA EXAMINADORA:

_____

Dr. Rui Barbosa de Souza
Orientador

_____

Dr. Hércicles Campos dos Santos
Coorientador

_____

Isis Nayra Rolemberg Prudente
1° Examinador (Externo)
PEQ/ UFS – Universidade Federal de Sergipe

_____

Cleber Marcos Ribeiro Dias
2° Examinador (Externo)
UFBA – Universidade Federal da Bahia

SÃO CRISTÓVÃO/SE
2026

DEDICATÓRIA

Dedico esta dissertação de mestrado à minha família, em especial aos meus pais José Paulo Costa dos Santos e Maria Dilma Costa de Jesus Santos.

AGRADECIMENTOS

Primeiro agradeço a Deus pelo dom da vida, sem ele nada seria possível.

Agradeço à minha família, em especial aos meus pais Paulo e Dilma, que sempre investiram em minha educação e deram todo o apoio para continuar nos estudos. Agradeço também aos meus irmãos Herickson, Hayslan e Kleysla por todo apoio.

Sempre serei grato ao meu orientador, Professor Rui Barbosa de Souza e ao meu coorientador Hericles Campos dos Santos, pela confiança, por todo apoio nesta pesquisa, pelos ensinamentos e por sempre estar à disposição para tirar quaisquer dúvidas. Quero deixar também um agradecimento aos professores do PROEC por todos os ensinamentos e ao técnico de laboratório do LAMCE (Laboratório de Materiais de Construção e Estruturas) da UFS, Mateus pela ajuda e orientações no uso de equipamentos e ensaios.

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa de estudos que me permitiu desenvolver essa pesquisa. Por disponibilizar a estrutura laboratorial que torna possível esta dissertação, agradeço ao Condomínio de Laboratórios Multiusuários do Departamento de Ciência e Engenharia de Materiais (CLMDCEM – UFS) e ao Condomínio de Laboratórios Multiusuários das Geociências (CLGeo – UFS).

Por fim, quero deixar meu eterno agradecimento aos colegas de mestrado Laísa e Marcos, pelo companheirismo nas disciplinas, pois juntos enfrentamos os desafios ao longo dessa jornada, principalmente por toda a ajuda nos trabalhos que fizemos. A Marcos, em especial, durante os ensaios de laboratório para a realização dessa pesquisa, que sempre esteve disposto a ajudar e inclusive na ideia do uso da forma de silicone rugosa para produzir os CPs rugosos desta pesquisa que, nos testes se mostrou de grande utilidade ajudando, assim, na execução desse trabalho.

SANTOS, H.K.J. **Efeito da porosidade, da morfologia superficial e do fíler carbonático na carbonatação de compósitos cimentícios reforçados com fibra de celulose.** 2026. 135f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2026.

RESUMO

Após a revolução industrial, a humanidade intensificou as emissões dos gases do efeito estufa, principalmente o dióxido de carbono (CO_2), proveniente de várias fontes como a queima de combustíveis fósseis. Na construção civil, o cimento é o maior responsável pelas emissões de carbono do setor. Na fabricação do cimento Portland, principalmente na etapa de clinquerização, ocorre o processo de descarbonatação, no qual, pela decomposição do carbonato de cálcio é liberado gás carbônico. Além disso, os combustíveis fósseis usados para aquecer o forno também contribuem para as emissões de carbono. Visando reduzir os impactos ambientais gerados pela indústria da construção civil, a captura de carbono pelo processo de carbonatação em compósito cimentício reforçado com fibra (fibrocimento) de celulose, em formato de placas, surge como um mecanismo promissor, pois devido ao seu formato esbelto e maior área de exposição das placas, estas podem se tornar reservatórios de carbono, além de não se ter a preocupação com a despassivação do aço, pois geralmente as placas utilizam fibras naturais ou artificiais para sua estabilização. Sendo assim, entender como maximizar a captura de carbono nessas placas pode ajudar a construção civil a se tornar mais ecoeficiente. O objetivo geral dessa pesquisa é analisar a cinética de incorporação de CO_2 em compósitos cimentícios reforçados com fibra de celulose, variando suas características morfológicas e incorporação do fíler carbonático (como nucleador), observando os impactos nas propriedades e ecoeficiência dos compósitos. Para atingir esse objetivo, foram produzidas placas cimentícias reforçadas com fibras de celulose, cortadas em corpos de prova prismáticos (16 x 4 x 1,5 cm) nas seguintes variações: corpo de prova de referência (sem fibras); corpo de prova poroso (fibrocimento de superfície plana porosa); corpo de prova rugoso (superfície com geometria modificada) e com incorporação do fíler carbonático (corpo de prova com adição mineral do fíler carbonático). Para avaliar o efeito da variação de morfologia superficial e adição do fíler carbonático, as composições foram mantidas em processo de carbonatação. Os corpos de prova foram mantidos a uma temperatura em torno de 25 °C, umidade de 70 % e 5 % de concentração de CO_2, posteriormente foram coletados em tempos de carbonatação de 0, 1, 3, 7 e 14 dias. Também foi realizada carbonatação natural nos mesmos períodos para comparação entre os métodos (carbonatação natural e em câmara). Os corpos de prova foram posteriormente caracterizados por meio de ensaios físico-mecânicos, depois da carbonatação, além de indicadores de carbonatação, ecoeficiência e retração por carbonatação. Ao fim dessa pesquisa pôde-se concluir que ao incorporar 6 % de celulose houve uma melhora na captura de carbono, associada a uma maior porosidade, já para as amostras com modificação de área superficial os resultados de captura de carbono foram semelhantes aos da superfície lisa, sendo atribuído ao processo de formação da rugosidade que diminuiu a porosidade e consequentemente menor absorção de CO_2, mas obteve bons indicadores de ecoeficiência, o que no geral apresentou um melhor desempenho comparado a outras amostras. Na adição do fíler carbonático as amostras também mostraram um bom desempenho na captura de carbono, semelhante ao aumento de porosidade. Quanto às propriedades mecânicas, ao adicionar 6 % de celulose a resistência à flexão reduziu 46,64 %, o que era esperado pela maior porosidade, no entanto, para as formulações com incorporação parcial do fíler carbonático e rugosa os valores foram semelhantes aos com 3 % de celulose.

Palavras-chave: Carbonatação. Captura de carbono. Cinética de carbonatação.

SANTOS, H.K.J. **Effect of porosity, surface morphology, and carbonate filler on the carbonation of cellulose fiber-reinforced cementitious composites**. 2026. 135f. Dissertation (master's in civil engineering) – Federal University of Sergipe, São Cristóvão, 2026.

ABSTRACT

Since the Industrial Revolution, humanity has intensified greenhouse gas emissions primarily carbon dioxide (CO_2) stemming from sources such as the burning of fossil fuels. In the construction industry, cement is the primary source of carbon emissions. During Portland cement manufacturing, specifically the clinkerization stage, a decarbonation process occurs wherein the decomposition of calcium carbonate releases carbon dioxide. Furthermore, the fossil fuels used to heat the kiln also contribute to carbon emissions. Aiming to mitigate the environmental impacts of the construction industry, carbon capture via the carbonation process in cellulose fiber-reinforced cementitious composites (fiber-cement) specifically in board form—emerges as a promising mechanism. Due to their slender profile and large surface area, these boards can serve as carbon reservoirs; additionally, there is no concern regarding steel depassivation, as these boards typically rely on natural or artificial fibers for stabilization. Thus, understanding how to maximize carbon capture in these boards can help the construction sector become more eco-efficient. The general objective of this research is to analyze the kinetics of CO_2 uptake in cellulose fiber-reinforced cementitious composites by varying their morphological characteristics and incorporating a carbonate filler (acting as a nucleating agent), while observing the resulting impacts on the composite's properties and eco-efficiency. To achieve this, cellulose fiber-reinforced cementitious boards were produced and cut into prismatic specimens (16 x 4 x 1.5 cm) representing the following variations: a reference specimen (fiber-free); a porous specimen (fiber-cement with a porous flat surface); a rough specimen (surface with modified geometry); and a specimen incorporating a carbonate filler (with the addition of carbonate filler as a mineral admixture). To evaluate the effects of varying surface morphology and adding carbonate filler, the compositions were subjected to a carbonation process. The specimens were kept at a temperature of approximately 25 °C, 70 % humidity, and a 5 % CO_2 concentration; samples were subsequently collected after 0, 1, 3, 7, and 14 days of carbonation. Natural carbonation was also carried out over the same periods to compare the two methods (natural vs. chamber carbonation). Following carbonation, the specimens underwent physical-mechanical testing, as well as assessments of carbonation indicators, eco-efficiency, and carbonation shrinkage. The study concluded that incorporating 6 % cellulose improved carbon capture, a result linked to increased porosity. For samples with modified surface areas, carbon capture results were like those of smooth-surfaced samples; this was attributed to the roughness formation process, which reduced porosity and consequently lowered CO_2 absorption, though these samples achieved good eco-efficiency indicators and generally performed better than other samples. Samples with added carbonate filler also demonstrated good carbon capture performance, comparable to that seen with increased porosity. Regarding mechanical properties, adding 6 % cellulose reduced flexural strength by 46.64 % an expected outcome given the higher porosity whereas formulations incorporating carbonate filler or featuring a rough surface yielded values like those of samples with 3 % cellulose.

Keywords: Carbonation. Carbon capture. Carbonation kinetics.

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 Propriedades físicas e mecânicas de placas cimentícias.....27
Tabela 4.2 Abreviações dos óxidos.....29
Tabela 4.3 Composição química do fíler carbonático.....44
Tabela 4.4 Absorção de carbono em placas cimentícias.....48
Tabela 5.1 Massa específica dos pós.....54
Tabela 5.2 Análise química dos pós (FRX).....57
Tabela 6.1 Teor de portlandita aos 14 dias de carbonatação.....98
Tabela 6.2 Teor de portlandita aos 14 dias de carbonatação.....113
Tabela 6.3 Amostra com menor índice.....114

LISTA DE QUADROS

Quadro 4.1 Características dos principais compostos gerados no processo de clinquerização 30
Quadro 5.1 Formulações de fibrocimento 62
Quadro 5.2 Materiais utilizados na câmara de carbonatação (continua) 65
Quadro 6.1 Síntese dos resultados de MOR entre as amostras carbonatadas em câmara e expostas ao ambiente natural 91

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Concentração de CO_2 na atmosfera ao longo de 1000 anos 16
Figura 3.1 Resultados quantitativos das bases de dados 21
Figura 3.2 Quantitativo da pesquisa após filtragem de dados 22
Figura 3.3 Materiais cimentícios objetos de estudo dos trabalhos selecionados 23
Figura 3.4 Variáveis dos trabalhos selecionados 24
Figura 5.1 Fluxograma de atividades 51
Figura 5.2 Nomenclatura das formulações produzidas 52
Figura 5.3 Materiais utilizados para a produção do fibrocimento 53
Figura 5.4 Granulômetro a laser Mastersizer MS 2000E 54
Figura 5.5 Distribuição das partículas dos pós 55
Figura 5.6 DRX dos pós utilizados 56
Figura 5.7 Preparo de amostra para microscopia (MEV): **(a)** Cartão de celulose; **(b)** Cartão metalizado em prata 58
Figura 5.8 MEV das fibras de celulose 58
Figura 5.9 TG/DTG dos materiais utilizados 60
Figura 5.10 Celulose de fibra curta 61
Figura 5.11 Polpa de celulose 61
Figura 5.12 Fluxograma de moldagem 62
Figura 5.13 Forma das amostras de fibrocimento 63
Figura 5.14 Placa de fibrocimento marcada 63
Figura 5.15 Moldagem da placa rugosa 64
Figura 5.16 Carbonatação na câmara 65
Figura 5.17 Câmara de carbonatação 67
Figura 5.18 Recipiente de carbonatação natural 68
Figura 5.19 Processo de selagem de amostras 69
Figura 5.20 Momentos no tempo de cura e exposição de coleta de amostra para caracterização e leituras de profundidade de carbonatação 70
Figura 5.21 Captura de tela do software *ImageJ*®. 74
Figura 5.22 Metodologia do ensaio da mufla 76
Figura 5.23 Face cortada de um CP rugoso 76
Figura 5.24 Ensaio de retração 77

Figura 6.1 (a) Absorção de água e porosidade total; (b) Densidades real e aparente das amostras de fibrocimento 82
Figura 6.2 Comportamento mecânico na flexão das amostras REF (a) e C3NL (b) 84
Figura 6.3 Comparação entre o MOR e o LOP pelo teste de Tukey 84
Figura 6.4 (a) Módulo de ruptura e (b) módulo de elasticidade 85
Figura 6.5 (a) Absorção de água, (b) Porosidade total, (c) Densidade real e (d) Densidade aparente das amostras com variação da área superficial de exposição e da porosidade na carbonatação 87
Figura 6.6 (a) Módulo de ruptura, (b) Módulo de elasticidade, (c) Tenacidade 88
Figura 6.7 Profundidades de carbonatação: (a) Carbonatação natural; (b) Carbonatação em câmara com 5% de CO_2 94
Figura 6.8 Cinética de carbonatação quanto a morfologia do fibrocimento 96
Figura 6.9 Análise termogravimétrica (TG/DTG) do fibrocimento na carbonatação natural 99
Figura 6.10 Análise termogravimétrica (TG/DTG) do fibrocimento na carbonatação na câmara 100
Figura 6.11 Retração do fibrocimento 101
Figura 6.12 (a) Absorção de CO_2 em carbonatação natural e **(b)** em ambiente com 5% de CO_2 104
Figura 6.13 Carbonatação natural e em atmosfera com 5% de CO_2 105
Figura 6.14 Absorção de CO_2 em amostra de carbonatação natural e em ambiente a 5% de CO_2 106
Figura 6.15 (a) Absorção de água, (b) Porosidade total, (c) Densidade real e (d) Densidade aparente das amostras com adição de fíler carbonático em comparação a sem fíler carbonático 108
Figura 6.16 Profundidade de carbonatação em amostras com fíler carbonático e sem fíler carbonático 109
Figura 6.17 Cinética de carbonatação para as amostras com adição de fíler carbonático 110
Figura 6.18 Efeito do fíler carbonático na absorção de CO_2: **(a)** carbonatação natural; **(b)** na câmara com 5% de CO_2. 111
Figura 6.19 TG/DTG das amostras com fíler carbonático e sem fíler carbonático 113
Figura 6.20 (a) IL, (b) IL e (c) SICFeq 115

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 4.1 Decomposição do carbonato de magnésio (400 °C-600 °C) 30
Equação 4.2 Decomposição do carbonato de cálcio (800 °C-950 °C) 30
Equação 4.3 Formação do aluminato tricálcico (C_3A) e ferroaluminato tetracálcico (C_4AF) (1200 °C-1300 °C) 30
Equação 4.4 Formação do silicato dicálcico (belita) (1200 °C-1300 °C) 30
Equação 4.5 Formação do silicato tricálcico (alita) (1350 °C-1450 °C) 30
Equação 4.6 Hidratação do aluminato tricálcico (C_3A) 34
Equação 4.7 Conversão da etringita em monosulfoaluminato 34
Equação 4.8 Hidratação do ferroaluminato tetracálcico (C_4AF) 34
Equação 4.9 Hidratação dos silicatos de cálcio 35
Equação 4.10 Reações químicas da carbonatação 36
Equação 4.11 Profundidade carbonatada 37
Equação 4.12 Profundidade carbonatada simplificada 38
Equação 4.13 Eficiência de carbonatação 39
Equação 4.14 Índice de intensidade de ligante (IL) **(a)** e Índice de intensidade de CO_2 (IC) **(b)** 49
Equação 5.1 Massa específica 53
Equação 5.2 Reação do bicarbonato de sódio com ácido sulfúrico 68
Equação 5.3 Equações para o cálculo da (a) porosidade (%), (b) densidade aparente (g/cm³), (c) densidade real (g/cm³) e (d) absorção de água (%) 71
Equação 5.4 Módulo de ruptura na flexão (MOR) 71
Equação 5.5 Módulo de elasticidade (E) 72
Equação 5.6 Tenacidade ou energia de fratura (ξ) 72
Equação 5.7 Equação do módulo de ruptura (MOR) usada para o CP rugoso 72
Equação 5.8 Cálculo do CO_2 pelo ensaio de perda de massa por forno mufla 75
Equação 5.9 IL e IC adaptados 78
Equação 5.10 Saldo de intensidade carbono-flexão equivalente (SICF eq) 78

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIAÇÕES

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Al_2O_3	Óxido de alumínio
ARC	Agregado Reciclado de Concreto
BECCS	Bioenergia com Captura e Armazenamento de Carbono
$Ca(OH)_2$	Hidróxido de cálcio
$CaCO_3$	Carbonato de cálcio
CaO	Cal
CLMDCEM	Condomínio de Laboratórios Multiusuários do Departamento de Ciência e Engenharia de Materiais
CPV ARI	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
DRX	Difração de Raios X
E	Módulo de elasticidade
Fe_2O_3	Óxido de ferro
FRX	Análise química
IC	Intensidade de carbono
IL	Intensidade de ligante
kN	Quilonewton
MOR	Módulo de ruptura
MPa	Megapascal
NBR	Norma Brasileira
pH	Potencial Hidrogeniônico
RCD	Resíduo de Construção e Demolição
SiO_2	Óxido de Silício
TG	Termogravimetria
TiO_2	Dióxido de titânio
ZrO_2	Dióxido de zircônio
ζ	Tenacidade ou energia de fratura

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 16
2 OBJETIVOS 19
2.1 OBJETIVO GERAL 19
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 19
3 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA 20
4 REFERENCIAL TEÓRICO 24
4.1 COMPÓSITO CIMENTÍCIO REFORÇADO COM FIBRAS 24
4.2 PRODUÇÃO DO CIMENTO PORTLAND 28
4.3 HIDRATAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND 33
4.4 CARBONATAÇÃO DAS FASES HIDRATADAS 35
4.4.1 Cinética de carbonatação 37
4.4.1.1 Efeito da porosidade e área superficial exposta na cinética de carbonatação 39
4.4.1.2 Efeito do pré-condicionamento, pressão de compactação, concentração e pressão de CO_2 na cinética de carbonatação 40
4.4.1.3 Efeito de fissuras na cinética de carbonatação 42
4.5 FÍLER CARBONÁTICO 43
4.6 CAPTURA DE CO_2 VIA CARBONATAÇÃO 45
4.6.1 Captura de CO_2 em placas cimentícias 48
4.7 PARÂMETROS DE AVALIAÇÃO DE ECOEFICIÊNCIA 49
4.7.1 Indicadores de ecoeficiência (IL) e (IC) 49
5 METODOLOGIA 50
5.1 MATERIAIS 52
5.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS 53
5.2.1 Densidade 53
5.2.2 Granulometria 54
5.2.3 Difração de raios X (DRX) 55
5.2.4 Análise Química (FRX) 57
5.2.5 Geometria da celulose 58
5.2.6 Análise Termogravimétrica (TG/DTG) 59
5.3 PRODUÇÃO DAS AMOSTRAS 61
5.4 CARBONATAÇÃO NA CÂMARA 65
5.5 CARBONATAÇÃO NATURAL 68
5.6 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS 69

5.6.1 Características físicas do fibrocimento 70
5.6.2 Desempenho mecânico 71
5.6.3 Indicadores de carbonatação 73
5.6.3.1 Profundidade de carbonatação por indicador de pH fenolftaleína 73
5.6.3.2 Análise Termogravimétrica (TG/DTG) 74
5.6.3.3 Análise da carbonatação por perda de massa na Mufla 74
5.6.3.4 Cinética de carbonatação 76
5.6.3.5 Retração por carbonatação 77
5.6.4 Indicadores de ecoeficiência (IL), (IC) e (SICFeq) 78
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES 80
6.1 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS 80
6.1.1 Caracterização inicial das formulações de fibrocimento 80
6.2 EFEITOS DA MORFOLOGIA E DA POROSIDADE NA CARBONATAÇÃO DO FIBROCIMENTO 86
6.2.1 Características físicas (porosidade, densidade, absorção) 86
6.2.2 Desempenho mecânico (MOR, E, ξ) 88
6.2.3 Profundidade de carbonatação e frente carbonatada 91
6.2.4 Cinética de carbonatação 94
6.2.5 Considerações microestruturais (TG/DTG) 96
6.2.6 Retração por carbonatação 101
6.2.7 Absorção de CO_2 medida por aquecimento em forno mufla 103
6.3 CARBONATAÇÃO EM AMBIENTE CONTROLADO E NATURAL: ANÁLISE COMPARATIVA DO MÉTODO DE ESTUDO 105
6.3.1 Profundidade de carbonatação e avanço da frente carbonatada 105
6.3.2 Absorção de CO_2 medida pelo método da mufla 106
6.3.3 Limitações e contribuições dessa comparação para o escopo do trabalho 107
6.4 EFEITO DO FÍLER CARBONÁTICO NA CINÉTICA DE CARBONATAÇÃO E NA MICROESTRUTURA 107
6.4.1 Características físicas e mecânicas 107
6.4.2 Profundidade de carbonatação e cinética na presença de fíler carbonático 109
6.4.3 Absorção de CO_2 medida pelo método da mufla 111
6.4.4 Evidências microestruturais de nucleação e formação de carbonatos 111
6.5 ECOEFICIÊNCIA E SÍNTESE INTEGRADA DOS RESULTADOS 114

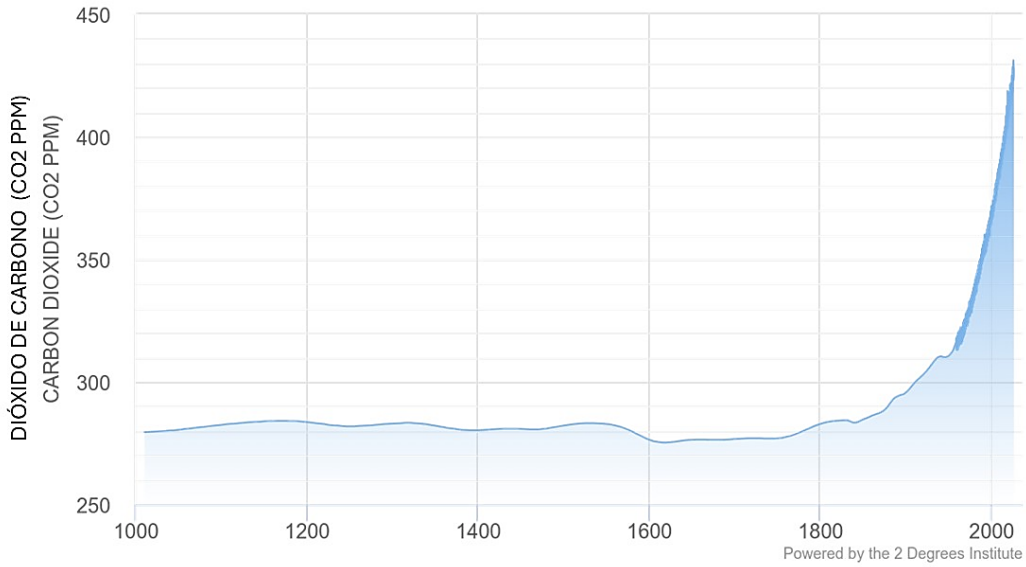
6.5.1 IL, IC e SICFeq das diferentes formulações 114
6.5.2 Relação entre carbonatação, desempenho mecânico e ecoeficiência 116
6.5.3 Síntese das hipóteses e implicações para captura de CO_2 116
7 CONCLUSÃO 117
REFERÊNCIAS 119

1 INTRODUÇÃO

A partir da revolução industrial, houve uma modificação expressiva da composição química natural da atmosfera, em especial a composição dos gases que fazem parte do efeito estufa, dentre eles o dióxido de carbono (CO_2) (Junges *et al.*, 2018). O efeito estufa é um processo natural que ocorre no planeta Terra, responsável por manter a temperatura do planeta em níveis que permitem a manutenção da vida. No entanto, a intensificação de atividades humanas que emitem CO_2 no processo, como por exemplo: queima de combustíveis fósseis (petróleo, carvão), desmatamento e uso inadequado da terra para agricultura e pastagens, contribuem para o aumento das concentrações desse gás na atmosfera, contribuindo para o desequilíbrio do efeito estufa e resultando, consequentemente, em temperaturas mais elevadas do que o normal (Junges *et al.*, 2018).

Na Figura 1.1 são apresentados dados da concentração de CO_2 na atmosfera ao longo de 1000 anos, nela, é possível observar o aumento da concentração de CO_2 em partes por milhão (ppm), havendo um aumento expressivo pós 1800 d.C. após início da 1ª revolução industrial (1760 – 1840) (CFA, 2019).

Figura 1.1 Concentração de CO_2 na atmosfera ao longo de 1000 anos



Fonte: CO_2.earth (2025) .

Segundo Richards (2017), a produção mundial de cimento está prevista para atingir 6,1 bilhões de toneladas em 2050. Em termos gerais, cada tonelada de cimento produzida resulta na emissão de 1 tonelada de CO_2 para a atmosfera. Sendo assim, o sequestro, ou captura e

fixação de carbono, é uma estratégia utilizada para reduzir a concentração do CO_2 na atmosfera terrestre. Existem dois tipos de sequestro de carbono: direto e indireto. O sequestro de carbono direto consiste na captura de CO_2 proveniente de processos industriais e da queima de combustíveis fósseis antes que o gás seja liberado na atmosfera. Um exemplo de sequestro de carbono direto ocorre na produção de energia a partir da biomassa (BECCS), onde o CO_2 liberado a partir da queima da biomassa é capturado antes que chegue na atmosfera e direcionado a formações geológicas profundas, onde é armazenado (Consoli, 2019).

Já o sequestro de carbono indireto ocorre após a emissão de CO_2, removendo-o do ar. Um exemplo desse processo é a fotossíntese realizada pelas plantas, onde o carbono é incorporado ao vegetal durante o seu desenvolvimento. Por esta razão, práticas como o reflorestamento são amplamente incentivadas. Na construção civil, ocorre um processo indireto de sequestro de carbono conhecido como carbonatação, que ocorre em materiais de matriz cimentícia e de cal. Esse fenômeno acontece naturalmente ao longo dos anos e após a demolição de edificações (Possan, 2019).

Para que a captura de CO_2 por carbonatação ocorra de maneira eficiente, é necessário considerar alguns fatores que influenciam seu avanço, como o ambiente de exposição, as características do material e proteção da superfície. Além disso, quanto maior for a área superficial exposta de um material cimentício, maior será a captura de carbono (Possan, 2019).

Alguns estudos analisaram a relação entre área superficial exposta *versus* carbonatação e, consequentemente, a captura de carbono. Um exemplo é o trabalho de Aguiar e Cristela Júnior (2013), que investigou o efeito da proteção superficial do concreto com a utilização de diferentes resinas. Os resultados dos autores trazem contribuições com relação à conservação de edificações de concreto, pois mostram que superfícies protegidas têm menor profundidade de carbonatação. Assim, para pesquisas voltadas à captura do dióxido de carbono, a estratégia oposta pode ser aplicada, ou seja, aumentar a área exposta para intensificar a captura de carbono. Outro fator que pode melhorar a captura de CO_2 por meio da carbonatação é o uso de adições na matriz cimentícia, como dolomita, cinza volante, cinza de óleo de palma, pó de calcário e escória de alto forno (Guo *et al.*, 2022; Qiu, 2020).

Para a adição do pó de calcário em uma granulometria mais fina, pode-se promover um maior avanço na frente de carbonatação. Em faixas de incorporação (10% - 20% em peso), além de promover o aumento da densificação interfacial melhorando a resistência inicial, pode fornecer superfícies de nucleação adicionais aumentando a absorção total de CO_2. No entanto, em excesso ou em altas concentrações de CO_2, pode acelerar a passivação da superfície e inibir a profundidade de carbonatação (Zhang *et al.*, 2026).

Com relação à captura de carbono utilizando placas de fibrocimento com fibra de celulose, no estudo de He *et al.* (2019), foi avaliada a capacidade dessas placas em absorver CO_2, o estudo concluiu que no processo de cura por carbonatação acelerada as placas de fibrocimento com celulose foram capazes de absorver 24,4% de carbono em 8 horas. Trabalhos como esse evidenciam a capacidade dos fibrocimentos se tornarem verdadeiros sumidouros de carbono.

Além da absorção de carbono, também é importante que o material tenha um bom desempenho mecânico para ser utilizado na construção civil, sendo assim, há pesquisas que analisaram o desempenho mecânico desse material. No trabalho de Bilcati e Costa (2023), foi avaliado o efeito da combinação entre fibra de celulose e microcelulose cristalina em placas cimentícias. Os autores concluíram que a microfibra de celulose proporciona um aumento de vazios, enquanto a microcelulose cristalina resulta em uma estrutura mais compacta e com menos vazios.

Considerando esses resultados, a presença de maior porosidade nas placas cimentícias com fibra de celulose pode ser vantajosa para estudos voltados à captura de CO_2. Além disso, as placas cimentícias são amplamente utilizadas em vedações de edificações, pois geram menos resíduos e possibilitam uma construção mais rápida. Sua estrutura esbelta e sua grande área superficial podem contribuir significativamente para a captura do dióxido de carbono (CO_2).

Sendo assim, o presente estudo investiga como o aumento da área superficial do fibrocimento, da permeabilidade e a substituição do calcário por fíler carbonático na formulação podem influenciar na cinética de captura de CO_2 devido à carbonatação, sem prejudicar as propriedades mecânicas do compósito e, dessa forma, mitigar sua pegada de carbono. A partir do entendimento de como esses fatores influenciam na fixação química do CO_2 pode-se identificar a morfologia mais ecoeficiente.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral do trabalho é analisar a cinética de incorporação de CO_2 em compósitos cimentícios reforçados com fibras, variando suas características morfológicas e substituição do calcário por fíler carbonático, observando os impactos nas propriedades e ecoeficiência dos compósitos por meio da carbonatação natural e carbonatação em câmara com 5 % de CO_2.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar a relação entre a morfologia superficial do compósito cimentício e a cinética de carbonatação.
- Analisar comparativamente como a variação na morfologia superficial do compósito e a variação na porosidade total do material, obtida variando-se o teor de celulose na formulação, influencia na cinética de carbonatação do fibrocimento.
- Analisar comparativamente como a variação na morfologia superficial do compósito e a indução de pontos de nucleação da reação de carbonatação, obtida substituindo o calcário mais grosso por um de granulometria mais fina (fíler carbonático) na formulação, influencia na cinética de carbonatação do fibrocimento.
- Investigar a ecoeficiência dos compósitos cimentícios por meio de uma adaptação do Índice de Intensidade de Ligante (IL) e Índice de Intensidade de Carbono (IC) e cinética de carbonatação.

3 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

A pesquisa bibliométrica é de natureza quantitativa e tem como objetivo fornecer uma visão geral sobre o assunto, permitindo apontar lacunas que irão orientar estudos futuros. Nesta pesquisa, foram utilizadas palavras-chave que, por meio de diferentes combinações e *strings* de busca, ajudaram a direcionar o estudo. As *strings* de busca foram elaboradas nos idiomas português e inglês, no período limitado entre 2005 e 2025. Foram utilizadas as bases de dados: Google Acadêmico®, *Science Direct*®, *Scopus*® e *Web of Science*®.

String em português: *("Cimento" OR "Compósito cimentício" OR "Concreto" OR "Argamassa") AND ("Carbonatação" OR "Sequestro de carbono" OR "Captura de carbono" OR "Adsorção de CO_2") AND ("Ecoeficiência" OR "Difusão de CO_2" OR "Matriz cimentícia"* OR *"Cinética").*

String em inglês: *("Cement" OR "Cement composite" OR "Concrete" OR "Mortar") AND ("Carbonation" OR "Carbon sequestration" OR "Carbon capture" OR "CO_2 adsorption") AND ("Eco-efficiency" OR "CO_2 diffusion" OR "Cement matrix"* OR *"Kinetics").*

Optou-se por essas palavras a fim de fazer uma análise da literatura científica sobre a captura de carbono em materiais cimentícios por meio da carbonatação e identificar possíveis lacunas que ao serem objeto de estudo podem contribuir na mitigação das emissões de carbono.

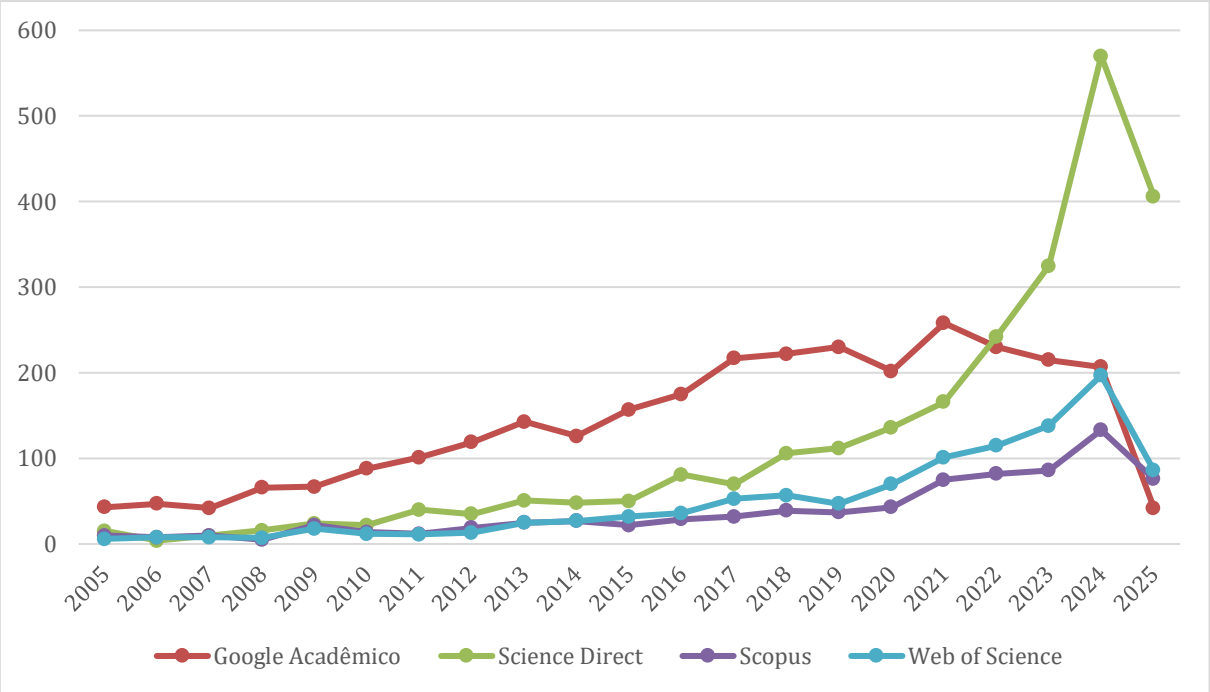
A metodologia adotada foi uma adaptação da realizada pelos autores Macedo *et al.* (2023) e foi realizada nas seguintes etapas: 1) Escolher bases de dados; 2) Realizar seleção de trabalhos por meio da *string* de pesquisa elaborada; 3) Realizar a leitura dos títulos e resumos dos trabalhos retornados das bases na etapa 2, excluindo trabalhos que fogem do tema pesquisado; 4) Análise de trabalhos objetivando encontrar as lacunas com relação à captura de carbono por meio de materiais cimentícios.

Na realização da pesquisa, buscou-se responder às seguintes perguntas: (1) Após o uso das *strings*, as bases retornaram trabalhos que tinham relação com o tema de interesse? (2) Quais materiais cimentícios são estudados pelos autores com relação à carbonatação e captura de carbono? (3) Quais variáveis foram analisadas pelos autores dos trabalhos com relação à carbonatação e captura de carbono?

Nas etapas 1 e 2 da análise foram retornados das bases: 3100 resultados do Google Acadêmico®; 2528 resultados da base *Science Direct*®; 806 resultados da base *Scopus*® e 1067

resultados da base *Web of Science*®. Na Figura 3.1 são apresentados os resultados quantitativos.

Figura 3.1 Resultados quantitativos das bases de dados

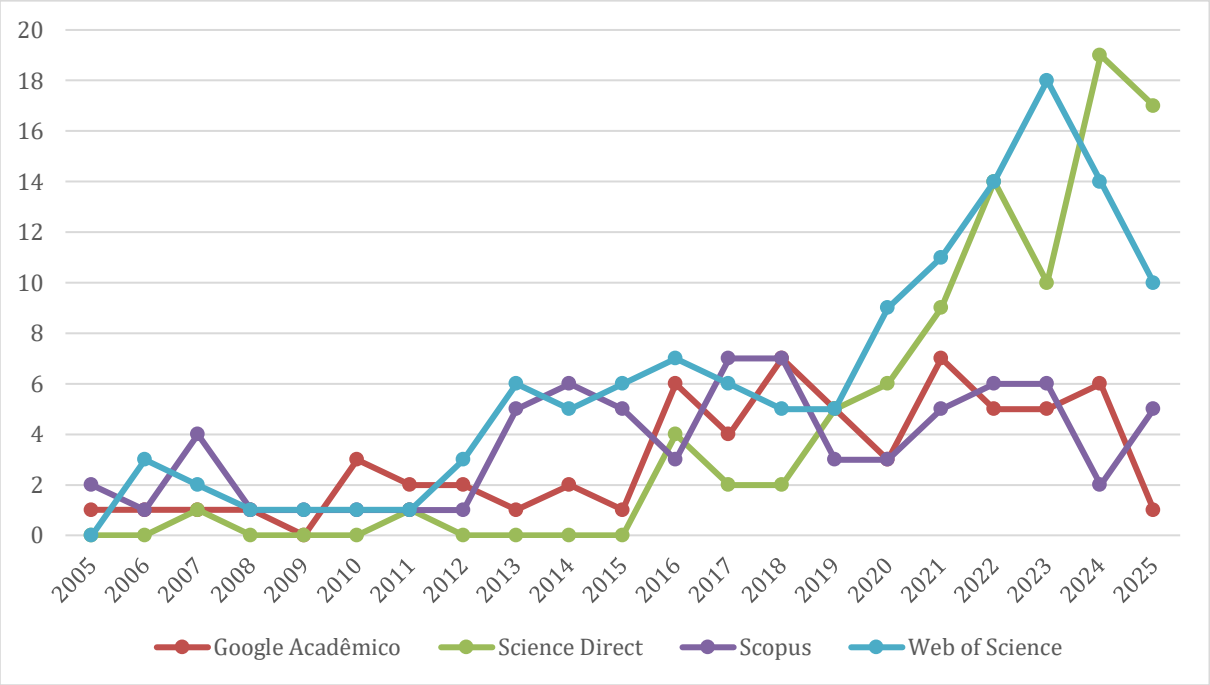


Fonte: O autor (2025).

Na Figura 3.1 é apresentado um elevado número de trabalhos retornados do Google Acadêmico®, seguido da base *Science Direct*®. É possível observar também uma queda nos resultados acentuada nos últimos dois anos (2023-2024) no Google Acadêmico®, enquanto o número de publicações na base *Science Direct*® aumentou, o que indica um interesse maior de publicações em bases estrangeiras.

Na etapa 3 da análise, após a filtragem por leitura de título e resumo, foram selecionados 357 trabalhos sendo distribuídos nas bases: *Web of Science*® (128); *Science Direct*® (90); *Scopus*® (75) e Google Acadêmico® (64). Na Figura 3.2 são apresentados os resultados da análise.

Figura 3.2 Quantitativo da pesquisa após filtragem de dados

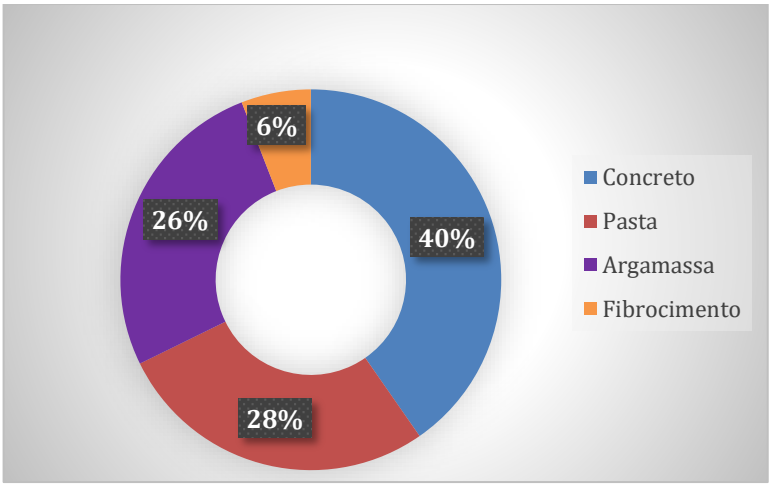


Fonte: O autor (2025).

A partir da análise da Figura 3.2, conclui-se que houve uma redução significativa nos resultados, evidenciando a importância de uma análise mais detalhada dos trabalhos, uma vez que as bases de dados retornam estudos que, por vezes, fogem do tema de interesse. Com relação ao número de publicações ao longo dos anos sobre carbonatação e captura de carbono em materiais cimentícios, observa-se que houve um aumento nos números de trabalhos nos últimos 5 anos (2019-2024), nas bases de dados internacionais (*Science Direct*® e *Web of Science*®), possivelmente devido a um maior interesse dos pesquisadores com relação ao tema, motivado pela urgência de combater as mudanças climáticas e à necessidade de mitigação das emissões de dióxido de carbono em nível global.

Na etapa 4, a partir da análise dos trabalhos selecionados foi elaborado um gráfico com os materiais que são objeto de estudo com relação à carbonatação e captura de carbono (Figura 3.3).

Figura 3.3 Materiais cimentícios objetos de estudo dos trabalhos selecionados

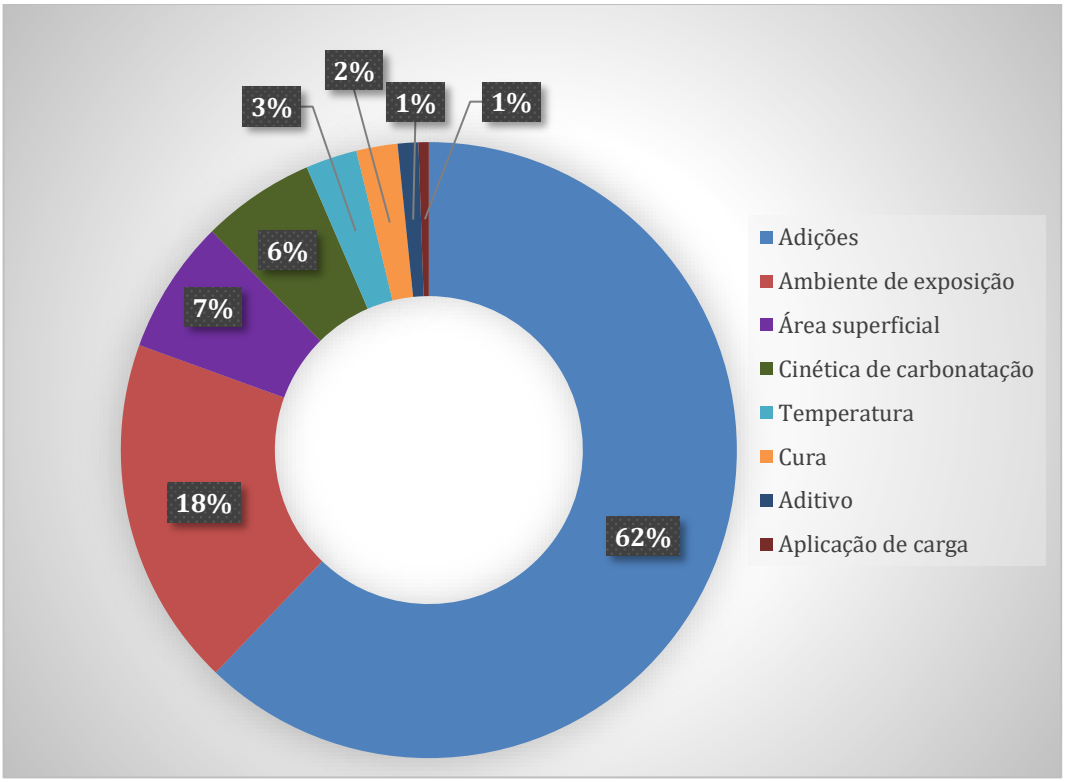


Fonte: O autor (2025).

A partir da Figura 3.3, pode-se concluir que os materiais mais estudados com a temática carbonatação e captura de carbono são os concretos, seguidos de pasta, argamassa e por último fibrocimento. É possível notar uma lacuna quanto ao estudo dessa temática em fibrocimento, sendo que por possuírem uma grande área exposta e serem muito esbeltos, são materiais que apresentam uma potencialidade para a captura de carbono.

Após análise dos materiais, seguiu-se para análise das variáveis estudadas pelos autores com relação à carbonatação e captura de carbono (Figura 3.4). Pode-se concluir que foram mais estudados os efeitos de adições (62%) e ambiente de exposição (18%) na carbonatação e captura de carbono, havendo uma lacuna quanto ao estudo da área superficial e cinética de carbonatação, sendo que dos trabalhos encontrados dos últimos 20 anos (2005-2025), apenas 7% e 6% dos trabalhos, respectivamente, tinham essas variáveis como a principal no estudo.

Figura 3.4 Variáveis dos trabalhos selecionados



Fonte: O autor (2025).

A partir da realização da análise bibliométrica, pôde-se ter uma visão geral dos estudos sobre carbonatação em materiais cimentícios, sendo possível identificar lacunas nesse campo do conhecimento, como a influência da área superficial e a cinética de carbonatação em fibrocimento.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

Nessa seção serão abordados tópicos referentes ao fibrocimento e captura de carbono.

4.1 COMPÓSITO CIMENTÍCIO REFORÇADO COM FIBRAS

O Compósito Cimentício Reforçado com Fibras é um tipo de material que pode ser composto por vários tipos de fibras em sua matriz cimentícia, como fibras de aço, sintéticas ou de resíduos. O uso das fibras melhora as propriedades mecânicas, incluindo resistência à tração, tenacidade e dissipação de energia, em comparação com o concreto simples (Labib, 2018).

Existem vários tipos de compósito reforçado com fibras, eles podem ser concretos com fibras, argamassa com fibras e fibrocimento (Figueiredo, 2011; Silva *et al.*, 2014; Tonoli, 2006).

O fibrocimento é um compósito cimentício formado por duas fases: uma matriz cimentícia e fibras. A matriz cimentícia é uma pasta produzida com cimento Portland e adições minerais de escória, pozolânicas e/ou calcíticas, não possuindo agregados (Souza, 2014). Na Figura 4.1 é apresentado um esquema da composição do fibrocimento.

Figura 4.1 Composição do fibrocimento



Fonte: Souza (2014, p. 36).

De acordo com a definição estabelecida, qualquer placa delgada que incorpore cimento em sua formulação é designada como cimentícia. Fundamentalmente, esses painéis são produzidos com uma mistura de cimento Portland, fibras celulósicas ou artificiais e agregados (Crasto, 2005). As placas cimentícias são uma variante do fibrocimento, sendo utilizadas em específico para divisórias e forros. Já os fibrocimentos são uma classificação mais geral, que podem incluir caixas d'água, tubos, telhas e outros elementos.

As placas cimentícias normalmente são aplicadas em vedações das edificações, proporcionando uma maior racionalização do espaço construído, melhor produtividade e menor tempo de execução. Além disso, é um material que proporciona uma diminuição do desperdício de materiais em comparação com outros métodos nos canteiros de obras (Fontenelle, 2012).

O processo original para fabricação de fibrocimento foi desenvolvido por Ludwig Hatschek no final do século XIX com base na indústria de papel, cujo processo recebeu o nome do inventor. Desde então, o processo Hatschek tem sido submetido a constantes melhorias para atingir alta produção e melhor desempenho sem afetar seu princípio básico: filtrar uma suspensão diluída de cimento em uma peneira cilíndrica rotativa. A fina camada obtida pela filtração é transferida e acumulada em prensas cilíndricas, até a espessura desejada.

Posteriormente a folha verde é cortada e conformada como uma folha ondulada ou painel plano (Figura 4.2) (Ikai *et al.*, 2010).

Figura 4.2 Máquina de Hatschek, rolo de prensagem, sistema de corte e processo de ondulação



Fonte: Ikai *et al.* (2010, p. 172) .

No mercado são oferecidos vários tipos de placas cimentícias, as principais são: placas cimentícias lisas, placas cimentícias texturizadas e placas cimentícias perfuradas. As placas cimentícias lisas são aplicadas como revestimento de paredes e lajes; as placas cimentícias texturizadas são caracterizadas por uma área superficial com relevos e texturas variáveis sendo aplicadas em fachadas, já as placas cimentícias perfuradas têm como aplicação paredes e lajes, contribuindo para o melhoramento acústico dos ambientes (Prado, 2024).

Com o objetivo de entender as propriedades estudadas na literatura das placas de fibrocimento são apresentadas na Tabela 4.1 as principais características físicas e mecânicas de placas cimentícias encontradas na literatura.

Tabela 4.1 Propriedades físicas e mecânicas de placas cimentícias

Referências	Reforço	Densidade aparente (g/cm³)	Porosidade (%)	Absorção de água (%)	Resistência à flexão (MPa)
Horváth e Alpár (2021)	Fibras lignocelulósicas mistas	1,2-1,38	-	22,01-27,06	0,9-2,99
Ridzuan *et al.* (2023)	Fibra de palma	1,3 (alvo)	-	-	3,51
Bilcati e Costa (2023)	Microfibra de celulose e microcelulose cristalina	1,52-2,67	-	-	4,91-9,23
Thepruttana *et al.* (2024)	Sisal revestido (0,25%)	1,7	-	15	5,58
Hamri *et al.* (2024)	Serragem de cedro (10-25%)	1,09-1,43	-	12,35-27,75	1,27-6,94
Taiwo *et al.* (2024)	Polpa Kraft e fibras de bambu	1,27-1,68	-	13,4-23,85	7,8-10,41
Xaysombath *et al.* (2025)	Polpa reciclada, bambu e eucalipto	1,29-1,68	15-45	-	6-12
Soares *et al.* (2025)	Fibra de sisal	1,75-1,82	14,86-21,01	13,40-13,80	9,2-14,4
Prasetyo *et al.* (2025)	Fibra de palmeira nipa	1,32-1,75	-	24,17-43,12	5,63-14,71
Parente *et al.* (2026)	Polpa de eucalipto	-	14-37	6,87-21,66	3,41-12,74

Fonte: O autor (2026)

De acordo com o levantamento apresentado na Tabela 4.1, pode-se concluir que as propriedades físico-mecânicas são influenciadas pelo tipo e teor de fibras utilizadas, sendo a densidade aparente na faixa 1,09-2,67 g/cm³, porosidade entre 14-45%, absorção de água 6,87-43,12% e resistência à flexão 0,9-12,74 MPa. Na literatura além dessas propriedades, são também estudadas a capacidade das placas cimentícias de absorverem CO_2.

As placas de fibrocimento podem ser uma ótima alternativa à captura de carbono, pois possuem uma estrutura mais esbelta, o que confere maior área de exposição ao ar, já que é de conhecimento que maior área de exposição facilita a carbonatação de materiais cimentícios (Possan, 2019). Outro fator que favorece o potencial desse material é que as fibras naturais que fazem parte da estrutura do fibrocimento facilitam a captura de carbono, isso ocorre devido à porosidade interna e arranjo espacial dos fios e poros interconectados dentro do sistema (Zhuge *et al.*, 2024).

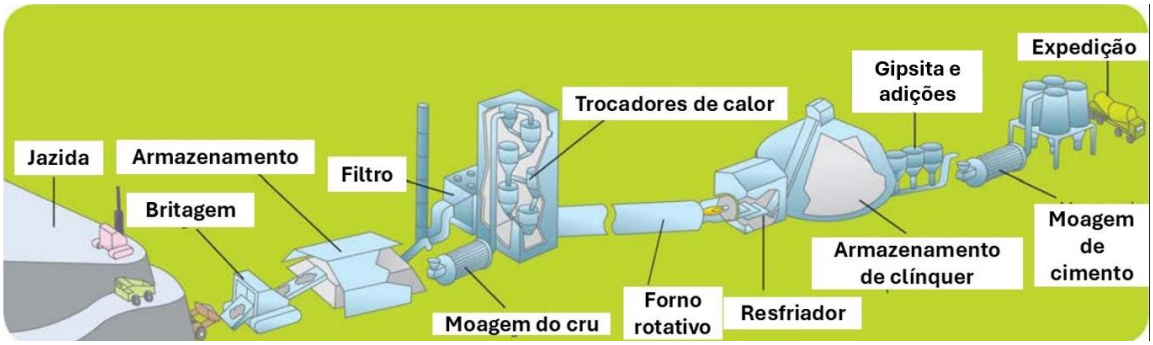
Um dos processos utilizados para o estudo da captura de carbono em placas de fibrocimento é a carbonatação acelerada. Quando testada em idade precoce (2 dias), essa técnica pode melhorar a durabilidade do compósito de fibrocimento, pois, durante a cura carbonatada, ocorre a redução da alcalinidade da matriz cimentícia pelo menor teor de hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$). Esse efeito está associado à densificação da matriz, promovida pela maior precipitação do carbonato de cálcio ($CaCO_3$), que é mais denso e estável que o $Ca(OH)_2$. Essa combinação explica a boa ligação fibra-matriz, as propriedades mecânicas melhoradas e a mitigação da degradação do compósito (Almeida *et al.*, 2013).

4.2 PRODUÇÃO DO CIMENTO PORTLAND

O cimento é um material inorgânico de granulometria fina que, quando homogeneizado com água, forma uma pasta que, após o processo de hidratação, se solidifica, resultando em um material resistente e estável. O cimento teve origem no Egito antigo, mas a forma na qual é utilizado atualmente em construções foi patenteada em 1824 pelo inglês Joseph Aspdin. Esse nome foi escolhido pelo construtor devido ao material ter aspecto (cor e consistência) que lembra as rochas da ilha britânica chamada Portland. O lançamento do cimento Portland no Brasil ocorreu a partir da criação da primeira fábrica destinada à sua produção no país, no ano de 1897 em Sorocaba (SP) (Battagin, 2025; Castro, 2021).

O cimento é obtido a partir da reação térmica entre dois componentes principais: calcário (carbonato de cálcio) e argila (silicato de alumínio e ferro). São desses materiais que se extraem os óxidos necessários para a produção do cimento (Castro, 2021) (Figura 4.3).

Figura 4.3 Processo de fabricação do cimento Portland



Fonte: Adaptado de ABCP (2020, p. 5).

Quando o carbonato de cálcio ($CaCO_3$) é aquecido a altas temperaturas, ele se decompõe em cal (CaO), liberando CO_2 na atmosfera. Da argila, extraem-se os óxidos SiO_2, Al_2O_3 e Fe_2O_3. Da areia também se obtém o SiO_2. Também podem ser encontrados tanto no clínquer como no cru, outros constituintes presentes nas cinzas dos combustíveis utilizados, como: MgO, SO_3, H_2O, K_2O e Na_2O, além de traços de outros elementos. Esse composto, proveniente das matérias primas que formam o cru (farinha), é então levado a fornos rotativos que podem atingir temperaturas superiores à 1450 °C, em um processo denominado clinquerização ou sinterização (Castro, 2021; Paula, 2009; Silva, 1994). É importante destacar que, na química do cimento, os óxidos presentes no clínquer e no cimento hidratado costumam ser representados de forma simplificada, utilizando abreviações conforme a Tabela 4.2.

Tabela 4.2 Abreviações dos óxidos

Óxido	Abreviação	Nome
CaO	C	Óxido de cálcio
SiO_2	S	Dióxido de silício
Al_2O_3	A	Óxido de alumínio
Fe_2O_3	F	Óxido de ferro
MgO	M	Óxido de magnésio
SO_3	$\bar{S}$	Trióxido de enxofre
H_2O	H	Água
K_2O	K	Óxido de potássio
Na_2O	N	Óxido de sódio

Fonte: Mehta e Monteiro (2006); Paula (2009)

Segundo Paula (2009), no processo de clinquerização as seguintes reações químicas ocorrem:

Equação 4.1 Decomposição do carbonato de magnésio (400 °C-600 °C)

$$MgCO_3 \rightarrow MgO + CO_2$$

Equação 4.2 Decomposição do carbonato de cálcio (800 °C-950 °C)

$$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$$

Equação 4.3 Formação do aluminato tricálcico (C_3A) e ferroaluminato tetracálcico (C_4AF) (1200 °C-1300 °C)

$$3CaO + Al_2O_3 \rightarrow 3CaO.Al_2O_3\ (C_3A)$$

$$4CaO + Al_2O_3 + Fe_2O_3 \rightarrow 4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3\ (C_4AF)$$

Equação 4.4 Formação do silicato dicálcico (belita) (1200 °C-1300 °C)

$$2CaO + SiO_2 \rightarrow 2CaO.SiO_2\ (C_2S)$$

Equação 4.5 Formação do silicato tricálcico (alita) (1350 °C-1450 °C)

$$3CaO + SiO_2 \rightarrow 3CaO.SiO_2\ (C_3S)$$

O componente mais importante que faz parte do cimento Portland é o clínquer. A partir das reações dos óxidos presentes na "farinha crua" no forno rotativo são formados os compostos que fazem parte do clínquer, sendo em média 75% de silicato dicálcico ($2CaO.SiO_2$) e silicato tricálcico ($3CaO.SiO_2$) e em menor quantidade aluminato tricálcico ($3CaO.Al_2O_3$) e ferro aluminato tetracálcico ($4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$). Lembrando que a alita (silicato tricálcico) é o componente principal do clínquer, pois a partir da sua hidratação gera como um dos produtos o C-S-H (Silicato de cálcio hidratado) o principal responsável pela resistência mecânica dos concretos aos 28 dias de cura (Behera *et al.*, 2021; Giammusso, 1992; Paula, 2009; Sac-Morane *et al.*, 2026). As características desses compostos são apresentadas no Quadro 4.1.

Quadro 4.1 Características dos principais compostos gerados no processo de clinquerização

Composto	Característica
C_3S	Endurecimento rápido, desprendimento moderado de calor de hidratação, altas resistências iniciais.
C_2S	Endurecimento lento, baixo calor de hidratação, altas resistências finais.
C_3A	Reação rapidíssima (controlada pelo gesso), calor de hidratação muito alto, resistência muito baixa.
C_4AF	Reação muito rápida, calor de hidratação alto, resistência desprezível.

Fonte: Adaptado de Giammusso (1992, p. 38).

O clínquer (Figura 4.4), após sair do forno rotativo é então triturado junto com sulfato de cálcio (responsável por controlar o início de pega) e outras substâncias (escória de alto-forno, pozolânicos, *filler* calcário, argilas calcinadas, cinzas de carvão mineral e cinzas de casca de arroz). As propriedades do cimento tanto no estado fresco, como no endurecido, dependem do tipo de adição no processo de fabricação (Castro, 2021; Paula, 2009).

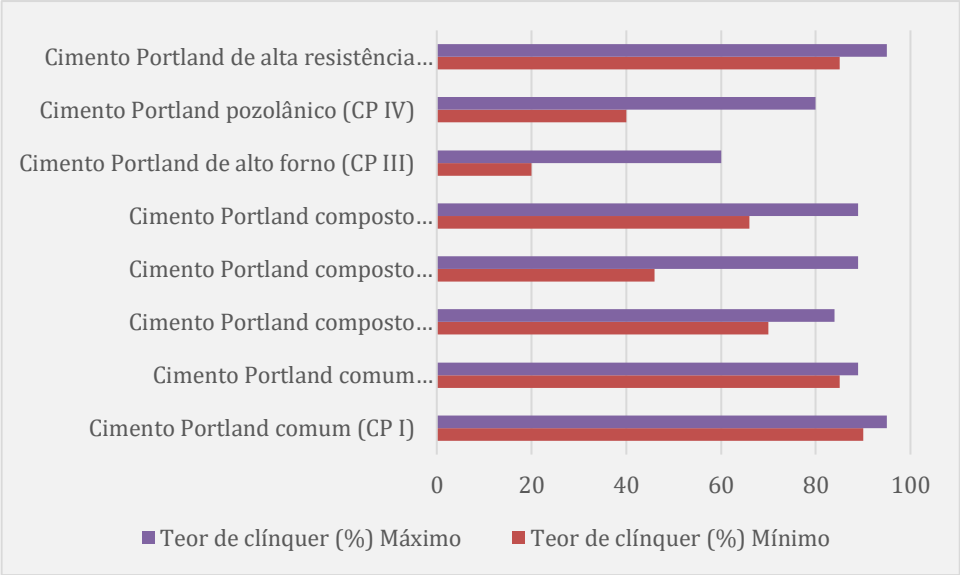
Figura 4.4 Grão de clínquer de cimento Portland com face cortada e polida



Fonte: Stutzman (2004, p. 958).

Cada tipo de cimento Portland é fabricado com diferentes teores de clínquer, na Figura 4.5 são apresentados os teores máximos e mínimos de clínquer para cada tipo de cimento, considerando um teor de 5% de sulfato de cálcio em todos os tipos de cimento (Possan, 2019).

Figura 4.5 Teor de clínquer por tipo de cimento Portland

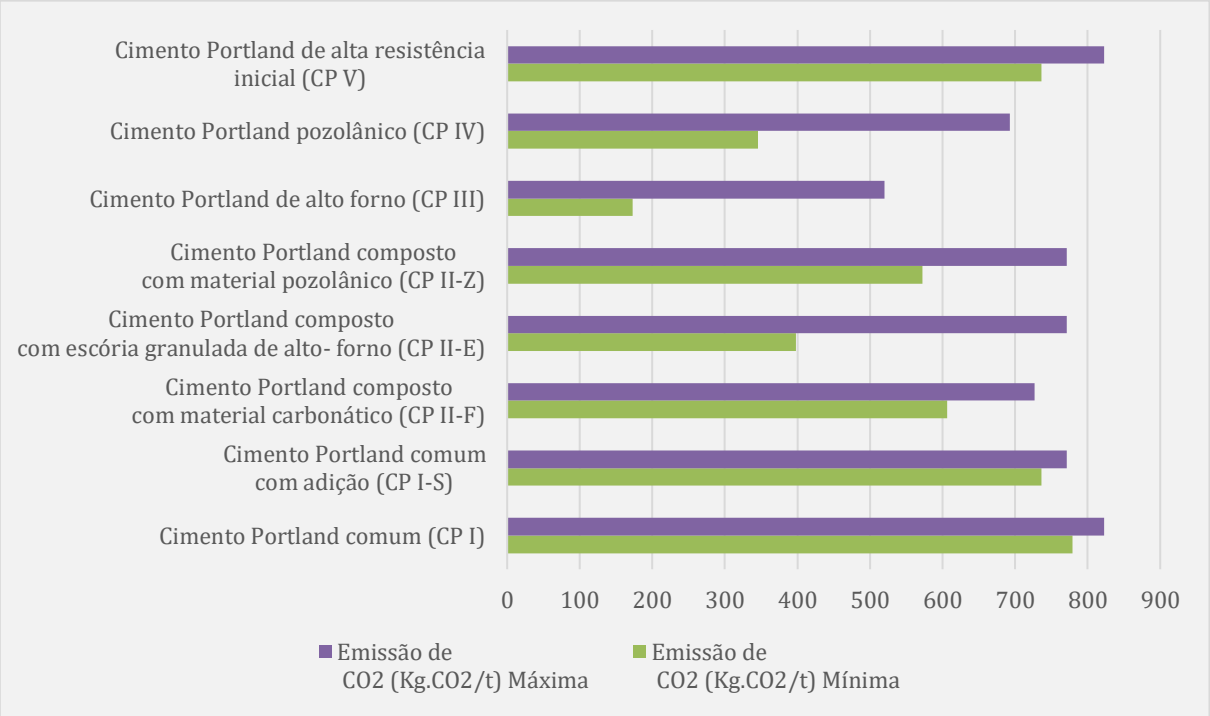


Fonte: Adaptado de NBR 16697 (ABNT, 2018)

De acordo com a Figura 4.5, os cimentos com maiores teores de clinquer são o CP I (90-95%) e o CP V (85-95%). No processo de produção do clínquer há emissões de carbono, tanto nas reações químicas, quanto no próprio funcionamento do forno, já que geralmente são utilizados combustíveis fósseis. A indústria cimenteira é responsável por 7% das emissões globais de carbono, sendo que do total, 90 % do CO_2 estão relacionados ao processo de clinquerização: 50% do total ao processo de calcinação e 40% à queima de combustíveis fósseis (Verdiani *et al.*, 2025).

Diante disso, quanto maior o teor de clínquer em um cimento, maior sua pegada de carbono, o que é demonstrado nos dados apresentados na Figura 4.6, em que os cimentos com os maiores teores de clínquer são os que possuem maiores emissões de CO_2, CP I (779-823 kg.CO_2/t) e CP V (736 – 823 kg.CO_2/t). Os dados foram calculados considerando uma emissão de 866 kg.CO_2/t de clínquer em sua produção (Possan, 2019).

Figura 4.6 Emissão de CO_2 por tonelada de clínquer



Fonte: Adaptado de Possan (2019)

4.3 HIDRATAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND

A hidratação do cimento Portland é um processo que possui várias etapas. A reação ocorre quando o cimento entra em contato com a água, a partir desse momento, começa o processo de solidificação, fazendo com que esse material adquira resistência mecânica (Bullard *et al.*, 2011; Piqué e Vázquez, 2012). De acordo com Taylor (1997), o termo hidratação, no contexto da química do cimento, refere-se às transformações que ocorrem quando um cimento anidro, ou uma de suas fases, é misturado com água, resultando em compostos hidratados. No entanto, essas reações são geralmente mais complexas. Além disso, segundo Mehta e Monteiro (2006), diversos fatores afetam a reatividade do cimento Portland, como tamanho das partículas, temperatura de cura e estrutura cristalina. Essas particularidades explicam por que compostos químicos semelhantes podem apresentar diferentes reatividades.

Segundo Bullard *et al.* (2011), a hidratação do cimento envolve diversas reações químicas que são influenciadas pela natureza do processo e pelo estado do sistema no momento da hidratação. As reações químicas envolvidas são classificadas em: dissolução/dissociação, difusão, crescimento, nucleação, complexação e adsorção.

O mecanismo de dissolução, ocorre com a hidratação por meio da solução de compostos anidros em seus constituintes iônicos e a formação de hidratos em uma solução supersaturada. Já na hidratação topoquímica ou em estado sólido, as reações ocorrem diretamente na superfície dos compostos anidros do cimento, sem que estes entrem em solução. Nos estágios iniciais da hidratação, o mecanismo dominante é o que ocorre por meio da solução. Em idades mais avançadas, com a restrição da mobilidade iônica na solução, a hidratação das partículas residuais de cimento passa a ocorrer principalmente por reações em estado sólido (Mehta e Monteiro, 2006).

Segundo Garcia (2015), a reação de hidratação do cimento Portland ocorre de modo complexo. Por isso, geralmente é explicado o processo de hidratação individual de cada composto do clínquer. Para facilitar o entendimento, esse processo é apresentado de modo simplificado nas seguintes etapas:

(1) Hidratação dos aluminatos e ferroaluminatos

No processo de hidratação do aluminato tricálcico (C_3A), ocorre a liberação de muito calor de hidratação (867 J/g ou 207 cal/g) (Garcia, 2015; Neville e Brooks, 2013). A reação química, segundo Neville e Brooks (2013), pode ser simplificada pela Equação 4.6 (a). No

entanto, a reação instantânea do C_3A com a água não é útil para a construção civil, pois a pega do cimento ocorre em um tempo muito curto, o que torna o uso de materiais cimentícios como argamassa e concreto inviável em obras. Sendo assim, é incorporado o sulfato de cálcio (gesso) ao clínquer, para retardar a pega. Uma vez adicionado, a reação química de hidratação é representada levando em consideração a gipsita, conforme Equação 4.6 (b) (Garcia, 2015; Mehta e Monteiro, 2006).

Equação 4.6 Hidratação do aluminato tricálcico (C_3A)

$C_3A + 6H \rightarrow C_3AH_6$	**(a)**
$C_3A + 3C\bar{S}H_2 + 26H \rightarrow C_6A\bar{S}_3H_{32}$ (etringita)	**(b)**

O produto da reação entre o C_3A, gipsita e água é chamado de etringita (Equação 4.6 (b)). Após a redução do teor de sulfato, a etringita torna-se instável e é convertida em monosulfoaluminato (Equação 4.7) (Kim, 2010).

Equação 4.7 Conversão da etringita em monosulfoaluminato

$2C_3A + C_6A\bar{S}_3H_{32} + 4H \rightarrow 3C_4A\bar{S}H_{12}$

Quanto à hidratação do ferroaluminato tetracálcico (C_4AF), ocorre de modo semelhante ao C_3A, diferindo quanto a menores velocidade e calor de hidratação. É possível a formação de dois hidratos, dependendo da disponibilidade de gesso (Equação 4.8) (Kim, 2010; Penn state, 2025).

Equação 4.8 Hidratação do ferroaluminato tetracálcico (C_4AF)

(Etringita + hidróxido de alumínio férrico)
$C_4AF + 3C\bar{S}H_2 + 21H \rightarrow C_6(A,F)\bar{S}_3H_{32} + (F,A)H_3$
(Granadas)
$C_4AF + C_6(A.F)\bar{S}_3H_{32} + 7H \rightarrow 3C_4(A,F)\bar{S}H_{12} + (F,A)H_3$

(2) Hidratação das fases silicato de cálcio

Neville e Brooks (2013) apontam que os produtos principais das reações de hidratação dos silicatos de cálcio são o hidróxido de cálcio (CH) e o silicato de cálcio hidratado (C-S-H).

As reações da alita e belita, respectivamente, são representadas de forma simplificada pela Equação 4.9 (Garcia, 2015).

Equação 4.9 Hidratação dos silicatos de cálcio

$2C_3S + 6H \rightarrow C_3S_2H_3 + 3CH$	**(alita)**
$2C_2S + 4H \rightarrow C_3S_2H_3 + CH$	**(belita)**

O C-S-H compõe de 50% a 60% do volume de sólidos em uma pasta de cimento Portland completamente hidratada, o que a torna a fase mais importante na determinação das propriedades da pasta. Trata-se de um produto bastante diverso, pois pode ser formado com diferentes razões Ca/Si, que geralmente variam entre 1,5 e 2,0, além de variações no teor de água. A morfologia do C-S-H também varia de fibras pouco cristalinas a redes reticulares (Mehta e Monteiro, 2006).

O hidróxido de cálcio (portlandita), que representa cerca de 20% a 25% do volume de sólidos na pasta hidratada, tende a formar grandes cristais, com uma morfologia distinta de prisma hexagonal. Em comparação ao C-S-H, o potencial de contribuição de resistência é limitado, devido sua área superficial ser consideravelmente menor (Mehta e Monteiro, 2006).

4.4 CARBONATAÇÃO DAS FASES HIDRATADAS

A carbonatação é o processo de reação química do dióxido de carbono com as fases hidratadas do cimento, onde o carbono é incorporado à composição do cimento, e outros elementos podem ser liberados. Neste processo também ocorre descalcificação, onde por meio de uma reação química, os compostos hidratados do cimento perdem o cálcio de sua composição, para a formação dos compostos carbonatados. Esta reação resulta em perda de volume e água da matriz cimentícia (Souza, 2014).

Na reação de carbonatação, é importante a presença de água, pois o CO_2 interage com os produtos de hidratação do cimento na solução intersticial (Houst e Wittmann, 2002). Com a matriz cimentícia úmida, o dióxido de carbono se dissolve na água presente nos poros do cimento, resultando a partir de reação química o ácido carbônico (H_2CO_3) (Wang *et al.*, 2025). O mecanismo ocorre a partir da reação do ácido carbônico com o hidróxido de cálcio (portlandita), resultando na formação do carbonato de cálcio. Isso acontece porque, no balanço final da reação, uma molécula de água é substituída por uma molécula de dióxido de carbono, resultando assim no aumento de massa do compósito, uma vez que o peso molecular da água

(18,02 g/mol) é menor do que o peso molecular do dióxido de carbono (44,01 g/mol) (Persson, 2002). O mecanismo de carbonatação da portlandita é representado pela Equação 4.10 (Souza, 2014):

Equação 4.10 Reações químicas da carbonatação

$CO_2 + H_2O \rightarrow H_2CO_3$	**Formação de ácido carbônico**
$2H_2CO_3 + Ca(OH)_2 \rightarrow Ca(HCO_3)_2 + 2H_2O$	**Carbonatação do hidróxido de cálcio**
$Ca(HCO_3)_2 + Ca(OH)_2 \rightarrow 2CaCO_3 + 2H_2O$	**Carbonatação do bicarbonato de cálcio**

Ao mesmo tempo em que ocorre a carbonatação do hidróxido de cálcio, outros compostos hidratados do cimento são carbonatados, como o monosulfoaluminato, a hidrogranada (aluminato de cálcio hidratado), etringita e o C-S-H (Hoppe Filho, 2008).

Em compósitos cimentícios, o processo de carbonatação ocorre ao longo da vida útil da estrutura e quando se executa a demolição para reformas ou outros fins. A carbonatação tem início na parte superficial da estrutura e, com o tempo, avança para o interior. O desenvolvimento desse processo depende da facilidade com que o dióxido de carbono consegue penetrar, o que está relacionado à umidade, porosidade e à composição química dos materiais utilizados na produção do compósito (Neves Junior, 2014 apud Mazurana, 2019).

Um dos fatores que mais influenciam a evolução da carbonatação é a umidade. Geralmente, quando o compósito cimentício é exposto em um local protegido da chuva, a frente de carbonatação tende a ser mais profunda em comparação com ambientes externos desprotegidos. Essa diferença se deve ao excesso de água nos poros, provocado pela chuva e alterações de umidade no interior do concreto (García *et al.*, 2010). Qiu (2020) complementa que o teor de umidade relativa ideal para a ocorrência da carbonatação situa-se na faixa de 50 a 70%. Além disso, é importante considerar que condições extremas podem impedir a carbonatação de ocorrer: a saturação de água nos poros em ambientes muito úmidos dificulta a entrada de CO_2, enquanto em ambientes muito secos, a umidade no interior do material cimentício é insuficiente para permitir a reação de carbonatação.

A carbonatação natural ocorre de maneira lenta, podendo levar anos para que a carbonatação da estrutura seja completa. Em alguns casos, os pesquisadores podem recorrer a carbonatação acelerada, que por envolver uma maior concentração de dióxido de carbono, permite que a reação ocorra em minutos (Kaliyavaradhan e Ling, 2017). Além disso, alguns outros fatores podem afetar a carbonatação em concreto, argamassa e fibrocimento. Em estudo desenvolvido por Werle, Kazmierczak e Kulakowski (2011), sobre a carbonatação de concreto

com agregado reciclado de concreto (ARC), verificou-se que a resistência do concreto de origem do agregado exerce influência significativa na velocidade de carbonatação. Quando o ARC é proveniente de concreto com resistência igual ou superior ao novo concreto onde foi incorporado, a velocidade de carbonatação é similar ao concreto de referência.

Por outro lado, quando o ARC é proveniente de concreto com resistência inferior ao novo concreto onde foi incorporado, a velocidade de carbonatação é superior ao do concreto de referência. Os autores explicam que o ARC de maior resistência possui menor porosidade, já que foi produzido com uma relação a/c (água/cimento) mais baixa do que a utilizada na produção do novo concreto. Assim, a menor porosidade dificulta a entrada de CO_2 na matriz cimentícia. O contrário ocorre com o ARC de menor resistência, produzido com uma maior relação a/c, o que resulta em maior porosidade e, consequentemente, facilita a penetração do dióxido de carbono (Werle, Kazmierczak e Kulakowski, 2011).

Já com relação ao fibrocimento, a carbonatação acelerada possibilita a produção desse compósito em menores idades, sem prejudicar suas propriedades mecânicas. Em estudo desenvolvido por Filomeno (2023) sobre a avaliação da carbonatação acelerada em fibrocimento, esse método de cura possibilitou ganhos de resistência em um período reduzido (3 dias), alcançando resultados semelhantes aos do fibrocimento curado pelo método tradicional (7 e 28 dias). Além disso, o ensaio de envelhecimento acelerado (200 ciclos) não influenciou na queda de resistência do fibrocimento curado por meio de carbonatação acelerada.

4.4.1 Cinética de carbonatação

A cinética de carbonatação pode ser definida, de forma aproximada, como um processo de difusão de um gás (CO_2) através de um material poroso com um determinado teor de umidade (Houst e Wittmann, 2002). Assume-se que a reação do dióxido de carbono dissolvido ocorre mais rapidamente do que o processo de difusão. Aplicando a primeira lei de Fick, a seguinte equação pode ser obtida após a integração (Kropp, 1995):

Equação 4.11 Profundidade carbonatada

$$x = \sqrt{\frac{2Dc}{a}}\sqrt{t}$$

Onde $\boldsymbol{x}$ é a profundidade carbonatada no tempo $\boldsymbol{t}$, $\boldsymbol{D}$ a difusividade efetiva do CO_2, $\boldsymbol{c}$ sua concentração na atmosfera e $\boldsymbol{a}$ corresponde a concentração dos compostos reativos. Esta equação pode ser descrita na forma mais conhecida:

Equação 4.12 Profundidade carbonatada simplificada

$x = A\sqrt{t}$	Onde: $A = \sqrt{\frac{2Dc}{a}}$

Aplicando a primeira lei de Fick, foram realizadas simplificações, embora o coeficiente de difusão (D) não seja constante, variando com o tempo (grau de hidratação), localização (efeito da cura, efeito parede ou *"Wall effect"*) e teor de umidade. O aumento da temperatura na faixa entre 20°C e 60 °C acelera a difusão de CO_2 enquanto reduz a umidade, resultando em mais espaço para a difusão do gás, ocasionado assim, a aceleração ainda maior da difusividade. No entanto, baixos níveis de umidade relativa do ar, reduzem os efeitos da alta temperatura sobre a cinética de carbonatação. Com o tempo, a carbonatação atinge uma profundidade em que a microestrutura é relativamente homogênea. Nem o efeito parede, nem grandes variações do grau de hidratação precisam ser levadas em consideração (Houst e Wittmann, 2002; Qiu, 2020).

Na prática, porém, a carbonatação não atinge um valor preciso de profundidade, conforme Equação 4.12. Após um tempo suficientemente longo, podem ser identificadas três zonas. A primeira, localizada próxima à superfície, por ser exposta ao ar, é totalmente carbonatada, ou seja, apresenta teor de carbonato constante. A segunda zona, chamada de frente de carbonatação, funciona como uma zona de transição, pois o grau de carbonatação diminui gradualmente até zero. Por fim, na terceira zona não há carbonatação. Uma vez que isso ocorre, a carbonatação nunca é 100% completa. A profundidade e o formato da frente de carbonatação variam devido diversos fatores, como o tipo de exposição e a composição do material. Devem ser considerados ainda a porosidade, tamanho e distribuição dos poros e a variabilidade local das propriedades do material (Houst e Wittmann, 2002).

4.4.1.1 Efeito da porosidade e área superficial exposta na cinética de carbonatação

A porosidade em materiais cimentícios tem grande influência na velocidade de carbonatação. Materiais cimentícios com uma quantidade relativamente alta de poros finos apresentam um volume de poros preenchido com água maior devido à condensação do que um material com uma estrutura de poros mais grosseira na mesma umidade relativa. Como resultado, a carbonatação de uma argamassa ou concreto com uma grande quantidade de poros finos é mais retardada com um aumento de umidade relativa do que a carbonatação de argamassa ou concreto com uma grande quantidade de poros grosseiros (Leemann e Moro, 2017)

No estudo de Wang *et al.* (2019), foram avaliadas as influências da porosidade da pasta de cimento, controlada pela razão água/cimento (a/c), na carbonatação e na evolução da microestrutura da pasta. Diferentes relações a/c foram adotadas para preparar as amostras de pasta: 0,30 a 0,60. As amostras foram inicialmente curadas em água por 1 dia, submetidas à cura padrão (20 ± 2 °C, 95% UR) e, em seguida, secas em tambor com aquecimento elétrico à temperatura constante de 60 °C por 2 dias, com o objetivo de evaporar a água livre da estrutura dos poros antes da carbonatação acelerada, evitando prejuízos à difusão de CO_2.

Na preparação das amostras, cinco lados dos corpos de prova foram revestidos com parafina derretida e um lado foi deixado descoberto para a cura por carbonatação. A concentração, pressão de CO_2 e a UR (umidade relativa, controlada por solução saturada de KCl) foram de 99,9%, 0,3 MPa e 80,25 ± 0,41%, respectivamente. Para calcular a eficiência de carbonatação, os autores utilizaram a Equação 4.13 (Wang *et al.*, 2019) .

Equação 4.13 Eficiência de carbonatação

$$CO_2\ wt\ \% = \frac{m_1 + m_{vap} + m_{KCl1} - m_0 - m_{KCl0}}{m_0}$$

Onde m_1 é o peso da pasta carbonatada; m_{vap} é o peso do vapor coletado da parede interna do reator; m_{KCl1} é o peso da solução saturada de KCl após a carbonatação; m_0 é o peso da pasta antes da carbonatação; e m_{KCl0} é o peso da solução saturada de KCl antes da carbonatação.

Por meio da porosimetria por intrusão de mercúrio, os autores descobriram que a relação água/cimento está relacionada com a porosidade total das amostras e que o volume dos poros com diâmetro maior que 200 nm (nanômetros) aumenta com a razão a/c, o que foi apontado

como o principal fator que acelerou a taxa de carbonatação. Os autores também concluíram que a eficiência de carbonatação aumenta até a relação a/c 0,55, depois diminui, pois o teor de reagentes minerais como o C_2S e o C_3S são reduzidos (Wang *et al.*, 2019).

No estudo de Barbosa (2021), a autora analisou o efeito da pintura na difusão do CO_2. Foram produzidas argamassas com traço 1:1:6 e 1:2:9 (cimento:cal:areia). Os corpos de prova foram mantidos em carbonatação natural e acelerada por períodos de 28, 101, 127 e 164 dias. A autora concluiu em seu estudo que a argamassa sem proteção superficial, após 164 dias de exposição e com profundidade de carbonatação de 25 mm, é capaz de capturar até 44,07% a mais de CO_2 emitido, em comparação às argamassas protegidas por meio de pintura.

As tintas semibrilho resultaram em maior proteção a argamassa em comparação às tintas foscas, o que se explica pelo fato de a tinta fosca possuir maior quantidade de pigmento no filme e, portanto, a eficiência da película formada é menor, pois tem menos filme para proteger a área superficial. Com isso, quanto a velocidade de carbonatação, as argamassas acrílicas de acabamento semibrilho apresentaram a maior redução, chegando a diminuir em até 3,6 vezes na difusão de CO_2 para o interior da matriz cimentícia, em comparação com argamassas sem proteção superficial (Barbosa, 2021) .

4.4.1.2 Efeito do pré-condicionamento, pressão de compactação, concentração e pressão de CO_2 na cinética de carbonatação

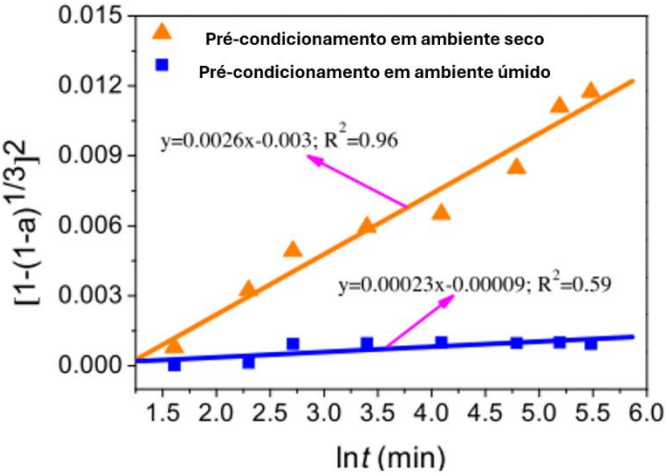
No estudo de Shi *et al.* (2012), foram avaliados os fatores que afetam a cinética da cura por CO_2 em concreto. Os autores produziram concreto com traço 1:3:2,5:0,35, (cimento: areia: cascalho: água). Para o estudo da cura por carbonatação, os corpos de prova passaram por um processo de pré-condicionamento em câmara com umidades relativas de 25%, 50% e 75%, que foi utilizado para ajustar a umidade dos corpos de prova e atingir maior grau de cura por dióxido de carbono. Os tempos de perda de umidade foram de 1, 2, 3, 4, 6, 8, 16 e 24h. E a cura dos corpos de prova por meio de CO_2 ocorreu mediante a exposição dos corpos de prova a uma pressão de 0,2 MPa com concentração de CO_2 constante, testadas nos teores de 5%, 20%, 50% e 99,5%.

No estudo foram avaliados os efeitos do pré-condicionamento, da pressão de compactação, concentração e pressão de CO_2 na cinética de cura por dióxido de carbono. Quanto ao pré-condicionamento: As reações entre o CO_2 e os minerais de clínquer ocorreram rapidamente no início, mas os produtos de reação revestiram a superfície de partículas do cimento, dificultando as reações posteriores. Os autores concluíram que, ao reduzir a saturação

dos poros, de 100% para teores de umidade relativa intermediários (50-75%), obtidos em pré-condicionamento , aumenta-se o coeficiente de difusão efetivo do CO_2, facilitando a penetração do gás (Shi *et al.*, 2012) .

Porém, o teor de água restante presente nos poros da matriz cimentícia ainda é suficiente para promover as reações de carbonatação, ou seja, tanto a saturação dos poros, quanto os poros totalmente secos impedem que as reações ocorram. Na figura 4.7 é apresentada a cinética de cura do concreto com CO_2. A expressão do eixo Y, faz parte de um modelo cinético proposto pelos autores para descrever o processo de cura do concreto com o uso de CO_2, o modelo foi derivado da teoria de difusão de sólidos de Jander. Portanto, na Figura 4.7 é apresentada o grau de cura por CO_2 (eixo Y) ao longo do tempo (eixo X) (Shi *et al.*, 2012).

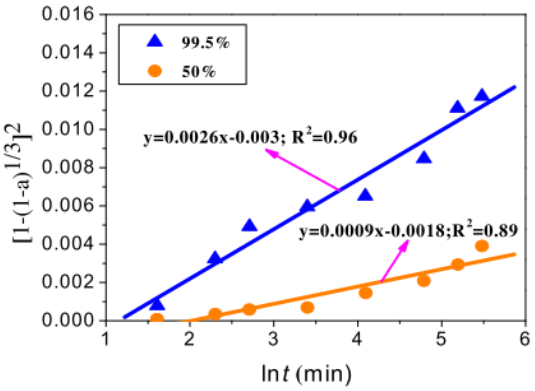
Figura 4.7 Efeito do pré-condicionamento na cinética de cura do concreto por CO_2



Fonte: Shi *et al.*, (2012, p. 28)

Com relação a pressão de compactação, quanto maior for a pressão, menor será o grau de cura por CO_2, pois a redução da porosidade dificulta a penetração do gás. Em relação à concentração de dióxido de carbono, maiores teores desse gás ocasionam na elevação da pressão parcial do CO_2 na superfície do concreto, aumentando o gradiente de concentração de CO_2 entre o exterior e o interior dos poros. Quanto maior o gradiente, maior o fluxo difusivo, assim o CO_2 penetra com maior velocidade e em maior quantidade nos primeiros momentos (Shi *et al.*, 2012). Na Figura 4.8 é apresentada a relação entre o efeito da concentração de CO_2 (99,5% e 50%) e a cinética da cura dos corpos de prova de concreto.

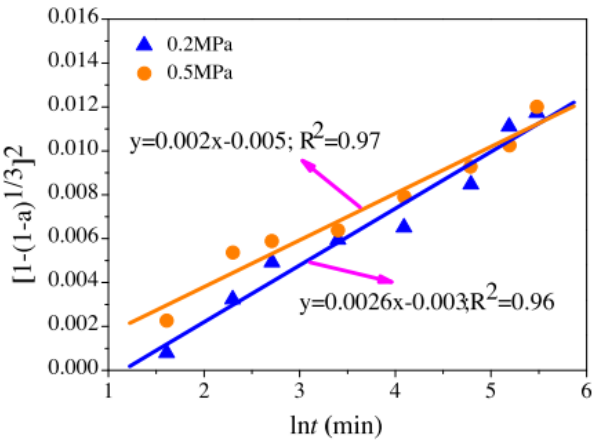
Figura 4.8 Efeito das concentrações de CO_2 na cinética de cura das amostras



Fonte: Shi *et al.*, (2012, p. 30)

O Grau de cura (grau de carbonatação devido ao processo de carbonatação acelerada com CO_2) aumenta com a pressão de CO_2, para pressão de até 0,2 MPa; no entanto, a variação da velocidade de reação é pequena. De acordo com o gráfico da Figura 4.9, a inclinação da reta é de 0,0026 para pressão de 0,2 MPa e 0,002 para pressão de 0,5 Mpa (Shi *et al.*, 2012).

Figura 4.9 Cinética de reação para concreto curado com diferentes pressões de CO_2



Fonte: Shi *et al.*, (2012, p. 31)

4.4.1.3 Efeito de fissuras na cinética de carbonatação

Dois tipos de fissuras podem ser utilizados para estudar os seus efeitos em materiais cimentícios: as fissuras naturais e as artificiais. As fissuras naturais proporcionam uma simulação mais próxima da realidade, como geometria tortuosa, distintas, largura e

repetibilidade difíceis de controlar. Já as artificiais possuem características uniformes e largura mais fácil de controlar (Bogas, Carriço e Pontes, 2019).

No estudo de Bogas, Carrico e Pontes (2019), foi avaliado o efeito de fissuras artificiais e naturais, na faixa de 0,1-0,3 mm, obtidas pelo método do entalhe e por ensaios de flexão em concretos com variadas razões a/c (0,35 e 0,55), conteúdo de cimento (450 e 350 kg/m³) e tipos de agregados (agregado de argila expandida, agregado de ardósia expandida, cascalho fino e grosso 1 e 2). As fissuras artificiais foram produzidas pelo método do entalhe no concreto fresco, utilizando uma placa fina de latão com 100 mm de largura e espessura 0,1, 0,2 e 0,3 mm. A placa era inserida a 20 mm de profundidade no concreto fresco; após secagem, o corpo de prova foi serrado, resultando em uma profundidade final de 10 mm. O tempo de remoção da placa variou de 4 a 5h, para evitar o fechamento da fissura.

Os resultados mostraram que a carbonatação aumentou com o aumento da abertura das fissuras. Para fissuras maiores que 0,1 mm, a resistência à difusão de CO_2 foi menos afetada pelas características das fissuras. Em comparação com o concreto não fissurado, a redução do tempo estimado para atingir uma determinada profundidade de carbonatação, dependendo do comprimento e profundidade de carbonatação, pode ser superior a 80%. Isso se deve ao fato de que a abertura das fissuras facilita a entrada do CO_2, o que acaba acelerando a carbonatação da matriz cimentícia (Bogas, Carriço e Pontes, 2019).

Como visto, nos estudos apresentados, a cinética de carbonatação pode ser mensurada através de equações originadas a partir da primeira lei de Fick, sendo sua velocidade influenciada por fatores como porosidade, teor de CO_2, local de exposição e variação da área superficial, seja por maior área exposta ao ambiente ou através do aumento da área por meio de fissuras naturais ou artificiais.

4.5 FÍLER CARBONÁTICO

O fíler carbonático, fíler calcário ou calcário ultrafino, como também é conhecido na literatura é um material carbonático rico em carbonato de cálcio é obtido pela trituração e moagem do calcário natural (ABCP, 2002; Eckhardt, 2025; Rong *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2018). O calcário é composto principalmente por fragmentos de esqueletos de organismos. Calcita, aragonita, vaterita e carbonato de cálcio amorfo são as formas disponíveis na composição mineral do calcário. O calcário pode ser formado a partir de organismos marinhos e ambientes lacustres. Também pode ser formado pela precipitação química de calcita ou

aragonita. Com base no método de formação, o calcário pode ser cristalino, clástico, granular ou maciço (Wang *et al.*, 2018).

De acordo com Lins (2017) *apud* Eckhardt (2025), o fíler influencia no material cimentício mudando o comportamento físico e químico, pois a área superficial específica, o diâmetro e a distribuição granulométrica das partículas podem alterar a hidratação do cimento, além disso quanto menor for esse diâmetro, maior a influência no processo de hidratação. No estudo de Zhang, Wang e Chen (2024), o fíler carbonático foi apresentado como tendo tamanho de partícula 2,653 μm e sua composição química apresentada na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 Composição química do fíler carbonático

Referência	CaO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3	LOI (950°C)
Zhang, Wang, Chen (2024)	50,29	1,37	0,43	0,15	4,40	-	0,08	-	43,12

Fonte: O autor (2026).

De acordo com a Tabela 4.3, o fíler carbonático é composto principalmente por óxido de cálcio (CaO) e óxido de magnésio (MgO). O fíler carbonático é estudado na literatura com o objetivo de melhorar as propriedades químicas e físicas dos materiais cimentícios. A adição de uma quantidade adequada de fíler carbonático ao concreto pode desempenhar múltiplas funções, como nucleação, preenchimento, diluição e hidratação, e melhorar a qualidade geral dos materiais à base de cimento (Rong *et al.*, 2023).

Em estudo com pastas de cimento pura e com incorporação parcial de fíler carbonático, dados de calorimetria e de pega mostraram que o pó de calcário mais fino reduziu de modo significativo o período de indução e o tempo de pega da pasta, além de acelerar a reação de hidratação inicial. Foi demonstrado que as taxas de nucleação e crescimento cristalino, reação na interface e difusão aumentaram, e a duração do processo diminuiu com o aumento da finura do fíler carbonático. Isso indicou que o aumento da taxa da reação de hidratação inicial estava intimamente relacionado à nucleação acelerada de partículas menores de pó de calcário (Zhang, Wang e Chen, 2024).

Análise de TG/DTG (Termogravimetria e Termogravimetria derivada) revelaram que pó de calcário mais fino geram mais produtos de hidratação e melhoram o grau de hidratação nos estágios posteriores. Além disso, em condições favoráveis à nucleação e com o aumento das taxas efetivas, os produtos de hidratação das pastas de pó de calcário ultrafino foram

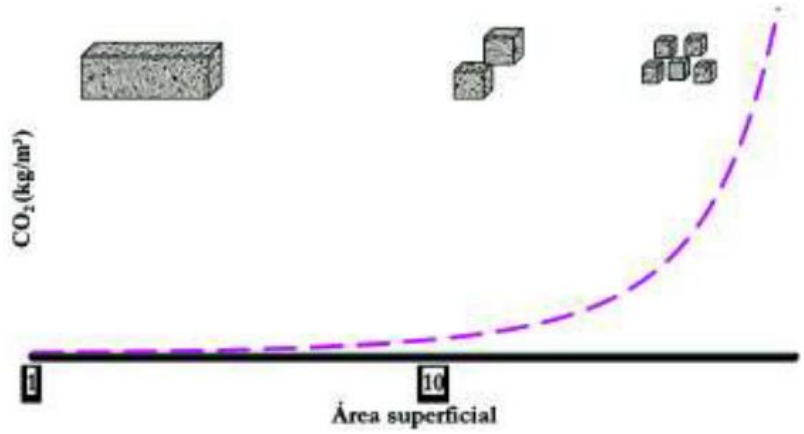
formados rapidamente, superando os da pasta pura nos estágios finais (Zhang, Wang e Chen, 2024).

No estudo de Rong *et al.,* (2023), foi concluído que a incorporação de uma quantidade adequada de fíler carbonático pode reduzir a porosidade inicial e formar uma microestrutura mais densa, inibindo assim o desenvolvimento da lixiviação em ambiente de imersão. No entanto, o próprio fíler apresentou baixa atividade, e a adição excessiva enfraqueceu o desempenho de lixiviação. Com base nos resultados dos ensaios realizados pelos autores, a adição ideal de fíler carbonático em ambiente de imersão é de 20%.

4.6 CAPTURA DE CO_2 VIA CARBONATAÇÃO

A captura de carbono em materiais cimentícios é influenciada pela área exposta do material ao dióxido de carbono, sendo esta, diretamente proporcional a captura (Possan, 2019). Na Figura 4.10 é apresentada um esquema representativo.

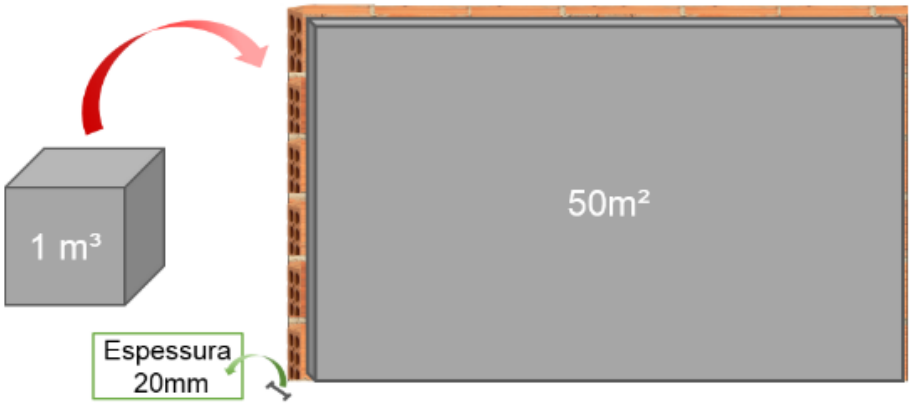
Figura 4.10 Efeito da área superficial na captura de CO_2 devido à carbonatação



Fonte: Possan (2019, p. 65).

Essa relação é expressa em metros quadrados/metros cúbicos de material (m^2/m^3), ou seja, a quantidade de metros quadrados exposta por um metro cúbico de um material cimentício. Na Figura 4.11 é apresentado um exemplo de um revestimento argamassado, em que um metro cúbico pode revestir 50 m^2 de uma parede em alvenaria, caso a espessura do revestimento adotado seja de 20 mm (Possan, 2019).

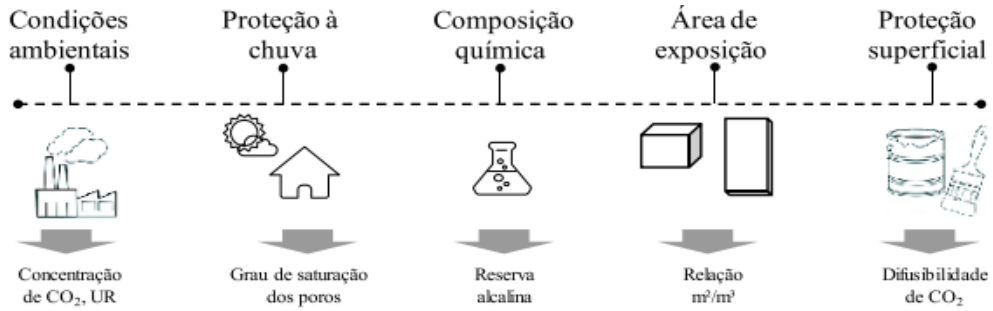
Figura 4.11 Relação entre 1 m^3 de argamassa e sua área aplicável considerando espessura de 20 mm



Fonte: Mazurana (2019, p. 52).

Já para elementos estruturais como vigas e pilares a relação é menor. Segundo Andrade e Sanjuán (2018), a sugestão a ser adotada pode ser de uma relação igual a 3, ou seja, 1 m³ de área de concreto reveste 3 m². É importante destacar que quanto menor for essa área, menor é a captura de CO_2. O cálculo apresentado é um importante parâmetro utilizado nos cálculos de captura de CO_2, uma vez que a carbonatação ocorre de maneira lenta no processo natural, do exterior para o interior, dependendo de diversos fatores (Figura 4.12). Os revestimentos em argamassa despertam grande interesse dos pesquisadores, uma vez que a aplicação ocorre em pequenas espessuras, apresentando grande área de exposição ao CO_2 sendo uma boa situação para o sequestro de carbono em menor tempo (Possan, 2019).

Figura 4.12 Fatores que afetam a captura de CO_2



Fonte: Possan (2019, p. 65)

Devido à grande capacidade de captura de CO_2 em materiais produzidos com cimento, alguns autores vêm estudando a captura por meio de concreto e argamassa. No estudo de Rigo (2019), concretos com resíduos de construção e demolição (RCD) foram avaliados quanto a

captura de carbono por meio da carbonatação. No estudo, a captura de CO_2 variou entre 8 e 54%, com os concretos contendo RCD apresentando os maiores valores em comparação com o concreto de referência.

Segundo Mazurana (2019), as argamassas de revestimento com incorporação de resíduos de construção e demolição (RCD) como agregado miúdo, além de apresentarem uma alternativa sustentável na destinação desses resíduos, possuem potencial de captura de CO_2. No estudo realizada pela autora, a substituição do agregado miúdo natural por RCD em 100%, chegou em seu potencial máximo de captura de carbono aos 266 dias, chegando a atingir a captura máxima de 165,34 $kgCO_2/m^3$ podendo atingir o máximo de reabsorção das emissões de carbono de 53,8% do emitido em sua produção. Já Borges *et al.*, (2023), ao incorporar RCD em argamassa, obteve potencial de reabsorção ainda maior de 63% de CO_2.

Um dos aditivos que melhoram a capacidade da matriz cimentícia de absorver carbono é a dolomita. No estudo de Guo *et al.* (2022), amostras de pastas de cimento contendo 25% de dolomita, apresentaram uma absorção de CO_2 23% maior que pastas de cimento Portland puro. Isso ocorre devido ao fato de que a dolomita, apesar de ser considerada um material inerte, ou seja, não reage diretamente com o CO_2, promove um aumento de vias gasosas, o que melhora a difusão do gás; melhora o efeito de diluição e promove maior área de superfície de contato para a precipitação de produtos carbonatados; age como semente de nucleação, ou seja, atua como um cristal de semente semelhante a calcita, orientando a precipitação de produtos de carbonatação em superfícies cristalinas específicas e partículas menores.

Outro aditivo que pode aumentar a capacidade de captura de carbono por meio da carbonatação é o quelante de íons, aditivo usado para promover as propriedades de autocura do concreto. No estudo de Zhuang *et al.* (2024), foi avaliado o efeito do quelante no sequestro de carbono e nas propriedades mecânicas de pastas de cimento curadas com CO_2, considerando diferentes estruturas de poros. Os resultados indicaram que o quelante promoveu o transporte e a difusão de CO_2 na pasta de cimento, permitindo que a cura por mineralização avançasse com uma estrutura de poros densa. Além disso, o aditivo promoveu um aumento da resistência à compressão das pastas estudadas, pois estimulou a reação de mineralização a reparar os poros maiores, aumentando a compactação da matriz cimentícia e acelerando o desenvolvimento da resistência à compressão da pasta de cimento.

4.6.1 Captura de CO_2 em placas cimentícias

O dióxido de carbono gasoso é convertido em carbonatos de cálcio sólidos durante a cura por carbonatação. As placas cimentícias podem servir como sumidouro de CO_2 para sequestrar permanentemente o dióxido de carbono. Num futuro próximo, haverá grande disponibilidade de CO_2 de alta pureza proveniente da captura de carbono em fontes industriais, devido à possível regulamentação de emissões. Em vez de ser injetado em formações geológicas para armazenamento, o dióxido de carbono pode ser utilizado na produção de placas de fibrocimento, obtendo-se benefícios econômicos, técnicos e ambientais (He *et al.*, 2019). Na Tabela 4.4 é apresentada a absorção de carbono em placas cimentícias estudadas na literatura.

Tabela 4.4 Absorção de carbono em placas cimentícias

Referência	Material	Tipo de carbonatação	CO_2 absorvido (%) (experimental)
He *et al.* (2019)	Fibrocimento de celulose	Carbonatação na câmara	1,6-24,4
Hu, Chen e Hu (2022)	Fibrocimento com PP e sílica ativa	Carbonatação na câmara	3,45-10,1
Parede *et al.* (2026)	Fibrocimento com fibra de eucalipto e rejeitos de cobre	Carbonatação na câmara	8-54,3

Fonte: O autor (2026)

A partir da análise da Tabela 4.4, pode-se concluir que as placas de fibrocimentos testadas experimentalmente possuem em média de 1,6% a 54,3% de absorção de CO_2, é importante destacar que esses valores podem variar, dependendo do tipo de fibra, adições, concentração de CO_2 e umidade. Portanto, não se pode afirmar um único valor, no entanto percebe-se o potencial que as placas cimentícias têm na absorção de carbono e na mitigação da pegada do setor da construção civil.

4.7 PARÂMETROS DE AVALIAÇÃO DE ECOEFICIÊNCIA

Nessa seção serão apresentados os parâmetros de ecoeficiência de materiais cimentícios disponíveis na literatura.

4.7.1 Indicadores de ecoeficiência (IL) e (IC)

No estudo de Damineli *et al.* (2010), foram apresentadas duas equações para medir a ecoeficiência do cimento, sendo eles o Índice de intensidade de ligante (IL) e Índice de intensidade de CO_2 (IC) (Equação 4.14).

Equação 4.14 Índice de intensidade de ligante (IL) **(a)** e Índice de intensidade de CO_2 (IC) **(b)**

$IL = \frac{Consumo\ de\ cimento\ (Kg\ m^{-3})}{Resistência\ à\ compressão\ aos\ 28\ dias\ (MPa)}$	**(a)**
$IC = \frac{CO_2\ emitido\ (Kg\ m^{-3})}{Resistência\ à\ compressão\ aos\ 28\ dias\ (MPa)}$	**(b)**

A intensidade de ligante (IL) é utilizada para medir a quantidade de ligante necessária à produção de 1 Mpa de resistência à compressão, sendo normalmente adotado o período de cura de 28 dias, no entanto, outros tempos de cura podem ser utilizados, dependendo da aplicação do concreto (Damineli *et al.*, 2010).

Já o índice de intensidade de CO_2 (IC) é utilizada para medir a quantidade total de carbono emitido no processo de produção e transporte de todos os materiais utilizados para a produção do concreto para fornecer 1 MPa de resistência. Como as maiores emissões de carbono ocorrem na produção do cimento, são essas emissões que são utilizadas para se ter uma medida mais precisa desse índice (Damineli *et al.*, 2010).

Os autores ainda explicam em sua pesquisa que a quantidade de carbono estimada na produção do cimento foi calculada com base na quantidade de clínquer utilizado e dados extraídos da pesquisa na literatura realizada, sendo este obtido subtraindo-se a quantidade total de aditivo mineral e levando em consideração uma fração adotada de sulfato de cálcio de 5% com isso foi considerada uma tonelada de CO_2 para uma tonelada de clínquer.

5 METODOLOGIA

Com a finalidade de explicitar a coerência entre os objetivos específicos da pesquisa e os procedimentos metodológicos adotados, apresenta-se a seguir a forma como cada objetivo foi operacionalizado experimentalmente. O primeiro objetivo específico, voltado à avaliação da relação entre a morfologia superficial do compósito cimentício e a cinética de carbonatação, foi atendido por meio da produção de amostras com diferentes configurações superficiais, representadas principalmente pelas formulações C6CL, C6NL, C3CR e C3NR (Figura 5.2) correspondentes, respectivamente, ao fibrocimento de superfície plana porosa (exposto ao ambiente de câmara de carbonatação (C) exposto a condições naturais (N)) e ao fibrocimento com aumento de área superficial com superfície rugosa (exposto ao ambiente de câmara de carbonatação (C) exposto a condições naturais (N)).

Essas amostras foram submetidas ao processo de carbonatação e avaliadas quanto à profundidade de carbonatação por fenolftaleína, cinética de carbonatação ao longo do tempo e absorção de CO_2 por meio do ensaio de perda de massa por aquecimento em forno mufla.

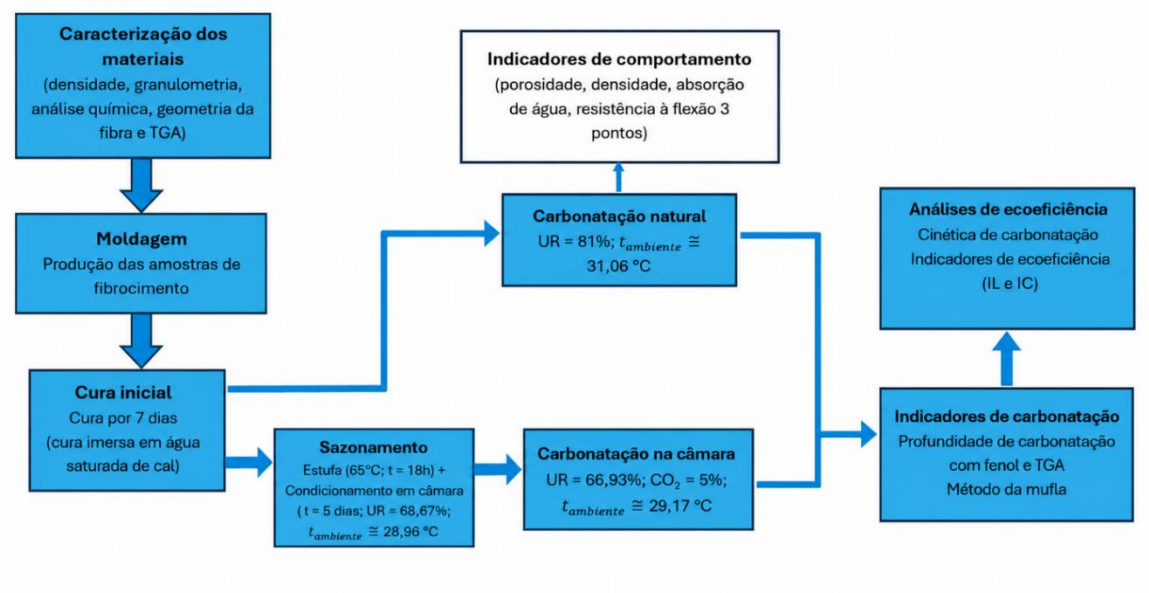
O segundo objetivo específico, relacionado à análise comparativa entre a variação da morfologia superficial e a variação da porosidade total do material, foi operacionalizado por meio da comparação entre as formulações com diferentes teores de fibras, bem como entre as amostras com maior porosidade aparente, especialmente a formulação C6CL e C6NL. A influência dessa condição foi investigada a partir da determinação das propriedades físicas do fibrocimento, incluindo porosidade total, densidade aparente, densidade real e absorção de água, obtidas segundo a NBR 9778 (ABNT, 2009). A correlação entre essas propriedades e os indicadores de carbonatação permitiu avaliar em que medida a maior porosidade do compósito favorece a difusão de CO_2 e o avanço da frente carbonatada.

O terceiro objetivo específico, referente à influência da indução de pontos de nucleação da reação de carbonatação pela substituição do calcário grosseiro por um de granulometria mais fina (fíler carbonático), foi atendido por meio da formulação C3FCL e C3FNL, correspondente à amostra de fibrocimento de superfície plana com fíler carbonático. A comparação entre a C3FCL e C3FNL e as amostras com calcário de granulometria mais grosseira, mantidas sob as mesmas condições de moldagem, cura, carbonatação e caracterização, possibilita avaliar o efeito da substituição de um calcário mais grosso por um mais fino sobre a carbonatação do compósito. Para essa análise, foram considerados os resultados de profundidade carbonatada, cinética de carbonatação, propriedades físico-mecânicas e caracterização microestrutural por TG/DTG.

O quarto objetivo específico, voltado à investigação da ecoeficiência do compósito cimentício, foi contemplado por meio da integração entre os resultados de desempenho mecânico e os indicadores de carbonatação. O desempenho mecânico foi avaliado por ensaio de flexão em três pontos, com determinação do módulo de ruptura (MOR), módulo de elasticidade (E) e tenacidade ou energia de fratura (ξ). Em complemento, foram calculados a cinética de carbonatação e os indicadores adaptados de intensidade de ligante (IL) e intensidade de carbono (IC), permitindo analisar se as alterações morfológicas e a adição de fíler carbonático, além de favorecerem a captura de CO_2, resultam em compósitos com desempenho técnico e potencial ambiental mais favoráveis. Foi também calculado o Saldo de intensidade carbono-flexão equivalente (SICFeq).

Adicionalmente, a comparação entre a carbonatação acelerada e a amostra de referência exposta ao ar em condição natural contribui para a interpretação da influência do ambiente de exposição sobre o avanço da carbonatação, oferecendo um parâmetro complementar para a análise da cinética de incorporação de CO_2 nas placas de fibrocimento produzidas neste estudo. As atividades realizadas para atender os objetivos dessa pesquisa são resumidas no fluxograma da Figura 5.1

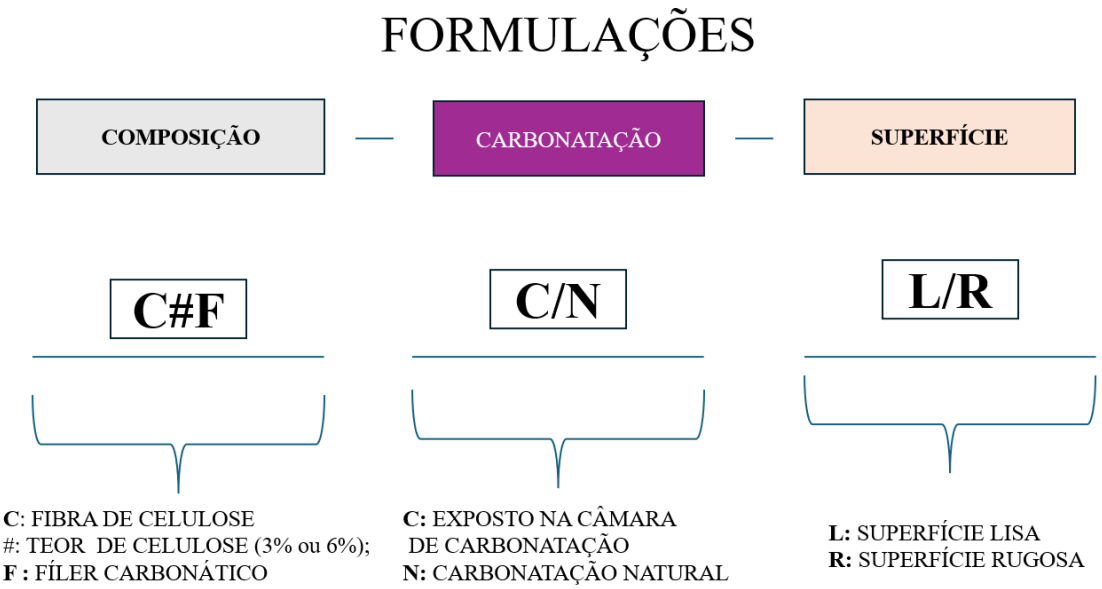
Figura 5.1 Fluxograma de atividades



Fonte: O autor (2026)

Na Figura 5.2, são apresentadas as nomenclaturas das formulações produzidas.

Figura 5.2 Nomenclatura das formulações produzidas



Fonte: O autor (2026).

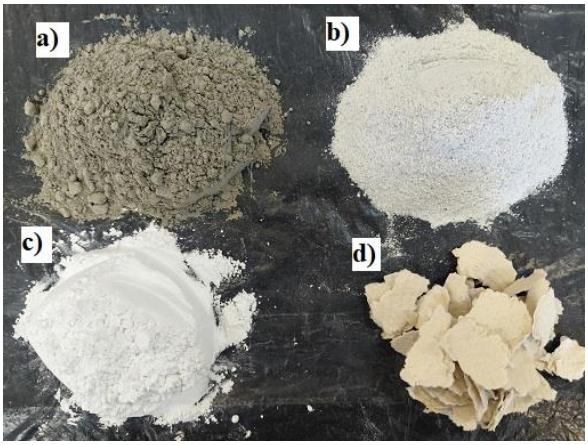
Neste capítulo são apresentados os materiais e o método de produção das amostras, bem como os ensaios realizados na caracterização tanto das amostras quanto dos materiais utilizados.

5.1 MATERIAIS

Foram utilizados para a realização dessa pesquisa os seguintes materiais:

a) Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CPV ARI), da marca MIZU® seguindo especificações da NBR 16697 (ABNT, 2018).
b) Calcário moído;
c) Fíler carbonático;
d) Fibra curta de celulose;
e) Água potável da rede pública de abastecimento de água da cidade de São Cristóvão (SE).

Figura 5.3 Materiais utilizados para a produção do fibrocimento



Fonte: O autor (2026)

5.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

O cimento, calcário e o fíler carbonático foram caracterizados quanto a:

5.2.1 Densidade

A densidade dos materiais foi determinada de acordo com a NBR 16605 (ABNT, 2017), pelo método do frasco volumétrico de *Le Chatelier*. Seguindo os procedimentos normatizados a massa específica foi calculada de acordo com a Equação 5.1:

Equação 5.1 Massa específica

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Onde:

ρ - Massa específica do material ensaiado (g/cm³);

m - Massa do material ensaiado (g);

V - Volume deslocado pela massa do material ensaiado (V_2' – V_1') (cm³);

V_2' – V_1' - Valores corrigidos de V_1 e V_2, respectivamente, a partir da calibração da escala do frasco volumétrico (cm³).

A massa específica dos materiais (calcário moído e fíler carbonático) está indicada na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 Massa específica dos pós

Material	V1 – Após 30 min	Peso (g)	V2 – Após 30 min	Massa Específica (g/cm³)
Cimento	0	60	19,6	3,06
Calcário	0	60	21,9	2,74
Fíler carbonático	0	60	21,6	2,78

Fonte: O autor (2026).

5.2.2 Granulometria

Para realizar a granulometria dos materiais, foi utilizada uma técnica de espalhamento de luz laser de baixo ângulo, conforme procedimento adotado por Souza (2014). O ensaio foi realizado em água com ultrassom para dispersar por 5 min, foi utilizado um granulômetro a laser *Mastersizer MS 2000E*, com laser de Hélio/Neon e faixa de detecção de 0,1 a 1000 µm (Figura 5.4).

Figura 5.4 Granulômetro a laser Mastersizer MS 2000E



Fonte: O autor (2025).

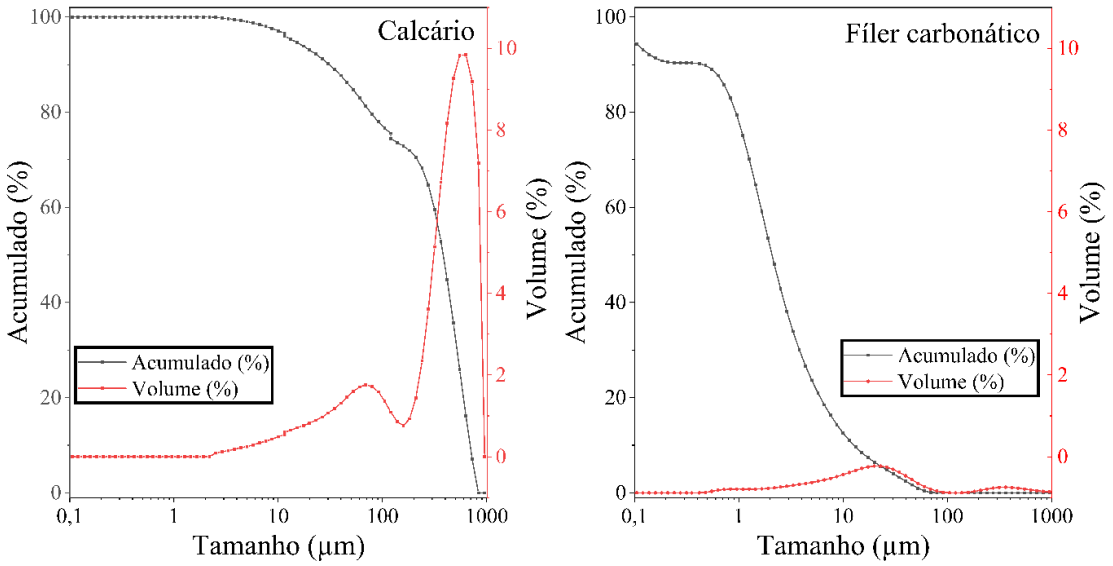
Os resultados de granulometria, obtidos por meio de espalhamento de luz laser no equipamento *Mastersizer MS 2000E*, mostraram curvas de distribuição de tamanho de partícula distintas para calcário e fíler carbonático, indicando que cada material contribui de forma diferente para o empacotamento de partículas na matriz cimentícia. Os resultados mostram que grande parte das partículas de fíler carbonático se concentra na faixa 3 e 50µm aproximadamente, apresentando um pico baixo e largo entre 10 e 30µm, sendo que a partir de

100 µm praticamente todo material já passou, o que indica que se trata de um material homogêneo e com muitas partículas finas.

Por outro lado, o calcário apresenta uma curva praticamente constante até apresentar uma queda brusca até aproximadamente 300 e 700 µm, o que indica uma predominância de partículas grosseiras (pico entre 500 e 700 µm), além disso a distribuição apresenta-se de modo mais heterogêneo abrangendo uma maior faixa granulométrica. Em geral, materiais com distribuição mais fina tendem a preencher vazios e reduzir a porosidade capilar, enquanto distribuições mais grosseiras podem favorecer a formação de poros interconectados; essa diferença é particularmente relevante para o fíler carbonático, que foi incorporada com o intuito de induzir pontos de nucleação da reação de carbonatação sem comprometer a estrutura física do compósito.

Na Figura 5.5 é apresentada a distribuição granulométrica dos pós (calcário moído e fíler carbonático).

Figura 5.5 Distribuição das partículas dos pós



Fonte: O autor (2026)

5.2.3 Difração de raios X (DRX)

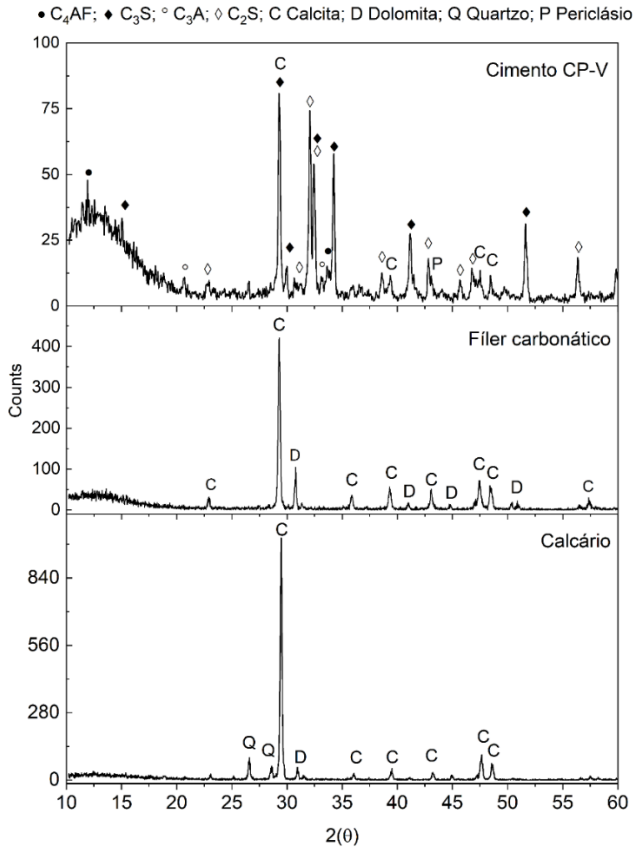
Para análise do DRX, foram utilizadas aproximadamente 40 mg de pó para cada análise, sendo os padrões de difração obtidos em um difratômetro *Shimadzu LabX XRD-6000*, com uma fonte CuKα (λ = 1,54 A), produzida a 30 kV e 40 mA, em um ângulo de difração 2θ na faixa entre 10° e 60°, varredura em modo contínuo com passo 0,02° e velocidade de 2°/min.

O objetivo da análise foi identificar as principais fases cristalinas presentes no cimento CPV-ARI, no fíler carbonático e no calcário. Os difratogramas dos respectivos materiais são apresentados na Figura 5.6, na qual as fases foram identificadas com base nos picos de difração.

No difratograma do cimento CPV-ARI, as principais fases mineralógicas do clínquer são identificadas como o silicato tricálcico (C_3S) (ICDD 00-016-0407), silicato dicálcico (C_2S) (ICDD 01-087-1259), aluminato tricálcico (C_3A) (ICDD 00-033-0251) e ferroaluminato tetracálcico (C_4AF) (ICDD 00-030-0226). Dentre as fases citadas destaca-se os picos associados ao C_3S, principalmente na região de 29 a 35°, um comportamento típico de um cimento Portland de alta resistência inicial (Coelho; Silva, 2024). Além das fases do clínquer foram identificadas calcita (C) (ICDD 01-081-2027), quartzo (Q) (ICDD 01-074-1811) e periclásio (P) (ICDD 00-019-0771).

A presença de calcita (C) nos materiais utilizados para a produção dos compósitos é relevante para a interpretação dos resultados de carbonatação, uma vez que parte dos carbonatos identificados podem ter origem nos próprios materiais que foram utilizados e não exclusivamente devido a reação do CO_2.

Figura 5.6 DRX dos pós utilizados



Fonte: O autor (2026)

Para o fíler carbonático foram identificados picos correspondentes a dolomita (D) (ICDD 00-036-0426) e a calcita (C), sendo este último o maior pico em uma intensidade próxima 29,4° 2(θ). Já com relação ao calcário é apresentado um pico de elevada intensidade, próxima a 29,4 ° 2(θ), também foi identificada em menor intensidade o quartzo (Q) e a dolomita (D).

A identificação de calcita, no cimento, calcário e fíler carbonático é uma importante informação para esse estudo, pois como os compósitos estudados apresentaram materiais que já possuem fases carbonáticas em sua composição inicial, a quantificação dos carbonatos após a exposição ao CO_2 deve considerar a condição de partida de cada formulação.

5.2.4 Análise Química (FRX)

O ensaio de Espectroscopia de Fluorescência de Raios X (FRX) foi realizado para análise da composição química do cimento, calcário e fíler carbonático, de acordo com procedimentos adotados por Santos (2024). Para a realização do ensaio foi utilizado um equipamento *Shimadzu – XRF – 1800*. O equipamento é equipado com detector FPC (Proportional Frequency Counter) e com cristais analisadores: CaO (LIF), P_2O_5 (Ge) e SiO_2 (PET). Foram utilizadas as linhas de emissão Kα para o cálculo da concentração dos óxidos. Na Tabela 5.2 são apresentados os resultados do ensaio.

Tabela 5.2 Análise química dos pós (FRX)

Amostra	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	LOI	Total
Calcário	4,50	0,08	0,92	0,55	3,32	49,89	0,09	0,15	0,03	39,56	99,08
CPV-ARI	16,69	0,17	3,76	2,46	4,57	60,65	0,20	1,12	0,18	6,29	96,10
Fíler carbonático	2,80	0,00	0,23	0,05	4,82	54,73	0,03	0,04	0,03	37,20	99,94

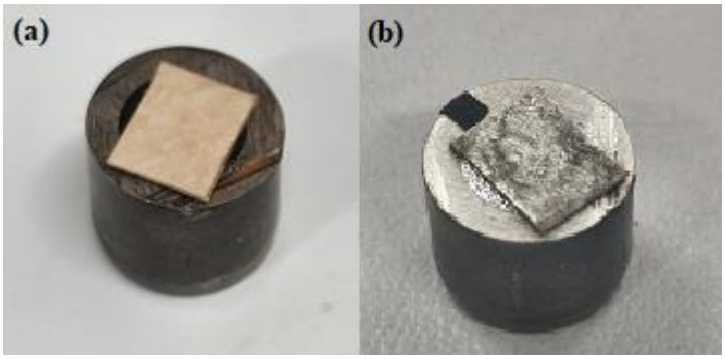
Fonte: O autor (2026)

De acordo com a Tabela 5.2 pode-se destacar que o calcário, cimento CPV-ARI e o fíler carbonático possuem em sua composição majoritária óxido de cálcio (CaO), 49,89%, 60,65% e 54,73%, respectivamente.

5.2.5 Geometria da celulose

As características morfológicas das fibras foram verificadas por meio de imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV). Foi utilizado equipamento *JEOL JSM 5700* operando com distância de trabalho de 10 mm e tensão de aceleração de 5 kV. A amostra de celulose em formato de cartão foi fixada no porta amostras com fita dupla-face de carbono e metalizada com prata por 100 segundos (Figura 5.7). A largura aparente das fibras foi mensurada por meio do *software ImageJ*®.

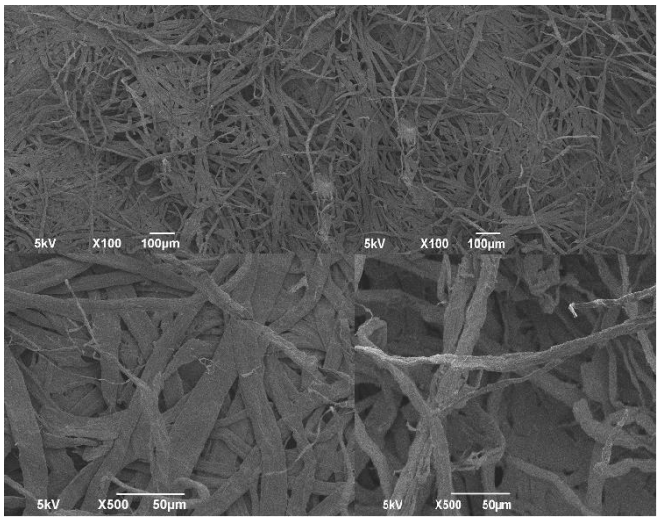
Figura 5.7 Preparo de amostra para microscopia (MEV): **(a)** Cartão de celulose; **(b)** Cartão metalizado em prata



Fonte: O autor (2026)

As imagens (Figura 5.8) foram obtidas nos aumentos 100x e 500x, permitindo observar a morfologia das fibras, bem como sua organização em diferentes escalas.

Figura 5.8 MEV das fibras de celulose



Fonte: O autor (2026)

Nas imagens obtidas com aumento de 100x, observa-se uma estrutura formada por fibras alongadas e de geometria irregular, espalhadas por várias direções e possuindo elevado grau de entrelaçamento. Além disso, é possível observar que as fibras sobrepostas formam uma rede que pode atuar no reforço estrutural da matriz cimentícia.

A partir das imagens com aumento 500x, torna-se evidente a característica alongada da fibra e seu entrelaçamento o que pode fazer com que além de atuar como elemento de reforço pode modificar a estrutura porosa da matriz, facilitando também o transporte de CO_2 no interior do compósito. A partir das imagens também foi medido a largura das fibras com o auxílio do software *ImageJ*®, primeiro as imagens foram carregadas no software, foi realizada a calibração para mensurar as medidas em micrômetros (µm) e realizadas 20 medidas de cada uma das quatro imagens da Figura 5.8 com a função "*Straight*", depois foi calculado a média total que resultou em uma largura aparente de 13,67 µm.

5.2.6 Análise Termogravimétrica (TG/DTG)

As amostras foram testadas em um analisador térmico simultâneo *NETZSCH STA 449 F1 Jupiter*. Aproximadamente 25 mg de amostra foi colocada em um cadinho de alumina, pesadas em balança analítica e posicionadas no suporte do analisador térmico. O equipamento foi acionado, com uma taxa de aquecimento de 10°C/min, em ambiente de nitrogênio com fluxo de 50 ml/min, até atingir a temperatura de interesse. A temperatura máxima para a análise do fibrocimento foi de 520 °C, já para os materiais utilizados foi de 1000 °C.

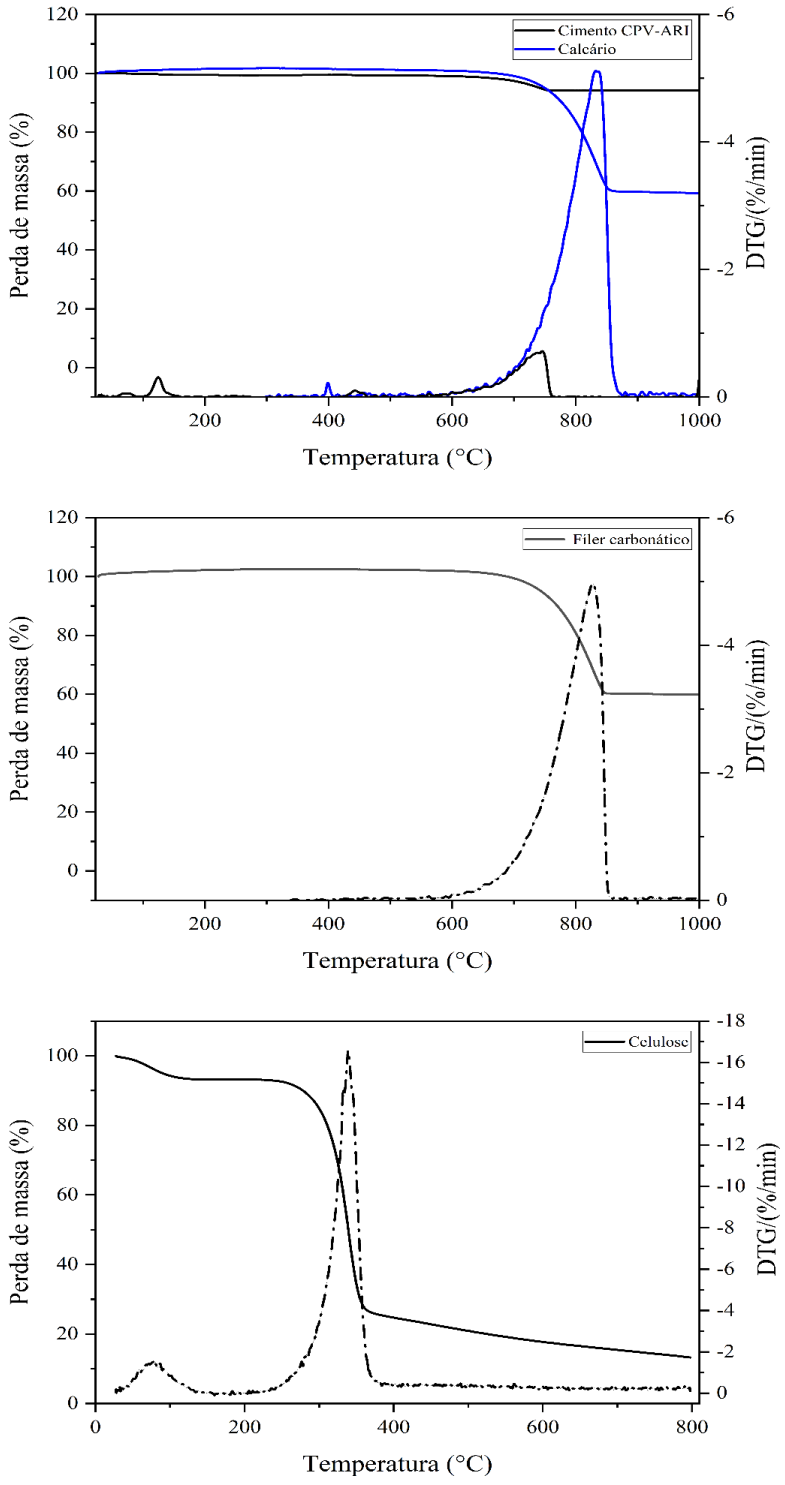
O cimento CPV-ARI, calcário e o fíler carbonático foram caracterizados por meio do ensaio de termogravimetria (TG) e termogravimetria derivada (DTG). Os resultados são apresentados na Figura 5.9.

O cimento CPV-ARI apresentou elevada estabilidade térmica, registrando pequena perda de massa abaixo de 200 °C, associada à desidratação de fases hidratadas e uma pequena perda de massa entre 600°C e 750°C (pico DTG, aproximadamente 740 °C) da descarbonatação de adições da própria composição, resultando em um resíduo final de 95%.

Em contrapartida, tanto o calcário, quanto o fíler carbonático mostraram-se estáveis até 600°C aproximadamente, posteriormente sofreram uma considerável decomposição térmica referente a liberação de CO_2 (calcinação do carbonato de cálcio ($CaCO_3$)), apresentando picos de DTG de alta intensidade (830-840 °C) e uma perda de massa aproximada de 40%, estabilizando em um teor de massa residual de 60% após 850°C. Com relação a celulose, houve perda de umidade inicial adsorvida até 120°C, seguida pela sua principal decomposição térmica

(pico entre 280 °C – 370 °C) da celulose, com perda de massa de aproximadamente 65% e finalizando com a degradação lenta do resíduo até 800 °C, resultando em massa final aproximada entre 13% e 15%.

Figura 5.9 TG/DTG dos materiais utilizados



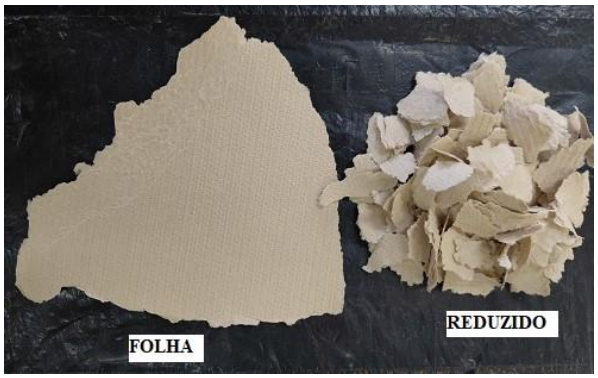
Fonte: O autor (2026)

5.3 PRODUÇÃO DAS AMOSTRAS

Neste trabalho, as amostras de fibrocimento foram produzidas por batelada. O processo de moldagem seguiu as seguintes etapas apresentadas na Figura 5.12.

Todas as moldagens foram executadas em três etapas: Dispersão das fibras de celulose, pois elas estavam em forma de folhas, o que foi necessário reduzir em pequenos pedaços de maneira manual (Figura 5.10) e após isso submeter as fibras ao processo de dispersão, utilizando-se um agitador mecânico, o que resultou em uma polpa de celulose (Figura 5.11) para possibilitar seu uso; Mistura de materiais, com o auxílio de uma argamassadeira e por fim moldagem em placas 35 x 35 x 1,5 cm.

Figura 5.10 Celulose de fibra curta



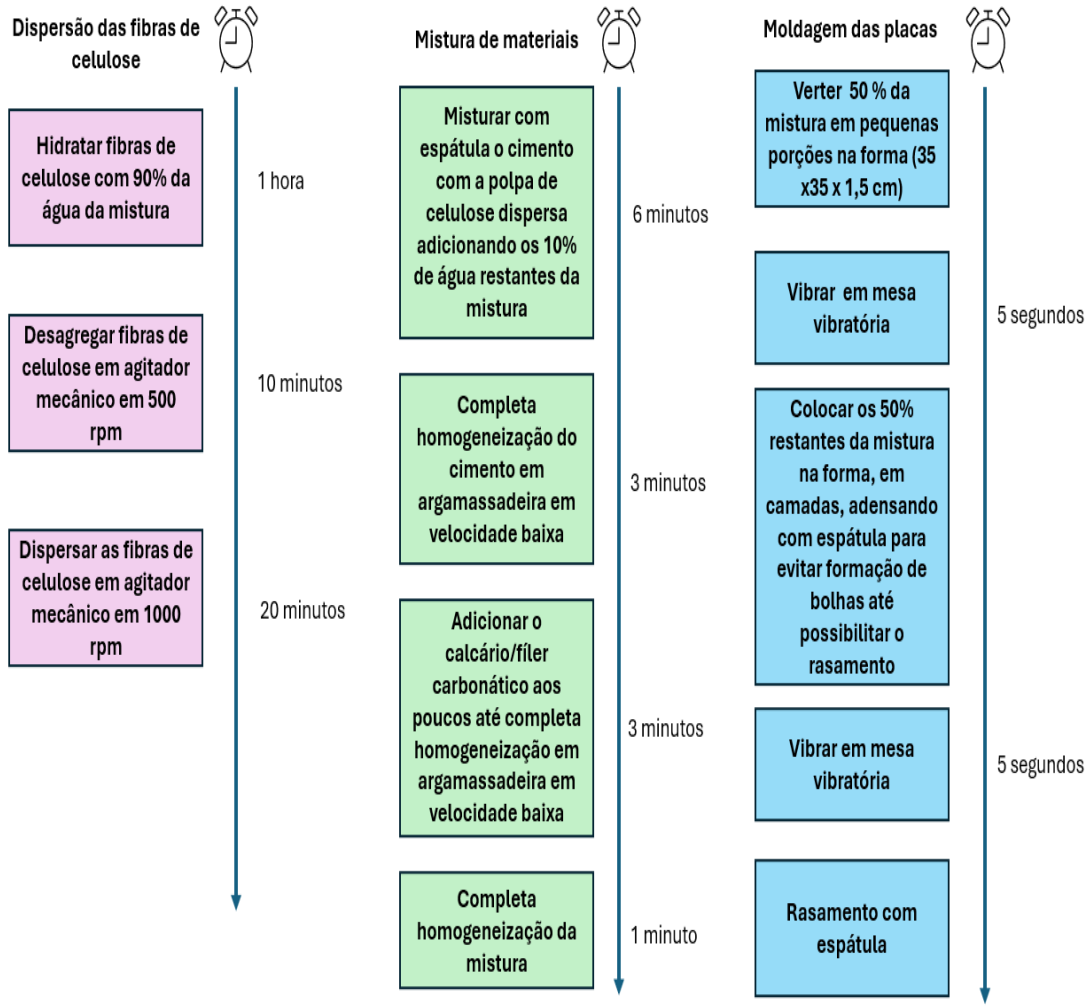
Fonte: O autor (2026)

Figura 5.11 Polpa de celulose



Fonte: O autor (2026)

Figura 5.12 Fluxograma de moldagem



Fonte: O autor (2026)

No Quadro 5.1 é apresentada a composição de cada uma das formulações de fibrocimento produzidas nesse estudo.

Quadro 5.1 Formulações de fibrocimento

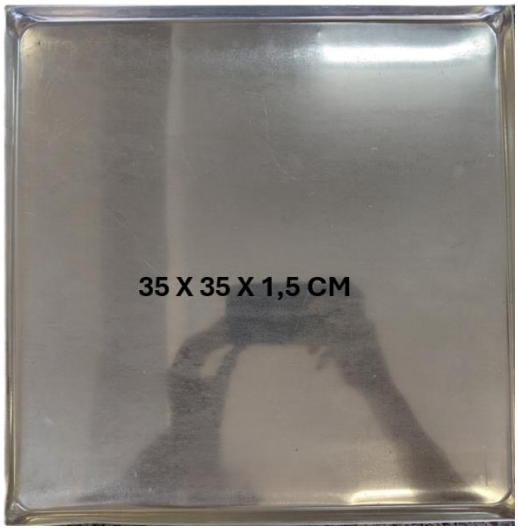
Composição		**Cimento (%)**	**Calcário (%)**	**Celulose (%)**	**Fíler carbonático (%)**	**a/c**	**Total (%)**
REF*	X	100	0	0	0	0,3	100
C3NL	C3CL	70	27	3	0	0,6	100
C6NL	C6CL	70	24	6	0	0,76	100
C3FNL	C3FCL	70	0	3	27	0,6	100
C3NR	C3CR	70	27	3	0	0,6	100

OBS: * A amostra REF se refere a uma composição apenas com cimento CPV-ARI, e sua carbonatação foi realizada em regime natural. Linhas com sombreamento formam o conjunto de amostras cuja variável é a morfologia superficial do fibrocimento.

Fonte: O autor (2026)

Todas as placas foram moldadas com o auxílio de formas de alumínio conforme figura 5.13.

Figura 5.13 Forma das amostras de fibrocimento



Fonte: O autor (2026)

Todas as placas de fibrocimento produzidas, foram divididas em 14 corpos de prova (16x4x1,5 cm), com área superficial (maior face) de 64 cm² (Figura 5.14).

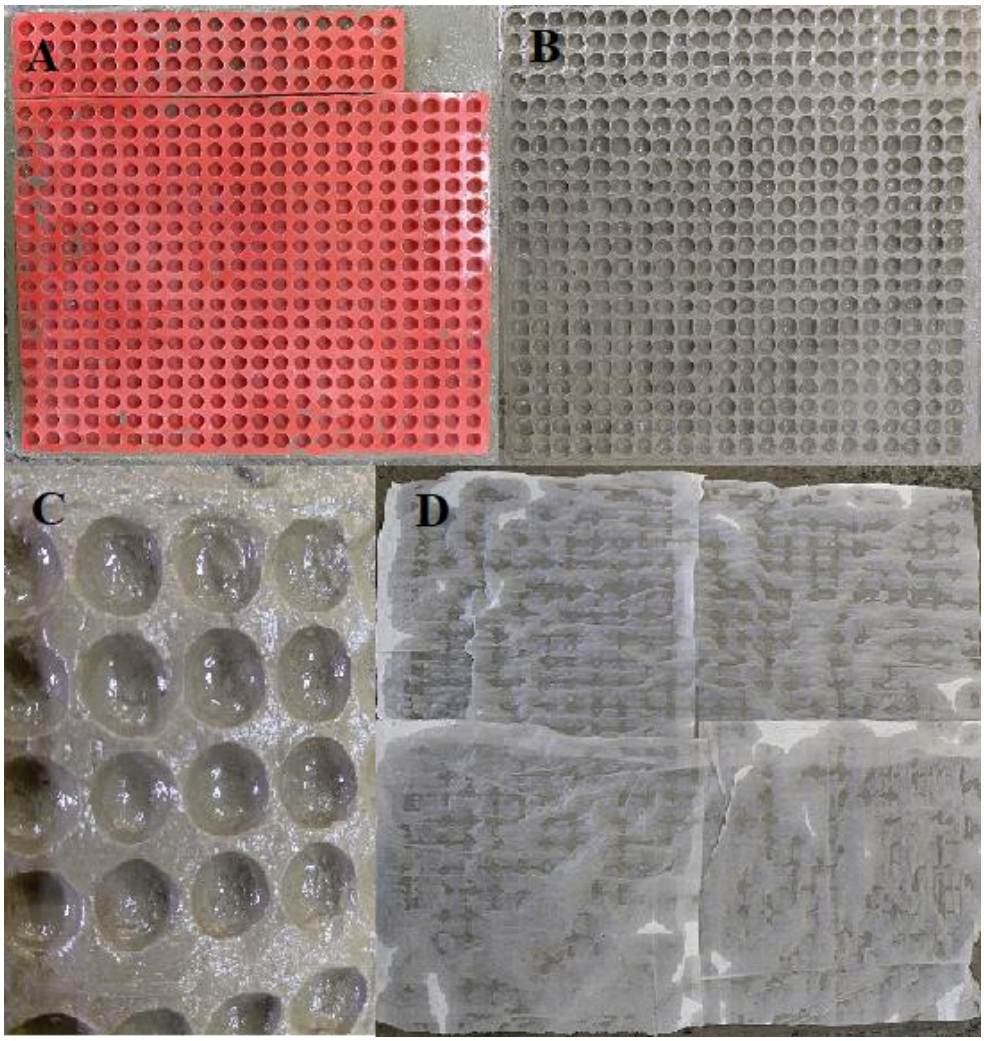
Figura 5.14 Placa de fibrocimento marcada



Fonte: O autor (2026)

Para a realização de ensaios físico mecânicos foram utilizados 7 corpos de prova, para TG e pH por fenolftaleína 5 corpos de prova, um para cada idade (0, 1, 3, 7 e 14 dias). Para as placas de fibrocimento rugosas (C3CR; C3NR), o aumento de área superficial foi de em média 38,71%, sendo produzidas semiesferas pela compressão manual de um molde de silicone na superfície de uma placa de fibrocimento fresca, após 1 hora da moldagem para evitar que a rugosidade desmanchasse, seguido de secagem por meio de absorção com papel para remover o excesso de água evitando assim a formação de uma camada superficial mais fraca ou porosa conforme figuras (Figura 5.15).

Figura 5.15 Moldagem da placa rugosa



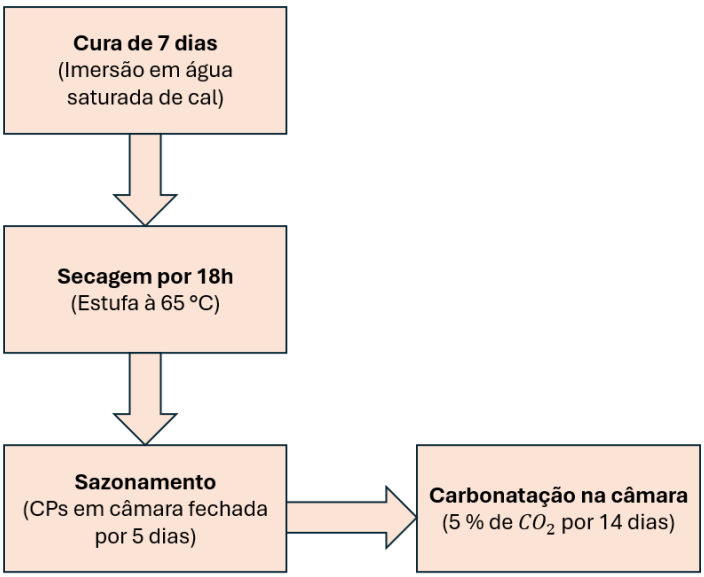
Legenda: A) Moldagem da rugosidade (semiesferas); B) Placa após retirada de molde de silicone; C) Detalhe da rugosidade com água na superfície; D) Tirada do excesso de água com papel.

Fonte: O autor (2026)

5.4 CARBONATAÇÃO NA CÂMARA

O ensaio de carbonatação na câmara seguiu as seguintes etapas conforme a Figura 5.16.

Figura 5.16 Carbonatação na câmara



Fonte: O autor (2026)

Para a realização da carbonatação na câmara, foi utilizada uma câmara de carbonatação confeccionada em laboratório, com base em uma adaptação da metodologia apresentada por Guimarães e Coelho (2018). No Quadro 5.2 são apresentados os materiais utilizados na montagem da câmara de carbonatação.

Quadro 5.2 Materiais utilizados na câmara de carbonatação (continua)

Material	Quantidade	Função
Termo-higrômetro	01	Verificar umidade e temperatura
Balão (látex)	01	Evitar pressurização da câmara
Mangueira para gás	01	Conduzir o dióxido de carbono até a câmara
Fonte de alimentação elétrica 12v	01	Responsável por suprir energia contínua e estável para funcionamento das ventoinhas.
Cola de Silicone Líquida	250 ml	Utilizada como material de vedação da garrafa onde ocorreu a geração de CO_2, bem como da conexão entre a garrafa e a câmara de carbonatação, assegurando a estanqueidade do sistema e prevenindo vazamentos de gás.

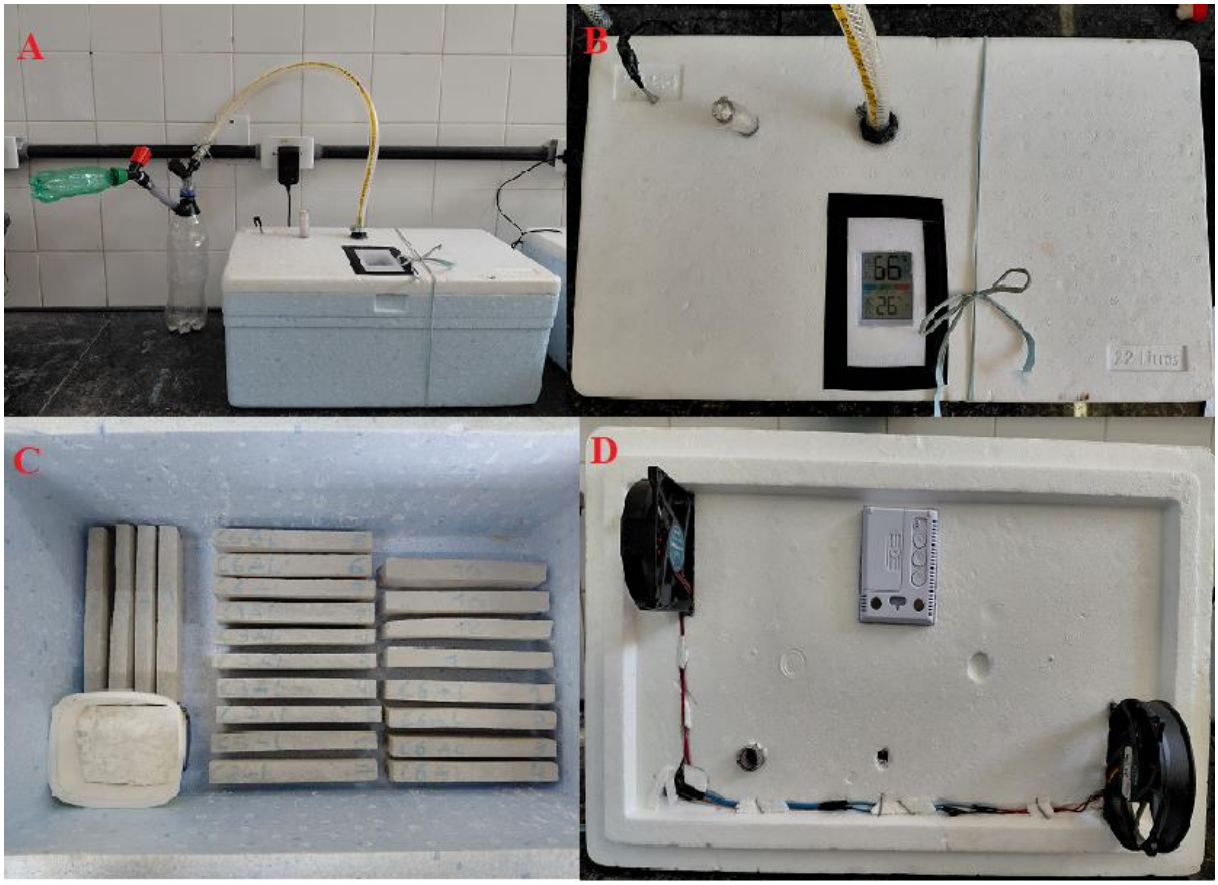
Bicarbonato de sódio	1 kg	Utilizado como um dos reagentes do sistema, atuando na reação química responsável pela geração de dióxido de carbono (CO_2)
Solução de bateria	2 L	Composta por 30% de ácido sulfúrico (H_2SO_4), foi utilizada como um dos reagentes na reação química responsável pela geração de dióxido de carbono (CO_2) no sistema.
Caixa de poliestireno expandido 22 L	01	Foi utilizada como câmara de carbonatação, na qual ocorre o processo de carbonatação e são mantidos os corpos de prova submetidos a esse ensaio.
Garrafas de politereftalato de etileno (PET) 2L	02	Utilizadas para o armazenamento da solução de bateria, bem como recipiente onde ocorre a reação química entre essa solução e o bicarbonato de sódio.
Ventoinha	02	Utilizadas para promover a circulação forçada do dióxido de carbono (CO_2) no interior da câmara de carbonatação, assegurando a distribuição homogênea do gás e a exposição uniforme de todos os corpos de prova.
Cloreto de sódio	500 g	Regular a umidade interna da câmara de carbonatação em 70%

Fonte: O Autor (2026)

A câmara de carbonatação foi produzida com uma caixa de poliestireno expandido de 22 litros. Foram realizados dois furos na tampa da caixa, onde um dos furos fez a ligação da caixa com a mangueira e a garrafa transparente, outro furo fez a passagem dos fios de conexão da fonte da ventoinha 1 e 2. Na parte interna da câmara ficaram as ventoinhas, o termo-higrômetro e recipiente contendo uma solução salina (Cloreto de sódio). Já na parte externa ficaram as duas garrafas que contém os reagentes químicos para a produção do CO_2: Garrafa transparente (Bicarbonato de sódio) e Garrafa verde (Ácido sulfúrico com 30% de concentração), ambas conectadas por uma torneira.

O princípio de funcionamento da câmara consiste em: levantamento da garrafa verde para o ácido sulfúrico passar para a garrafa transparente que contém o bicarbonato de sódio, ambos reagem e produz o CO_2 que passa para a câmara de carbonatação; dentro da câmara o gás carbônico tenderá a se concentrar na parte inferior da caixa, com isso entra a necessidade da ventoinha, que fará a circulação do gás no interior da câmara. O recipiente contendo a solução salina de cloreto de sódio faz o papel de regular a umidade interna (50-70%) que foi medida com o auxílio de um termo-higrômetro, aparelho que também é possível determinar a variação de temperatura (Guimarães e Coelho, 2018). Na Figura 5.17 é apresentada a câmara de carbonatação construída.

Figura 5.17 Câmara de carbonatação



Legenda: A) Vista frontal da câmara, garrafa verde contendo ácido sulfúrico (30%), garrafa transparente contendo bicarbonato de sódio; B) Vista superior da câmara de carbonatação, da esquerda para direita (conexão do fio da fonte das ventoinhas, saída de ar, conexão da mangueira do gás (CO_2), no meio o termo-higrômetro; C) Interior da câmara de carbonatação, contendo solução salina e corpos de prova de fibrocimento; D) Vista interna da tampa da câmara, contendo as ventoinhas, fios de conexão e o fundo do termo-higrômetro.

Fonte: O autor (2026)

A quantidade de reagentes para conseguir determinadas concentrações de gás carbônico é calculada com base no cálculo estequiométrico e o volume dos gases nas condições ambientais de temperatura e pressão (CATP), ou seja, para cada um mol de determinado gás, o volume é de aproximadamente 25 L em uma temperatura de 25 °C a 1 atm de pressão. No cálculo também deve-se considerar o volume da câmara de carbonatação, os corpos de prova, ventoinha, solução salina e as garrafas conectadas (Guimarães e Coelho, 2018).

Na Equação 5.2 é apresentada a reação do bicarbonato de sódio com o ácido sulfúrico (Guimarães e Coelho, 2018).

Equação 5.2 Reação do bicarbonato de sódio com ácido sulfúrico

$$H_2SO_{4(aq)} + 2NaHCO_{3(S)} \rightarrow Na_2SO_{4(S)} + 2H_2O_{(l)} + 2CO_{2(g)} \uparrow$$

De acordo com a Equação 5.2, para a reação do ácido sulfúrico (H_2SO_4) e o bicarbonato de sódio ($NaHCO_3$) são produzidos 2 mols de CO_2. Para esse estudo, considerou-se o volume interno da câmara sendo 22 L, o volume das duas garrafas, volume das amostras com dimensões 4x16 cm e 1,5 cm de espessura, volume de duas ventoinhas (8 x 8 x 2,5 cm), recipiente de solução salina (500 cm³) e o termo-higrômetro (121 cm³). Para uma concentração de 5% de CO_2 de acordo com os cálculos estequiométricos, como orienta Guimarães e Coelho (2018), a quantidade de reagentes a ser utilizada, foi calculada em uma planilha de Excel, pois à medida que iam sendo retirados os corpos de prova (1 para cada idade 0,1,3,7 e 14 dias) para TG, profundidade de carbonatação e ensaio da mufla, as quantidades dos reagentes têm que ser ajustadas de acordo com a nova quantidade de amostras presentes na câmara.

5.5 CARBONATAÇÃO NATURAL

Após a cura de 7 dias, as amostras (REF; C3NL; C6NL; C3NR), foram submetidas ao regime de carbonatação natural por 14 dias, sendo retiradas um corpo de prova nas idades 0,1,3,7 e 14 dias para a realização dos ensaios de TG e profundidade de carbonatação por 1% de fenolftaleína e ensaio da mufla.

As amostras foram armazenadas em recipiente de plástico fechado (sem vedação) (Figura 5.18), até a retirada para a realização dos respectivos ensaios, no interior do recipiente também foi colocada duas vasilhas de sal para controle de umidade, a umidade média ficou em 81%.

Figura 5.18 Recipiente de carbonatação natural



Legenda: A) Vista frontal; B) Vista interna

Fonte: O autor (2026)

5.6 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

Nesse tópico são apresentados os ensaios que foram realizados na caracterização físico mecânica das placas de fibrocimento produzidas nesse estudo. Após o processo de carbonatação das amostras, elas foram imersas em álcool isopropílico por 90 minutos e depois secas em estufa por mais 90 minutos a 70 °C, conforme procedimento de parada de hidratação adotado por Mendonça (2023). Após o procedimento, as amostras foram armazenadas em sacos selados em vácuo, com auxílio de uma seladora (Figura 5.19), um procedimento adotado por outros autores (Pereira *et al.*, 2025; Snellings *et al.*, 2018). Foram armazenados nessas condições até a realização dos ensaios de caracterização apresentados nas próximas seções.

Figura 5.19 Processo de selagem de amostras

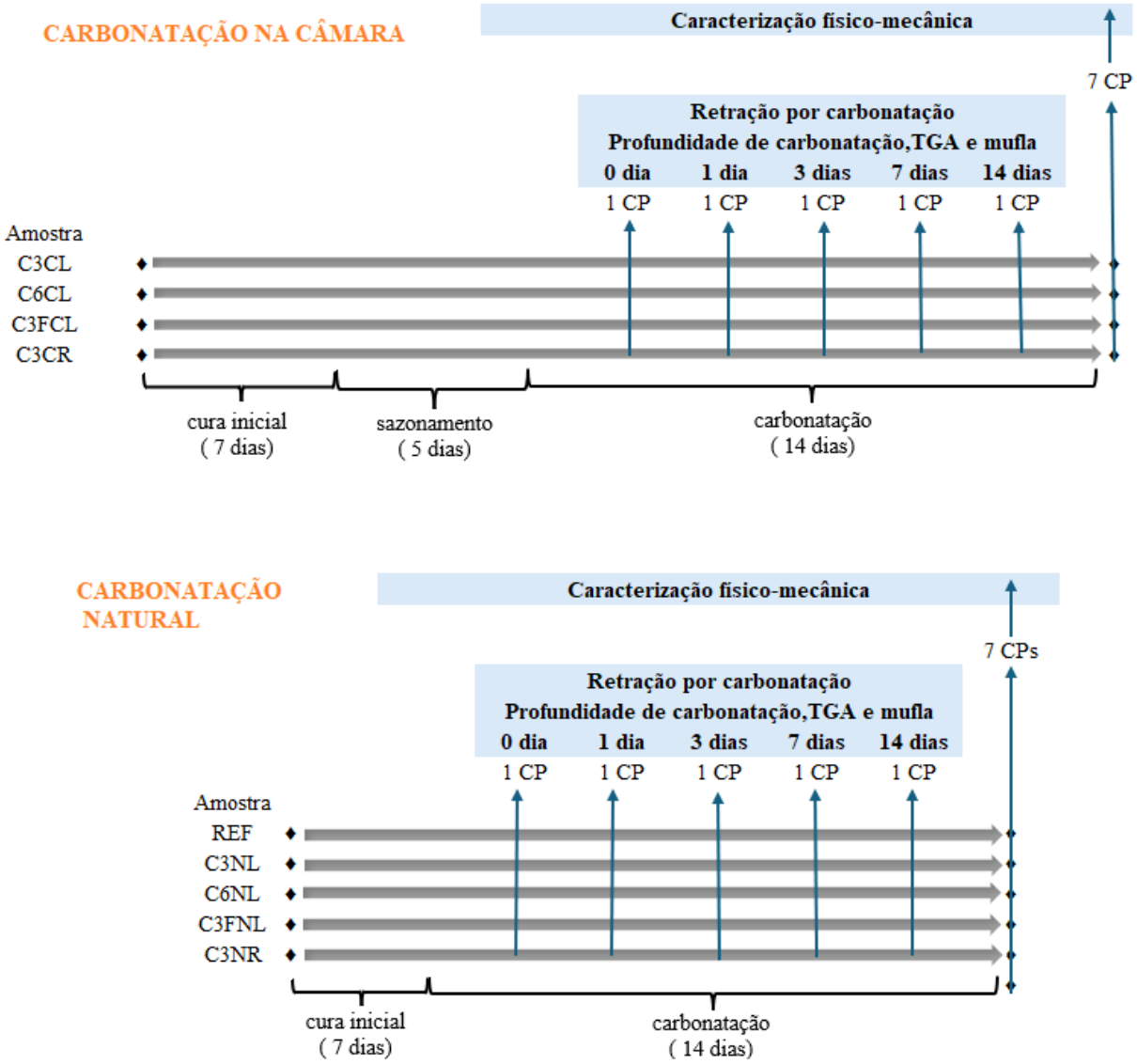


Legenda: (a) Seladora a vácuo; (b) Selagem a vácuo de amostra; (c) Amostra em saco plástico antes da selagem; (d) Amostra em saco plástico após selagem.

Fonte: O autor (2026)

Na Figura 5.20 é apresentado os momentos no tempo de cura e exposição de coleta de amostra para os ensaios de caracterização físico-mecânica, retração, TGA, mufla e leituras de profundidade de carbonatação (durante o período de carbonatação).

Figura 5.20 Momentos no tempo de cura e exposição de coleta de amostra para caracterização e leituras de profundidade de carbonatação



Fonte: O autor (2026)

* Em cada dia (0,1,3,7 e 14), foi separado um CP, que foi fraturado em dois pedaços, 1 para TGA e mufla e outro para medir profundidade de carbonatação por aspersão de 1% fenolftaleína.

5.6.1 Características físicas do fibrocimento

Para a caracterização física do fibrocimento, foram realizados os ensaios de porosidade total, densidade aparente, densidade real e absorção de água, determinados pelo princípio de Arquimedes, conforme procedimentos estabelecidos pela NBR 9778 (ABNT, 2009). O método consistiu na imersão dos corpos de prova em água saturada com cal por um período de 24 horas, visando a completa saturação. Após esse período, as amostras foram pesadas para a

determinação das massas saturadas (m_{sat}) e imersa em água (m_{im}), utilizando-se uma balança hidrostática com precisão de 1g.

As mesmas amostras foram posteriormente empregadas na avaliação do desempenho mecânico, sendo a condição saturada utilizada nos ensaios de resistência à flexão. A determinação da massa seca (m_{seca}) foi realizada após 14 dias de carbonatação, para as amostras carbonatadas, submetidas a secagem em estufa a 50 °C por 24 horas, até massa constante.

A porosidade total, a densidade aparente, a densidade real e a absorção de água foram calculadas conforme apresentado na Equação 5.3, por meio das expressões (a), (b), (c) e (d), respectivamente.

Equação 5.3 Equações para o cálculo da (a) porosidade (%), (b) densidade aparente (g/cm³), (c) densidade real (g/cm³) e (d) absorção de água (%).

$P = \frac{m_{sat} - m_{seca}}{m_{sat} - m_{im}}$	$D_{ap} = \frac{m_{seca}}{m_{sat} - m_{im}}$	$D_{real} = \frac{m_{seca}}{m_{seca} - m_{im}}$	$Ab = \frac{m_{sat} - m_{seca}}{m_{seca}}$
(a)	**(b)**	**(c)**	**(d)**

Fonte: Souza (2014, p. 64).

5.6.2 Desempenho mecânico

O desempenho mecânico das amostras foi determinado adaptando a metodologia utilizada por Souza (2014), pela resistência mecânica através do ensaio de flexão de três pontos. Foi determinado o módulo de ruptura (MOR) (Equação 5.4 e 5.7), módulo de elasticidade (E) (Equação 5.5) e tenacidade ou energia de fratura (ξ) (Equação 5.6). Os ensaios de flexão foram realizados com corpos de prova depois de serem imersos em água por um período de 24h.

Equação 5.4 Módulo de ruptura na flexão (MOR)

$$MOR = \frac{3P_{máx}.L}{2b.e^2}$$

Onde:

Pmáx – carga máxima de ensaio (N);

L – Distância entre os cutelos (mm);

b – largura do corpo de prova (mm);

e – Espessura do corpo de prova (mm).

Equação 5.5 Módulo de elasticidade (E)

$$E = \frac{L^3}{48.l}\left(\frac{P}{\delta}\right)$$

Onde:

L – Distância entre os cutelos (mm);

l – Momento de inércia da seção transversal, dado por $\frac{be^3}{12}$ $(mm)^4$;

P/ δ – coeficiente angular do trecho elástico da curva carga versus flecha (N/mm).

Equação 5.6 Tenacidade ou energia de fratura (ξ)

$$\xi = \frac{A_{p-\delta}}{b.e}$$

Onde:

$A_{p-\delta}$ – área total sob a curva carga versus flecha (N.mm);

b – Largura do corpo de prova (mm);

e – Espessura do corpo de prova (mm).

Para realizar o cálculo do módulo de ruptura (MOR), para as amostras rugosas (C3NR e C3CR), foi necessário utilizar a Equação 5.7, devido à sua geometria única.

Equação 5.7 Equação do módulo de ruptura (MOR) usada para o CP rugoso

$$MOR = \frac{P_{máx}.L.c}{4.l}$$

Onde:

Pmáx – carga máxima de ensaio (N);

L – Distância entre os cutelos (mm);

c (Y_{CG}) – Centro de gravidade da seção transversal, dado por $\frac{\sum(y_i.A_i)}{\sum A_i}$(mm);

l – Momento de inércia da seção transversal, dado por $l_x + A.dy^2(mm)^4$.

Para realizar o ensaio de flexão foi utilizada uma prensa universal, modelo DL20, da marca EMIC, com dispositivo de ensaio de compressão com capacidade de até 200 kN, computadorizada, disponível no Laboratório de Materiais de Construção e Estruturas (LAMCE) do Departamento de Engenharia Civil (UFS). Para determinar o coeficiente angular e módulo de elasticidade dos corpos de prova, foi medida a flecha do meio do vão utilizando extensômetro de curso máximo de 5mm, com a velocidade de carregamento de 5mm/min.

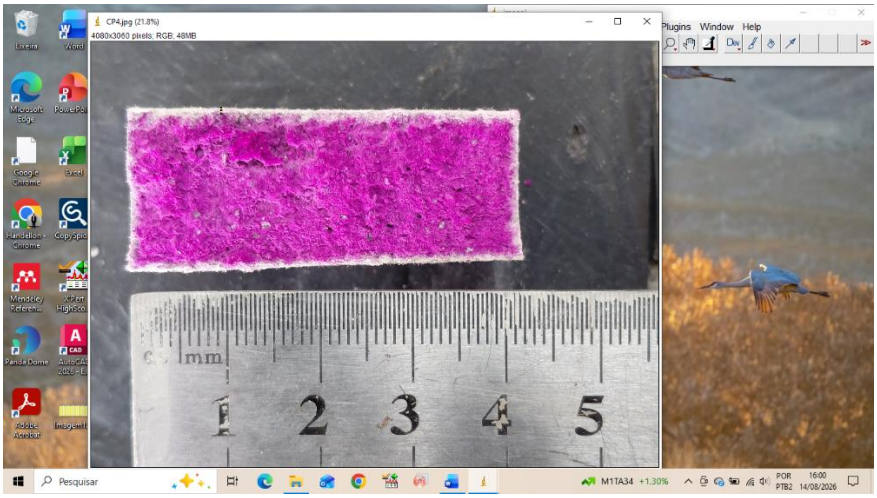
5.6.3 Indicadores de carbonatação

5.6.3.1 Profundidade de carbonatação por indicador de pH fenolftaleína

A profundidade de carbonatação, determinada por indicador de pH à base de fenolftaleína, foi avaliada utilizando-se uma solução de fenolftaleína a 1% em álcool etílico. A solução foi borrifada sobre a superfície de fratura dos corpos de prova de fibrocimento. A identificação das regiões carbonatadas foi realizada com base na variação de coloração do material, sendo a coloração vermelho/magenta indicativa de regiões não carbonatadas, associadas a pH elevado, enquanto a ausência de coloração (incolor) indicou regiões carbonatadas, correspondentes a pH reduzido, conforme descrito por Neves (2005).

Após aplicação do indicador e a estabilização da reação, as superfícies analisadas foram fotografadas e as profundidades de carbonatação foram mensuradas com o auxílio do *software ImageJ*®. Foi posicionada uma régua graduada na produção das imagens dos corpos de prova, para ser realizada a calibragem do software na escala desejada, nesse estudo as medidas foram mensuradas em milímetros (mm). A profundidade de carbonatação (incolor) foi mesurada por meio de 4 medidas (a cada 1 cm, tendo como referência a régua na imagem) (Figura 5.21), posteriormente os resultados foram registrados em planilha do software Excel e produzidos gráficos relacionando as idades (0, 1 ,3 ,7 e 14 dias) com a média das profundidades de carbonatação (mm).

Figura 5.21 Captura de tela do software *ImageJ*®.



Fonte: O autor (2026)

5.6.3.2 Análise Termogravimétrica (TG/DTG)

Foi realizada, conforme metodologia já indicada na seção 5.2.6, para as idades 0 e 14 dias, com o objetivo de analisar a carbonatação por meio da perda de massa.

5.6.3.3 Análise da carbonatação por perda de massa na Mufla

Foi realizado o aquecimento de amostras de fibrocimento nas idades 0, 1, 3, 7 e 14 dias e registrada a perda de massa, com a qual foi possível identificar a quantidade de dióxido de carbono (CO_2) presente nas amostras. Por meio desse ensaio é possível saber a quantidade de carbonatos na perda de massa por meio da pesagem do material após esfriar depois de um aquecimento em uma faixa de temperatura (520 °C – 1000 °C) (Figura 5.22). O CO_2 presente nas amostras é calculado pela Equação 5.8 **(a)**. A quantidade de CO_2 absorvida nas amostras após 14 dias de carbonatação foi determinada pela Equação 5.8 **(b)**, a fim de descontar os carbonatos que já estavam na amostra aos 0 dias.

Equação 5.8 Cálculo do CO_2 pelo ensaio de perda de massa por forno mufla

$\%CO_2 = \frac{\Delta m(520\,°C - 1000\,°C)}{Mamostra + \Delta m(30\,°C - 520\,°C)}$	**(a)**
$CO_2 absorvido\ (\%)14D = \%CO_2 14D - \%CO_2 0D$	**(b)**

Onde:

$\%\boldsymbol{CO_2}$**:** CO_2 presente nas amostras (%);

$\boldsymbol{\Delta m(520\,°C - 1000\,°C)}$**:** Perda de massa final (g);

$\boldsymbol{Mamostra}$**:** Massa da amostra (g);

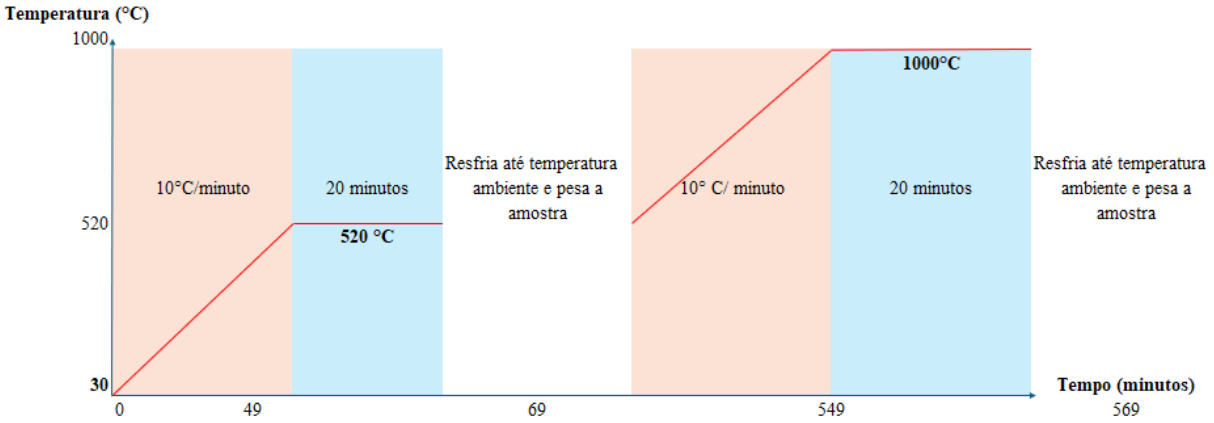
$\boldsymbol{\Delta m(30\,°C - 520\,°C)}$**:** Perda de massa inicial (g);

$\boldsymbol{CO_2 absorvido}\ (\%)\boldsymbol{14D}$**:** CO_2 absorvido na amostra aos 14 dias de carbonatação;

$\%\boldsymbol{CO_2 14D}$**:** CO_2 presente nas amostras (%) aos 14 dias de carbonatação;

$\%\boldsymbol{CO_2 0D}$**:** CO_2 presente nas amostras (%) aos 0 dias de carbonatação.

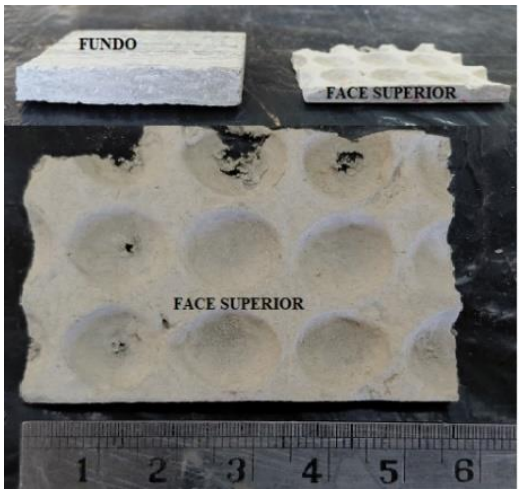
Figura 5.22 Metodologia do ensaio da mufla



Fonte: O autor (2026)

Para os CPs C3NL, C3CL, C3NR e C3CR, uma das faces foi escolhida para comparação e serrada por meio de serra circular com disco diamantado (Figura 5.23), o objetivo era comparar só a face rugosa com a face equivalente para os CPs de face lisa com mesmo teor de celulose. Para fins de identificação a face da amostra lisa foi identificada com final "SU" (superfície), sendo assim são elas: C3NLSU e C3CLSU, superfícies das amostras C3NL e C3CL, respectivamente, já para a rugosa continua a mesma nomenclatura, já que apenas a face foi analisada nesse ensaio.

Figura 5.23 Face cortada de um CP rugoso



Fonte: O autor (2026)

5.6.3.4 Cinética de carbonatação

A cinética de carbonatação, foi calculada conforme Equação 4.12, apresentada na seção 4.4.1 do Referencial teórico.

5.6.3.5 Retração por carbonatação

Os corpos de prova utilizados no ensaio de retração foram cortados nas dimensões 16 x 4 cm, a partir de placas de fibrocimento com dimensões de 32 x 32 cm, produzidas em laboratório. O corte foi realizado com o auxílio de serra circular equipada com disco diamantado, garantindo precisão dimensional e integridade dos corpos de prova.

Para possibilitar a leitura do comprimento dos corpos de prova no aparato de determinação de retração, foram coladas, em cada extremidade, peças metálicas com superfícies cônica e côncava, conforme o procedimento adotado por Souza (2014). Essas peças permitem o perfeito encaixe com as pontas convexas do equipamento de medição (Figura 5.24), assegurando a repetibilidade e a confiabilidade das leituras.

Figura 5.24 Ensaio de retração



Fonte: O autor (2026)

Os pinos metálicos foram fixados aos corpos de prova utilizando adesivo epóxi bicomponente de secagem rápida. O procedimento de colagem foi realizado com os corpos de prova ainda úmidos, a fim de evitar que fossem submetidos à primeira secagem antes do início do ensaio. Inicialmente, colou-se o pino metálico em uma das extremidades do corpo de prova e em um intervalo de 10 minutos (tempo de secagem da cola), colou-se o segundo pino na outra extremidade.

As medições de retração foram realizadas nas idades de 0, 1, 3, 7 e 14 dias, com o objetivo de avaliar a evolução da retração ao longo do tempo em corpos de prova submetidos à carbonatação nos mesmos períodos.

5.6.4 Indicadores de ecoeficiência (IL), (IC) e (SICFeq)

Os indicadores foram calculados de acordo com a Equação (4.14), apresentada no Referencial Teórico (seção 4.7.1). No entanto, por este trabalho tratar de fibrocimento, cuja aplicação é como telha ou placa cimentícia, foi realizada uma adaptação aos índices de ecoeficiência, sendo utilizada a resistência à flexão ao invés da resistência à compressão. Portanto a adaptação ficou da seguinte forma para a intensidade de ligante (IL) **(a)** e índice de intensidade de carbono (IC) **(b)**, respectivamente:

Equação 5.9 IL e IC adaptados

$IL = \frac{Consumo\ de\ cimento\ (kg\ /m^2)}{Resistência\ à\ flexão\ aos\ 14\ dias\ (MPa)}$	**(a)**
$IC = \frac{CO_2\ emitido\ (kg\ /m^2)}{Resistência\ à\ flexão\ aos\ 14\ dias\ (MPa)}$	**(b)**

Para calcular o consumo de cimento foi multiplicado a fração de cimento de cada formulação pela densidade aparente de cada formulação, depois convertido em kg/m², já para o CO_2 emitido, foi calculado pelo produto entre o consumo de cimento e o fator de emissão do cimento CPV ARI (CO_2/kg/kg) (média da emissão mínima e máxima obtida pelo sidac) (Sidac, 2026). Nesse estudo também foi calculado o Saldo de intensidade carbono-flexão equivalente (SICF eq), desenvolvido por Carvalho (2026) que é uma relação entre a resistência à flexão da placa pela diferença entre o carbono emitido e capturado (Equação 5.10).

Equação 5.10 Saldo de intensidade carbono-flexão equivalente (SICF eq)

$$SICF_{eq} = \frac{CO_2 emitido\ \left(\frac{kg}{m^2}\right) - CO_2 eq\ capturado\ (\frac{kg}{m^2})}{Resistência\ à\ flexão\ aos\ 14\ dias\ (MPa)}$$

O CO_2 eq capturado foi obtido pelo produto do CO_2 eq obtido no ensaio da mufla (%/100) aos 14 dias de carbonatação, pela densidade da placa de cada formulação (kg/m³) e pela espessura da placa (m).

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse estudo, foram produzidas amostras de fibrocimento que tiveram suas características físicas alteradas (porosidade, morfologia superficial), foram estudadas suas propriedades físico-mecânicas e microestruturais, bem como a cinética do avanço da frente de carbonatação submetidas em ambiente natural (teor de CO_2 em níveis naturais), e em câmara fechada (teor de CO_2 com concentração de 5%), além disso foi estudada o efeito do fíler carbonático com relação a pontos de nucleação nas amostras, sendo realizada as mesmas análises mencionadas anteriormente. Sendo assim, nos tópicos seguintes, serão apresentados e discutidos os resultados dessa pesquisa.

6.1 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

A caracterização das amostras foi realizada com o objetivo de estabelecer as condições de referência das formulações de fibrocimento antes da análise dos efeitos da carbonatação. Foram analisadas as propriedades físicas e mecânicas das formulações produzidas, com ênfase nas diferenças decorrentes do teor de fibras de celulose e da configuração da superfície.

Os resultados apresentados nesta seção correspondem à condição inicial das amostras, antes da comparação sistemática entre os diferentes ambientes de carbonatação. Dessa forma, a porosidade, a absorção de água, as densidades e o desempenho mecânico determinados nesta etapa constituem a base para interpretar as alterações observadas após a exposição ao CO_2. A discussão dos efeitos da carbonatação, incluindo a evolução da porosidade, da absorção de água, da frente carbonatada, da incorporação de CO_2 e da retração, será realizada nos itens subsequentes.

6.1.1 Caracterização inicial das formulações de fibrocimento

A caracterização inicial das formulações de fibrocimento teve como finalidade estabelecer um panorama comparativo entre os compósitos produzidos, permitindo identificar, antes da análise específica da carbonatação, como as alterações de composição e morfologia influenciaram a estrutura física e o desempenho mecânico das placas. As formulações avaliadas compreenderam o corpo de prova de referência sem fibras e os compósitos reforçados com celulose, incluindo as variações com maior porosidade, superfície rugosa e incorporação de fíler carbonático, conforme o delineamento experimental adotado no estudo.

Do ponto de vista físico, a análise de porosidade total, densidade aparente, densidade real e absorção de água permitiu observar diferenças importantes entre as formulações, uma vez que esses parâmetros refletem diretamente o arranjo interno da matriz e sua capacidade de interação com fluidos e gases. Como esses ensaios foram determinados pelo princípio de Arquimedes, eles constituem uma base importante para interpretar posteriormente a difusão de CO_2, e a profundidade de carbonatação dos compósitos.

A absorção de água e a porosidade apresentam uma tendência de aumento proporcional, pois ambos indicam a quantidade de espaço vazio no interior do material, no entanto, a primeira indica esta análise em relação à massa (massa de água absorvida em relação à massa total) e a porosidade é uma relação de volume (volume de vazios em relação ao volume total). Porém, é importante destacar que nem sempre a absorção de água aumenta à medida que a porosidade também aumenta, pois no caso de a matriz cimentícia possuir poros que não estão interconectados, vai ocorrer um aumento da porosidade, mas a absorção de água não vai ter um aumento proporcional (Ramli, Tabassi e Hoe, 2013).

O primeiro resultado apresentado (Figura 6.1 (a)) mostra que ao incorporar fibras de celulose ao compósito, aumenta-se a quantidade de vazios, com crescimento na porosidade de 88,9% (aumento de 18% na pasta cimentícia – REF – para 34% no compósito com fibras de celulose – C3NL). A absorção de água acompanha esta tendência (aumento de 9% (REF) para 22% (C3NL)). Este aumento na porosidade resultou em redução na densidade aparente de 19%, diminuindo de 1,95 g/cm³ na pasta (REF) para 1,58 g/cm³ no compósito com fibras (C3NL) (Figura 6.1 (b)). Uma vez que a fibra de celulose representa a inserção de uma nova fase porosa no compósito, e não é resultado de alterações nos produtos de hidratação ou de empacotamento, dos pós da pasta cimentícia, a densidade real se manteve praticamente a mesma entre as duas amostras.

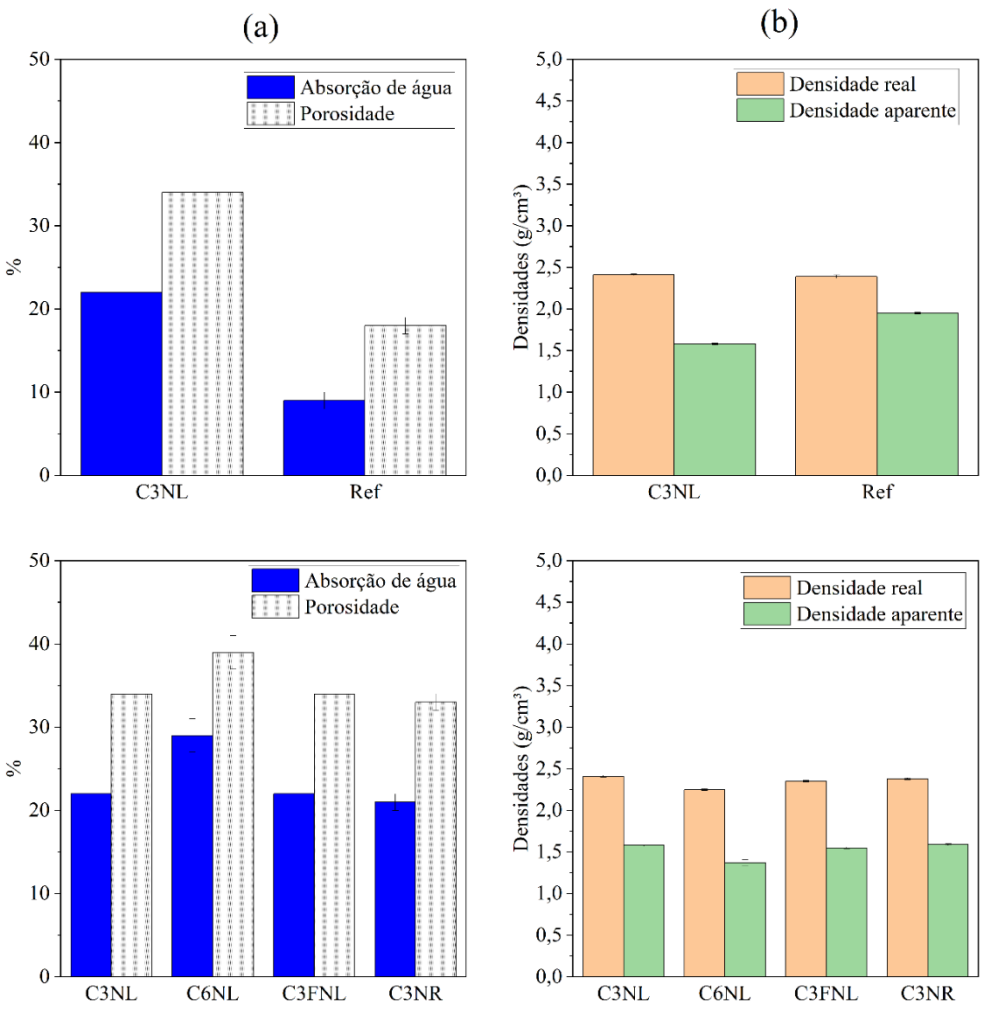
A porosidade da fibra de celulose é atribuída aos seus compartimentos internos vazados chamados de lúmen, no qual funciona como um canal para a movimentação de água dentro das fibras (Liu e Lv, 2021). A alta capacidade de absorção e retenção da água das fibras de celulose podem resultar em microcanais na matriz cimentícia aumentando assim a porosidade do compósito (Zaid e Kahla, 2026).

De modo geral, as formulações com incorporação de fibra tenderam a apresentar comportamento distinto em relação à amostra de referência, especialmente em função da inserção desta fase porosa formada pela celulose, observada na porosidade maior ao passo que

se aumenta o teor de fibra no compósito (Figura 6.1 (a)). Este comportamento indica a conectividade dos poros e na área efetivamente exposta ao meio, quando expostas ao ambiente.

Esse resultado é particularmente relevante porque a proposta central da pesquisa parte justamente da hipótese de que o aumento da porosidade e da área superficial do fibrocimento pode favorecer a penetração de CO_2 e, consequentemente, acelerar a carbonatação e a captura de carbono. Já as amostras com mesmo teor de celulose, mas com alterações na rugosidade superficial, ou até mesmo na composição da matriz, com filer carbonático, os valores de porosidade e densidade não apresentaram diferenças significativas (Figura 6.1).

Figura 6.1 (a) Absorção de água e porosidade total; (b) Densidades real e aparente das amostras de fibrocimento



Fonte: O autor (2026)

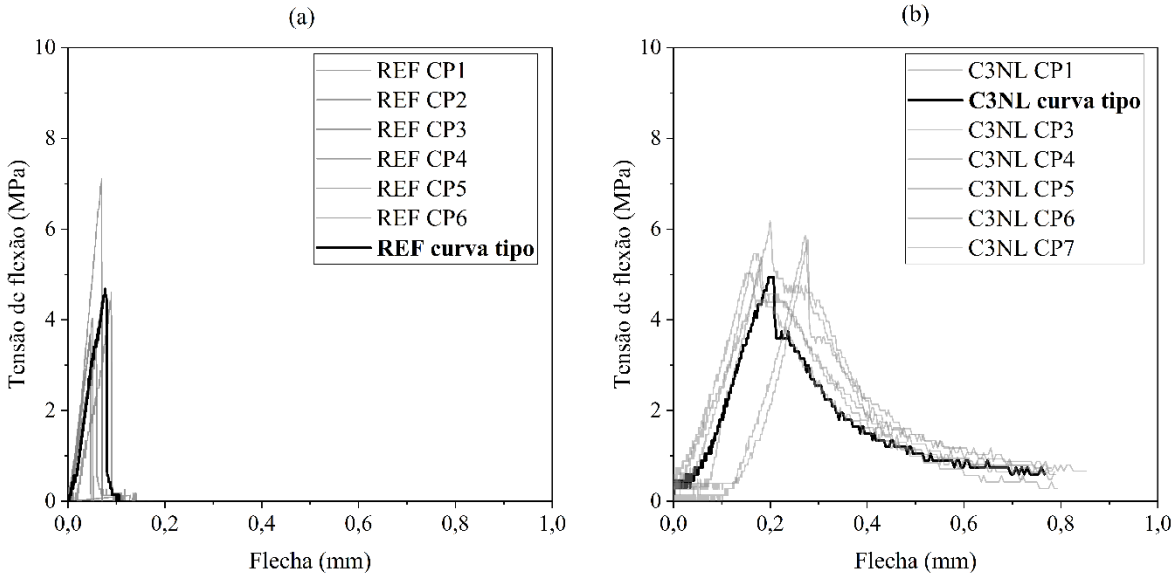
No caso das características físicas, a comparação entre as formulações permite interpretar não apenas qual material apresenta maior porosidade total ou maior absorção de água, mas sobretudo como essas propriedades se relacionam com a facilidade de transporte de CO_2 no interior da matriz cimentícia. Formulações com maior volume de vazios e maior absorção podem indicar maior permeabilidade ao gás, embora esse efeito deva ser analisado em conjunto com a distribuição e conectividade dos poros, bem como com a estabilidade da estrutura formada após a cura.

Sob o ponto de vista mecânico, a caracterização inicial foi conduzida por meio dos ensaios de flexão em três pontos, a partir dos quais foram obtidos o módulo de ruptura, o módulo de elasticidade e a tenacidade. Esses parâmetros são necessários para verificar se as alterações propostas para potencializar a carbonatação mantêm desempenho compatível com o uso do compósito, já que a hipótese do trabalho não se restringe ao aumento da captura de CO_2, mas também considera a preservação das propriedades mecânicas do fibrocimento.

A comparação inicial entre as formulações mostra que a presença de fibras e as modificações na morfologia superficial não devem ser analisadas apenas pelo efeito isolado sobre a resistência, mas pela forma como alteram o mecanismo de resposta do compósito sob carregamento. Enquanto a matriz sem fibra tende a apresentar comportamento menos dúctil, a incorporação de celulose pode modificar a dissipação de energia e a resposta pós-fissuração, refletindo-se principalmente na tenacidade e na forma de ruptura observada nos ensaios de flexão.

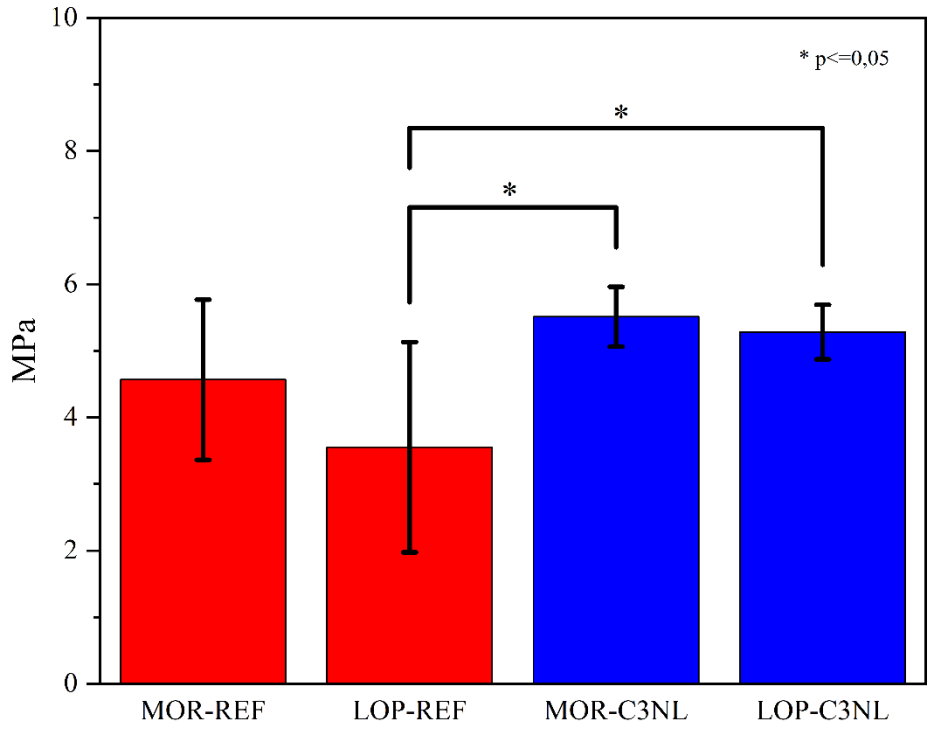
Na Figura 6.2 é mostrado que o MOR – módulo de ruptura na flexão, ou tensão de flexão, sendo este parecido entre as amostras sem e com fibras de celulose, com a principal diferença observada no comportamento pós-fissuração com ruptura frágil observada na amostra REF, enquanto há ganho de ductilidade na amostra com celulose (C3NL). O MOR não apresentou diferença significativa com relação ao valor do LOP – limite de proporcionalidade (Figura 6.3). Isso indica que a adesão da fibra de celulose na matriz cimentícia não é elevada, como em comparação com fibras poliméricas de PP (MOR de 6-10 MPa) ou PVA (MOR de 9-13 MPa), por exemplo (Bezerra; Joaquim; Savastano, 2004).

Figura 6.2 Comportamento mecânico na flexão das amostras REF (a) e C3NL (b)



Fonte: O autor (2026)

Figura 6.3 Comparação entre o MOR e o LOP pelo teste de Tukey



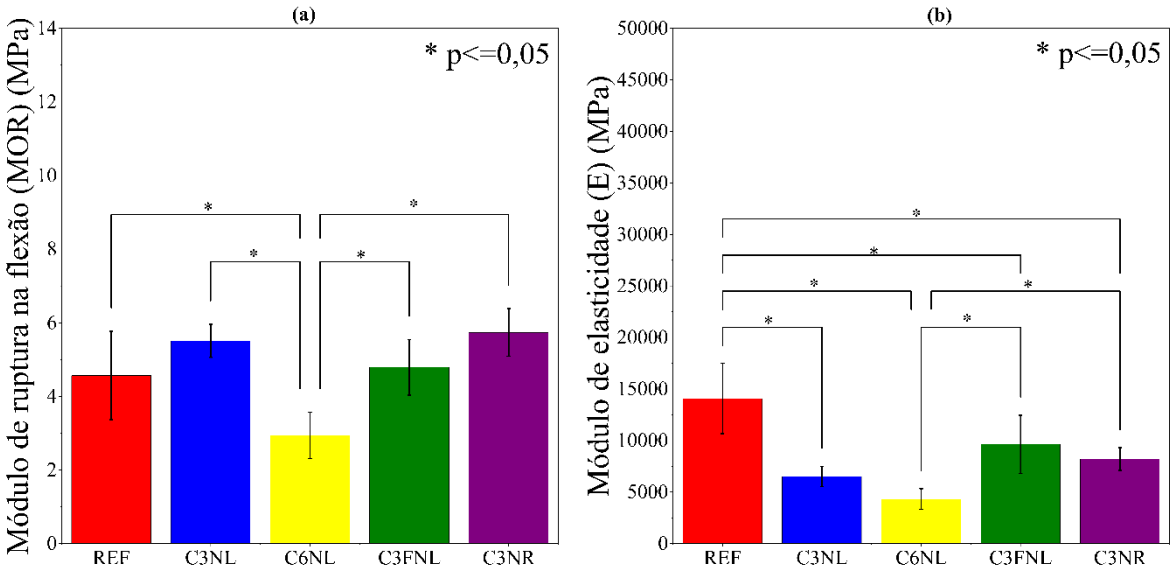
Legenda: ▬ : Entre duas colunas de dados indica que há diferença significativa entre as amostras conectadas no teste de Tukey.

Fonte: O autor (2026)

Da mesma forma, alterações de porosidade da matriz cimentícia, rugosidade superficial e amostras com substituição do calcário por fíler carbonático podem impactar o módulo de ruptura e o módulo de elasticidade, seja pela possibilidade de modificar a compacidade da matriz, seja por introduzir ou reduzir descontinuidades geométricas ou pontos preferenciais de concentração de tensões em sua microestrutura. Analisando inicialmente a substituição por fíler carbonático, para uma amostra com o mesmo teor de fibras de celulose, não foram observadas variações significativas no MOR (Figura 6.4 (a)), o mesmo ocorre com relação à rigidez do fibrocimento (Figura 6.4 (b)).

Com relação à rugosidade superficial, apesar de se esperar uma redução na resistência à flexão, pois houve uma redução de material abaixo do relevo da superfície, pela análise estatística (Tukey), não houve diferença significativa (Figura 6.4 (a)). No entanto, ao observar o aumento no teor de celulose houve uma redução significativa no MOR, de 46,64% (5,51 MPa para C3NL e 2,94 MPa para C6NL), o que era esperado, já que ao aumentar o teor de celulose na matriz cimentícia, aumentam-se os vazios, o que consequentemente reduz a resistência do compósito.

Figura 6.4 (a) Módulo de ruptura e (b) módulo de elasticidade



Legenda: ——— : Entre duas colunas de dados indica que há diferença significativa entre as amostras conectadas no teste de Tukey.

Fonte: Autor (2026)

Em síntese, a caracterização inicial das formulações de fibrocimento constitui uma etapa de transição entre a descrição dos materiais constituintes e a análise específica da carbonatação,

pois organiza a compreensão do comportamento de cada compósito antes da exposição ao CO_2, ainda em seus estágios iniciais de avaliação. A partir dessa base, torna-se possível discutir com maior clareza, nos itens subsequentes, como a presença da fibra, o aumento da porosidade, a variação da morfologia superficial e a incorporação de fíler carbonático influenciam a cinética de carbonatação, os indicadores de ecoeficiência e o desempenho global do fibrocimento.

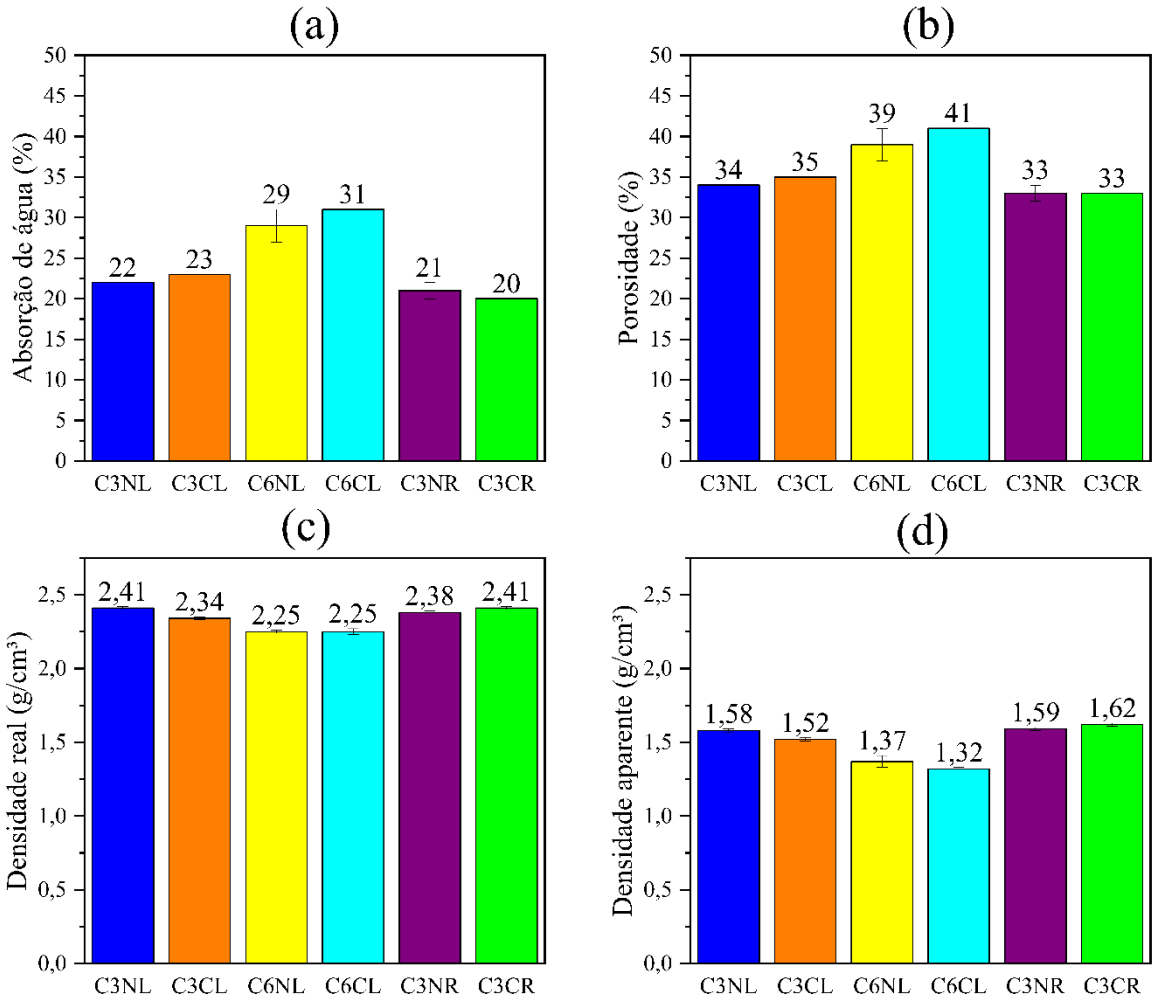
6.2 EFEITOS DA MORFOLOGIA E DA POROSIDADE NA CARBONATAÇÃO DO FIBROCIMENTO

Nos tópicos seguintes serão discutidos e analisados os efeitos da morfologia superficial dos compósitos (mudança de área superficial lisa para rugosa) e alterações nas características físicas na carbonatação do fibrocimento.

6.2.1 Características físicas (porosidade, densidade, absorção)

Os resultados de porosidade total, densidade aparente, densidade real e absorção de água mostram que a morfologia da superfície e a porosidade do fibrocimento, induzida por maior teor de celulose, pouco influenciaram nestas propriedades. De acordo com a figura 6.5, houve aumento de porosidade e absorção de água para as composições C3 e C6, além de queda nas densidades aparente e real. Para as composições rugosas houve um comportamento distinto, queda na absorção de água, mesma porosidade e aumento nas densidades.

Figura 6.5 (a) Absorção de água, (b) Porosidade total, (c) Densidade real e (d) Densidade aparente das amostras com variação da área superficial de exposição e da porosidade na carbonatação



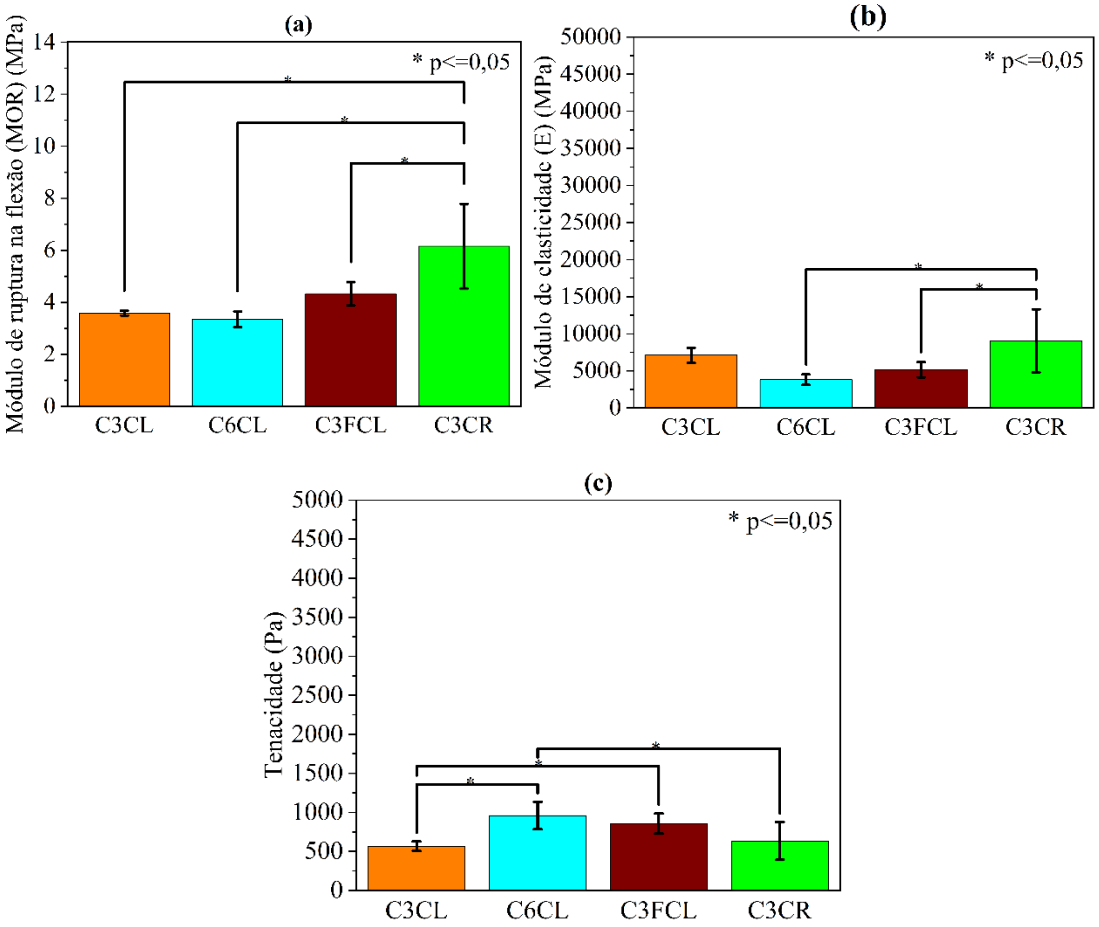
Fonte: O autor (2026)

Ao comparar as amostras antes e depois da carbonatação, a tendência esperada é que parte dos vazios acessíveis seja progressivamente preenchida pelos produtos carbonatados formados na matriz, refletindo na redução da porosidade pelo refinamento de poros e aumento da densificação da matriz cimentícia (Jaberizadeh, Danoglidis e Konsta-Gdoutos, 2026; Parente *et al.*, 2026). No entanto, os resultados encontrados não tiveram o comportamento esperado, pois em alguns casos, apesar da diferença ser pequena houve aumento de porosidade. Apesar disso, os resultados encontrados numericamente foram semelhantes aos encontrados na literatura para absorção de água (24,17%-43,12%) (Prasetyo *et al.*, 2025), porosidade (15%-45%) (Xaysombath *et al.*, 2025) e densidade aparente (1,27 g/cm³-1,68 g/cm³) (Taiwo *et al.*, 2024). Para densidade real não foram encontrados artigos.

6.2.2 Desempenho mecânico (MOR, E, ξ)

Após 14 dias de exposição ao processo de carbonatação, as amostras foram submetidas ao ensaio de flexão em três pontos para determinação do módulo de ruptura, do módulo de elasticidade e da tenacidade. Os resultados das amostras carbonatadas são apresentados na Figura 6.6. Nesta seção, além da comparação entre as formulações submetidas à carbonatação, também são analisadas as alterações observadas em cada composição em relação à sua condição inicial, apresentada no item 6.1.1.

Figura 6.6 (a) Módulo de ruptura, (b) Módulo de elasticidade, (c) Tenacidade



Fonte: O autor (2026)

A comparação entre as amostras carbonatadas indica que o maior valor de MOR foi obtido para a formulação rugosa C3CR, com aproximadamente 6,16 MPa. As demais amostras submetidas à carbonatação em câmara apresentaram valores próximos de 3,35 MPa, 3,58 MPa, 4,33 MPa correspondentes às formulações C6CL, C3CL e C3FCL. Dessa forma, entre as

amostras carbonatadas, a C3CR apresentou o maior valor de resistência à flexão, enquanto a C6CL apresentou o menor valor.

Entretanto, a análise entre as amostras carbonatadas não é suficiente para determinar o efeito da carbonatação sobre o desempenho mecânico. Para isso, é necessário comparar cada formulação com sua respectiva condição N, ou seja, apenas exposta ao ambiente em condição de carbonatação natural. A comparação entre C3NL e C3CL indica redução do módulo de ruptura após a carbonatação em câmara, de aproximadamente 5,51 MPa para 3,58 MPa. Essa redução corresponde a uma diminuição aproximada de 35% no valor médio. Portanto, para a formulação com 3% de celulose e superfície plana, a exposição ao ambiente com 5% de CO_2 não resultou em aumento da resistência à flexão após 14 dias. Esse comportamento indica que a carbonatação, nas condições avaliadas, não produziu uma densificação mecânica suficiente para compensar possíveis efeitos de variação dimensional.

Na formulação com 6% de celulose, a comparação entre C6NL e C6CL mostra comportamento diferente. O MOR aumentou de aproximadamente 2,95 MPa na condição natural para 3,35 MPa após a carbonatação. Apesar de o valor carbonatado continuar inferior ao observado para a formulação C3CL, a exposição ao CO_2 promoveu aumento da resistência média da própria formulação C6. Esse resultado sugere que a maior porosidade inicial da C6NL pode ter permitido maior penetração do CO_2 e maior interação com as fases hidratadas da matriz, favorecendo algum grau de preenchimento ou densificação local após a formação de produtos carbonatados.

No entanto, ao observar os resultados anteriores de porosidade, houve um aumento de 39% para 41% referente as composições C6NL e C6CL, respectivamente, o que indica que não é possível afirmar que houve um preenchimento dos poros devido a carbonatação.

Para a formulação com fíler carbonático, a comparação entre C3FNL e C3FCL indica redução do MOR de aproximadamente 4,79 para 4,33 MPa após a carbonatação em câmara. A diminuição foi menor que a observada para a formulação plana com 3% de celulose sem fíler carbonático, mas ainda assim não foi verificado aumento da resistência à flexão após a exposição ao CO_2. Portanto, considerando apenas o MOR, a presença do fíler carbonático não foi suficiente para produzir ganho mecânico após 14 dias de carbonatação.

Esse resultado mostra que a possível atuação do fíler carbonático como superfície de nucleação ou como material capaz de favorecer a precipitação de carbonatos não se traduziu necessariamente em aumento da resistência à flexão. O fíler carbonático pode contribuir para a formação ou distribuição de produtos carbonatados, mas o efeito mecânico depende da localização desses produtos e da interação entre a matriz e as fibras. Assim, a confirmação de

um eventual efeito de nucleação deve ser realizada por meio dos resultados de carbonatação e das análises microestruturais, e não apenas pelo MOR.

A comparação entre C3NR e C3CR apresentou o comportamento mais favorável em termos de resistência à flexão. O MOR aumentou de aproximadamente 5,74 MPa na amostra rugosa não carbonatada em câmara para 6,16 MPa após a carbonatação. Esse aumento foi de aproximadamente 5% e, considerando a proximidade entre os valores, deve ser interpretado como uma pequena variação da resistência média.

Ainda assim, a formulação C3CR apresentou o maior MOR entre as amostras carbonatadas. Esse resultado não deve ser atribuído automaticamente ao aumento da área superficial provocado pela rugosidade, pois a caracterização inicial não mostrou diferenças significativas entre as amostras lisa e rugosa nas propriedades físicas. Além disso, a rugosidade pode introduzir uma geometria específica na seção transversal, alterando a distribuição das tensões e a forma de ruptura durante o ensaio de flexão.

A comparação individual das formulações permite observar que a carbonatação não provocou uma resposta mecânica uniforme. Houve redução do MOR para C3CL e C3FCL, aumento para C6CL e pequena elevação para C3CR. Esse comportamento reforça que a carbonatação não deve ser associada à densificação e ao aumento da resistência nas amostras analisadas. Em compósitos reforçados com celulose, a reação ocorre em uma matriz com diferentes níveis de porosidade e pode modificar simultaneamente a fase cimentícia, a interface fibra-matriz e a rede de vazios.

O efeito da carbonatação sobre o módulo de elasticidade deve ser interpretado de maneira complementar ao MOR. Enquanto o MOR representa a tensão máxima suportada pelo corpo de prova, o módulo de elasticidade está relacionado à rigidez da resposta no trecho aproximadamente linear da curva carga-deslocamento. Assim, uma formulação pode apresentar aumento ou manutenção da rigidez sem necessariamente apresentar aumento proporcional da resistência máxima. Por esse motivo, a análise do módulo de elasticidade não deve ser substituída pela análise do MOR.

Em síntese, a comparação entre as condições não carbonatada e carbonatada mostrou os seguintes comportamentos médios de MOR (Quadro 6.1):

Quadro 6.1 Síntese dos resultados de MOR entre as amostras carbonatadas em câmara e expostas ao ambiente natural

Formulação	Condição inicial	Após carbonatação	Tendência
C3NL/C3CL	5,51 MPa	3,58 MPa	Redução
C6NL/C6CL	2,95 MPa	3,35 MPa	Aumento
C3FNL/C3FCL	4,79 MPa	4,33 MPa	Redução
C3NR/C3CR	5,74 MPa	6,16 MPa	Pequeno aumento

Fonte: O autor (2026)

Os resultados indicam que o aumento da porosidade pela elevação do teor de celulose não produziu uma única resposta mecânica após a carbonatação. A formulação C6CL apresentou aumento do MOR em relação à C6NL, enquanto a formulação C3CL apresentou redução em relação à C3NL. Esse comportamento, no entanto, não condiz com os resultados encontrados para as propriedades físicas em que apesar de as diferenças serem pequenas, houve aumento da porosidade para as composições em câmara fechada.

Portanto, com base no MOR, não é possível afirmar que a carbonatação acelerada melhorou de maneira geral o desempenho mecânico do fibrocimento. O efeito foi dependente da formulação: algumas amostras apresentaram redução, enquanto outras apresentaram aumento ou manutenção da resistência. Apesar dos resultados serem semelhantes numericamente aos encontrados por Hamri *et al.* (2024) (1,27 MPa-6,94 MPa), os resultados encontrados não foram de acordo com a literatura que apresenta o aumento da resistência para amostras carbonatadas, devido a densificação da matriz cimentícia (Jaberizadeh, Danoglidis e Konsta-Gdoutos, 2026).

6.2.3 Profundidade de carbonatação e frente carbonatada

A profundidade de carbonatação foi determinada por meio da aplicação de solução de fenolftaleína sobre a superfície de fratura dos corpos de prova. A região que permaneceu com coloração vermelho-magenta foi considerada não carbonatada, enquanto a região sem alteração de cor foi associada à redução do pH provocada pelo avanço da carbonatação. As medidas foram realizadas nas idades de 0, 1, 3, 7 e 14 dias, conforme o procedimento descrito na metodologia, e os resultados estão apresentados na Figura 6.7.

Foram analisados três pares de formulações: C3NL e C3CL, C6NL e C6CL, e C3NR e C3CR. As comparações foram escolhidas para avaliar, respectivamente, a influência do ambiente de exposição sobre a amostra com 3% de celulose e superfície plana, o efeito da maior porosidade associada ao aumento do teor de celulose e o efeito da alteração da área superficial por meio da rugosidade. Em resumo, as 3 amostras apresentam distintas superfícies de exposição ao CO_2.

Em condições de exposição natural, observou-se que a amostra C6NL apresentou o maior avanço da frente carbonatada ao final dos 14 dias, atingindo aproximadamente 1,10 mm. As demais amostras apresentaram profundidades próximas de 0,42 mm. Portanto, no ambiente natural, a formulação com 6% de celulose apresentou profundidade de carbonatação aproximadamente 2,6 vezes maior que as formulações com 3% de celulose e superfície plana ou rugosa.

No estudo de Parente *et al.,* (2026), foi avaliado o potencial de utilização de polpa de eucalipto, adições minerais e carbonatação em compósito com fibras e os autores concluíram que as fibras criam vias que aumentam a eficiência de carbonatação em 33% em comparação com matrizes sem fibras, ainda explicam que ao adicionar as fibras aumenta a porosidade e que isso é estratégico para facilitar a entrada de CO_2 na matriz cimentícia, o que pode explicar o aumento da profundidade de carbonatação nesse estudo ao dobrar a quantidade de fibras de celulose.

Os resultados indicam de modo geral que ao aumentar a porosidade observa-se um aumento da frente carbonatada, o que indica que a fibra de celulose aumenta os vazios, hipótese essa vista nos resultados de características físicas apresentadas anteriormente. O CO_2 tende a penetrar com mais facilidade na matriz cimentícia em corpos de prova mais porosos o que explica a maior área carbonatada.

A diferença observada entre C6NL e as demais formulações mostra que, no ambiente natural, o efeito da porosidade interna foi mais expressivo que o efeito da área superficial externa. Embora a amostra C3NR apresentasse superfície rugosa e, portanto, maior área de exposição, sua profundidade de carbonatação permaneceu próxima à das amostras lisas com 3% de celulose, ao contrário do que diz a literatura, segundo a qual, ao aumentar a área de exposição da matriz cimentícia, tem-se a tendência de aumentar a carbonatação (Barbosa, 2021; Possan, 2019).

Esse resultado confirma que o aumento da área superficial externa não garante, isoladamente, maior avanço da carbonatação. É necessário que a geometria externa esteja

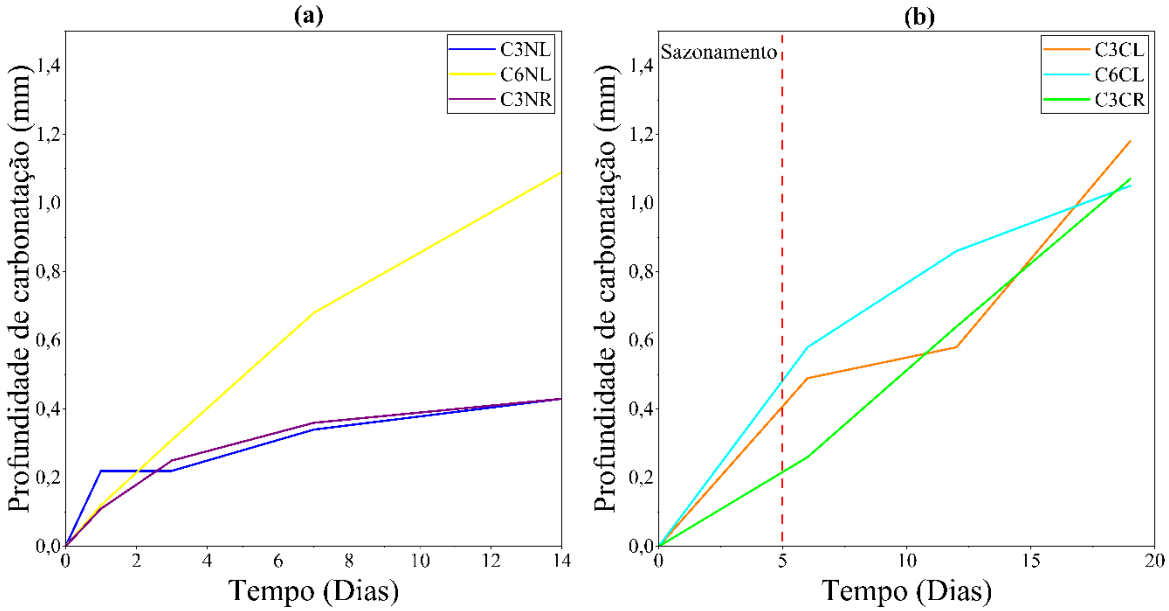
associada a uma rede de poros que permita a difusão do CO_2 para o interior da matriz. Uma hipótese para este comportamento é que ao formar a rugosidade por meio da compressão do molde com rugosidade, pode ter ocorrido uma compactação, diminuindo a abertura de poros na superfície, como mostrado na seção 6.2.1 no gráfico de porosidade, o que pode ter retardado a entrada de CO_2, mesmo em uma área superficialmente maior. No estudo de Shi *et al.* (2012), ao aumentar a pressão de compactação da moldagem do concreto, menor foi a carbonatação.

Na exposição em câmara de carbonatação, com concentração nominal de 5% de CO_2, observou-se aumento da profundidade carbonatada para as formulações. A amostra C6CL manteve profundidade elevada, de aproximadamente 1,05 mm, resultado próximo ao obtido para C6NL em exposição natural. Entretanto, nesse ambiente, as demais formulações também apresentaram aumento expressivo da profundidade de carbonatação, atingindo aproximadamente 1,18 mm para C3CL e 1,07 mm para C3CR.

A comparação entre os dois ambientes mostra que a concentração elevada de CO_2 diminuiu a diferença inicialmente observada entre as formulações. Enquanto a C6NL se destacou claramente na exposição natural, na câmara os valores finais das três amostras ficaram próximos, variando aproximadamente entre 1,05 e 1,18 mm. A maior concentração de CO_2 aumentou a disponibilidade do gás na superfície das amostras e favoreceu sua difusão para o interior da matriz, fazendo com que as formulações com menor porosidade também atingissem profundidades semelhantes às da amostra C6CL.

O resultado encontrado está de acordo com Shi *et al.* (2012) , que explicam que a maior concentração do gás (CO_2), ocasiona uma elevação da pressão parcial do dióxido de carbono na superfície do material cimentício, o que aumenta o gradiente de concentração de CO_2 entre o exterior e o interior dos poros, assim quanto maior esse gradiente, maior a difusão do gás, penetrando com mais velocidade e em maior quantidade nos primeiros momentos da carbonatação.

Figura 6.7 Profundidades de carbonatação: (a) Carbonatação natural; (b) Carbonatação em câmara com 5% de CO_2



Fonte: O autor (2026)

É importante destacar que a profundidade determinada por fenolftaleína representa o avanço de uma frente associada à redução da alcalinidade, mas não corresponde diretamente à quantidade total de CO_2 incorporada pelo material. Uma amostra pode apresentar determinada profundidade carbonatada e, ainda assim, possuir diferenças na quantidade de carbonatos formados ao longo da matriz. Por esse motivo, os resultados deste item devem ser complementados pela análise da absorção de CO_2, que nessa pesquisa foi realizada pelo método de perda de massa na mufla, que será discutido mais adiante.

6.2.4 Cinética de carbonatação

O estudo da cinética de carbonatação está relacionado a velocidade de avanço da frente carbonatada em um determinado tempo, geralmente em anos. Nesse estudo foi calculado pela equação 4.12, citada na seção 4.4.1 O coeficiente A (coeficiente angular da reta), foi calculado com base nas profundidades encontradas experimentalmente (Figura 6.7 (a)). Neste estudo, a projeção foi realizada utilizando os resultados da carbonatação natural das amostras C3NL, C6NL e C3NR. A escolha dessas formulações permitiu comparar o efeito do aumento da porosidade, provocado pela elevação do teor de celulose, com o efeito da modificação da área superficial externa por meio da rugosidade.

A Figura 6.8 apresenta as curvas de profundidade de carbonatação projetadas em função do tempo. Foi utilizada somente resultados referentes a carbonatação natural, por se aproximar mais de uma situação real, devido a concentração de CO_2 e ao momento em que as medições começaram (nos da câmara, após 5 dias de sazonamento).

É importante destacar que, apesar de ser mencionado na seção anterior que a rugosidade não aumentou de maneira significativa a profundidade de carbonatação com relação à amostra lisa (C3NL), em uma avaliação na escala de anos, percebe-se uma maior diferença entre as duas, sendo que a carbonatação da rugosa vai se distanciando ao longo do tempo com relação a lisa. No entanto, os resultados da projeção devem ser interpretados com cautela. A equação $x = A\sqrt{t}$ são uma aproximação baseada em um comportamento difusivo e pressupõe que o coeficiente de carbonatação permaneça constante ao longo do tempo.

Na prática, esse coeficiente pode ser alterado pela evolução da hidratação, pela redução da umidade, pela formação de carbonatos, pela densificação da matriz e pela mudança na conectividade dos poros. Neste caso analisado, a carbonatação das amostras com rugosidade pode ser maior nas idades iniciais devido ao aumento de área exposta, mas ao adentrar no interior do material, a área da frente de carbonatação termina por se igualar a seção transversal retangular da placa.

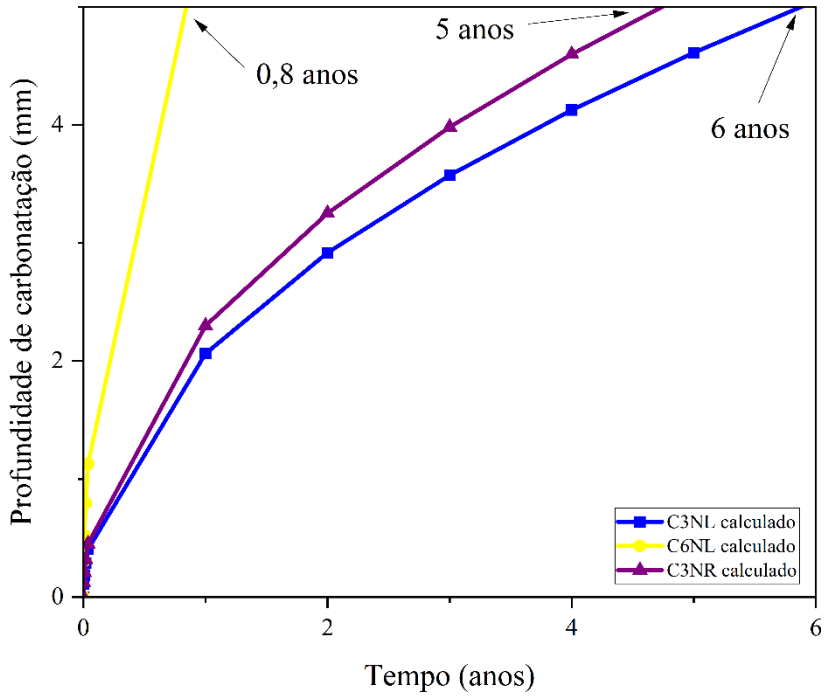
A análise das curvas mostra que a amostra C6NL apresentou o maior coeficiente de carbonatação e, consequentemente, a maior velocidade de avanço da frente carbonatada. Esse comportamento está associado à maior porosidade observada para a formulação com 6% de celulose. Como discutido nos itens anteriores, o aumento do teor de fibras elevou a porosidade total, indicando uma estrutura com maior volume de vazios e maior possibilidade de conexão entre os caminhos internos.

A maior velocidade de carbonatação da C6NL foi observada mesmo em condições naturais de exposição, nas quais a concentração de CO_2 é muito inferior à utilizada na câmara de carbonatação. Esse resultado reforça a importância da estrutura porosa para o transporte do gás, pois, em uma atmosfera com menor disponibilidade de CO_2, a maior facilidade de difusão no interior da matriz pode compensar parcialmente a menor concentração do gás no ambiente.

Com base na projeção apresentada, a C6NL atingiria a condição de carbonatação completa de uma placa com 10 mm de espessura em período inferior a um ano, considerando o avanço simultâneo da frente a partir das duas faces da placa. Em contraste, as formulações C3NL e C3NR atingiriam essa mesma condição em aproximadamente seis anos e cinco anos, respectivamente. Portanto, segundo o modelo utilizado, a amostra C6NL apresentou velocidade de carbonatação aproximadamente seis vezes superior à das formulações com 3%

de celulose. Apesar da literatura citar que a carbonatação nunca é 100% completa (Houst e Wittmann, 2002), o modelo como já foi dito considera uma constante de carbonatação ao longo do tempo.

Figura 6.8 Cinética de carbonatação quanto a morfologia do fibrocimento



Fonte: O autor (2026)

A interpretação é compatível com a literatura, segundo a qual a carbonatação pode ser aproximada por um processo de difusão através de um material poroso e depende da porosidade, da distribuição dos poros, da umidade e da concentração de CO_2 (Houst e Wittmann, 2002; Qiu, 2020). No presente estudo, a maior porosidade da C6NL favoreceu o avanço da frente carbonatada nos resultados experimentais e consequentemente na projeção para períodos mais longos.

6.2.5 Considerações microestruturais (TG/DTG)

Foi realizado o ensaio de TG/DTG para as amostras de fibrocimento antes e depois da carbonatação de 14 dias para as amostras na condição N (carbonatação natural) (Figura 6.9) e para as amostras na condição C (carbonatação na câmara), antes e depois da carbonatação de 14 dias (Figura 6.10). A primeira fase do ensaio de termogravimetria compreende a faixa de perda de massa equivalente a evaporação da água presente na matriz cimentícia das amostras

analisadas (35 °C – 200 °C). Nessa fase percebe-se a diferença das amostras que foram expostas a carbonatação natural (sem sazonamento) e carbonatação na câmara (com sazonamento).

Percebe-se que para as amostras em carbonatação na câmara a perda de massa é menos intensa nessa faixa de temperatura do que as de carbonatação natural, a hipótese é que ao passar por sazonamento as amostras em carbonatação na câmara tinham menos água na matriz cimentícia para evaporar do que as de carbonatação natural. O mesmo ocorre na análise entre mesma amostra e mesma condição de carbonatação, só que avaliando a diferença entre as idades (0 e 14 dias). Nos gráficos é possível perceber que a amostra de 0 dias tem uma maior perda de massa na faixa de evaporação de água, ou seja, tinha mais água na amostra, em contraste com a de 14 dias, que ao passar por esse período de carbonatação, a água nos poros foi evaporando ao longo do tempo.

A segunda fase do ensaio de termogravimetria, compreende a faixa de perda de massa equivalente a decomposição da Portlandita ($Ca(OH)_2$) (400°C-500°C) (Baldin, Pereira Filho e Baldin, 2021), um dos produtos de hidratação da matriz cimentícia. Na Tabela 6.1 são apresentados os resultados calculados pela expressão: $Ca(OH)_2 = \Delta m * 4{,}111$ (Jaberizadeh, Danoglidis e Konsta-Gdoutos, 2026), onde o Δm corresponde a diferença das massas na faixa correspondente a decomposição da portlandita (400 °C-500°C).

Analisando os resultados da Tabela 6.1, pode-se notar que ao mudar de ambiente de exposição de carbonatação natural para carbonatação na câmara, houve um aumento do teor de portlandita das amostras em comparação com seus respectivos equivalentes na condição N: 10,87% (C3CL), 8,19% (C6CL) e 12,86% (C3CR). Esse resultado mostra que tem mais portlandita remanescente a ser carbonatado nas amostras da câmara aos 14 dias.

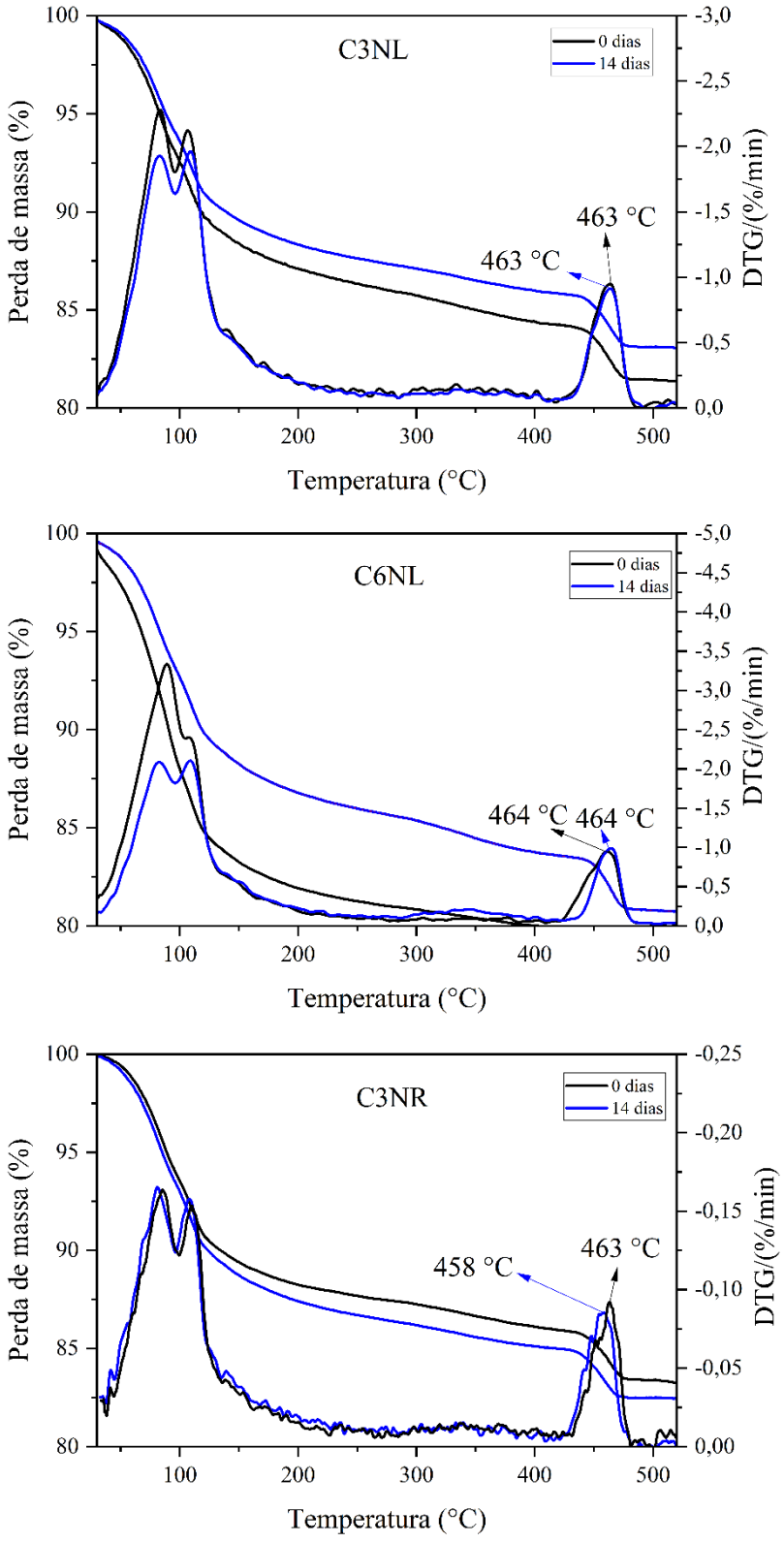
Com relação análise da morfologia e porosidade pode-se notar o seguinte comportamento para a condição N: aumento de 3,04% para C6NL e redução de 8,76% para C3NR. Para as amostras na condição C: aumento de 0,53% para C6CL e redução de 7,15% para C3CR. Ou seja em ambas as situações de carbonatação as amostras com aumento do teor de celulose têm mais portlandita remanescente a ser carbonatado do que as amostras com mudança de morfologia superficial.

Tabela 6.1 Teor de portlandita aos 14 dias de carbonatação

Amostra	Massa (%) – 400 °C	Massa (%) – 500 °C	Δm (%)	Portlandita (%)
C3NL	85,99216	83,1098	2,88236	11,85
C3CL	88,60241	85,40562	3,19679	13,14
C6NL	83,75969	80,7907	2,96899	12,21
C6CL	88,30131	85,08734	3,21397	13,21
C3NR	85,1194149	82,4902725	2,629142	10,81
C3CR	88,94444	85,97778	2,96666	12,20

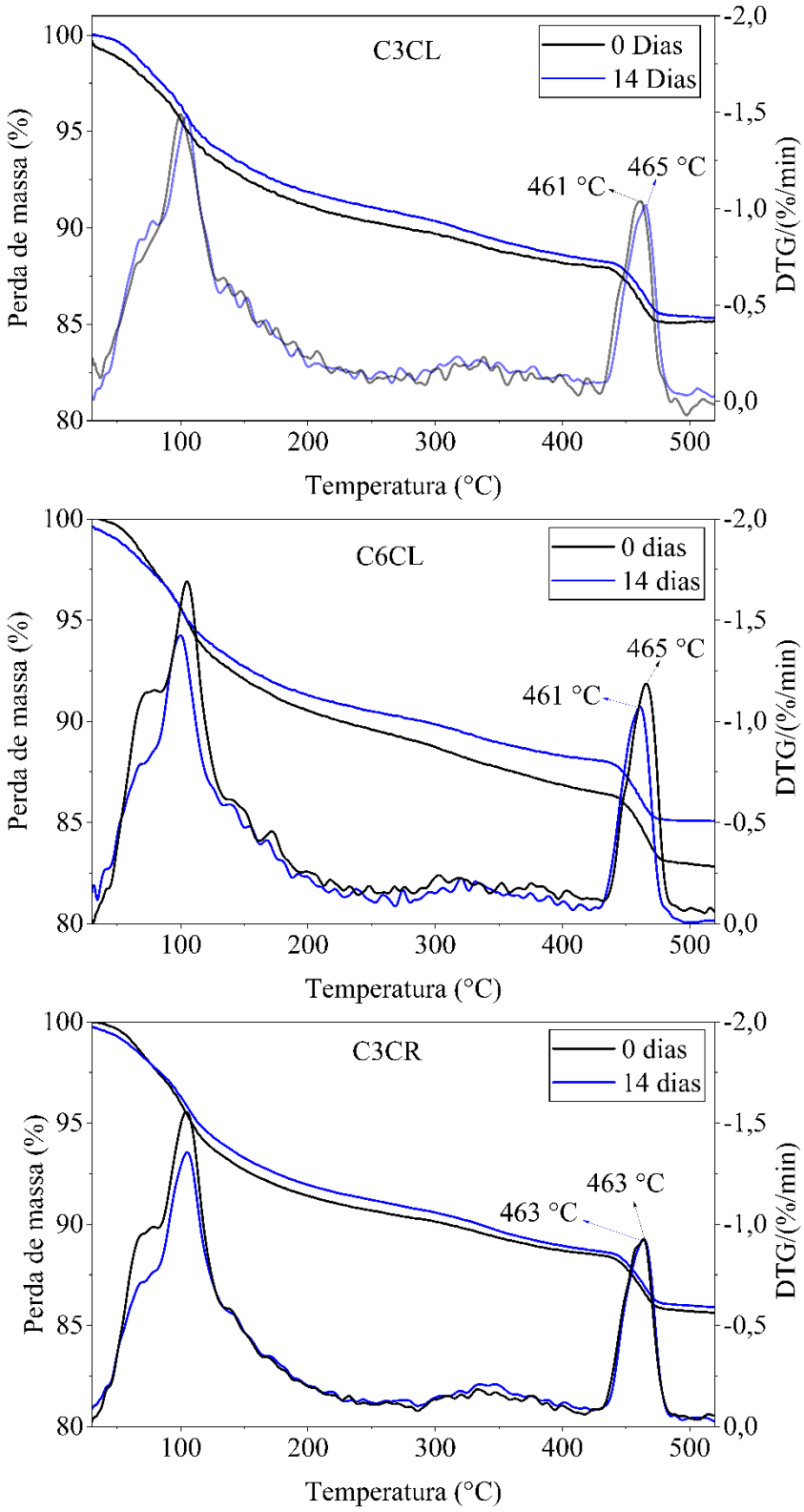
Fonte: O autor (2026)

Figura 6.9 Análise termogravimétrica (TG/DTG) do fibrocimento na carbonatação natural



Fonte: O autor (2026)

Figura 6.10 Análise termogravimétrica (TG/DTG) do fibrocimento na carbonatação na câmara

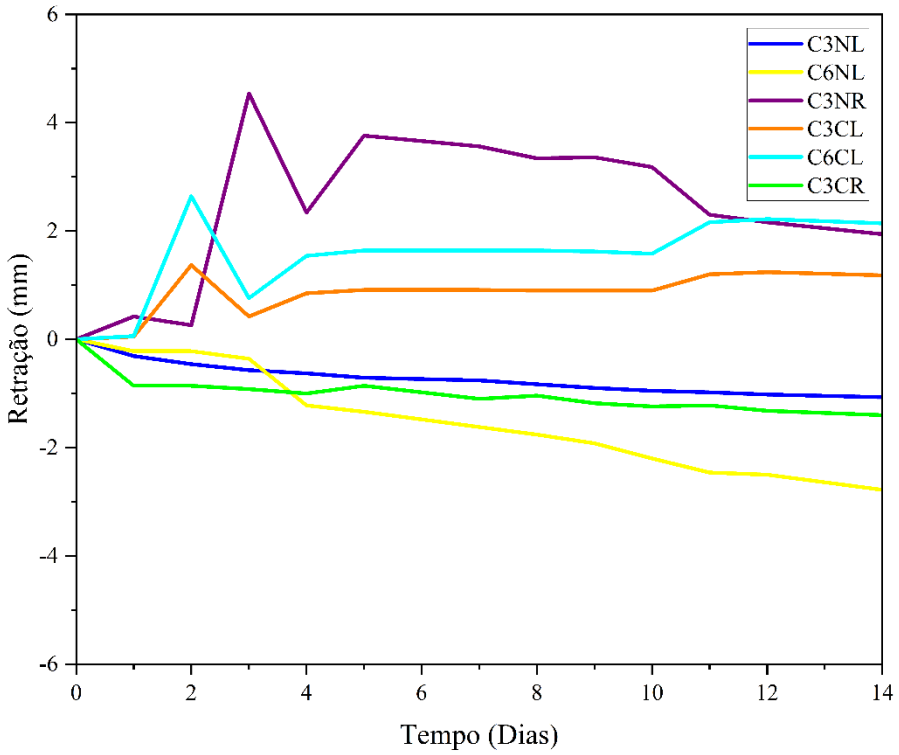


Fonte: O autor (2026)

6.2.6 Retração por carbonatação

A variação dimensional dos corpos de prova foi acompanhada ao longo dos 14 dias de exposição, considerando as formulações com diferentes teores de celulose e as amostras com superfície lisa ou rugosa. Os resultados estão apresentados na Figura 6.11. Nesta análise, valores positivos foram interpretados como expansão e valores negativos como retração, conforme a convenção adotada para o ensaio.

Figura 6.11 Retração do fibrocimento



Fonte: O autor (2026)

Os resultados mostram que as amostras não apresentaram um comportamento dimensional único durante o período analisado. Embora a retração seja frequentemente associada à carbonatação de materiais cimentícios, foram observadas tanto retrações quanto expansões nas formulações estudadas. Esse comportamento indica que, no intervalo de 14 dias, a variação dimensional resultou da combinação entre a perda de água, a retração da matriz cimentícia e as alterações associadas à formação de produtos carbonatados.

As amostras submetidas à carbonatação em câmara, C3CL e C6CL, apresentaram expansão ao longo do período avaliado. Ao final dos 14 dias, a C6CL atingiu aproximadamente 2,15 mm/m, enquanto a C3CL apresentou expansão próxima de 1,20 mm/m. Portanto, dentro

das condições experimentais utilizadas, o aumento do teor de celulose de 3% para 6% esteve associado a uma maior expansão dimensional na exposição em câmara.

Esse comportamento pode estar relacionado à maior porosidade da C6CL. A formulação com 6% de celulose apresentou maior absorção de água e maior porosidade total na caracterização física, o que pode ter favorecido a entrada e a distribuição do CO_2 no interior da matriz. A presença de uma rede porosa mais aberta também pode ter permitido maior disponibilidade de regiões para a formação e deposição de produtos carbonatados. Entretanto, a expansão não deve ser atribuída exclusivamente ao preenchimento dos poros, pois a resposta dimensional também depende do estado de umidade da amostra, do grau de hidratação e da retração simultânea da matriz.

A amostra C3NR apresentou um comportamento não monotônico. Inicialmente, ocorreu expansão até aproximadamente 4,5 mm/m, seguida de retração, de modo que ao final dos 14 dias a amostra permaneceu com expansão aproximada de 2,00 mm/m. Esse resultado indica que os mecanismos responsáveis pela variação dimensional não atuaram com a mesma intensidade durante todo o período. Na etapa inicial, a expansão predominou; posteriormente, a perda de água e a retração da matriz passaram a compensar parte desse aumento.

Embora a retração seja frequentemente associada à carbonatação de materiais cimentícios, estudos recentes mostram que a variação dimensional pode envolver tanto retração quanto expansão. Xian, Logan e Shao (2022) observaram que a carbonatação pode provocar uma retração inicial associada à evaporação de água durante a entrada do gás, seguida de expansão relacionada à incorporação de CO_2 e à precipitação de carbonato de cálcio. Em alguns casos, após a expansão, pode ocorrer uma nova retração, indicando que a resposta dimensional se modifica ao longo do processo de carbonatação.

Esse mecanismo é particularmente compatível com o comportamento observado na amostra C3NR, que apresentou expansão inicial até aproximadamente 4,50 mm/m, seguida de retração parcial e estabilização próxima de 2,00 mm/m. Portanto, a trajetória da C3NR não deve ser interpretada como um resultado inconsistente, mas como uma resposta dimensional composta por etapas sucessivas de expansão e retração.

A ocorrência de expansão pode estar relacionada à precipitação de carbonato de cálcio em regiões confinadas da estrutura porosa. Xian, Logan e Shao (2022) associaram a expansão relativa à formação de carbonato de cálcio, confirmada por análises de difração de raios X e microscopia eletrônica de varredura. Segundo os autores, a expansão provocada pela precipitação dos carbonatos pode superar a retração decorrente da perda de água, especialmente quando a geometria dos poros restringe o crescimento dos produtos formados.

Em contraste, a amostra C3NL apresentou retração de aproximadamente 1,00 mm/m ao final do período, enquanto a C6NL atingiu retração próxima de 2,85 mm/m. A maior retração da C6NL em relação à C3NL pode estar associada à maior quantidade de fibra e à maior capacidade de retenção de água da formulação. Durante a secagem, a remoção dessa água pode produzir maior variação dimensional, especialmente em uma matriz com maior volume de vazios e maior superfície interna.

Esse resultado mostra que o aumento do teor de celulose produziu respostas distintas dependendo da condição de exposição. Em ambiente natural, o aumento de 3% para 6% de celulose esteve associado ao aumento da retração, passando de aproximadamente 1,00 mm/m para 2,85 mm/m. Em ambiente de câmara, por outro lado, o aumento do teor de celulose esteve associado ao aumento da expansão, passando de aproximadamente 1,20 mm/m para 2,15 mm/m.

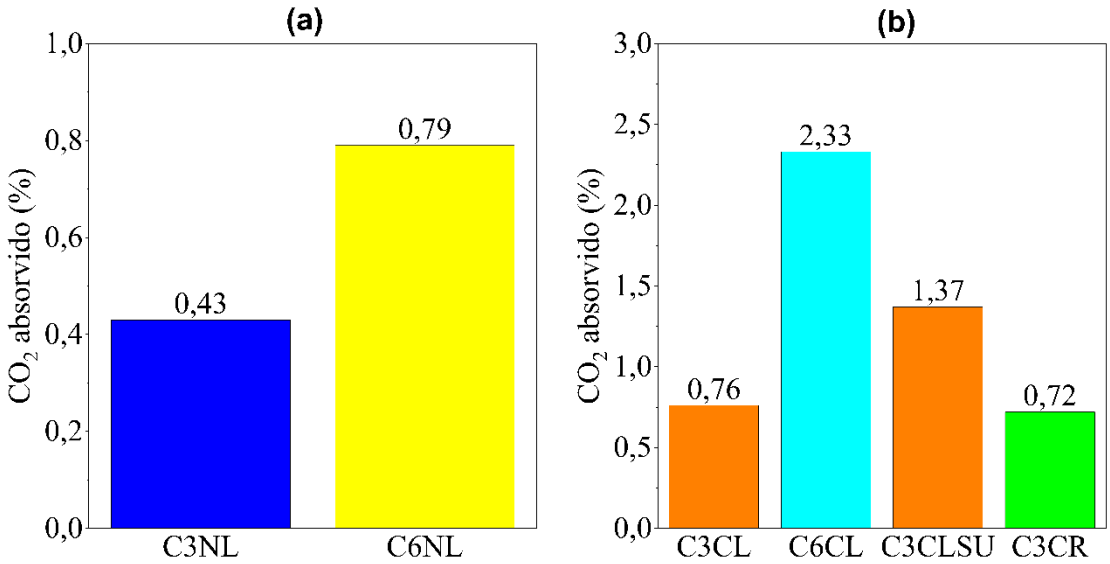
A comparação entre as amostras rugosas também deve ser realizada com cautela. A C3NR apresentou expansão final de aproximadamente 2,00 mm/m, enquanto a C3CR apresentou retração de aproximadamente 1,40 mm/m. Assim, a mudança de condição natural para a exposição em câmara alterou não apenas a magnitude da deformação, mas também o sentido predominante da resposta dimensional da amostra rugosa.

Esse comportamento pode estar relacionado à diferença entre as condições de preparação e exposição das amostras. As formulações submetidas à câmara passaram por período de sazonamento antes da entrada no ambiente com CO_2, enquanto as amostras naturais seguiram outra condição de exposição. Dessa forma, a quantidade de água disponível nos poros no início da carbonatação pode ter sido diferente entre C3NR e C3CR. Como a água participa da reação de carbonatação e influencia a retração por secagem, essa diferença de condicionamento pode ter contribuído para a resposta oposta observada.

6.2.7 Absorção de CO_2 medida por aquecimento em forno mufla

As amostras de fibrocimento expostas em ambiente natural e controlado foram analisadas nas idades (0,3,7 e 14 dias) com relação à perda de massa na mufla (Figura 6.12).

Figura 6.12 **(a)** Absorção de CO_2 em carbonatação natural e **(b)** em ambiente com 5% de CO_2



Fonte: O autor (2026)

De modo geral, com o aumento do teor de celulose de 3% para 6%, houve uma melhora na absorção de CO_2 (Figura 6.12). Para a carbonatação natural (C3NL/C6NL), o aumento foi de 83,72%, para a carbonatação na câmara (C3CL/C6CL) o aumento foi de 206,57%. Isso pode ser explicado devido uma maior porosidade das amostras, como já apresentado em seção anterior, o que aumenta consequentemente o caminho livre para o dióxido de carbono entrar na matriz cimentícia e reagir com a portlandita.

Com relação ao aumento de área superficial, o resultado mostrou-se de acordo com o já abordado anteriormente, os corpos de prova com superfície rugosa (amostras com final R), não resultaram em maior absorção de CO_2, quando comparado a amostra da superfície de corpos de prova liso (amostras com final SU, que é apenas a superfície de C3CL). Em comparação com resultados encontrados na literatura, apenas a C6CL, ficou dentro da faixa de absorção de CO_2 encontrada de 1,6-54,3% para carbonatação acelerada (He *et al.*, 2019; Hu, Chen e Hu, 2022; Parente *et al.*, 2026).

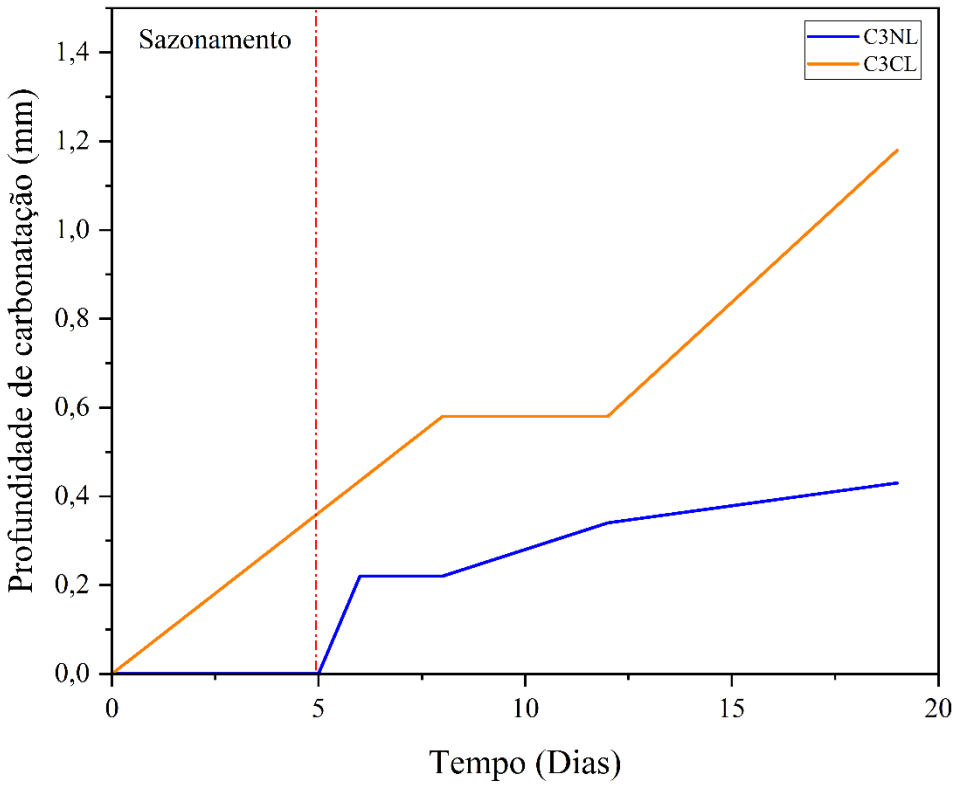
6.3 CARBONATAÇÃO EM AMBIENTE CONTROLADO E NATURAL: ANÁLISE COMPARATIVA DO MÉTODO DE ESTUDO

Nessa parte do trabalho, serão discutidos uma comparação entre a carbonatação de corpos de prova de fibrocimento expostos em ambiente controlado e natural quanto ao avanço da frente de carbonatação e a absorção de CO_2.

6.3.1 Profundidade de carbonatação e avanço da frente carbonatada

Na Figura 6.13 é apresentado corpos de prova com teor de celulose de referência (3%), representando uma placa de fibrocimento com celulose convencional, expostos em dois ambientes de carbonatação com condições distintas.

Figura 6.13 Carbonatação natural e em atmosfera com 5% de CO_2



Fonte: O autor (2026)

A partir da análise da Figura 6.13 pode-se concluir que amostras expostas em ambiente com maior concentração de CO_2 C3CL (5% de CO_2) apresentou um ligeiro aumento da profundidade de carbonatação ao longo do tempo. Nota-se que a amostra C3CL já inicia o dia

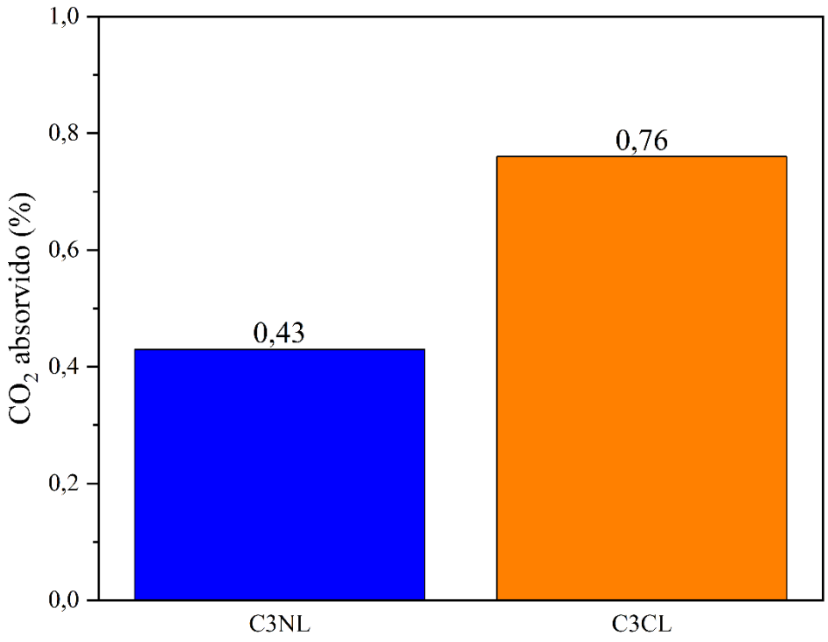
0 (Dia 5, onde termina o sazonamento e inicia a cura em câmara, a amostra natural não passou por sazonamento), com um considerável avanço da frente carbonatada, o que indica que a amostra por passar pela secagem no período de sazonamento tinha menos água nos poros o que facilitou a incorporação do CO_2.

Segundo Shi *et al.* (2012) e Qiu (2020), umidade relativa intermediária (50-70%), obtidos em sazonamento facilita a difusão do CO_2, pois os poros nem estão saturados, nem estão totalmente secos. Além disso enquanto a amostra natural a partir do dia 12 se estabiliza, a do ambiente com maior concentração de carbono segue com o avanço da frente de carbonatação, o que mostra a influência do teor de CO_2. Esse resultado está de acordo com a literatura, onde maior concentração do dióxido de carbono resulta em maior velocidade de carbonatação (Shi *et al.*, 2012).

6.3.2 Absorção de CO_2 medida pelo método da mufla

A partir da análise da Figura 6.14, observa-se um aumento na absorção de CO_2 de 76,74%, o que mostra claramente que o ambiente com maior concentração de dióxido de carbono pode influenciar na maior carbonatação de materiais cimentícios, como já mencionado na literatura (Kaliyavaradhan e Ling, 2017).

Figura 6.14 Absorção de CO_2 em amostra de carbonatação natural e em ambiente a 5% de CO_2



Fonte: O autor (2026)

6.3.3 Limitações e contribuições dessa comparação para o escopo do trabalho

Apesar do ambiente com maior concentração de carbono apresentar uma tendência a promover uma melhora na captura de carbono, não é a condição encontrada em ambientes onde normalmente é exposto as placas de fibrocimento no dia a dia, pois a concentração utilizada (5% de CO_2) é ligeiramente superior a concentração desse gás na atmosfera, no entanto, esse estudo é importante para acelerar o processo de carbonatação e verificar efeitos que só depois de anos seria possível observar, como o tempo na maioria das pesquisas é limitado, ter condições de analisar esses efeitos rapidamente, pode-se entender melhor o processo de carbonatação e captura de CO_2.

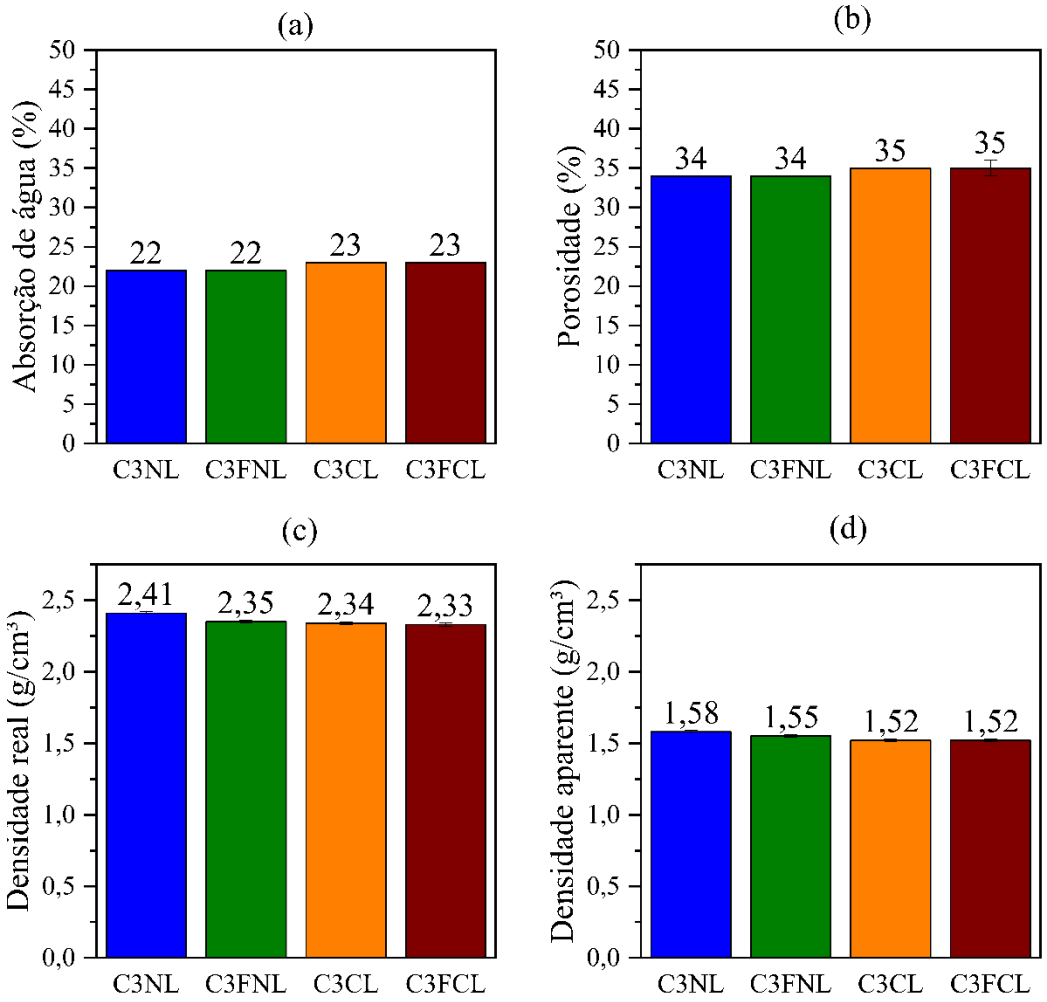
6.4 EFEITO DO FÍLER CARBONÁTICO NA CINÉTICA DE CARBONATAÇÃO E NA MICROESTRUTURA

A adição de fíler carbonático em substituição ao calcário foi estudada nessa pesquisa, a fim de verificar se o fíler carbonático teria a capacidade de melhorar a cinética de carbonatação. Nessa seção serão apresentados os resultados dessa adição no avanço da frente carbonatada e na microestrutura do compósito.

6.4.1 Características físicas e mecânicas

Ao fim do ciclo de carbonatação das amostras com fíler carbonático (aos 14 dias), elas foram submetidas aos ensaios físicos pelo princípio de Arquimedes. Na Figura 6.15 é apresentado esses resultados.

Figura 6.15 (a) Absorção de água, (b) Porosidade total, (c) Densidade real e (d) Densidade aparente das amostras com adição de fíler carbonático em comparação a sem fíler carbonático



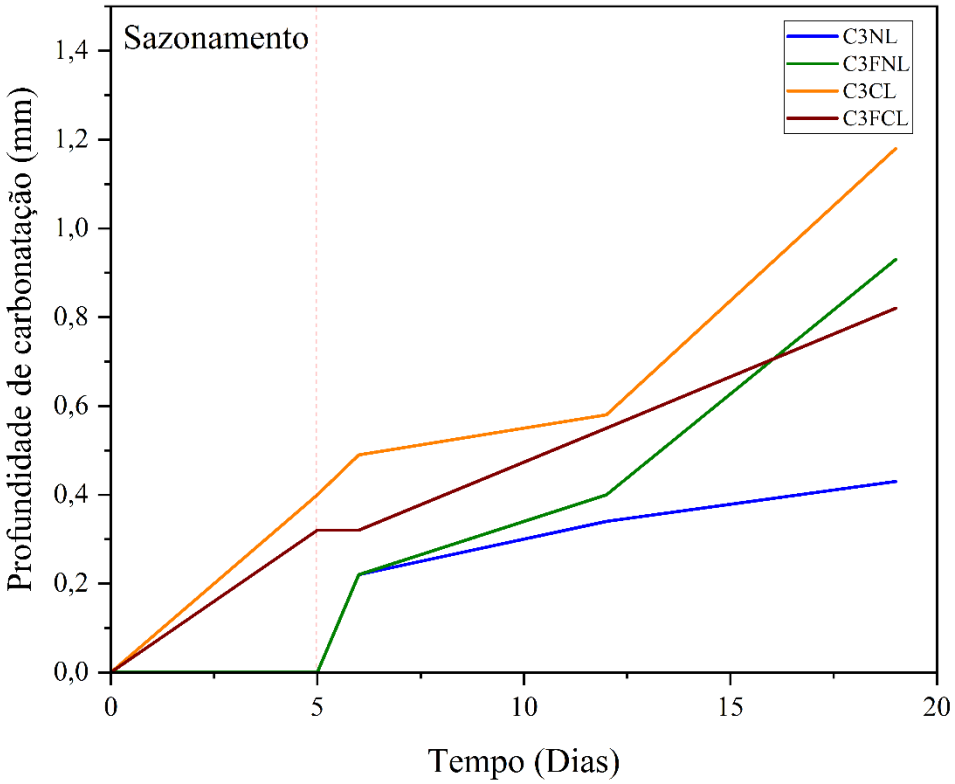
Fonte: O autor (2026)

Ao incorporar fíler carbonático nas formulações estudada os resultados foram semelhantes entre as amostras com e sem fíler carbonático para absorção de água, porosidade, densidade real e densidade aparente (Figura 6.15), apesar do fíler carbonático possuir grãos mais finos promovendo um maior empacotamento, isso não se traduziu em aumento nas propriedades analisadas. Portanto, os resultados das propriedades físicas com a incorporação de fíler carbonático não teve o efeito encontrado na literatura que normalmente é apontado que o fíler carbonático pode reduzir a porosidade inicial e formar microestrutura mais densa em materiais cimentícios por meio de preenchimento (Rong *et al.*, 2023).

6.4.2 Profundidade de carbonatação e cinética na presença de fíler carbonático

As amostras de fíler carbonático foram caracterizadas por meio das aspersões de 1% de fenolftaleína, os resultados são mostrados na Figura 6.16.

Figura 6.16 Profundidade de carbonatação em amostras com fíler carbonático e sem fíler carbonático



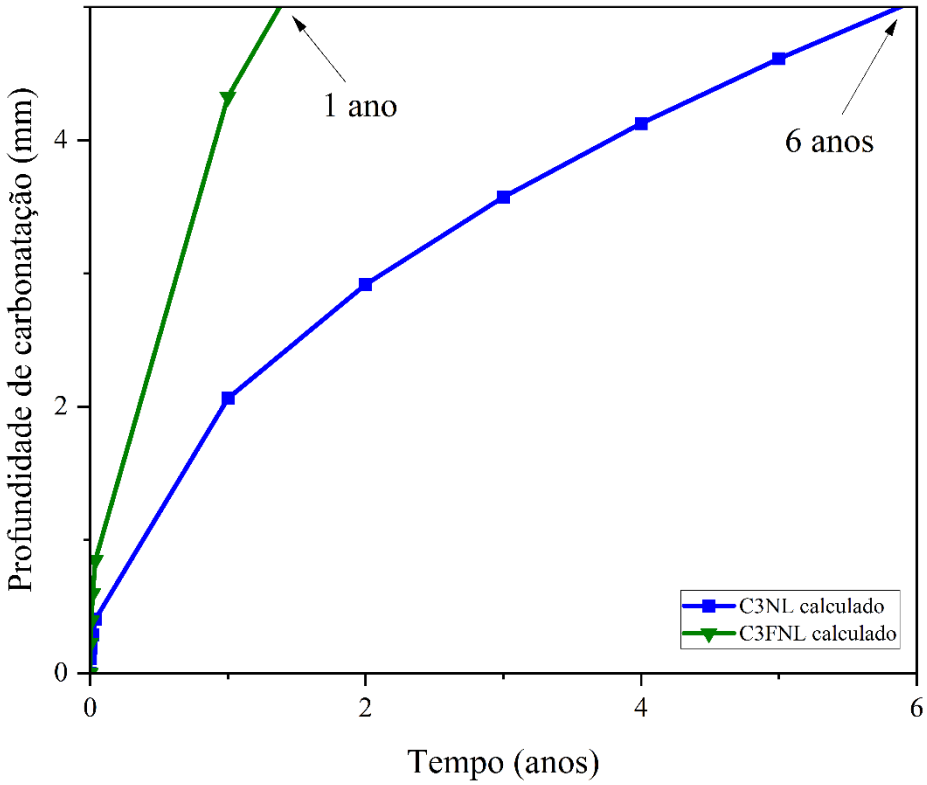
Fonte: O autor (2026)

Para a composição de fíler carbonático curada em ambiente natural, a profundidade de carbonatação aumentou consideravelmente ao longo do tempo em comparação com a composição sem fíler carbonático, no entanto, o contrário ocorreu para a exposição em ambiente rico em CO_2, pois os corpos de prova sem fíler carbonático apresentaram uma profundidade de carbonatação superior aos com fíler carbonático. Uma hipótese é que a maior concentração de CO_2, favoreceu a difusão para o interior da matriz, o que elevou a carbonatação para C3CL, o que mostra que o avanço da profundidade não está relacionado apenas a adição de fíler carbonático.

Na Figura 6.17 são apresentadas curvas de profundidade de carbonatação projetadas em função do tempo. Da mesma maneira que na seção 6.2.4, resultados referentes à carbonatação natural foram utilizados, devido a motivações já mencionadas.

A análise das curvas mostra que a amostra C3FNL apresentou o maior coeficiente de carbonatação e, consequentemente, a maior velocidade de avanço da frente carbonatada (carbonatação em 1 ano, para uma placa de 10 mm de espessura). Esse comportamento pode estar relacionado à melhor diluição devido às partículas finas do fíler carbonático, como visto nesse estudo (entre 10 e 30 μm) oferecendo maior superfície de contato para a precipitação de produtos carbonatados e o papel de nucleação, orientando a precipitação de produtos de carbonatação (Rong *et al.*, 2023).

Figura 6.17 Cinética de carbonatação para as amostras com adição de fíler carbonático

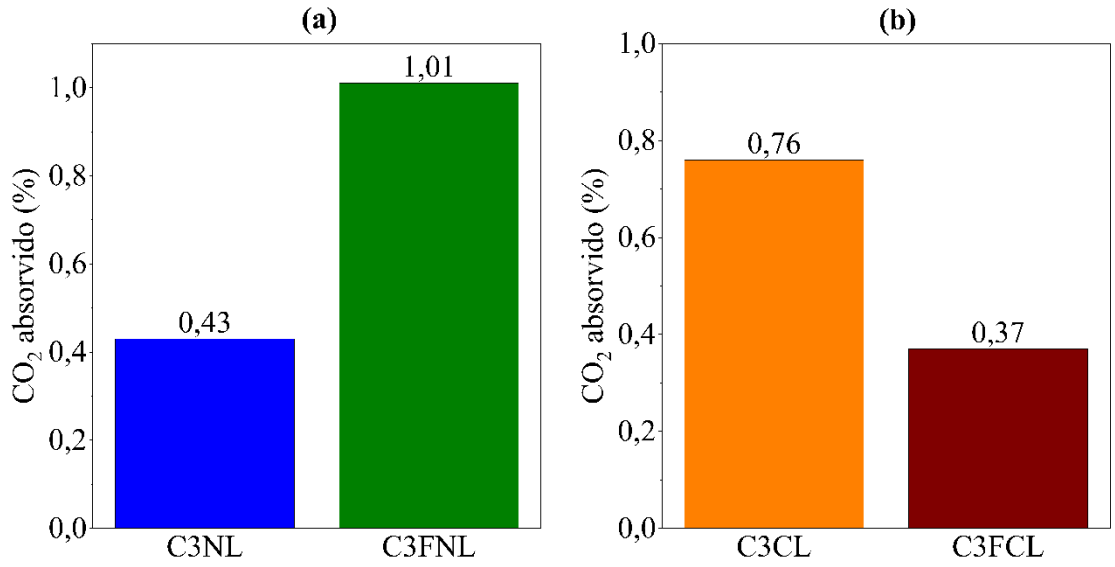


Fonte: O autor (2026)

6.4.3 Absorção de CO_2 medida pelo método da mufla

De acordo com a Figura 6.18, na carbonatação natural o fíler carbonático apresentou um melhor desempenho com relação à absorção de CO_2, no entanto, o contrário ocorreu com a exposição a uma maior concentração de CO_2, confirmando o que foi encontrado no ensaio de pH por fenolftaleína, na seção 6.4.2. A maior concentração de CO_2, pode ter sido responsável pelo desempenho superior do C3CL em comparação ao C3FCL (Shi *et al.*, 2012), no entanto, só esse resultado não seria suficiente para afirmar que essa foi a causa, seria necessário uma análise completa da microestrutura como uma análise MEV (Microscopia eletrônica de varredura), para ver a deposição de calcita ($CaCO_3$) nos poros na matriz cimentícia das amostras (Hu, Chen e Hu, 2022).

Figura 6.18 Efeito do fíler carbonático na absorção de CO_2: **(a)** carbonatação natural; **(b)** na câmara com 5% de CO_2.



Fonte: O autor (2026)

6.4.4 Evidências microestruturais de nucleação e formação de carbonatos

As curvas de análise termogravimétrica (TG) e termogravimetria derivada (DTG) das amostras com 3% de celulose e com substituição do calcário por fíler carbonático são apresentadas na Figura 6.19. Na primeira fase do ensaio (35 °C – 200 °C), a curva equivale a perda de massa referente a água presente na matriz cimentícia. Ao analisar as amostras com relação ao período de carbonatação (0-14 dias), a diferença é mais evidente nas amostras

expostas a carbonatação natural. Aos 0 dias (após cura de 7 dias imersa em água saturada de cal) percebe-se que a curva DTG é mais intensa nessa faixa para essas amostras em comparação com 14 dias de carbonatação, o que pode ser associada a perda de umidade ao longo do tempo.

No entanto, ao analisar a curva DTG para as amostras carbonatadas em câmara com 5 % de concentração de CO_2, percebe-se uma maior estabilidade da umidade baixa para as amostras tanto 0 dias como 14 dias de carbonatação, essa maior estabilidade com relação à umidade pode estar relacionada a perda de água no período de sazonamento, já que as amostras para esse tipo de carbonatação, antes do dia 0, passaram por secagem a 65 °C por 18 horas e um período de sazonamento na câmara por 5 dias.

A segunda fase do ensaio, (400°C-500°C), a curva equivale a perda de massa da decomposição da Portlandita ($Ca(OH)_2$) (Baldin, Pereira Filho e Baldin, 2021). Na Tabela 6.2 são apresentados os resultados calculados de acordo com a expressão já mencionada na seção 6.2.5. Analisando os resultados da Tabela 6.2, pode-se notar que ao mudar de ambiente de exposição (exposição natural (N) e em câmara (C)), houve um aumento no teor de Portlandita.

Na seção 6.2.5, já foi mencionado esse aumento com relação à amostra C3NL/C3CL (aumento de 10,87%), nessa seção para a amostra C3FCL, houve aumento de 13,96% no teor de Portlandita com relação à mesma amostra na condição N. Isso significa que assim como os resultados já apresentados anteriormente o ambiente de exposição com maior concentração de CO_2 promoveu um maior teor de portlandita remanescente a ser carbonatado. Para as amostras com fíler carbonático o aumento foi maior do que o encontrado para as amostras C6CL (8,19%) e C3CR (12,86%), em comparação com as respectivas amostras na condição N.

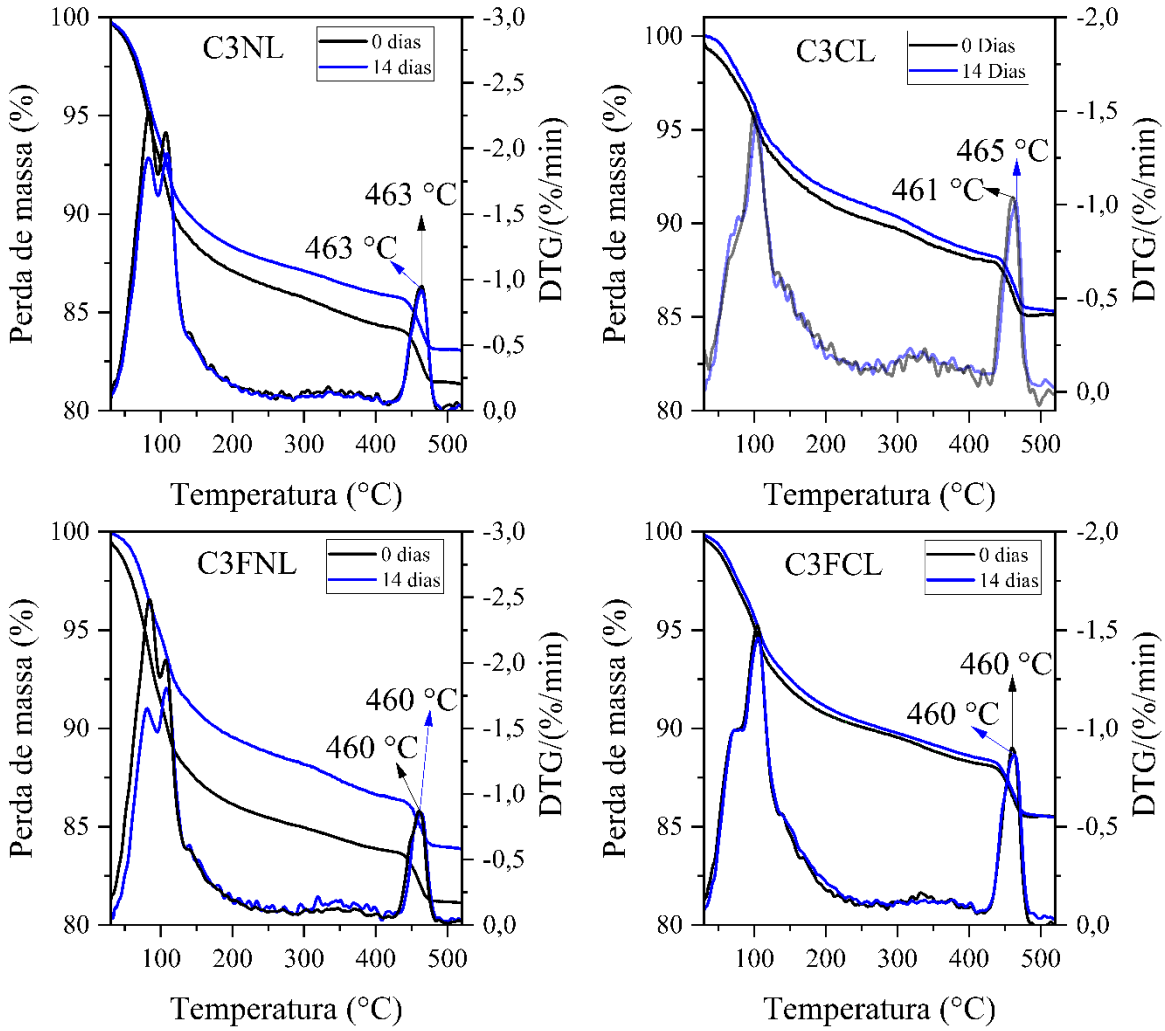
Em comparação com a amostra com mesmo teor de celulose, mas sem fíler carbonático para a condição N tem-se o seguinte comportamento: redução de 6,92% para C3FNL. Para a condição C: redução de 4,34% para C3FCL. O resultado encontrado foi o oposto ao apresentado pela literatura, em que ao analisar pastas de cimento sem e com fíler carbonático por TG/DTG, houve uma melhora no grau de hidratação, pois gerou mais produtos de hidratação ao incorporar fíler carbonático (Zhang, Wang e Chen, 2024).

Tabela 6.2 Teor de portlandita aos 14 dias de carbonatação

Amostra	Massa (%) – 400 °C	Massa (%) – 500 °C	Δm (%)	Portlandita (%)
C3NL	85,99216	83,1098	2,88236	11,85
C3CL	88,60241	85,40562	3,19679	13,14
C3FNL	86,63669	83,95324	2,68345	11,03
C3FCL	88,61069	85,55343	3,05726	12,57

Fonte: O autor (2026)

Figura 6.19 TG/DTG das amostras com fíler carbonático e sem fíler carbonático



Fonte: O autor (2026)

6.5 ECOEFICIÊNCIA E SÍNTESE INTEGRADA DOS RESULTADOS

Nessa seção, serão apresentadas e discutidas as análises de ecoeficiência de cada composição de fibrocimento testada nesse trabalho, apresentando assim, aquelas com a melhor relação de ecoeficiência.

6.5.1 IL, IC e SICFeq das diferentes formulações

O índice de intensidade de ligante (IL), o índice de intensidade de carbono (IC) e o Saldo de intensidade carbono-flexão equivalente (SICFeq) foram calculados para as diferentes formulações (Figura 6.20).

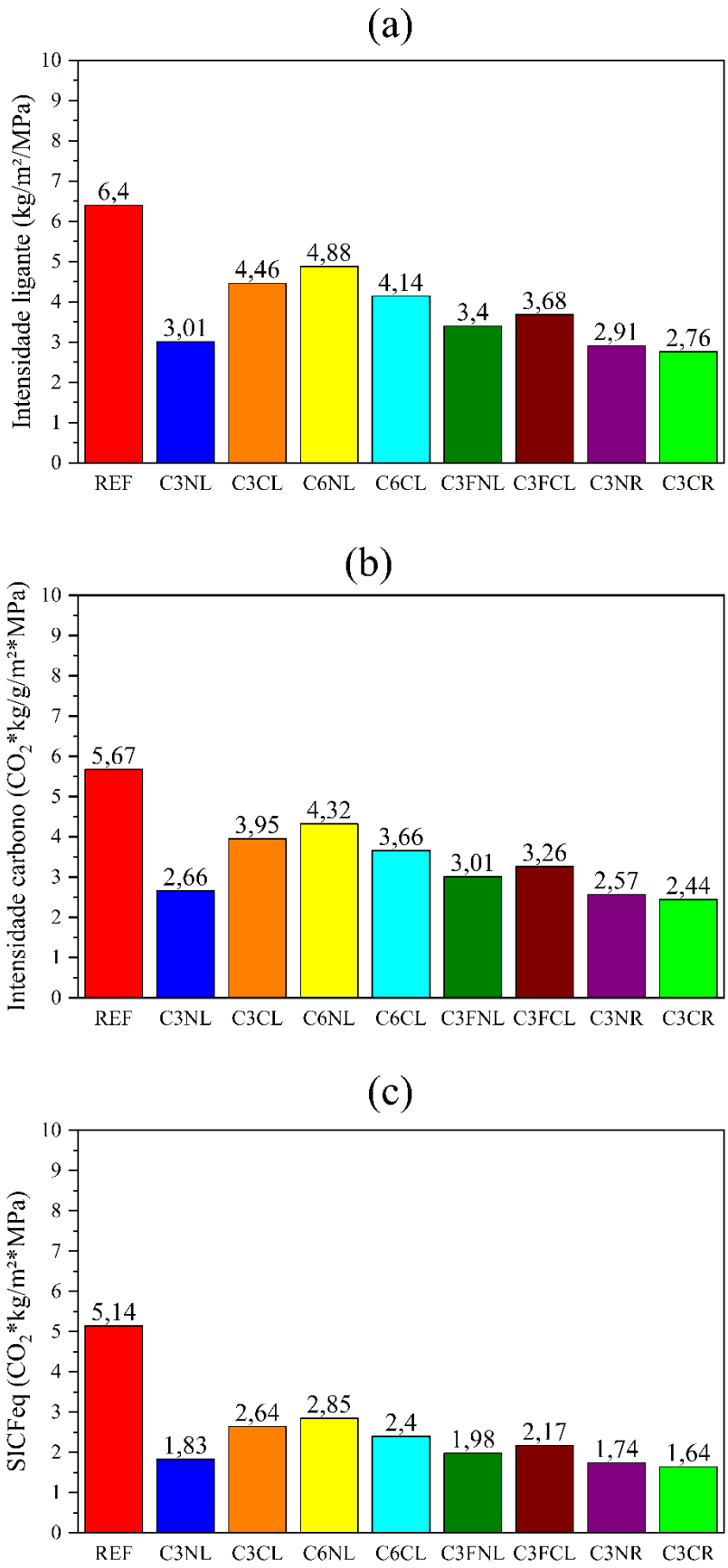
Analisando a Figura 6.20, chega-se aos resultados que indicaram o melhor desempenho de ecoeficiência, pois foram as que apresentaram os menores índices (IL, IC e SICFeq). Na Tabela 6.3 é apresentado o resultado da amostra com a melhor relação consumo de cimento-emissões de CO_2 na produção-saldo carbono flexão equivalente.

Tabela 6.3 Amostra com menor índice

Amostra	**IL (kg/m²/MPa)**	**IC (CO_2*kg/m²*MPa)**	**SICFeq (CO_2*kg/m²*MPa)**
C3NR	2,91	2,57	1,74
C3CR	2,76	2,44	1,64

Fonte: O autor (2026)

Figura 6.20 (a) IL, (b) IL e (c) SICFeq



Fonte: O autor (2026)

6.5.2 Relação entre carbonatação, desempenho mecânico e ecoeficiência

As amostras que possuíram uma maior frente de carbonatação foram as de maior porosidade, por meio do aumento do teor de celulose (C6NL, C6CL), seguidas da adição de mineral fíler carbonático (C3FNL, C3FCL) e por fim, a mudança de morfologia superficial por meio de rugosidades semiesféricas (C3NR, C3CR).

Quanto ao desempenho mecânico (MOR), não é possível afirmar que a carbonatação melhorou de maneira geral o desempenho mecânico do fibrocimento, devido a comportamentos distintos entre as amostras, umas apresentaram redução enquanto outras, aumento de resistência.

Quanto à ecoeficiência, a de melhor desempenho (IL, IC e SICFeq) foi a amostra com mudança da morfologia superficial pela rugosidade (C3NR, C3CR), pois foi a de melhor relação consumo de cimento - emissões de CO_2 na produção – saldo intensidade carbono flexão equivalente.

6.5.3 Síntese das hipóteses e implicações para captura de CO_2

Quanto ao melhor desempenho das amostras que mais capturaram CO_2, isso tem como hipótese, para o C6NL e o C6CL, que a porosidade facilita a passagem do CO_2 para dentro da matriz cimentícia, inclusive essa propriedade sendo mais expressiva que o efeito da área superficial externa (C3NR/C3CR), mostrando que isoladamente o aumento da área superficial externa não garante maior avanço da carbonatação, sendo necessário associação com uma rede de poros que permita a difusão do CO_2 para o interior da matriz. Quanto à incorporação de fíler carbonático (C3FNL e C3FCL), não se pode afirmar que a formação de pontos de nucleação favorece a formação do carbonato de cálcio, pois houve resultados opostos dependendo do ambiente de carbonatação, o que seria necessário uma análise mais aprofundada da matriz cimentícia como por meio do ensaio MEV.

De acordo com o estudo, os fatores que mais implicaram na captura de carbono foram, a porosidade pela adição de fibras, adição mineral de fíler carbonático além da concentração de CO_2 e o sazonamento, já que as amostras que passaram por esse processo (C3CL, C6CL, C3FCL, C3CR), já estavam com um pequeno avanço na frente de carbonatação ao entrarem na câmara em ambiente controlado (maior teor de carbono).

7 CONCLUSÃO

O estudo teve como objetivo geral analisar a cinética de incorporação de CO_2 em compósitos cimentícios reforçados com fibras, variando suas características morfológicas e adição de fíler carbonático, observando os impactos nas propriedades e ecoeficiência dos compósitos.

As amostras com aumento de porosidade foram as que tiveram mais avanço na frente de carbonatação, seguido pela adição mineral de fíler carbonático, quanto à cinética de carbonatação para as amostras com variação da morfologia superficial (C3NR/C3CR), para os resultados experimentais não houve aumento significativo da profundidade de carbonatação, já em uma projeção em anos, percebe-se uma maior diferença entre as duas, no entanto, esses resultados devem ser interpretados com cautela, pois o modelo utilizado pressupõe que o coeficiente de carbonatação permaneça constante ao longo do tempo, na prática é diferente.

A amostra rugosa pode apresentar maior frente de carbonatação, no entanto isso não ocorre isoladamente, está relacionado a características como a rede de poros e o avanço da frente carbonatada para o interior, o que resulta em uma área da frente de carbonatação igual a seção transversal retangular da placa.

Quanto às propriedades físico-mecânicas, para as propriedades físicas (porosidade, absorção de água, densidades), a única amostra que apresentou diferença significativa foi a com aumento de celulose (C6NL), o mesmo comportamento para as propriedades mecânicas, a C6NL apresentou menor resistência à flexão, associada à sua maior porosidade, para as demais amostras (C3NL, C3FNL, C3NR), não houve diferença significativa. Já na exposição na câmara com 5% de CO_2, não é possível afirmar que essa exposição melhora o desempenho mecânico dos fibrocimentos, já que nessa condição foram verificados comportamentos distintos, relacionados às diferentes formulações.

No estudo da ecoeficiência, chegou-se à conclusão de que a amostra com mudança de morfologia superficial por rugosidade, foi a que teve melhor relação consumo de cimento - emissões de CO_2 na produção – saldo intensidade carbono flexão equivalente. Esse tipo de placa tem um uso promissor na construção civil, já que devido à sua textura pode-se utilizar em ambientes onde se deseje esse efeito estético, pois tem potencial de captura de carbono sem comprometer, como visto suas propriedades físico-mecânicas.

Como sugestão para estudos futuros, sugere-se estudar um tempo maior de carbonatação, como 28 dias em diante, já que ao analisar a projeção da cinética em um período maior pôde-se observar uma diferença maior entre as amostras, portanto, sugere-se esse

procedimento a fim de verificar os efeitos em um período maior de carbonatação, quanto à eficiência de captura de carbono. Outra sugestão é analisar por meio do MEV as amostras C3FNL/C3FCL, pois somente com os resultados encontrados não foi possível afirmar que o fíler carbonático promove maior nucleação dos carbonatos e assim maior carbonatação, devido aos resultados opostos dependendo do ambiente de exposição.

Sendo assim, o objetivo geral desse trabalho foi atendido, sendo estudada a cinética de carbonatação em diferentes morfologias (porosidade, rugosidade), uso de fíler carbonático como adição mineral e os impactos nas propriedades e ecoeficiência.

REFERÊNCIAS

ABCP. **Panorama do Coprocessamento 2020 Ano base 2018: Uma tecnologia sustentável Associação Brasileira de Cimento Portland**, 2020. Disponível em: <https://coprocessamento.org.br/wpcontent/uploads/2020/10/Panoramaco_processamento_2020_bx.pdf>. Acesso em: 31 mar. 2025

___. **Guia Básico de utilização do cimento Portland.** 7.ed. São Paulo, 2002. 28p. (BT-106)

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

___. **NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica** Rio de Janeiro, 2017.

___. **NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos** Rio de Janeiro, 2018.

AGUIAR, J. B.; CRISTELA JÚNIOR. Carbonation of surface protected concrete. **Construction and Building Materials**, v. 49, n. 49, p. 478–483, 23 set. 2013.

ALMEIDA, A. E. F. S.; TONOLI, G. H. D.; SANTOS, S. F.; SAVASTANO, 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, set. 2013.

ANDRADE, C.; SANJUÁN, M. Á. Updating carbon storage capacity of Spanish cements. **Sustainability (Switzerland)**, v. 10, p. 1–15, 17 dez. 2018.

BALDIN, C. R. B.; PEREIRA FILHO, J. I.; BALDIN, V. Estudo da influência da substituição do cimento Portland por resíduo de cerâmica vermelha na fabricação de placas de fibrocimento. **Revista Materia**, v. 26, n. 1, p. 1–9, 2021.

BARBOSA, M. C. **Efeito da proteção superficial (pintura imobiliária) na difusão e captura de CO_2 em argamassas de revestimento**. 2021. 119f. Dissertação (Mestrado) – Programa de

Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2021.

BATTAGIN, A. F. **Uma breve história do cimento Portland**. Disponível em: <https://abcp.org.br/cimento/historia/>. Acesso em: 6 mar. 2025.

BEHERA, S. K.; MISHRA, D. P.; SINGH, P.; MISHRA, K.; MANDAL, S. K.; GHOSH, C. N.; KUMAR, R.; MANDAL, P. K. Utilization of mill tailings, fly ash and slag as mine paste backfill material: Review and future perspective. **Construction and Building Materials**, v. 309, p. 1–22, 22 nov. 2021.

BEZERRA, E.M.; JOAQUIM, A. P.; SAVASTANO, H. **Some Properties of fiber-cement composites with selected fibers.** Conferência Brasileira de Materiais e Tecnologias Não-Convencionais: Habitações e Infraestrutura de Interesse Social Brasil-NOCMAT 2004. **Anais**...3nov.2004.

BILCATI, G. K.; COSTA, M. DO R. DE M. M. DA. **Avaliação do sistema combinado de microfibra de celulose e microcelulose cristalina em placas cimentícias** ENARC. **Anais**...Foz do Iguaçu: 2023.

BOGAS, J. A.; CARRIÇO, A.; PONTES, J. Influence of cracking on the capillary absorption and carbonation of structural lightweight aggregate concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 104, p. 1–11, 30 jul. 2019.

BORGES, P.; RIGO, E.; POSSAN, E.; ANDRADE, J. **Captura de carbono em argamassas produzidas com agregado reciclado de resíduo de construção e demolição.** 6° Congresso Sul-Americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade. **Anais**...Foz do Iguaçu: Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais e de Saneamento, 23 maio 2023.

BULLARD, J. W.; JENNINGS, H. M.; LIVINGSTON, R. A.; NONAT, A.; SCHERER, G. W.; SCHWEITZER, J. S.; SCRIVENER, K. L.; THOMAS, J. J. Mechanisms of cement hydration. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 12, p. 1208–1223, dez. 2011.

CARVALHO, J. M. L. **Análise da incorporação de CO_2 em placa cimentícia têxtil (Não Publicado)**. 2026. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2026.

CASTRO, V. G. DE. **Compósitos madeira-cimento: um produto sustentável para o Futuro**. Mossoró: EdUFERSA, 129 p, 2021.

CFA. **Conheça as quatro Revoluções Industriais que moldaram a trajetória do mundo.** Disponível em: https://cfa.org.br/as-outras-revolucoes-industriais/. Acesso em: 20 nov.2025.

CO_2.EARTH. **CO_2 for Print**. Disponível em: <https://www.co2.earth/co2-for-print>. Acesso em: 30 jul.2025.

COELHO, H. C. DA S.; SILVA, G. J. B. S. **Estudo da difração de raios X, "IN SITU" do cimento CPV**. Simpósio Brasileiro da Ciência do cimento (SBCC). **Anais**...15 jan.2024.

CONSOLI, C. Bioenergy and carbon capture and storage. **Global CCS Institute**, p. 1-14, 2019.

CRASTO, R. C. M. DE. **Arquitetura e tecnologia em sistemas construtivos industrializados: light steel framing.** 2005. 231 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2005.

DAMINELI, B. L.; KEMEID, F. M.; AGUIAR, P. S.; JOHN, V. M. Measuring the eco-efficiency of cement use. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, n. 8, p. 555–562, set. 2010.

ECKHARDT, R. S. **Estudo do efeito de aditivo autocicatrizante e diferentes materiais cimentícios suplementares na autocicratização de pastas de cimento Portland.** 2025. 104 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2025.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto reforçado com fibras**. 2011. 248 f. Tese (Livre docência) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

FILOMENO, R. H. **Estudo e avaliação da carbonatação acelerada no fibrocimento sob aspectos de cura, desempenho físico-mecânico, microestrutura e permeabilidade.** 2023. 136f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos (FZEA), Universidade de São Paulo (USP), Pirassununga 2023.

FONTENELLE, J. H. **Sistema de fixação e juntas em vedações verticais constituídas por placas cimentícias: Estado da arte, desenvolvimento de um sistema e avaliação experimental.** 2012. 219 f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

GARCIA, D. C. S. **Análise da microestrutura de pasta de cimento Portland com tratamento térmico por meio de segmentação de imagens e ensaio de ultra-microdureza**. 2015. 100f. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia de Materiais e construção, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

GARCÍA, I. G.; PERDRIX, C. A.; RÁBADE, M. P.; PERIS, P. M.; AGÜÍ, J. C. L.; BARBUDO, M. Á. S. Estudio del efecto sumidero de CO_2 de los materiales de base cemento. **Cemento Hormigón**, n. 939, p. 70–83, ago. 2010.

GIAMMUSSO, S. E. **Manual do concreto**. 1. ed. São Paulo: PNI, 145 p, 1992.

GUIMARÃES, C. C.; COELHO, V. A. Construção de câmara de carbonatação: alternativa para a construção de saberes no curso de engenharia. XLVI Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia e 1° Simpósio Internacional de Educação em Engenharia. **Anais**...Salvador: 3 set. 2018.

GUO, R.; WANG, L.; HUANG, H.; WANG, T.; YI, Z. Enhanced carbonation curing of cement pastes with dolomite additive. **Greenhouse Gases: Science and Technology**, v. 12, n. 2, p. 273–283, 1 abr. 2022.

HAMRI, A. EL; MOUHIB, Y.; OURMICHE, A.; CHIGR, M.; MANSOURI, N. E. EL. Study of the Effect of Cedar Sawdust Content on Physical and Mechanical Properties of Cement Boards. **Molecules**, v. 29, n. 18, 1 set. 2024.

HASAN, K. M. F.; HORVÁTH, P. G.; ALPÁR, T. Development of lignocellulosic fiber reinforced cement composite panels using semi-dry technology. **Cellulose**, v. 28, n. 6, p. 3631–3645, 1 abr. 2021.

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, 20 jul. 2019.

HOPPE FILHO, J. **Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: mecanismo de hidratação, microestrutura e carbonatação de concreto**. 2008. 247f. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

HOUST, Y. F.; WITTMANN, F. H. Depth profiles of carbonates formed during natural carbonation. **Cement and Concrete Research**, v. 32, n. 12, p. 1923–1930, dez. 2002.

HU, L.; CHEN, Z.; HU, J. Carbon Sequestration, Mechanical Properties and Carbonation Kinetics of PP-Fiber-Reinforced Cement-Based Composites with CO2-Curing Treatment. **Coatings**, v. 12, n. 9, p. 1–16, 14 set. 2022.

IKAI, S.; REICHERT, J. R.; RODRIGUES, A. V.; ZAMPIERI, V. A. Asbestos-free technology with new high toughness polypropylene (PP) fibers in air-cured Hatschek process. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 2, p. 171–180, fev. 2010.

JABERIZADEH, M.; DANOGLIDIS, P. A.; KONSTA-GDOUTOS, M. S. The role of carbonation curing in enhancing interfacial stability, durability, and mechanical performance of cellulose fiber-reinforced cementitious composites. **Construction and Building Materials**, v. 541, p. 2–17, 17 ago. 2026.

JUNGUES, A. L.; SANTOS, V. Y.; MASSONI, N. T.; SANTOS, F. A. C. Efeito estufa e aquecimento global: Uma abordagem conceitual a partir da física para educação básica. **Experiências em Ensino de Ciências**, v. 13, n. 5, p. 126–151, 23 nov. 2018.

KALIYAVARADHAN, S. K.; LING, T. C. Potential of CO2 sequestration through construction and demolition (C&D) waste - An overview. **Journal of CO2 Utilization**, v. 20, p. 234–242, 8 jun. 2017.

KIM, S. G. **Effect of heat generation from cement hydration on mass concrete placement**. 2010. 114f. Thesis (Master of Science) – Department of Civil Engineering, Iowa State University, Ames, 2010.

KROPP, JÖRG. Relations between transport characteristics and durability. *In*: KROPP, J; HILSDORF, H. K. (Eds.). **Performance criteria for concrete durability**. 1 edição ed. London: E & FN Spon, p. 65–89. 1995.

LABIB, W. A. Fibre Reinforced Cement Composites. *IN*: **Cement Based Materials**. [s.l.] InTech, p. 31-48, 2018.

LEEMANN, A.; MORO, F. Carbonation of concrete: the role of CO2 concentration, relative humidity and CO2 buffer capacity. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 50, n. 1, p. 1–14, 1 fev. 2017.

LIU, J.; LV, C. Research Progress on Durability of Cellulose Fiber-Reinforced Cement-Based Composites. **International Journal of Polymer Science**, v. 2021, p. 1–13, 17 ago. 2021.

MACEDO, J. W. N. DE; PIPOLO, L. F. G.; RAMOS FILHO, R. E. B.; SOUZA, J. M. DE; SILVA, V. M. DA; ACCHAR, W. Argamassas produzidas com resíduos de scheelita e pó de pedra: uma revisão sistemática da literatura. **Revista Principia - Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB**, v. 60, n. 1, p. 166, 30 mar. 2023.

MAZURANA, L. **Captura de CO_2 em argamassas de revestimento através da carbonatação.** 2019. 120p. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2019.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: microestructure, properties, and materials**. Third Edition ed. New York: McGraw-Hill, 660 p. 2006.

MENDONÇA, K. R. M. **Influência da morfologia da etringita na expansão de pastas cimentícias contendo nanocarbonato de cálcio**. 2023. 86f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2023.

NEVES, Í. B. F. **Avaliação da carbonatação em argamassas de cimento com adições de cinza de casca de arroz amorfa e cristalina.** 2005. 149f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil). Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2005.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. Segunda edição ed. Porto Alegre: BOOKMAN EDITORA LTDA, 390 p. 2013.

PARENTE, I. M. DA S.; SAKANO, V. K.; PILEGGI, R. G.; CARDOSO, F. A.; SAVASTANO JUNIOR, H. Assessment of the potential use of eucalyptus pulp, mineral additions, and carbonation in extruded fiber cement. **Case Studies in Construction Materials**, v. 25, p. 1–20, 27 ago. 2026.

PAULA, L. G. DE. **Análise termoeconômica do processo de produção de cimento Portland com co-processamento de misturas de resíduos**. 2009. 158f. Dissertação (Mestrado em Conversão de Energia) – Instituto de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2009.

PENN STATE. **Hydration of Portland Cement.** Disponível em: <https://www.engr.psu.edu/ce/courses/ce584/concrete/library/construction/curing/Hydration.htm>. Acesso em: 9 jul. 2025.

PEREIRA, T. G. T.; FARIA, D. L.; SILVA, D. W.; ARANTES, L. DE S.; SORIANO, J.; BATISTA, F. G.; HOSTALÁCIO, J. M. V. P.; MENDES, L. M.; TONOLI, G. H. D. Improved performance of coconut fiber and quartzite waste cement composites using accelerated carbonation. **Environmental Science and Pollution Research**, p. 1–19, 14 abr. 2025.

PERSSON, B. Eight-year exploration of shrinkage in high-performance concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 32, n. 8, p. 1229–1237, ago. 2002.

PIQUÉ, T. M.; VÁZQUEZ, A. Uso de espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) en el estudio de la hidratación del cemento. **Concreto y Cemento. Investigación y Desarrollo**, v. 3, n. 2, p. 62–71, 2012.

POSSAN, E. Captura de CO2 em materiais cimentícios. **Concreto & Construções**, p. 60–66, 2019.

PRADO, H. **O que é placa cimentícia? Vantagens, aplicações e mais.** Disponível em: <https://gessoprado.com/cimenticia/o-que-e-placa-cimenticia/>. Acesso em: 22 nov. 2024.

PRASETYO, T.; PRAMUDIA, M.; KHOIRUL UMAMI, M.; HERDINAN, M. **Impact of nipah palm stem fiber volume fraction on the physical and mechanical properties of cement-based particle board composites.** EPJ Web of Conferences. **Anais**...EDP Sciences, 22 dez. 2025

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, p. 1–22, 30 jun. 2020.

RAMLI, M.; TABASSI, A. A. A.; HOE, K. W. Porosity, pore structure, and water absorption of polymer-modified mortars: An experimental study under different curing conditions. **Composites Part B: Engineering**, v. 55, p. 221–233, 25 jun. 2013.

RICHARDS, G. N. **Air emission reduction from the use of alternative fuels in cement production**. 2017. 257f. Thesis (PhD Doctorale) - Griffith School of Engineering. Griffith University, Brisbane, 2017.

RIDZUAN, M. N.; BAKAR, H. A.; SAMSUDIN, E. M.; SOH, N. M. Z. N.; ISMAIL, L. H. Effects of Density Variation on the Physical and Mechanical Properties of Empty Fruit Bunch Cement Board (EFBCB). **Pertanika Journal of Science and Technology**, v. 31, n. 3, p. 1157–1172, 1 abr. 2023.

RIGO, E. **Avaliação do potencial de captura de CO2 de concretos com resíduos de construção e demolição devido à carbonatação.** 2019. 78f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, Paraná, 2019.

RONG, H. LIU; ZHOU, Z. HUA; PENG, S. LONG; HUANG, Y.; LIANG, J. LIN; YANG, X. LONG; SHI, J. CHUANG; FENG, Y. MENG. Effect of ultra-fine limestone powder on leaching resistance of cement mortar. **Construction and Building Materials**, v. 368, p. 1–11, 3 mar. 2023.

SAC-MORANE, A.; IOANNIDOU, K.; VEVEAKIS, M.; RATTEZ, H. Predicting microstructure and mechanical properties during alite (C_3S) hydration using a Phase-Field model. **Construction and Building Materials**, v. 521, p. 1–16, 25 abr. 2026.

SANTOS, H. C. **Etilenoglicol e nano-CaCO3 como aditivos para argamassas de cimento Portland: Efeitos na microestrutura, carbonatação e capacidade de autocura.** 2024. 157f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2024.

SHI, C.; LIU, M.; HE, P.; OU, Z. Factors affecting kinetics of co2 curing of concrete. **Journal of Sustainable Cement-Based Materials**, v. 1, n. 1–2, p. 24–33, 9 nov. 2012.

SIDAC. **Cimento - CPV**. Disponível em: <https://sidac.org.br/produtos/62>. Acesso em: 16 ago. 2026.

SILVA, E. J. DA; SILVA, P. D. DA; MARQUES, M. L.; FORNARI JUNIOR, C. C. M.; GARCÍA, F. C.; LUZARDO, F. H. M. Resistência à compressão de argamassas em função da adição de fibra de coco. **Revista Brasileira de Engenharia Agricola e Ambiental**, v. 18, n. 12, p. 1268–1273, 14 jul. 2014.

SILVA, R. J. DA. **Análise energética de plantas de produção de cimento Portland**. 1994. 259f. Tese (Doutorado) – Departamento de Energia. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1994.

SNELLINGS, R. *et al.* RILEM TC-238 SCM recommendation on hydration stoppage by solvent exchange for the study of hydrate assemblages. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 51, p. 1–4, 13 dez. 2018.

SOARES, E. N. C.; GARCIA, D. C. S.; SILVA, D. W.; MARTINS, M. A.; GUIMARÃES JUNIOR, J. B. Efeito da combinação de aditivos surfactantes em fibrocimento extrudado reforçado com fibras de sisal in natura. **Ambiente Construído**, v. 25, p. 1–16, dez. 2025.

SOUZA, R. B. DE. **Estudo da retração em fibrocimento reforçado com fibra polimérica**. 2014. 244 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

STUTZMAN, P. Scanning electron microscopy imaging of hydraulic cement microstructure. **Cement and Concrete Composites**, v. 26, n. 8, p. 957–966, nov. 2004.

TAIWO, A. S.; AYRE, D. S.; KHORAMI, M.; RAHATEKAR, S. S. Optimizing the Mechanical Properties of Cement Composite Boards Reinforced with Cellulose Pulp and Bamboo Fibers for Building Applications in Low-Cost Housing Estates. **Materials**, v. 17, n. 3, p. 1–18, 1 fev. 2024.

TAYLOR, H. F. W. . **Cement chemistry**. 2. ed. London: T. Telford, 469 p. 1997.

THEPRUTTANA, S.; PATTHANAVARIT, J.; HANKOY, M.; KITIWAN, M.; KEAWPRAK, N.; TUNTHAWIROON, P. Enhancement of Flexural Strength in Fiber–Cement Composites through Modification of Sisal Fiber with Natural Rubber Latex and Expanded Perlite. **Buildings**, v. 14, n. 4, p. 1–16, 1 abr. 2024.

TONOLI, G. H. D. **Aspectos produtivos e análise do desempenho do fibrocimento sem amianto no desenvolvimento de tecnologia para telhas onduladas.** 2006. 129f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2006.

VERDIANI, V. B.; YAMAJI, F. M.; LIMA, L.; BELINI, G. B. Visão geral sobre o processo de coprocessamento na indústria do cimento no Brasil. **Ambiente Construído**, v. 25, p. 1–21, 2025.

WANG, D.; SHI, C.; FARZADNIA, N.; SHI, Z.; JIA, H.; OU, Z. A review on use of limestone powder in cement-based materials: Mechanism, hydration and microstructures. **Construction and Building Materials**, v. 181, p. 659–672, 30 ago. 2018.

WANG, J.; XU, H.; XU, D.; DU, P.; ZHOU, Z.; YUAN, L.; CHENG, X. Accelerated carbonation of hardened cement pastes: Influence of porosity. **Construction and Building Materials**, v. 225, p. 159–169, 20 nov. 2019.

WANG, Z.; ZHOU, H.; LIAN, S.; MENG, T.; YU, H.; ZHOU, X.; WANG, S.; RUAN, S. Hydration behaviors, workability, and strength variations in direct aqueous carbonation (DAC) of Portland cement paste. **Scientific Reports**, v. 15, n. 1, p. 1–21, 14 fev. 2025.

WERLE, A. P.; KAZMIERCZAK, C. DE S.; KULAKOWSKI, M. P. Carbonatação em concretos com agregados reciclados de concreto. **Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**, v. 11, n. 2, p. 213–228, 2011.

XAYSOMBATH, P.; SOYKEABKAEW, N.; WATTANASIRIWECH, D.; WATTANASIRIWECH, S. Effect of Natural Fiber Characteristics on Properties of Cementitious Composites: A Comparison of Recycled Pulp from Beverage Cartons, Bamboo, and Eucalyptus Fibers. **Construction Materials**, v. 5, n. 3, p. 2–19, 1 set. 2025.

XIAN, X.; LOGAN, C.; SHAO, Y. Dimensional stability of cement paste and concrete subject to early-age carbonation curing. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 55, n. 3, p. 1–19, 1 abr. 2022.

ZAID, O.; KAHLA, N. BEN. Natural fiber reinforcements in cement-based composites: A review on recent advances, properties, and sustainability. **Industrial Crops and Products**, v. 240, p. 1–36, 6 jan. 2026.

ZHANG, S.; LIU, J.; XIONG, Z.; CHEN, X.; LIU, Y.; ZENG, J.; ZHUGE, Y. Carbonation of Ca–rich and Mg–rich precursor: a comprehensive review, comparisons, and future opportunities. **npj Materials Sustainability**, v. 4, n. 1, 3 fev. 2026.

ZHANG, W.; WANG, J.; CHEN, Z. Hydration kinetics, strength, autogenous shrinkage, and sustainability of cement pastes incorporating ultrafine limestone powder. **Case Studies in Construction Materials**, v. 20, p. 1–16, 1 jul. 2024.

ZHUANG, R.; LI, Y.; HUANG, J.; LIU, Q.; LUO, Y.; SHEN, Z.; ZHANG, T.; HE, Y.; ZENG, S.; DUAN, H.; YU, J. Effect of chelator on carbon sequestration and mechanical properties of CO2-cured cement pastes with different pore structures. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 12, n. 6, p. 1–16, 1 dez. 2024.

ZHUGE, Y.; ONG, P. B.; WONG, H. S.; MYERS, R. J. Natural fibre-enhanced CO2 transport and uptake in cement pastes subjected to enforced carbonation. **Journal of CO2 Utilization**, v. 90, p. 1–15, 1 dez. 2024.