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

JOÃO MARCOS LIMA CARVALHO

ANÁLISE DA INCORPORAÇÃO DE CO_2 EM PLACA CIMENTÍCIA TÊXTIL

São Cristóvão
2026

JOÃO MARCOS LIMA CARVALHO

ANÁLISE DA INCORPORAÇÃO DE CO_2 EM PLACA CIMENTÍCIA TÊXTIL

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

São Cristóvão
2026

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE

Carvalho, João Marcos Lima
C331a Análise da incorporação de CO_2 em placa cimentícia têxtil / João Marcos Lima Carvalho ; orientador Rui Barbosa de Souza. - São Cristóvão, 2026.
137 f. : il.

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

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

CDU 625

ANÁLISE DA INCORPORAÇÃO DE CO_2 EM PLACA CIMENTÍCIA TÊXTIL

JOÃO MARCOS LIMA CARVALHO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE EM (28/08/2026)

BANCA EXAMINADORA:

Dr. Rui Barbosa de Souza
Orientador

Dr. Vania Elisabete Schneider
1° Examinador (Interno)
PROEC / UFS – Universidade Federal de Sergipe

Dr. Heloísa Cristina Fernandes Cordon
2° Examinador (Externo)
CBCS – Conselho Brasileiro de Construção Sustentável

São Cristóvão
2026

RESUMO

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

A crescente preocupação com os impactos ambientais provocados pelas emissões de dióxido de carbono (CO_2), oriundas da indústria cimenteira, tem impulsionado o desenvolvimento de materiais sustentáveis e eficientes. O cimento Portland, principal ligante do concreto e das placas cimentícias, é responsável por uma significativa parcela das emissões globais de CO_2. Nesse contexto, o presente estudo propõe investigar alternativas que aliem desempenho técnico e redução da pegada de carbono, por meio da utilização de reforços têxteis em placas cimentícias planas submetidas à carbonatação acelerada. O objetivo geral do presente trabalho é avaliar a incorporação de CO_2 por carbonatação em diferentes condições de exposição em placas cimentícias planas reforçadas com tecido não tecido e tecido de vidro álcali resistente, em comparação com placas reforçadas com fibras sintéticas de PVA, analisando as diferenças no comportamento físico, mecânico, microestrutural, bem como nos indicadores de ecoeficiência. A metodologia experimental consiste na caracterização de materiais (granulometria por difração a laser, Fluorescência de Raios X, Difração de Raios X, massa específica e Microscopia Eletrônica de Varredura), produção das amostras em batelada, utilizando moldes com dimensões internas de 29,5x16x1 cm e carbonatação natural (CN) e em câmara (CC) com umidade relativa e temperatura controladas em ambas as condições, além de concentração manipulada em 5% de CO_2. As placas apresentam duas camadas de tecido intercaladas à matriz cimentícia (Placa de tecido não tecido (PTNT) e placa de tecido de vidro álcali resistente (PTVAR)). Os grupos de amostras foram produzidos e submetidos a ensaios físicos (porosidade, densidades e variação dimensional por carbonatação), mecânicos (resistência à flexão 3 pontos), microestruturais (microscopia digital, termogravimetria, profundidade de carbonatação e gravimetria por perda de massa em mufla) e indicadores de ecoeficiência (intensidade ligante-flexão, intensidade carbono-flexão e saldo de intensidade carbono-flexão equivalente). Os resultados mostraram que a PTNT apresentou maior porosidade e absorção de água, associadas ao maior avanço da frente de carbonatação atingindo 0,79 mm aos 14 dias em CN e 0,87 mm em CC. A incorporação de CO_2 aos 28 dias também foi superior na PTNT, alcançando 1,70% na CN e 0,88% na CC. Em contrapartida, o PTVAR apresentou menor profundidade de carbonatação, associada à sua menor porosidade, e destacou-se pelo melhor desempenho mecânico e pela menor ecoeficiência nos três indicadores propostos. Conclui-se que o tipo de reforço exerce influência significativa sobre a interação entre transporte de CO_2, microestrutura e desempenho mecânico. O PTNT apresentou maior potencial de mineralização de CO_2 nas condições avaliadas, enquanto o PTVAR apresentou o melhor equilíbrio entre desempenho estrutural e ecoeficiência. A incorporação de CO_2 ainda foi insuficiente para compensar as emissões associadas à produção no período avaliado, indicando a necessidade de exposições mais prolongadas para melhor avaliar o potencial de carbonatação das placas.

Palavras-chave: Fibrocimento têxtil. Carbonatação. Indicadores de ecoeficiência. Propriedades mecânicas.

ANALYSIS OF CO_2 INCORPORATION IN TEXTILE CEMENT BOARD

ABSTRACT

The growing concern about the environmental impacts caused by carbon dioxide (CO_2) emissions from the cement industry has driven the development of sustainable and efficient materials. Portland cement, the main binder in concrete and cementitious boards, is responsible for a significant share of global CO_2 emissions. In this context, the present study proposes to investigate alternatives that combine technical performance with a reduced carbon footprint through the use of textile reinforcements in flat cementitious boards subjected to accelerated carbonation. The general objective of this work is to evaluate CO_2 uptake through carbonation under different exposure conditions in flat cementitious boards reinforced with nonwoven fabric and alkali-resistant glass fabric, in comparison with boards reinforced with synthetic PVA fibers, analyzing the differences in physical, mechanical, and microstructural behavior, as well as in eco-efficiency indicators. The experimental methodology consists of material characterization (particle size distribution by laser diffraction, X-Ray Fluorescence, X-Ray Diffraction, specific mass, and Scanning Electron Microscopy), production of samples in batches using molds with internal dimensions of 29.5 × 16 × 1 cm, and natural carbonation (NC) and chamber carbonation (CC), both with controlled relative humidity and temperature, and with the CO_2 concentration set at 5%. The boards feature two layers of fabric interlaid within the cementitious matrix (Nonwoven Fabric Board (NFB) and Alkali-Resistant Glass Fabric Board (ARGB)). The sample groups were produced and subjected to physical tests (porosity, densities, and dimensional variation due to carbonation), mechanical tests (three-point flexural strength), microstructural tests (digital microscopy, thermogravimetry, carbonation depth, and gravimetry by mass loss in a muffle furnace), and eco-efficiency indicators (binder-flexural intensity, carbon-flexural intensity, and equivalent carbon-flexural intensity balance). The results showed that the NFB exhibited higher porosity and water absorption, associated with a greater advance of the carbonation front, reaching 0.79 mm at 14 days under NC and 0.87 mm under CC. CO_2 uptake at 28 days was also higher in the NFB, reaching 1.70% under NC and 0.88% under CC. In contrast, the ARGB showed a lower carbonation depth, associated with its lower porosity, and stood out for its better mechanical performance and lower eco-efficiency across the three proposed indicators. It is concluded that the type of reinforcement exerts a significant influence on the interaction between CO_2 transport, microstructure, and mechanical performance. The NFB showed greater potential for CO_2 mineralization under the conditions evaluated, while the ARGB presented the best balance between structural performance and eco-efficiency. CO_2 uptake was still insufficient to offset the emissions associated with production during the period evaluated, indicating the need for longer exposure times to better assess the carbonation potential of the boards.

Keywords: Textile fiber-cement. Carbonation. Eco-efficiency indicators. Mechanical properties.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 3.1. Amostragem inicial das bases de dados em relação às strings 6
Figura 3.2. Distribuição de trabalhos relevantes por base de dados após filtragem temática 7
Figura 3.3. Percentual de trabalhos acadêmicos 8
Figura 3.4. Materiais cimentícios com inserção de reforços 8
Figura 3.5. (a) Materiais cimentícios com inserção de reforços; (b) Tipos de fibras inseridas como reforço.....9
Figura 3.6. (a) Panorama metodológico dos ensaios; (b) Métodos de carbonatação 10
Figura 4.1. Etapas do processo produtivo do cimento Portland 13
Figura 4.2. Histórico dos níveis de dióxido de carbono global 15
Figura 4.3. Placa cimentícia comercial 18
Figura 4.4. Produção mundial de fibras em 2023 20
Figura 4.5. Tipos de tecido: (a) tecidos planos; (b) malhas; e (c) tecidos não tecidos 22
Figura 5.1. Fluxograma de procedimento experimental 27
Figura 5.2. Ensaio de resistência a flexão 3 pontos 31
Figura 5.3. Coloração do indicador fenolftaleína 33
Figura 5.4. Configuração dos corpos de prova. 35
Figura 5.5. Esquema de identificação das amostras 35
Figura 5.6. Fluxograma de procedimento de dispersão da celulose 37
Figura 5.7. Molde das formas das placas 38
Figura 5.8. Fluxograma de amostras.....40
Figura 5.9. Esquema da câmara de carbonatação.....42
Figura 5.10. Câmara de carbonatação com disposição das amostras 44
Figura 6.1 – Granulometria por difração a laser do calcário..... 48
Figura 6.2. Morfologia da fibra de vidro álcali resistente analisada por MEV.....52
Figura 6.3. Morfologia do tecido não tecido analisada por MEV..... 53
Figura 6.4. Morfologia da fibra curta de celulose analisada por MEV..... 54
Figura 6.5. Análise termogravimétrica das matérias-primas empregadas na produção do fibrocimento..... 55
Figura 6.6. Difratogramas de raios X do cimento CP-V e do calcário.....58
Figura 6.7. Absorção de água das amostras em condições de carbonatação natural e acelerada 60

Figura 6.8. Porosidade total das amostras em condições de carbonatação natural e acelerada 61
Figura 6.9. Densidade aparente das amostras em condições de carbonatação natural e em câmara..... 62
Figura 6.10. Densidade real das amostras em condições de carbonatação natural e em câmara..... 63
Figura 6.11. Variação dimensional por carbonatação natural das amostras..... 65
Figura 6.12. Perda de massa por carbonatação natural das amostras..... 66
Figura 6.13. Variação dimensional durante sazonamento de amostras pré-carbonatação em câmara..... 68
Figura 6.14. Variação dimensional por carbonatação das amostras em câmara..... 70
Figura 6.15. Perda de massa das amostras em câmara de carbonatação..... 71
Figura 6.16. Gráfico de tensão x flecha de amostras de PVA sob CN e CC..... 76
Figura 6.17. Gráfico de tensão x flecha de amostras de TNT sob CN e CC..... 77
Figura 6.18. Gráfico de tensão x flecha de amostras de TVAR sob CN e CC 78
Figura 6.19. Interface matriz-reforço de amostra PFPVA após rompimento 80
Figura 6.20. Interface matriz-reforço de amostra PTNT após rompimento 81
Figura 6.21. Interface matriz-reforço de amostra PTVAR após rompimento 82
Figura 6.22. Frente de carbonatação por indicador fenolftaleína em amostras sob CN 84
Figura 6.23. Frente de carbonatação por indicador fenolftaleína em amostras sob CC 85
Figura 6.24. Profundidade de carbonatação natural 87
Figura 6.25. Profundidade de carbonatação em câmara..... 88
Figura 6.26. Profundidade de carbonatação estimada pelo modelo de Tuutti (1982) 90
Figura 6.27. Termogravimetria de amostra PFPVA sob carbonatação natural (a) e em câmara (b) 93
Figura 6.28. Termogravimetria de amostra PTNT sob carbonatação natural (a) e em câmara (b) 94
Figura 6.29. Termogravimetria de amostra PTVAR sob carbonatação natural (a) e em câmara (b)..... 95
Figura 6.30. Incorporação de CO_2 em amostras sob carbonatação natural (a) e em câmara (b) 99
Figura 6.31. Comparativo da intensidade ligante-flexão em amostras sob CN e CC..... 102
Figura 6.32. Comparativo da intensidade carbono-flexão em amostras sob CN e CC..... 102

Figura 6.33. Comparativo do saldo de intensidade carbono-flexão equivalente em amostras sob CC e CN 103

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1. Relação dos indicadores de ecoeficiência com a resistência mecânica 25
Tabela 5.1. Formulação da matriz cimentícia em percentual 36
Tabela 5.2. Relação do número de amostras com a concentração dos reagentes 42
Tabela 6.1. Caracterização da massa específica pelo método de *le chatelier*..... 49
Tabela 6.2. Caracterização química das matérias-primas por FRX..... 50
Tabela 6.3. Caracterização da resistência mecânica à flexão 3 pontos sob CN e CC..... 72
Tabela 6.4. Estimativa estequiométrica do potencial carbonatável do $Ca(OH)_2$ residual aos 28 dias 97
Tabela 6.5. Estimativa estequiométrica do carbonato de cálcio formado aos 28 dias..... 101

LISTA DE QUADROS

Quadro 1.1 – Especificações dos materiais utilizados..... 28
Quadro 1.2 - Função dos componentes da câmara de carbonatação..... 41

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIAÇÕES

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
(aq)	Aquoso
ASCE	American Society of Civil Engineers
ASTM	American Society for Testing and Materials
BET	Brunauer-Emmett-Teller
Ca	Cálcio
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CATP	Condições Ambientais de Temperatura e Pressão
CLGEO	Condomínio de Laboratórios Multiusuários das Geociências
CO_2	Dióxido de carbono
DEC	Departamento de Engenharia Civil
DRX	Difração de Raios X
DTG	Termogravimetria Derivada
FRX	Fluorescência de Raios X
(g)	Gasoso
GDL	Granulometria por difração a laser
GEE	Gases do Efeito Estufa
IC	Intensidade de Carbono
IL	Intensidade Ligante
kg	Quilogramas
(l)	Líquido
LAMCE	Laboratório de Materiais de Construção e Estruturas
CLMDCEM	Condomínio de Laboratórios Multiusuários do Departamento de Ciência e Engenharia de Materiais
m^2	Metro quadrado
m^3	Metro cúbico
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
Mg	Magnésio
MPa	Mega Pascal
NaCl	Cloreto de sódio
ODS	Organização de Desenvolvimento Sustentável
P/P_0	Razão entre a pressão parcial de um gás e a pressão de referência
pH	Potencial Hidrogeniônico
ppm.	Pressão por minuto
PVA	Poliacetato de vinila
RCD	Resíduo de Construção e Demolição
Ŝ	Trióxido de enxofre (SO_3)
(s)	Sólido
SNIC	Sindicato Nacional da Indústria do Cimento
TG	Termogravimetria
TNT	Tecido Não Tecido
TVAR	Tecido de Vidro Álcali Resistente
UFS	Universidade Federal de Sergipe
WBCSD	World Business Council for Sustainable Development

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 1

2 OBJETIVOS 4

2.1 OBJETIVO GERAL 4
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 4

3 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA 5

3.1 ANÁLISES DOS DADOS ESTATÍSTICOS 5
3.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS DA PESQUISA BIBLIOMÉTRICA 11

4 REVISÃO DE LITERATURA 13

4.1 CIMENTO PORTLAND: PRODUÇÃO, HIDRATAÇÃO E CARBONATAÇÃO 13
4.1.1 Produção do cimento Portland 13
4.1.2 Hidratação do Cimento Portland 15
4.1.3 Carbonatação das Fases Hidratadas 16
4.2 CHAPAS CIMENTÍCIAS PLANAS 18
4.3 COMPÓSITO CIMENTÍCIO TÊXTIL 20
4.3.1 Tipos de estrutura têxtil 22
4.4 MÉTODOS DE CAPTURA DE CO_2 VIA CARBONATAÇÃO 23
4.5 PARÂMETROS DE AVALIAÇÃO DE ECOEFICIÊNCIA 24

5 METODOLOGIA 27

5.1 FLUXOGRAMA DE ATIVIDADES 27
5.2 MATERIAIS 27
5.3 TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO 28
5.3.1 Granulometria por Difração a Laser (GDL) 28
5.3.2 Fluorescência de Raios X (FRX) 29
5.3.3 Difração de Raios X (DRX) 29
5.3.4 Massa específica 29
5.3.5 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) 30
5.3.6 Porosidade total e densidade das amostras 30
5.3.7 Ensaios de variação dimensional por carbonatação 30
5.3.8 Resistência Mecânica 31
5.3.9 Microscopia digital 33
5.3.10 Procedimento de interrupção da reação de hidratação 33
5.3.11 Profundidade de carbonatação 33
5.3.12 Termogravimetria (TGA/DTG) 34
5.3.13 Gravimetria por perda de massa em mufla 34
5.4 PRODUÇÃO DAS AMOSTRAS 34

5.5 CARBONATAÇÃO DAS AMOSTRAS 40
5.5.1 Montagem da câmara de carbonatação 40
5.5.2 Procedimento experimental de carbonatação em câmara 43
5.6 INDICADORES DE ECOEFICIÊNCIA 44
5.6.1 Intensidade Ligante-Flexão (IL_f) 45
5.6.2 Intensidade Carbono-Flexão (IC_f) 45
5.6.3 Saldo de Intensidade Carbono-Flexão Equivalente ($SIC_{f\,eq}$) 46

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO 48

6.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS 48
6.1.1 Granulometria e massa específica 48
6.1.2 Composição química por FRX 50
6.1.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) 51
6.1.4 Termogravimetria das matérias-primas (TGA) 55
6.1.5 Difração de Raios X (DRX) e discussão mineralógica 57
6.2 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DAS PLACAS CIMENTÍCIAS 59
6.2.1 Absorção de água e Porosidade total 59
6.2.2 Densidade aparente e real 62
6.3 VARIAÇÃO DIMENSIONAL POR CARBONATAÇÃO 65
6.3.1 Carbonatação natural 65
6.3.2 Carbonatação em câmara 68
6.4 COMPORTAMENTO MECÂNICO DO FIBROCIMENTO 72
6.4.1 Resistência à flexão (MOR e LOP) 73
6.4.2 Módulo de elasticidade e Tenacidade 73
6.4.3 Deflexão máxima e discussão do comportamento mecânico 74
6.4.4 Interface matriz-reforço 78
6.5 CARBONATAÇÃO, CAPTURA DE CO_2 E MICROESTRUTURA 81
6.5.1 Profundidade de carbonatação e frente carbonatada 81
6.5.2 Análise dos efeitos da carbonatação nas fases hidratadas das placas 90
6.6 ECOEFICIÊNCIA E POTENCIAL DE INCORPORAÇÃO DE CARBONO 97
6.6.1 Absorção de CO_2 97
6.6.2 Indicadores de ecoeficiência 100
6.7 DISCUSSÃO INTEGRADA 103

7 CONCLUSÃO 105

8 REFERÊNCIAS 107

1 INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com os impactos ambientais provocados pelas emissões de dióxido de carbono (CO_2), oriundas da indústria cimenteira, tem impulsionado o desenvolvimento de materiais sustentáveis e eficientes. O cimento Portland, amplamente utilizado na construção civil, é responsável por significativa parcela das emissões globais de CO_2, devido ao processo de clinquerização e a elevada demanda energética deste processo.

Os materiais cimentícios são amplamente utilizados no setor da construção civil. Como principais produtos gerados pelo setor estão o concreto, a argamassa, os blocos, as telhas e as placas cimentícias. Por conseguinte, o consumo nacional de cimento atingiu a marca de 65,695 milhões de toneladas no período de junho de 2024 a junho de 2025 (SNIC, 2025). Diante disso, o concreto é o material mais produzido e consequentemente aquele que contribui para a maior parcela da pegada de carbono. Já com relação à composição desses materiais, as placas cimentícias são as que possuem maior consumo de cimento, pois cerca de 60 a 75% da massa seca do produto é constituída de cimento e o restante dessa fração constituída de adições minerais e fibras (Gorzelańczyk; Schabowicz; Szymków, 2020; Kottititum et al., 2018).

Criadas por Hatschek em 1901, as placas de fibrocimento utilizavam amianto em seu processo inicial de produção, o qual tem como princípio básico a filtragem de uma suspensão diluída de cimento e fibras por um tamis rotativo. Essa composição de fibrocimento foi sendo questionada em virtude dos riscos à saúde que o amianto causava nos trabalhadores, o que incentivou pesquisas para a substituição do material sem perda da qualidade e desempenho do produto (Rodrigues, 2020).

Nas décadas de 1970 e 1980, as fibras vegetais e sintéticas começaram a ser incorporadas às placas cimentícias, oferecendo melhorias na resistência à tração, durabilidade e flexibilidade, além de serem materiais biodegradáveis e renováveis, conferindo maior sustentabilidade ao compósito. No mesmo período, teve início o uso de tecidos como reforço das placas cimentícias, o que permitiu uma distribuição das tensões de modo uniforme, redução do peso do produto e durabilidade do compósito (Ikai et al., 2010).

No contexto do desenvolvimento de compósitos cimentícios reforçados com têxteis, os tecidos técnicos, como o tecido não tecido (TNT) e o tecido de vidro álcali resistente (TVAR), têm se mostrado alternativas promissoras frente aos reforços fibrosos convencionais, por conferirem aos elementos maior tenacidade, ductilidade e capacidade de deformação. Esses reforços atuam de maneira ativa na contenção da fissuração e na redistribuição de tensões, influenciando diretamente a durabilidade e a resistência à flexão das placas (Freitas, 2008;

Giese, 2019).

A busca por soluções que reduzam significativamente a pegada de carbono das matrizes cimentícias tem trazido à tona diversos métodos que potencializam a captura de CO_2 por carbonatação. O processo de carbonatação ocorre naturalmente, porém estudos vêm sendo desenvolvidos para sua indução e aceleração de forma controlada, com o objetivo de capturar CO_2 e transformá-lo em $CaCO_3$ estável dentro da matriz cimentícia. Essas técnicas envolvem a utilização de resíduos reciclados, aditivos para amplificação da carbonatação e materiais que atuam como nucleadores de carbonato de cálcio, com destaque para diversas abordagens validadas por estudos recentes (Mazurana, 2019; Wang et al., 2023; Zajac et al., 2023).

No entanto, as interações entre matriz cimentícia e os reforços têxteis, bem como os efeitos provocados pela carbonatação acelerada ao longo do tempo, ainda necessitam de estudos mais aprofundados, sobretudo em condições experimentais controladas que simulem esse envelhecimento dos materiais.

A eficiência da carbonatação depende de vários fatores, sendo um dos mais importantes a área exposta do material ao ambiente. Materiais que possuem uma maior área exposta, sem a aplicação de camadas adicionais como revestimentos, são mais suscetíveis à carbonatação, uma vez que o CO_2 pode penetrar diretamente na superfície do compósito cimentício (Lo et al., 2016).

Nesse cenário, estratégias como a carbonatação acelerada de materiais cimentícios têm sido exploradas não apenas como forma de mitigar os impactos ambientais, mas também como mecanismo para potencializar o desempenho físico, mecânico e durável dos compósitos. Em particular, as placas cimentícias planas, utilizadas como sistemas de vedação e revestimento, apresentam elevado potencial de captura de CO_2 devido à sua ampla área superficial exposta e à presença de compostos reativos na matriz. Estes fatores contribuem significativamente para a neutralização parcial das emissões provenientes do processo de fabricação do cimento Portland (Andrade e Sanjuán, 2018; Possan et al., 2017).

A questão central deste estudo é investigar como os reforços têxteis com tecido de vidro álcali resistente (TVAR) e tecido não tecido (TNT), em comparação com o reforço de fibras poliméricas, combinada com uma matriz cimentícia de menor densidade, modificam a microestrutura e a rede porosa das placas cimentícias planas, de modo a aumentar a captura de CO_2 por carbonatação e, ao mesmo tempo, manter ou melhorar seu desempenho físico-mecânico e ecoeficiente. Com isso, o estudo é guiado na hipótese que o tipo de reforço têxtil influencia a estrutura de poros e, consequentemente, o comportamento de carbonatação e o

desempenho físico-mecânico das placas cimentícias, resultando em diferentes níveis de incorporação de CO_2 e ecoeficiência.

A justificativa para este estudo está relacionada às pautas ambientais levantadas nos últimos anos que englobam a necessidade de redução das emissões de carbono na indústria da construção, especialmente a produção de cimento, as quais são as maiores responsáveis pela pegada de carbono global. Dessa forma, estudar alternativas que transformem a placa cimentícia em sumidouros de carbono, analisando os impactos desse sistema nas propriedades físicas e mecânicas do compósito se torna crucial para o desenvolvimento de materiais de construção sustentáveis, incentivando práticas inovadoras e ecoeficientes na construção civil. Portanto, o uso de reforços têxteis, além de possibilitar a melhoria de propriedades mecânicas do material, pode proporcionar uma maior permeabilidade à matriz cimentícia, permitindo que o CO_2 presente no ambiente seja mais facilmente incorporado ao material durante sua vida útil.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral do presente trabalho é avaliar a incorporação de CO_2 por carbonatação em diferentes condições de exposição em placas cimentícias planas reforçadas com TNT e TVAR, em comparação com placas reforçadas com fibras sintéticas de PVA, analisando as diferenças no comportamento físico, mecânico, microestrutural, bem como nos indicadores de ecoeficiência.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar o comportamento mecânico de placas cimentícias, comparando os efeitos do tipo de reforço têxtil (TNT e TVAR) e do reforço de fibras poliméricas, expostas à carbonatação natural e em câmara;
- Analisar o efeito da carbonatação na variação dimensional do fibrocimento têxtil;
- Investigar as alterações microestruturais e químicas causadas pela carbonatação nas matrizes cimentícias, correlacionando-as com o desempenho físico-mecânico;
- Analisar o efeito da incorporação de CO_2 na ecoeficiência de compósitos cimentícios têxteis;
- Propor um indicador de ecoeficiência que relacione o desempenho mecânico de placas cimentícias à intensidade de carbono associada ao consumo de cimento.

3 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

O estudo foi realizado a partir de trabalhos escritos em dois idiomas: português e inglês, os quais foram publicados entre os anos de 2020 a junho de 2025, dentro da área de engenharia civil. Além disso, foram escolhidas as bases de dados que hospedavam trabalhos acadêmicos, como monografias, dissertações e teses, além de artigos publicados em congressos e revistas científicas. Estas bases foram o *Google Acadêmico*®, *ASCE*®, *Scopus*® e *Science Direct*®. Vale destacar que a utilização em larga escala do *Google Acadêmico*® configura-se como uma plataforma relevante nas etapas iniciais de busca por material, sobretudo ao se tratar de temas emergentes ou pouco explorados. Tal prática torna-se indispensável para a verificação do número de citações, especialmente quando essa informação não está disponível nas bases hospedadas pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal do Ensino Superior (CAPES).

Nesta pesquisa, foram adotadas palavras-chave previamente definidas para nortear o estudo, estruturadas em forma de *strings* de busca (combinação de palavras), em dois idiomas: português e inglês.

String em inglês: *((“cement composite” OR “cement board” OR "fiber-cement") AND (“carbonation” OR “carbon capture” OR "carbon uptake") AND (“textile” OR “fabric”))*

String em português: *((“compósito cimentício” OR “placa cimentícia” OR “fibrocimento”) AND (“carbonatação” OR “captura de carbono” OR “absorção de carbono”) AND (“têxtil” OR “tecido”))*

A seleção das palavras foi guiada pela necessidade científica de investigar de forma aprofundada a incorporação de CO_2 na matriz cimentícia de placas planas, destacando a relevância do tema para o avanço de estudos no setor. Para isto, foram lidos os títulos e resumos dos trabalhos selecionados inicialmente, excluindo trabalhos sem relação com o tema desta pesquisa e os duplicados. Na sequência foi elaborado um levantamento estatístico dos dados apurados para a discussão dos resultados.

Além disso, a pesquisa foi estruturada em quatro eixos principais: primeiramente, foi analisado sobre o número de trabalhos acadêmicos diferenciando o seu grau de complexidade de produção; em seguida, foram abordados quais os materiais cimentícios utilizados na composição com tecidos ou fibras; na sequência, comparou-se a inserção desses reforços nos compósitos; e, por fim, foram avaliadas as metodologias ou análises realizadas nesses estudos.

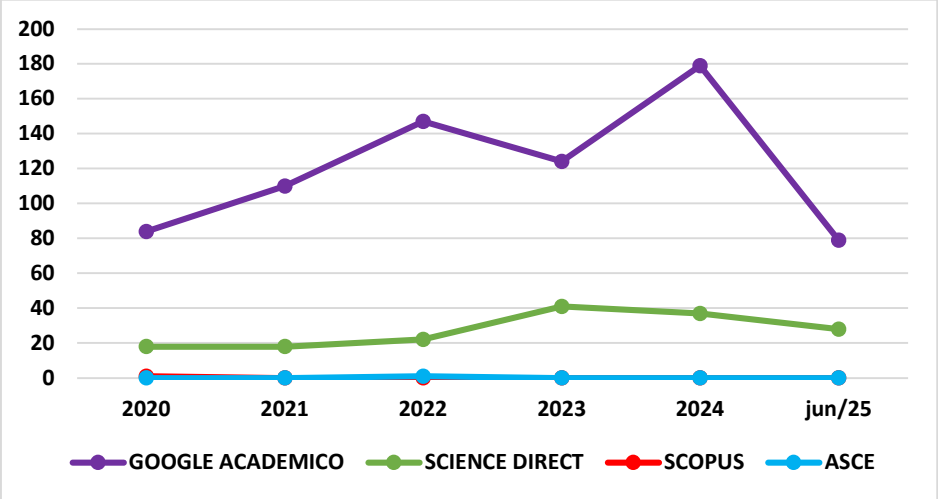
3.1 ANÁLISES DOS DADOS ESTATÍSTICOS

Em uma análise inicial dos dados obtidos, foi possível obter 889 trabalhos relacionados

às duas strings de pesquisas, destes apenas 9 trabalhos foram advindos da língua nacional, as quais foram lançadas em 4 bases de dados. Destas bases selecionadas, apenas o *Google Acadêmico*® não faz parte da CAPES, que hospeda o *Science Direct*®, *ASCE*® e *Scopus*®.

Por ser uma plataforma de acesso mundial da sociedade acadêmica, o *Google Acadêmico*® foi a base de dados que obteve o maior percentual de trabalhos com 81,33% na amostragem inicial. A Figura 3.1 apresenta o número de trabalhos por base de dados entre os anos de 2020 a junho de 2025, sem uma filtragem específica relacionada ao objetivo da pesquisa, mostrando apenas os trabalhos encontrados com as palavras-chave selecionadas.

Figura 3.1. Amostragem inicial das bases de dados em relação às *strings*



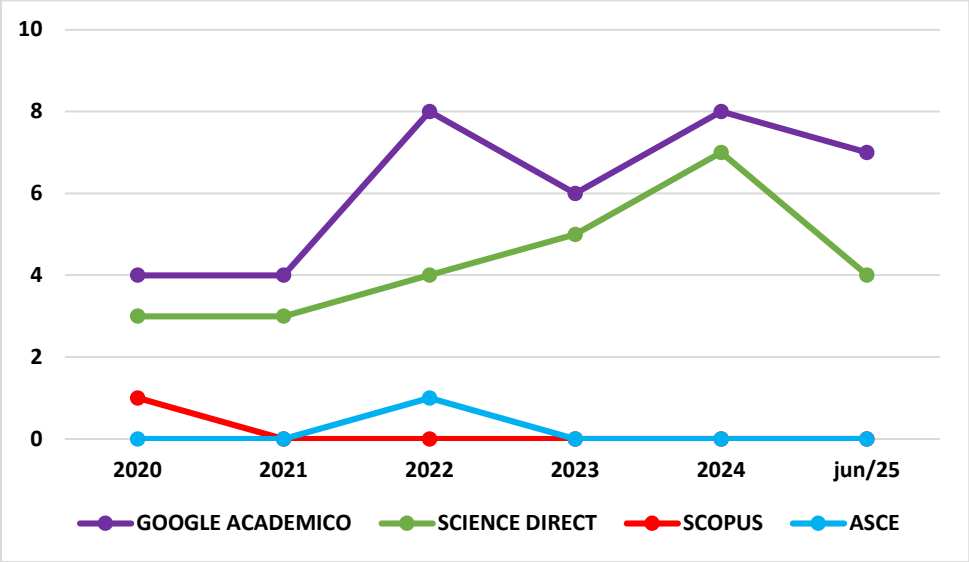
Fonte: Autoria própria (2025).

Na Figura 3.1 observa-se que o *Google Acadêmico*® apresentou o maior volume de publicações, com picos significativos em 2022 e 2024, evidenciando sua abrangência como ferramenta de busca acadêmica. A base *Science Direct*® manteve uma tendência de crescimento, dobrando o número de trabalhos em 2023 em relação a 2020, seguido de uma leve queda nos anos seguintes. Já as demais bases (*Scopus*® e *ASCE*®) apresentaram valores residuais, com pouca representatividade, indicando menor número de publicações encontradas nesses repositórios com os critérios utilizados.

A segunda etapa refere-se à filtragem de dados, através da leitura dos títulos, resumos e aderência temática das pesquisas selecionadas, as quais resultaram em um total de 65 trabalhos relacionados aos compósitos, o que significa apenas 7,31% do total apurado na análise inicial. A Figura 3.2 apresenta o gráfico após esse processo, o qual foi perceptível analisar que a base que apresentou uma grande quantidade na primeira etapa, foi a mesma que teve baixa relação

com o tema pesquisado. Enquanto, as bases que tiveram baixo retorno inicial mostraram ter uma filtragem alta com poucos trabalhos fora das *strings*.

Figura 3.2. Distribuição de trabalhos relevantes por base de dados após filtragem temática

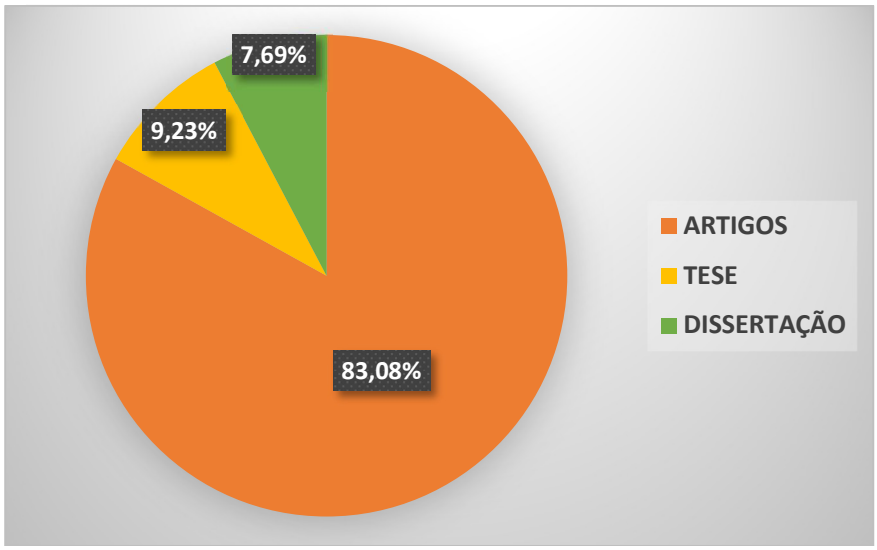


Fonte: Autoria própria (2025).

Conforme a Figura 3.2, o *Google Acadêmico*® lidera novamente, com 8 publicações selecionadas em 2024 e 2022. Já o *Science Direct*® também demonstrou bom desempenho, com até 7 publicações em 2024. As demais bases permaneceram com valores próximos a zero, o que indica o menor número de publicações disponíveis na área de interesse selecionada.

Apesar de terem uma baixa filtragem (5,12% e 15,85%, respectivamente), o *Google Acadêmico*® e *Science Direct*®, foram as bases com bons volumes de publicações acerca do tema. Em contrapartida, as bases do *Scopus*® e *ASCE*®, apresentaram bons índices de filtragem (100% cada), devido à baixa quantidade de trabalhos obtidos na amostragem inicial.

Figura 3.3. Percentual de trabalhos acadêmicos

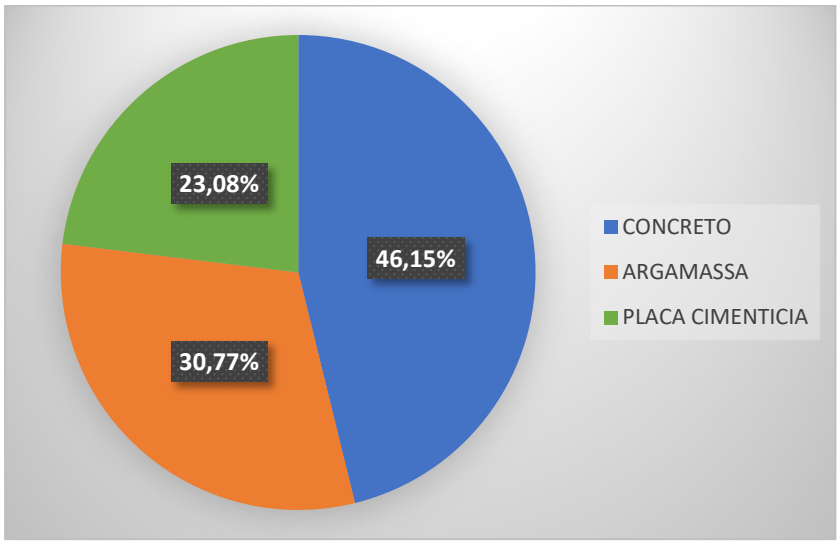


Fonte: Autoria própria (2025)

A Figura 3.3 apresenta a classificação dos documentos analisados quanto ao tipo de publicação. Os artigos científicos representam a ampla maioria, com 83,08% do total. As teses correspondem a 9,23%, enquanto as dissertações somam apenas 7,69%. Este dado reforça a predominância dos artigos como principal meio de disseminação do conhecimento acadêmico, sobretudo por sua maior agilidade na publicação e visibilidade internacional.

Analisando esses documentos com relação aos principais materiais empregados nas aplicações construtivas, a Figura 3.4 apresenta a distribuição percentual do concreto, da argamassa e da placa cimentícia em análises laboratoriais.

Figura 3.4. Materiais cimentícios com inserção de reforços



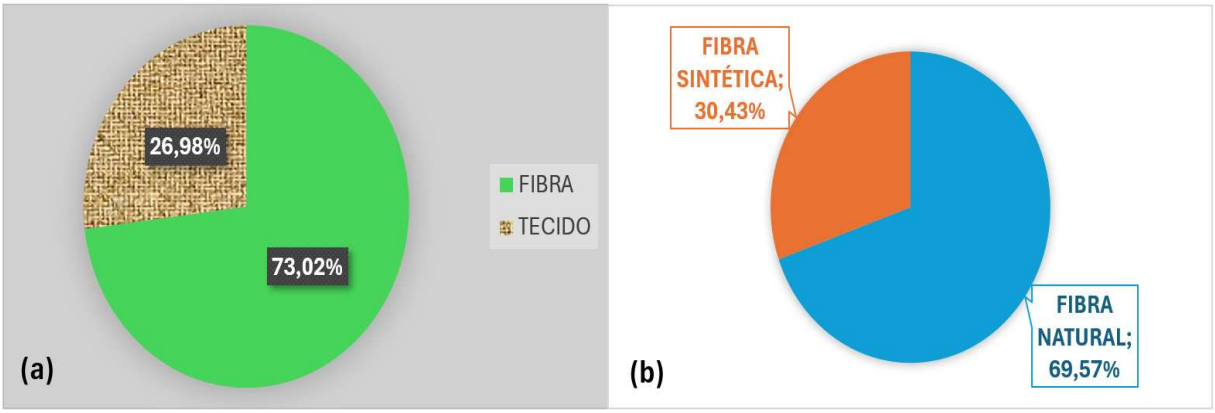
Fonte: Autoria própria (2025).

A análise da composição, mostrada na Figura 3.4, revela que o concreto representa a maior parcela do total, correspondendo a 46,15% dos materiais utilizados. Este dado evidencia a predominância do concreto como elemento estrutural fundamental, o que é coerente com sua ampla aplicação em obras civis devido às suas propriedades mecânicas, durabilidade e versatilidade. Em segundo lugar, observa-se a presença da argamassa, responsável por 30,77% da composição total. A argamassa desempenha papel essencial na ligação de elementos construtivos, como tijolos e blocos, além de ser utilizada em revestimentos, contribuindo tanto para a resistência quanto para o acabamento das superfícies.

Por fim, a placa cimentícia representa 23,08% da distribuição. Embora sua participação seja a menor entre os três materiais analisados, a placa cimentícia vem ganhando destaque em soluções construtivas modernas, principalmente pela sua leveza, resistência à umidade e facilidade de aplicação em sistemas de construção a seco.

A Figura 3.5 apresenta a distribuição percentual do uso de reforços em materiais cimentícios, destacando-se, na parte (a), a comparação entre a utilização de fibras e tecidos, e na parte (b), a distinção entre fibras naturais e fibras sintéticas.

Figura 3.5. (a) Materiais cimentícios com inserção de reforços; (b) Tipos de fibras inseridas como reforço



Fonte: Autoria própria (2025).

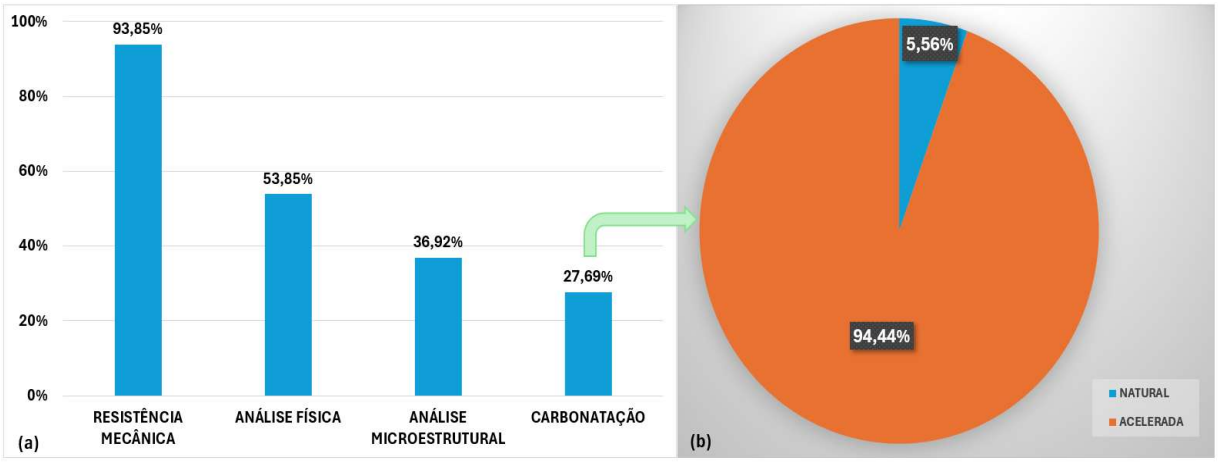
Na Figura 3.5a, observa-se que o uso de fibras como reforço corresponde a 73,02% dos casos analisados, enquanto os tecidos representam 26,98%. A ampla predominância das fibras pode ser atribuída à sua praticidade de incorporação à matriz cimentícia, além de sua eficácia na mitigação de fissuras, no aumento da tenacidade e na melhoria do desempenho mecânico. Embora em menor proporção, os tecidos constituem uma estratégia relevante de reforço, sobretudo em contextos que exigem maior controle direcional da resistência ou a construção de

sistemas multicamadas. Sua aplicação, porém, tende a ser mais restrita, exigindo técnicas específicas de moldagem e maior controle sobre a interface entre matriz e reforço.

A Figura 3.5b detalha a tipologia das fibras utilizadas. Entre os estudos que empregaram fibras, nota-se a predominância das fibras naturais (69,57%) em comparação com as fibras sintéticas (30,43%). Essa tendência evidencia o avanço da pesquisa em direção a soluções sustentáveis e de menor impacto ambiental. Fibras naturais, provenientes de recursos renováveis como sisal, coco, juta e linho, destacam-se não apenas pela disponibilidade e baixo custo, mas também pelo apelo ambiental, uma vez que são biodegradáveis e geram menor pegada de carbono em sua produção. Por outro lado, fibras sintéticas como polipropileno, polietileno, nylon e fibras de vidro, embora menos utilizadas no conjunto analisado, oferecem vantagens como maior uniformidade, resistência à alcalinidade da matriz cimentícia e desempenho previsível.

A Figura 3.6 apresenta dois gráficos que sintetizam o panorama metodológico de estudos envolvendo materiais cimentícios, com ênfase na avaliação de desempenho mecânico, físico, microestrutural e de carbonatação.

Figura 3.6. (a) Panorama metodológico dos ensaios; (b) Métodos de carbonatação



Fonte: Autoria própria (2025).

Na Figura 3.6a observa-se que a análise de resistência mecânica é amplamente dominante, estando presente em 93,85% dos estudos analisados. Essa ênfase se justifica pelo papel essencial da resistência mecânica na garantia da segurança estrutural e na aceitação normativa de concretos e argamassas.

No entanto, a análise física aparece com 53,85% dos estudos, indicando que características como porosidade, absorção de água e densidade também recebem atenção

significativa, embora de forma secundária. Essa predominância pode refletir uma abordagem ainda limitada no que diz respeito à avaliação da durabilidade e dos aspectos físico-químicos mais complexos desses materiais. Por sua vez, a análise microestrutural foi realizada em apenas 36,92% dos casos. Apesar de sua relevância para a compreensão dos mecanismos reacionais, da formação de produtos hidratados e da evolução da microestrutura, observa-se que esse tipo de investigação ainda é subutilizado, possivelmente devido ao custo e à infraestrutura de equipamentos técnicos envolvidos.

A análise de carbonatação é a menos frequente entre as categorias listadas, ocorrendo em apenas 27,69% das pesquisas. Este dado é particularmente relevante no contexto contemporâneo, em que os impactos ambientais dos materiais de construção vêm sendo cada vez mais debatidos. A baixa incidência de estudos sobre esse fenômeno sugere a necessidade de maior atenção da comunidade científica, especialmente em iniciativas voltadas à sustentabilidade e à mitigação de emissões.

A Figura 3.6b complementa essa análise ao ilustrar a distribuição entre os tipos de ensaio de carbonatação utilizados, o qual constatou-se que 94,44% dos estudos optam pelo ensaio de carbonatação acelerada, enquanto apenas 5,56% empregam ensaios em condições naturais. Essa discrepância evidencia uma forte preferência por métodos acelerados, justificada pela praticidade, controle experimental e rapidez na obtenção dos resultados.

3.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS DA PESQUISA BIBLIOMÉTRICA

A análise bibliométrica evidencia a importância como direcionamento da identificação de lacunas científicas em diversas áreas de pesquisa. Nesse estudo, a metodologia estruturada com claros critérios de inclusão e exclusão permitiu mensurar o conhecimento produzido e publicado sobre os tipos de materiais analisados, as metodologias empregadas e as estratégias de reforços adotadas voltadas aos materiais cimentícios.

Quanto aos materiais cimentícios analisados (Figura 3.4), as placas cimentícias foram as menos prestigiadas em estudos laboratoriais com apenas 23,08%, devido a utilização de uma técnica mais elaborada para sua produção. Já com relação aos reforços utilizados (Figura 3.5), evidenciou a preferência por fibras (73,02%) em relação aos tecidos (26,98%), o que se deve à facilidade de incorporação e à eficácia das fibras na melhoria do desempenho mecânico dos compósitos. Além disso, a preferência por fibras naturais (69,57%) frente às sintéticas (30,43%) reflete uma tendência crescente de adoção de materiais sustentáveis e renováveis, alinhados aos princípios da construção verde e dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).

A avaliação das metodologias de ensaio (Figura 3.6) mostrou que a resistência mecânica

é o parâmetro mais recorrente nas pesquisas (93,85%), reforçando sua importância na caracterização técnica dos materiais cimentícios. Todavia, análises físicas (53,85%) e microestruturais (36,92%) ainda são subutilizadas, mesmo sendo essenciais para a compreensão do comportamento interno e da durabilidade dos compósitos.

A carbonatação, fenômeno relevante tanto sob a ótica da deterioração quanto da sustentabilidade (por seu potencial de sequestro de CO_2), foi abordada em apenas 27,69% dos estudos, indicando uma lacuna na literatura. Além disso, constatou-se uma forte preferência por ensaios de carbonatação acelerada (94,44%) em detrimento dos ensaios naturais (5,56%). Embora os métodos acelerados ofereçam maior controle e celeridade, sua validade em simular condições reais de exposição ainda é debatida, conforme apontado por Possan (2004), devido à multiplicidade de fatores envolvidos e à carência de normatização técnica.

Portanto, o estudo mostra a necessidade de ampliação das investigações sobre o potencial de captura de carbono em compósitos cimentícios têxteis, com enfoque em mecanismos de carbonatação e técnicas de mensuração. Este direcionamento pode não apenas contribuir para o avanço das ciências dos materiais, mas também fomentar práticas ecoeficientes no setor da construção civil, respondendo às demandas crescentes por inovação sustentável.

4 REVISÃO DE LITERATURA

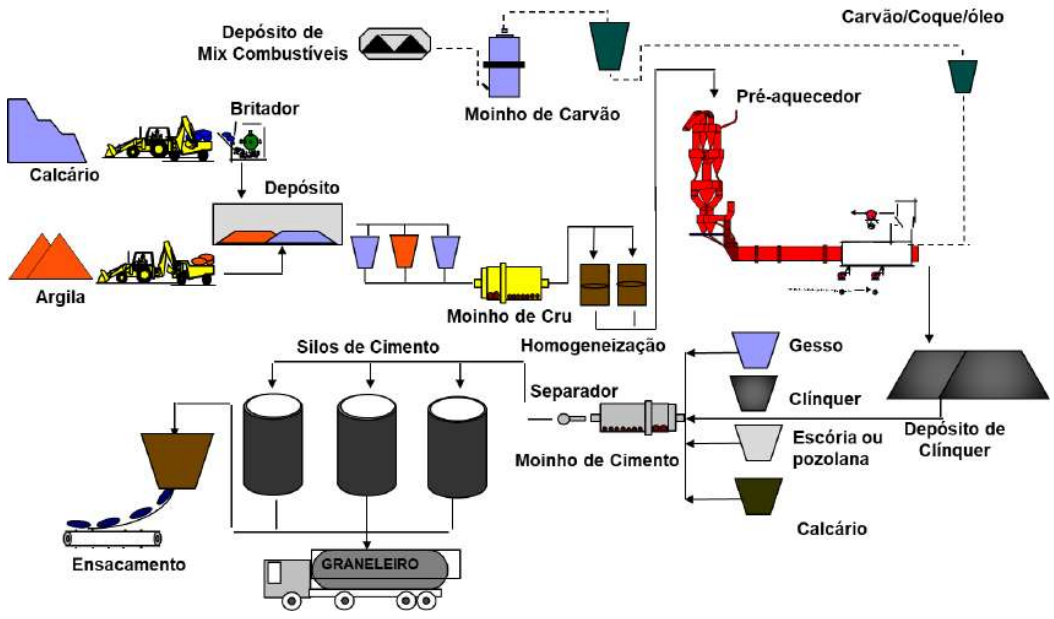
4.1 CIMENTO PORTLAND: PRODUÇÃO, HIDRATAÇÃO E CARBONATAÇÃO

4.1.1 Produção do cimento Portland

Conforme pesquisa de Lago (2022), a produção de cimento tem início com a extração da matéria-prima, onde esse material é coletado e britado para gerar partículas menores. Em seguida, o calcário é misturado com argila e corretivos, sendo moído até formar a farinha crua, que é homogeneizada em silos. Após passar pela torre de ciclones no pré-aquecimento, essa farinha segue para o calcinador, onde ocorre a decomposição parcial dos carbonatos. No forno rotativo, a mistura é submetida a temperaturas acima de 1.450 ºC, levando à decomposição do carbonato de cálcio ($CaCO_3$) e a formação de compostos como os silicatos de cálcio (C_3S e C_2S) e aluminatos de cálcio (C_3A e C_4AF), os quais são responsáveis pelas propriedades aglomerantes do cimento.

Este processo resulta na formação do clínquer, que, segundo Costa et al. (2013), é composto por C_3S (74,5%), C_2S (6,6%), C_3A (8,7%) e C_4AF (10,10%), entretanto esses teores são bastante variáveis. Em seguida, o clínquer é rapidamente resfriado para estabilização dos seus minerais. Após o resfriamento, o material é triturado com gesso e possíveis adições, como fillers e pozolanas, para então ser armazenado, ensacado ou enviado a granel para distribuição (Figura 4.1).

Figura 4.1. Etapas do processo produtivo do cimento Portland



Fonte: Rodrigues (2024).

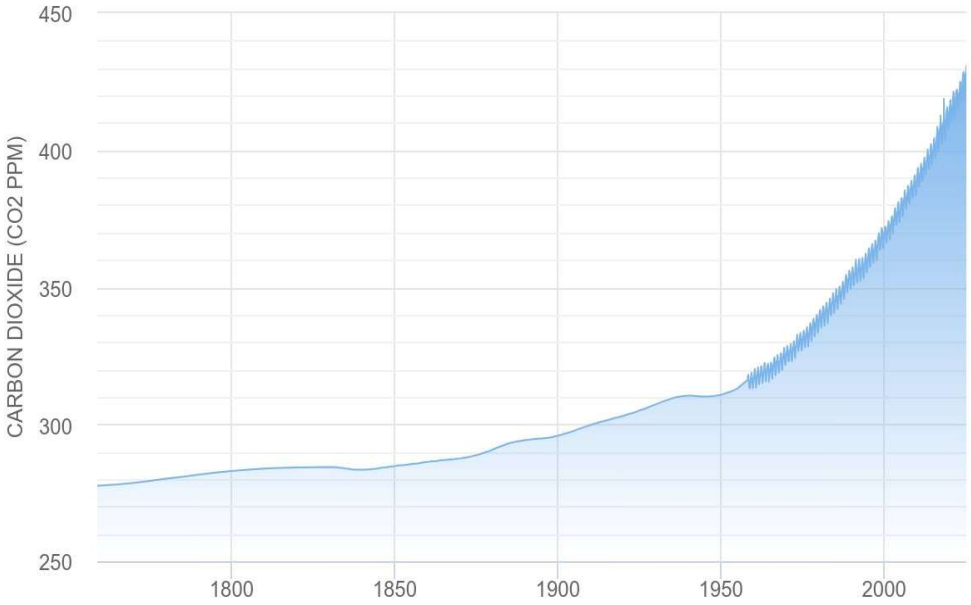
Neste processo de fabricação do cimento, as emissões de CO_2 são classificadas em duas categorias: direta e indireta. A primeira refere-se às decomposições dos carbonatos e da combustão de combustíveis durante a calcinação do clínquer, a qual representa a maior parcela das emissões. Já a segunda resulta do consumo de energia elétrica no processo de fabricação e do diesel usado no transporte das matérias-primas (Gao et al., 2025).

A produção de cimento é uma atividade intensiva na emissão de gases de efeito estufa (GEE), sendo responsável por aproximadamente 7% das emissões globais de CO_2. No entanto, o Brasil adotou diversas práticas sustentáveis ao longo dos anos, que diminuiu a participação nas emissões, correspondendo a cerca de 2,6% (SNIC, 2019). Do total de emissões de GEE da indústria cimenteira, aproximadamente 50% provêm do processo produtivo, 40% da etapa de clinquerização e 10% divididos para o transporte e o consumo de eletricidade nas fábricas (WBCSD, 2002).

Entre 1990 e 2022, o setor brasileiro reduziu suas emissões de CO_2 em 17%, passando de 700 kg CO_2/t para 580 kg CO_2/t, um valor inferior à média global de 608 kg CO_2/t (SNIC, 2023). Para mitigar essas emissões, as fábricas de cimento adotam estratégias como o coprocessamento de resíduos sólidos e a substituição de combustíveis fósseis por biomassa e outras fontes alternativas.

Segundo a plataforma CO_2 Earth, que usa dados de autoria do Instituto de Ciências Atmosféricas e Climáticas (IAC, 2025), a taxa de CO_2 presente na atmosfera aumentou de 280 partes por milhão (ppm) em volume, desde o período que antecede a Primeira Revolução Industrial (1760), para cerca de 429 ppm em março de 2025. Esse crescimento foi ainda mais acentuado com a Terceira Revolução Industrial (1950 – atual) resultando em um percentual de 38,6% neste período (Figura 4.2).

Figura 4.2. Histórico dos níveis de dióxido de carbono global.



Fonte: IAC (2025).

4.1.2 Hidratação do Cimento Portland

Conforme Manual de Tecnologia do Concreto (Alves, 2002), a hidratação do cimento decorre de reações químicas entre compostos de clínquer e água. O silicato tricálcico (C_3S) é o principal composto para o endurecimento inicial do cimento, o qual reage com a água (H) formando um gel de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e hidróxido de cálcio (CH), conforme equação 4.1. As equações apresentadas ao longo deste trabalho seguem a notação convencional da química do cimento, em que: C = CaO, A = Al_2O_3, $\hat{S}$ = SO_3, H = H_2O e F = Fe_2O_3, conforme também adotado por Brahim et al. (2023).

$$C_3S + 2H \rightarrow C\text{-}S\text{-}H + 2CH \quad (4.1)$$

Com relação ao silicato dicálcico (C_2S), a reação ocorre de forma mais lenta e de maneira similar ao silicato tricálcico, o que contribui para o ganho de resistência a longo prazo. Essa reação é evidenciada na equação 4.2:

$$C_2S + H \rightarrow C\text{-}S\text{-}H + CH \quad (4.2)$$

Além dos silicatos, os aluminatos constituintes no cimento também fazem parte desse

processo de hidratação. O aluminato tricálcico (C_3A) reage rapidamente com o sulfato de cálcio hidratado ($C\hat{S}H_2$) dissolvido em água, resultando na formação de etringita ($C_6A\hat{S}_3H_{32}$), conforme exposto na equação 4.3:

$$C_3A + 3C\hat{S}H_2 + 26H \rightarrow C_6A\hat{S}_3H_{32} \quad (4.3)$$

De forma gradual, parte da etringita pode se decompor, resultando em outros compostos remanescentes como o monossulfoaluminato hidratado ($C_4A\hat{S}H_{12}$). Além disso, o ferroaluminato tetracálcico (C_4AF) também sofre hidratação semelhante ao C_3A, mas sua reatividade e os impactos nas propriedades cimentantes são considerados baixos. O processo de hidratação do C_4AF pode formar compostos como o $C_6AF\hat{S}_3H_{32}$ ou o $C_4AF\hat{S}H_{18}$, dependendo da concentração de sulfato na mistura.

4.1.3 Carbonatação das Fases Hidratadas

Apesar da documentação dos mecanismos físicos e químicos da carbonatação em materiais cimentícios serem amplamente difundidos, a compreensão desse processo ainda é limitada devido à complexidade de fatores interconectados (Qiu, 2020). Entre estes fatores que influenciam a carbonatação estão as propriedades e composição dos materiais, o tipo de aglomerante utilizado, a estrutura porosa, as condições de cura e aspectos ambientais, incluindo a umidade relativa, temperatura e concentração de CO_2 (Drouet et al., 2019; Qiu, 2020; Yu et al., 2023).

A carbonatação das fases hidratadas em materiais cimentícios é um processo físico-químico que ocorre principalmente pela reação do dióxido de carbono com os produtos da hidratação do cimento Portland, especialmente o hidróxido de cálcio (portlandita) e os silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), promovendo a redução do pH dos materiais cimentícios (Pauletti, 2007). Baseado no princípio de Fick, esse processo inicia-se na superfície externa e avança para o interior de forma não linear, devido ao equilíbrio entre as concentrações (Silva et al., 2019). Seu avanço é controlado pela difusão do CO_2, que depende diretamente da umidade interna, do tamanho dos poros e da composição química dos materiais (Possan et al., 2017).

A carbonatação possui atuação no mecanismo de captura de CO_2 da atmosfera, compensando parcialmente as emissões geradas pela produção do cimento durante a calcinação (Felix; Possan, 2018). Em uma representação simplificada das reações envolvidas, o carbonato de cálcio sofre decomposição térmica em uma reação endotérmica, formando óxido de cálcio e

liberando dióxido de carbono, conforme ilustrado na equação 4.4, que representa a reação principal da produção de cimento (Felix e Possan, 2018).

$$CaCO_3 + calor \rightarrow CaO + CO_2 \quad (4.4)$$

De forma inversa, durante o processo de carbonatação, o CO_2 presente no ambiente difunde-se pelos poros da matriz cimentícia, dissolve-se na água presente nesses poros, formando ácido carbônico (H_2CO_3), que reage com o $Ca(OH)_2$ e com os produtos de hidratação formando carbonato de cálcio e água, conforme equações 4.5 a 4.7 (Johannesson e Utgenannt, 2001).

$$CO_2 + H_2O \rightarrow H_2CO_3 \quad (4.5)$$

$$2H_2CO_3 + Ca(OH)_2 \rightarrow Ca(HCO_3)_2 + 2H_2O \quad (4.6)$$

$$Ca(HCO_3)_2 + Ca(OH)_2 \rightarrow 2CaCO_3 + 2H_2O \quad (4.7)$$

Embora o hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$) seja tradicionalmente reconhecido como o principal composto afetado, outras fases hidratadas, como o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), o monossulfoaluminato e a etringita, também estão sujeitas à carbonatação, influenciando a microestrutura e as propriedades mecânicas do concreto.

As fases C-S-H, apesar de apresentarem menor grau de reatividade frente ao CO_2 que a portlandita, também sofrem carbonatação ao longo do tempo, especialmente em concretos com menor relação Ca/Si, como os que contêm adições pozolânicas (Buth et al., 2024; Zajac et al., 2023). Estudos indicam que a carbonatação do C-S-H leva à despolimerização da estrutura, à perda de integridade da matriz, além de promover a formação de gel de sílica amorfa e carbonato de cálcio (An et al., 2025; Zajac et al., 2023; Possan et al., 2017). A equação 4.8 descreve a formulação dessa reação, com valores de t, x, y e z, que indicam proporções variáveis dos componentes químicos (Chen et al., 2020).

$$(CaO)x \cdot (SiO_2)y \cdot (H_2O)z + xCO_2 \rightarrow xCaCO_3 + ySiO_2 \cdot tH_2O + (z - t)\,H_2O \quad (4.8)$$

A carbonatação da etringita (equação 4.9), assim como do monossulfoaluminato hidratado (equação 4.10), são reações relevantes no estudo da durabilidade dos compósitos cimentícios. Brahim et al. (2023) demonstram por meio de espectroscopia Raman *in situ*, a ocorrência de carbonatação dessas fases, com formação de carbonato de cálcio e sulfato de

cálcio, além de fases como hidróxido de alumínio e água.

$$C_6A\hat{S}_3H_{32} + 3CO_2 \rightarrow 3CaCO_3 + 3C\hat{S}H_2 + AH_x + (26–x)H \quad (4.9)$$

$$C_4A\hat{S}H_{12} + 3CO_2 \rightarrow 3CaCO_3 + C\hat{S}H_2 + AH_x + (10 – x)H \quad (4.10)$$

O entendimento das reações de carbonatação nas fases hidratadas é essencial para o desenvolvimento de materiais cimentícios mais duráveis e sustentáveis. Além de ser um fator crítico para a proteção de armaduras, a carbonatação pode ser explorada como um mecanismo de captura de CO_2 atmosférico, contribuindo para a redução da pegada de carbono dos compósitos cimentícios (Possan et al., 2017).

4.2 CHAPAS CIMENTÍCIAS PLANAS

Conforme Crasto (2005), as placas cimentícias são sistemas de vedação utilizados como divisórias, forros, além de fechamento de áreas molháveis. A elevada precisão dimensional e a possibilidade criar juntas imperceptíveis levaram as placas cimentícias a serem utilizadas em fachadas. Esse uso é relevante em sistemas construtivos modernos, como o *light steel framing* (estrutura com perfis de aço) e *wood framing* (estrutura com perfis de madeira).

No Brasil, as placas planas cimentícias (Figura 4.3) são normatizadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), conforme a quarta edição da NBR 15498:2021 – Chapas cimentícias reforçadas com fios, fibras, filamentos ou telas, que estabelece requisitos para materiais, composição, dimensões, tolerâncias, métodos de ensaio, aplicações, durabilidade e condições ambientais (ABNT, 2021).

Figura 4.3. Placa cimentícia comercial



Fonte: Brasilit (2025).

Os principais métodos utilizados na produção de fibrocimento incluem os processos *hatschek, flow-on* e extrusão. O processo *hatschek* baseia-se na filtração de uma suspensão diluída composta por cimento, agregados e fibras em uma peneira cilíndrica rotativa. O material floculado na peneira rotativa é transferido para uma prensa cilíndrica até alcançar a espessura desejada das placas de fibrocimento (Ikai et al., 2010).

Já os processos *flow-on* e extrusão são empregados na produção de placas planas. O processo de extrusão é a segunda tecnologia utilizada como alternativa, a qual usa extrusoras, comumente adaptadas da indústria cerâmica, para fabricar placas de fibrocimento com aplicações em revestimentos internos e externos, além de tubos (Correia; Santos; Savastano Junior, 2018).

A placa cimentícia é definida como uma lâmina com espessura determinada composta por uma pasta cimentícia misturada a fibras (vegetais ou sintéticas) e agregados, sendo utilizada como pisos e materiais para sistemas de fechamento internos e externos (Crasto, 2005; Oliveira, 2009). Estas placas destacam-se por sua versatilidade na produção, aplicação e coloração, demandando funcionalidade e estética.

Costa (2021) destaca que a rigidez do reforço influencia diretamente a capacidade de carga antes da fissuração, enquanto a tenacidade é fortemente impactada pela adesão entre o reforço e a matriz, além da deformabilidade do tecido. A autora ainda observou, após ensaios de flexão, que os tecidos atuam como ponte de transferências sobre as fissuras, retardando a propagação de trincas e aumentando a ductilidade da placa cimentícia.

A carbonatação é intensificada em materiais cimentícios com alto teor de cimento e com grau de porosidade considerável, facilitando a velocidade de carbonatação do material (Andrade e Sanjuán, 2018; Barbosa, 2021). A carbonatação e a consequente captura de CO_2, estão diretamente relacionadas à área superficial do material que fica exposta à ação desse gás (Possan et al., 2017). No caso das placas cimentícias, esse potencial é elevado, pois elas possuem grande área superficial em relação ao seu volume, além de serem ricas em produtos carbonatáveis na sua composição. Nesse sentido, Andrade e Sanjuán (2018) ressaltam a importância de considerar a relação entre a área exposta (m^2) e o volume total (m^3) do material (ou seja, a razão m^2/m^3) ao se avaliar o balanço de emissões de CO_2. Essa proporção é fundamental para entender o quanto de CO_2 pode ser capturado durante o ciclo de vida de elementos cimentícios expostos à carbonatação.

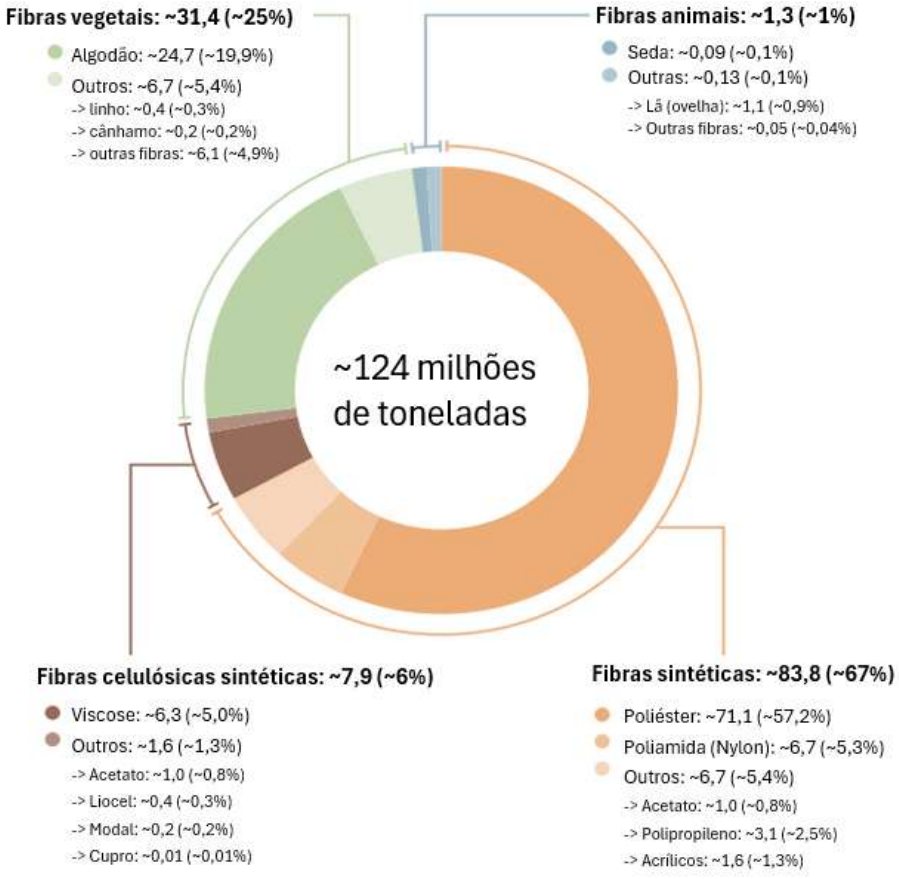
4.3 COMPÓSITO CIMENTÍCIO TÊXTIL

O compósito cimentício têxtil é obtido através da inserção de fios organizados em forma de malha no interior da matriz cimentícia (Brameshuber, 2003; Peled e Bentur, 2000). Diferentemente das fibras curtas, a utilização de tecidos como reforço possibilita a criação de estruturas reforçadas em múltiplas direções, abrangendo tanto a trama quanto o urdume (Claramunt et al., 2017; Hakamy; Shaikh; Low, 2014; Yan; Chouw; Yuan, 2012).

A literatura apresenta diversos tipos de reforços têxteis, geralmente classificados em quatro grupos: vegetais, animais, celulósicos e sintéticos. Conforme relatório de mercado de fibra (Textile Exchange, 2024), a produção de fibras sintéticas em 2023 alcançou um percentual de 67% da produção global, enquanto as fibras vegetais chegaram a 25% dessa produção (Figura 4.4).

Ainda segundo o relatório produzido pela *Textile Exchange (2024)*, as fibras mais produzidas em 2023 foram algodão (19,9%), poliéster (57,2%) e nylon (5,3%). Outra fibra com boa representatividade é o polipropileno (2,5%), uma das matérias-primas na indústria têxtil para produção de tecidos não tecidos (Hutten, 2007).

Figura 4.4. Produção mundial de fibras em 2023.



Fonte: Textile Exchange (2024, p. 9).

Segundo Amaral et al. (2018), o algodão é a fibra vegetal mais consumida no Brasil, representando aproximadamente 84% do total, seguido pelas fibras sintéticas (13%) e outras fibras (3%). O país se destaca mundialmente como o terceiro maior exportador, o quinto maior consumidor e produtor de algodão, com uma produção média de 1,7 milhão de toneladas por safra.

As fibras vegetais, por sua vez, exigem um tratamento prévio para garantir compatibilidade com matrizes cimentícias, enquanto as fibras sintéticas não reagem em meio alcalino, dispensando esse tipo de preparação (Laverde et al., 2022). Além disso, as fibras sintéticas são amplamente utilizadas no reforço de materiais cimentícios devido às suas características de alta resistência e durabilidade em ambientes agressivos, que também contribuem para a redução do peso estrutural e dos custos de construção (Bolat et al., 2014).

Dependendo do módulo de elasticidade em relação ao concreto, essas fibras são classificadas como de baixo módulo ou alto módulo. Naaman (2010) descreve que as fibras de polipropileno, polietileno e nylon são de baixo módulo, enquanto as fibras de vidro álcali-resistente, polietileno de alta densidade e carbono são de alto módulo. Essas fibras apresentam estabilidade em ambientes carbonatados e com cloretos, o que as torna adequadas para aplicações em compósitos cimentícios (Reinhardt; Kruger; Grobe, 2003).

Por outro lado, as fibras naturais são empregadas no reforço de tecidos, geralmente para agregar características estéticas ou ambientais aos materiais. Essas fibras representam uma alternativa renovável e econômica para matrizes cimentícias, resultando em compósitos de baixa densidade e alta tenacidade (Costa, 2021).

Estudos indicam que fibras como juta, malva e sisal, quando reforçadas em placas cimentícias e combinadas com tratamento de resina acrílica, podem proporcionar tenacidade superior. Costa (2021) observou que as placas reforçadas com quatro camadas de tecidos formados dessas fibras exibiram alto desempenho, enquanto aquelas com cinco camadas apresentaram maior deflexão, evidenciando o impacto da quantidade de camadas no comportamento estrutural.

De acordo com Leite e de Castro (2020), as propriedades, a quantidade e a organização dos materiais fibrosos exercem uma influência significativa na composição do material cimentício reforçado com têxtil. Esses fatores são cruciais para garantir a eficiência do sistema e prevenir patologias durante a vida útil da edificação. Segundo Marotta et al. (2023), entre as principais causas das patologias na construção civil estão erros de projeto, falhas na execução, deterioração dos materiais de construção, ausência de manutenção e uso inadequado da

edificação. Além disso, estas causas contribuem significativamente para o surgimento de fissuras, trincas, infiltrações, manchas (eflorescência), carbonatação e corrosão na estrutura.

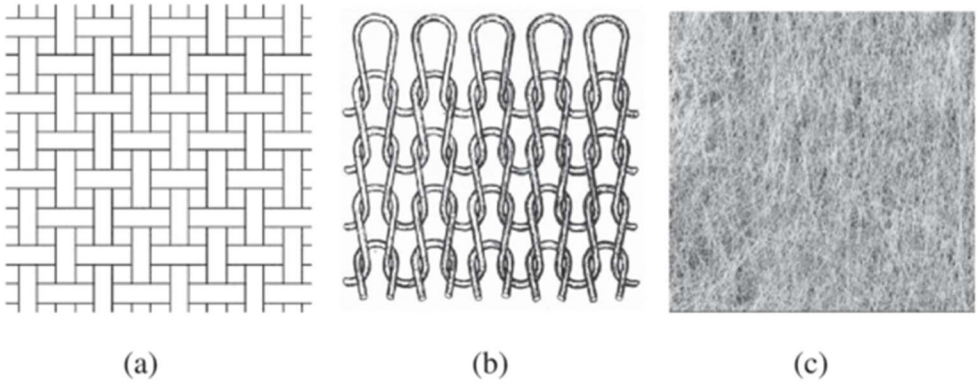
4.3.1 Tipos de estrutura têxtil

As fibras têxteis, quando alinhadas e unidas por torção, formam um material mais compacto conhecido como fio. Por sua vez, os tecidos são compostos por fios interligados por forças de contato e pelo intertravamento criado nos diferentes métodos de fabricação. Tecidos urdidos e tramados são confeccionados pela interseção de fios em duas direções: o urdume, que representa os fios longitudinais, e a trama, composta por fios transversais (Reinhardt; Kruger; Grobe, 2003).

Tradicionalmente, considera-se que o reforço estrutural é mais eficiente ao longo da direção longitudinal (carregamento), enquanto os fios transversais desempenham uma função secundária, de manutenção dos fios longitudinais no lugar durante a produção do compósito (Carvalho, 2005). Contudo, em compósitos cimentícios, essa abordagem pode ser inadequada, uma vez que os mecanismos de interação entre a matriz cimentícia e os fios individuais são mais complexos (Peled; Bentur, 2000).

Os tecidos utilizados nos compósitos cimentícios podem apresentar diferentes estruturas têxteis, que influenciam diretamente no comportamento mecânico e na interação com a matriz (Rodrigues, 2022). As principais estruturas incluem os tecidos planos (ou tecidos bidimensionais), as malhas e os não tecidos (Figura 4.5), além destes, existem ainda os tecidos tridimensionais (Yan; Kasal; Huang, 2016). Cada tipo possui características específicas que afetam o desempenho do compósito, como a capacidade de ancoragem na matriz, o modo de falha e a dissipação de energia (Ventura, 2009).

Figura 4.5. Tipos de tecido: (a) tecidos planos; (b) malhas; e (c) tecidos não tecidos.



Fonte: Yan; Kasal e Huang (2016, p. 96).

De acordo com Codispoti et al. (2015), tecidos bidimensionais são os mais comumente utilizados na fabricação de compósitos e incluem estruturas não tecidas, trançadas, não trançadas e de malha. O tipo de tecido e sua configuração são determinadas pela aplicação prevista e pelas condições às quais o compósito será submetido. Tecidos planos, sejam unidirecionais ou bidirecionais, são amplamente utilizados na produção de laminados finos ou como reforços em estruturas (Rambo et al., 2015).

O desempenho dos compósitos cimentícios é fortemente influenciado pelo arranjo das fibras em sua matriz. Quando as fibras são orientadas em uma única direção, o material apresenta comportamento anisotrópico, com propriedades mecânicas distintas, conforme a direção do esforço aplicado. Já a disposição em duas direções perpendiculares promove maior uniformidade em planos específicos. Há ainda o arranjo pseudo-isotrópico, no qual as fibras são distribuídas aleatoriamente em múltiplas direções, simulando um comportamento próximo ao isotrópico e proporcionando características mecânicas mais homogêneas. Essa classificação dos arranjos fibrosos é apresentada por Gallardo (2002).

O reforço têxtil aparece neste contexto como uma alternativa aos reforços convencionais já utilizados, visto que permite peças com seções reduzidas, diminuindo o desperdício de material e as deixando mais leves quando aplicado como reforço principal (Rambo et al., 2015). Além disso, pode gerar um ganho de tenacidade, de resistência à tração e de capacidade de deformação em relação ao reforço fibroso (Rambo et al., 2015), o que mostra seu grande potencial de inovação tecnológica no mercado atual.

4.4 MÉTODOS DE CAPTURA DE CO_2 VIA CARBONATAÇÃO

A redução da pegada de carbono das matrizes cimentícias tem se consolidado como uma estratégia essencial para mitigar os impactos ambientais da indústria da construção civil, uma das maiores emissoras de CO_2 no mundo (SNIC, 2023). Uma das estratégias mais exploradas para potencializar a captura de CO_2 é a intensificação da carbonatação em materiais cimentícios, a qual pode ser promovida por meio da incorporação de aditivos orgânicos, adições minerais ou materiais reciclados.

Estudos demonstraram que a porosidade dos resíduos de construção e demolição (RCDs) e a presença de fases reativas, como a portlandita, facilitam a reação de carbonatação em revestimentos, elevando o potencial de captura de CO_2 com percentuais variando entre 8% e 54% (Mazurana, 2019; Rigo, 2019). Fontolan, Gava e Possan (2022) também evidenciaram que cenários práticos com RCDs podem aumentar em até 50% a eficiência de sequestro de carbono em argamassas, dependendo da exposição superficial e das condições de aplicação.

Tais estudos demonstraram que a carbonatação de RCDs em argamassas apresentaram maior capacidade de incorporação quando comparados a compósitos convencionais.

Adem et al. (2025) exploraram o uso de cimentos com teor reduzido de cal para melhorar a hidratação e favorecer a carbonatação em pastas de cimento Portland comum. O uso de adições mineralógicas, como pozolanas e sílica ativada, modificou a microestrutura, acelerando a formação de $CaCO_3$ sem comprometer a resistência pós cura, especialmente em regimes de cura por carbonatação.

Zajac et al. (2023) revisaram o uso de tecnologias de carbonatação forçada que utilizam CO_2 em condições ambientes para mineralizar cálcio (Ca) e magnésio (Mg) em resíduos reciclados, escórias e poluentes da construção. Estas técnicas obtêm altas taxas de sequestro e geram materiais cimentícios suplementares com propriedades pozolânicas, fortalecendo a economia circular.

Wang et al. (2023) detalham mecanismos internos de reforço por carbonatação, indicando que a introdução de materiais nucleadores, como nanopartículas e superfícies reativas, otimiza a precipitação de $CaCO_3$ dentro da matriz, onde a profundidade de carbonatação aumentou de 2 mm para 12 mm, melhorando a microestrutura e a durabilidade.

A carbonatação natural foi investigada por Yu et al. (2023), os quais avaliaram os efeitos da exposição ambiental ao longo de 8 anos em concretos com altos teores de sulfato. O estudo comprovou a formação de carbonato de cálcio na estrutura com taxa de carbonatação que chegou a 1,02 mm/ano, além de alterações positivas na estrutura do compósito, como a redução de porosidade na camada superficial, indicando refinamento de poros por preenchimento com carbonato de cálcio contribuindo para uma microestrutura mais densa. Outro fator relevante foi a diminuição do pH da estrutura, apontando o consumo das fases de hidratação sinalizando a eficiência da captura de CO_2 atmosférico.

4.5 PARÂMETROS DE AVALIAÇÃO DE ECOEFICIÊNCIA

A ecoeficiência em materiais cimentícios é definida pela relação entre desempenho técnico (como resistência mecânica) e impacto ambiental (consumo de cimento e emissão de CO_2). Para quantificar essa eficiência, Damineli et al. (2010) propuseram dois parâmetros: intensidade ligante (IL) e intensidade de CO_2 (IC). O primeiro mede a eficiência do consumo de cimento necessário para alcançar 1 MPa de resistência aos 28 dias (equação 4.11). Já o segundo, representa a quantidade de dióxido de carbono emitido para produzir e transportar o material em relação a um indicador de desempenho (resistência mecânica), calculado conforme equação 4.12.

$$IL = \frac{Consumo\ de\ cimento\ (kg/m^3)}{Resistência\ média\ aos\ 28\ dias\ (MPa)} \quad (4.11)$$

$$IC = \frac{CO\ \ emitido\ (kg/m^3)}{Resistência\ média\ aos\ 28\ dias\ (MPa)} \quad (4.12)$$

Damineli et al. (2012) definiram que os indicadores IL e IC devem ser utilizados de forma conjunta na avaliação de ecoeficiência dos concretos. Enquanto um baixo IC assegura menor impacto ambiental relacionado ao aquecimento global, um baixo IL indica maior eficiência na dosagem dos materiais, favorecendo a ampla adoção de concretos com reduzido impacto ambiental. Para alcançar essa combinação ideal, é essencial um controle rigoroso no projeto de formulação do concreto.

Segundo Damineli et al. (2012), o IC depende da existência de dados confiáveis sobre o inventário do ciclo de vida dos materiais constituintes do concreto, com destaque para os ligantes, que mais contribuem para as emissões. Nesse contexto, as emissões relacionadas à extração, processamento e transporte dos agregados foram desconsideradas, pois a maior parte do dióxido de carbono gerado na produção do concreto provém da fabricação do cimento (Flower; Sanjayan, 2007).

As pesquisas apresentadas por Damineli et al. (2010) e (Medeiros et al., 2019) evidenciam uma relação inversa entre a resistência mecânica e os indicadores de ecoeficiência (IL e IC), conforme Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Relação dos indicadores de ecoeficiência com a resistência mecânica.

Resistência Mecânica (MPa)	Intensidade Ligante (kg/m³·MPa)	Intensidade de CO_2 (kg/m³·MPa)	Referência
20 a 30	9 – 18	4 – 16,5	(Damineli et al., 2010)
	13 – 17	7,9 – 10,3	(Medeiros et al., 2019)
30 a 60	6 – 22	2 – 16,5	(Damineli et al., 2010)
	6 – 10	< 8	(Medeiros et al., 2019)
> 60	4,5 – 14	1,5 – 11,3	(Damineli et al., 2010)
	6 – 8	< 6	(Medeiros et al., 2019)

Fonte: Autoria própria (2026).

De forma geral, concretos com maior resistência (acima de 60 MPa) tendem a apresentar menores valores de IL e IC, indicando um uso mais eficiente de materiais e menor emissão de CO_2 por unidade de resistência. Por outro lado, concretos de baixa resistência (20 a 30 MPa) demonstram maior consumo de ligante e maior emissão de CO_2, refletindo menor ecoeficiência (Damineli et al., 2010; Damineli; Pileggi; John, 2012; Medeiros et al., 2019).

No caso de placas cimentícias reforçadas, entretanto, a aplicação direta dos indicadores IL e IC apresenta limitações, uma vez que esses parâmetros foram desenvolvidos e amplamente empregados para relacionar o consumo de ligante e as emissões de CO2 ao desempenho mecânico de concretos, tendo a resistência à compressão como principal indicador. Para placas, não há, na literatura, um parâmetro único e amplamente consolidado equivalente à IL e IC especificamente destinado à avaliação da ecoeficiência de placas cimentícias reforçadas. Nesse contexto, a avaliação dessas placas requer a adaptação dos indicadores existentes, permitindo uma comparação mais adequada entre diferentes sistemas de reforço e formulações.

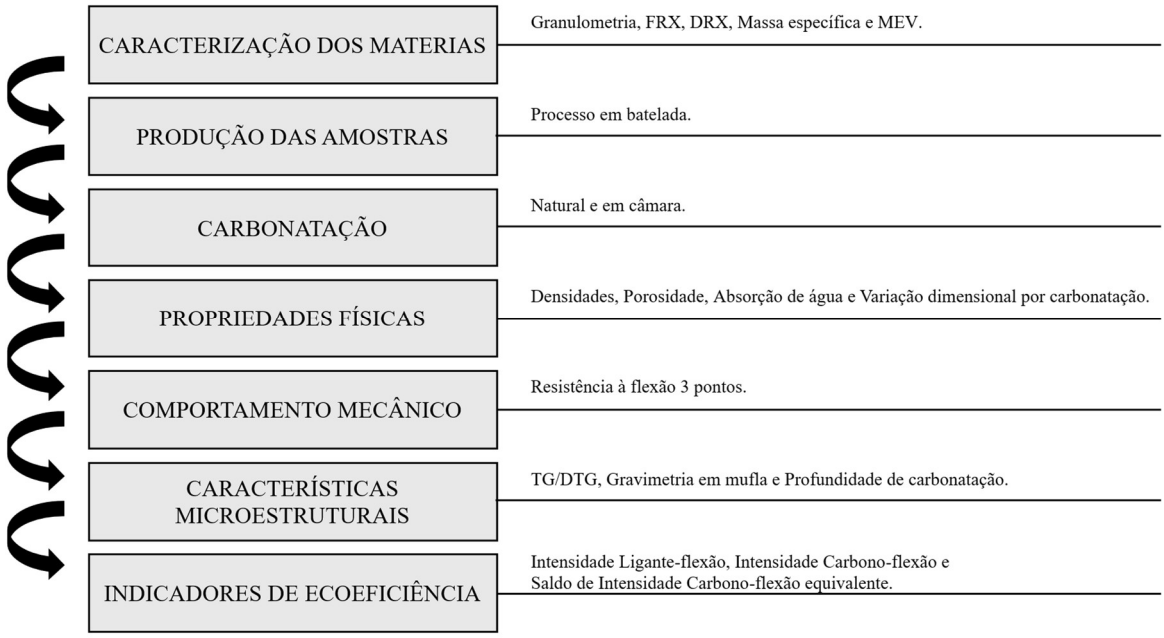
5 METODOLOGIA

O presente trabalho foi realizado no Laboratório de Materiais de Construção e Estruturas (LAMCE) do Departamento de Engenharia Civil (DEC) em parceria com o Laboratório Multiusuário do Departamento de Ciência e Engenharia de Materiais (CLMDCEM) e com o Laboratório de Geociências (CLGEO) da Universidade Federal de Sergipe (UFS).

5.1 FLUXOGRAMA DE ATIVIDADES

A metodologia do presente trabalho tem caráter experimental, pois define a forma de controle e observação dos efeitos da variável no objeto de estudo. Além disso, a pesquisa está dividida em 7 etapas: caracterização dos materiais, produção de amostras, carbonatação acelerada, indicadores de comportamento físico, mecânico, microestrutural e indicadores de ecoeficiência. Na Figura 5.1, é mostrado o esquema metodológico das etapas que foram executadas tanto no LAMCE quanto nos laboratórios parceiros.

Figura 5.1 - Fluxograma de procedimento experimental.



Fonte: Autoria própria (2026).

5.2 MATERIAIS

Para a preparação da pasta cimentícia foram utilizados o cimento Portland do tipo CPV-ARI do fabricante Mizu, calcário moído da marca Renova Terra e água potável. Como reforços fibrosos, foram utilizadas fibras de celulose branqueada curta nas placas têxteis e fibra de

poliacetato de vinila (PVA) apenas na amostra de referência sem tecidos. Já como reforço têxtil, foram utilizados tecido não tecido (TNT) e tecido de vidro álcali resistente (TVAR) com a finalidade de serem materiais facilitadores da difusão de CO_2 no interior da matriz cimentícia, além do reforço mecânico. O quadro 5.1 mostra as especificações dos materiais utilizados no projeto.

Quadro 5.1 – Especificações dos materiais utilizados.

Materiais	Especificações
Tecido de fibra de vidro álcali resistente (TVAR)	Composto por fibra de vidro, do fabricante Telas MM, tendo malhas de 5x5 mm e gramatura de 145 g/m².
Tecido não tecido (TNT)	Composto por polipropileno, tendo uma estrutura não tecida de gramatura de 25 g/m².
Fibras de Poliacetato de vinila (PVA)	Composto por poliacetato de vinila, tendo geometria monofilamentar, com densidade de 1300 kg/m³*.
Fibra de celulose curta	Composta de celulose, com geometria da fibra considerada curta e fina, tendo propriedades morfológicas de alta fibrilação e alta crimpagem.
Cimento Portland	O tipo do cimento foi o CPV-ARI, do fabricante Mizu, o qual possui alta resistência inicial, com 90% a 100% de clínquer e de 0% a 10% de material carbonático (calcário), sem pozolanas e sem escórias, com propriedades de resistência a sulfatos.
Calcário	Calcário calcítico do fabricante Calcário Renova Terra Ltda.

Nota: *Valor retirado da literatura, conforme (Cai et al., 2025). Fonte: Autoria própria (2026).

5.3 TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO

5.3.1 Granulometria por Difração a Laser (GDL)

A análise granulométrica dos materiais foi conduzida por meio da técnica de difração a laser por via úmida (em meio aquoso), empregando-se o analisador de partículas da marca Malvern, modelo Mastersizer MS2000E com faixa de leitura entre 0,1 e 1000 micrômetros, disponível no CLMDCEM. As amostras foram colocadas no equipamento em pó, conforme produzidas pelos fabricantes, sem a necessidade de peneiramento prévio. Para garantir a desaglomeração e a correta dispersão das partículas na suspensão, aplicou-se ultrassom por 5 minutos antes da leitura inicial.

O equipamento opera com um sistema de detectores que utiliza luz vermelha, permitindo a detecção do espalhamento em diferentes ângulos (frontal, lateral e posterior),

conforme o tamanho das partículas. A luz vermelha utilizada no equipamento é proveniente de um laser de hélio-néon, sendo o comprimento de onda dessa fonte o parâmetro que define a faixa de tamanhos de partículas que o aparelho é capaz de analisar (Wagner e Aranha, 2007).

5.3.2 Fluorescência de Raios X (FRX)

A caracterização química das matérias primas foi realizada por meio da técnica de Fluorescência de Raios X (FRX) por dispersão de comprimento de onda, empregando o espectrômetro Shimadzu - XRF-1800, operando com o *software* LAB CENTER, disponível no Condomínio de Laboratórios Multiusuários das Geociências (CLGEO). As análises foram conduzidas utilizando amostras em pó do cimento e calcário, com massa aproximada de 10g.

5.3.3 Difração de Raios X (DRX)

Para a análise de difração de raios X (DRX), utilizou-se aproximadamente 1 g de pó por amostra. As medidas foram realizadas em um difratômetro Shimadzu LabX XRD-6000, operando por reflexão e equipado com fonte de radiação CuKα (λ = 1,54 Å), sob tensão de 30 kV e corrente de 40 mA. As aquisições foram realizadas na faixa de 2θ entre 5º e 60º, em modo contínuo, com passo de 0,02º e velocidade de 1°/min.

5.3.4 Massa específica

A determinação da massa específica dos materiais em pó (cimento e calcário) foi realizada conforme NBR 16605 (ABNT, 2017). No ensaio utilizou-se o frasco de Le Chatelier preenchido com querosene, por ser um líquido de baixa tensão superficial e que não reage com os materiais testados. O procedimento envolveu a pesagem inicial do frasco em balança de precisão (0,01 g), o preenchimento com querosene até um nível de referência e a adição de uma massa conhecida de pó seco, colocado cuidadosamente com uma espátula através de funil seco. Por fim, foram observados os volumes deslocados no frasco e anotado seus respectivos valores. Este ensaio se repetiu três vezes para garantir a reprodutibilidade dos resultados. As densidades foram calculadas conforme a equação 5.1, a seguir:

$$\rho = \frac{m}{V} \tag{5.1}$$

Onde:

- ρ é a massa específica (g/cm³);
- m é a massa dos materiais (g);
- V é o volume de querosene deslocado (cm³).

5.3.5 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A fibra curta de celulose branqueada, assim como os tecidos, teve seus comprimentos e diâmetros determinados através do microscópio eletrônico de varredura (MEV) da marca JEOL, modelo JSM-5700. As amostras analisadas foram previamente metalizadas com prata por 100 segundos. A caracterização por MEV foi realizada utilizando-se uma tensão de 5 a 15 kV e distância de trabalho ajustada em 10 mm (Santos, 2020; Savastano Junior, 2007).

5.3.6 Porosidade total e densidade das amostras

A determinação do índice de absorção de água foi realizada com base nos princípios de Arquimedes, conforme a norma NBR 9778 (ABNT, 2009). O método consistiu na imersão dos compósitos em amostras de 6 corpos de prova, em água até a completa saturação durante 7 dias de cura úmida. Na sequência, um grupo de amostras foram expostas à carbonatação natural e outro grupo à carbonatação acelerada, ambos durante 14 dias.

Após a exposição, esses grupos foram levados para a estufa, onde passaram por 24 horas de secagem condicionados a uma temperatura de 60ºC, onde foi medida a massa seca (m_{seca}) após o período. Já para a mensuração das massas saturadas (m_{sat}) e imersas (m_{im}), as amostras foram levadas para cura úmida por 24 horas para saturação dos poros. Em ambas as medidas, foi utilizada uma balança digital com precisão de 0,1 g.

As equações utilizadas para o cálculo da absorção de água (AA), porosidade (P), densidade aparente (D_{ap}) e densidade real (D_{real}) são apresentadas a seguir, respectivamente, das equações 5.2 a 5.5.

$$AA = \frac{m_{sat} - m_{seca}}{m_{seca}} \tag{5.2}$$

$$P = \frac{m_{sat} - m_{seca}}{m_{sat} - m_{im}} \tag{5.3}$$

$$D_{ap} = \frac{m_{seca}}{m_{sat} - m_{im}} \tag{5.4}$$

$$D_{real} = \frac{m_{seca}}{m_{seca} - m_{im}} \tag{5.5}$$

5.3.7 Ensaios de variação dimensional por carbonatação

Ao final da cura, as extremidades das placas foram dotadas de pinos metálicos fixados com cola epóxi de secagem rápida da marca Loctite®, com as amostras ainda úmidas, evitando assim uma secagem precoce, sem comprometer os resultados.

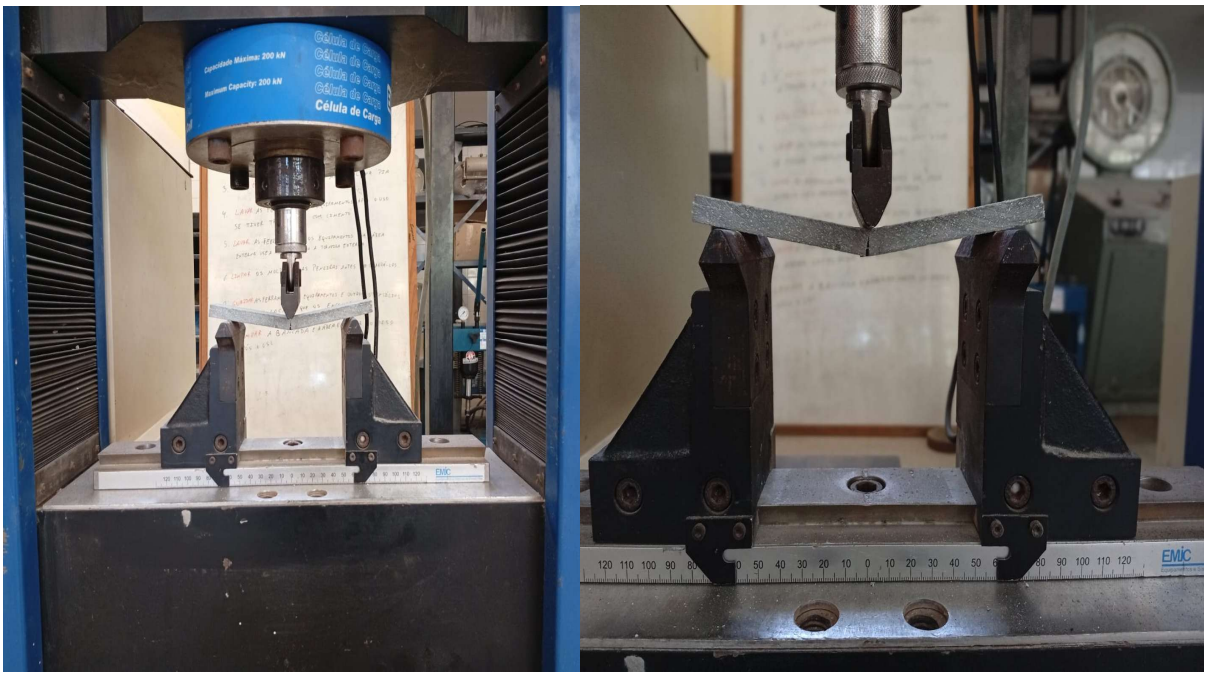
O ensaio de variação dimensional por carbonatação, baseado na tese de Souza (2013), foi conduzido por meio da medição do comprimento e da massa dos CPs após a exposição dos mesmos em ambiente rico de CO_2 ao longo do tempo. Para este procedimento foi utilizada uma balança digital com precisão de 0,01 g para a massa e um extensômetro com precisão de 0,01 mm para o comprimento, conforme a norma C596-23 (ASTM, 2023). A primeira leitura foi feita após 30 minutos da retirada dos CPs da cura, antes da exposição ao gás, servindo como referência para o cálculo da variação dimensional ao longo do tempo sob as condições em câmara e natural.

É importante salientar que as placas que foram utilizadas nesse ensaio compõem o grupo de medida contínua, ou seja, amostras que permanecem continuamente expostas às condições ambientais de secagem desde o momento da primeira medição até o final do ensaio.

5.3.8 Resistência Mecânica

A resistência mecânica das amostras foi determinada através de ensaios de flexão com três pontos, conforme esquema exposto na Figura 5.2.

Figura 5.2 – Ensaio de resistência à flexão 3 pontos.



Fonte: Autoria própria (2026).

Neste ensaio foram determinados o módulo de ruptura (Equação 5.6), módulo de elasticidade (Equação 5.7), tenacidade ou energia específica de fratura (Equação 5.8) e deflexão

máxima (Equação 5.9). Os ensaios de flexão foram feitos após o ensaio de porosidade, já com os corpos de prova saturados.

$$MOR = \frac{3P_{máx} \cdot L}{2b \cdot e^2} \tag{5.6}$$

Onde:

- MOR – módulo de ruptura (MPa);
- $P_{máx}$ – 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).

$$E = \frac{L^3}{48 * I} * \left(\frac{P}{\delta}\right) \tag{5.7}$$

Onde:

- E é o módulo de elasticidade (Gpa);
- L é a distância entre os cutelos (mm);
- I é o momento de inércia da seção transversal, dado por (mm^4);
- P/δ é o coeficiente angular do trecho elástico da curva carga versus flecha (N/mm).

$$\xi = \frac{A_p - \delta}{b * e} \tag{5.8}$$

Onde:

- ξ – Tenacidade ou energia específica (kJ/m^2);
- ($A_p - \delta$) – Área total sob a curva carga versus flecha (N·mm);
- b – Largura da amostra (mm);
- e – Espessura da amostra (mm).

Onde:

$$\delta_{máx} = \frac{P_{máx} \cdot L^3}{48EI} \tag{5.9}$$

- $\delta_{máx}$ – Deflexão máxima (mm);
- $P_{máx}$ – Carga máxima de ensaio (N);
- L é a distância entre os cutelos (mm);

- E é o módulo de elasticidade (Gpa);
- I é o momento de inércia da seção transversal, dado por (mm^4).

Os ensaios de flexão foram realizados em uma prensa equipada com uma célula de carga de 100 kN de capacidade. Para determinar o coeficiente angular e o módulo de elasticidade das placas têxteis, foi utilizada a medida da flecha no meio do vão, por meio de um extensômetro de curso máximo de 5 mm. A célula de carga foi deslocada a uma velocidade de 5 mm/min.

5.3.9 Microscopia digital

A análise morfológica foi realizada utilizando um microscópio digital USB, com iluminação por LED e sistema de ampliação variável podendo chegar até 1000 vezes. As amostras foram posicionadas sobre uma superfície plana, com região de interesse voltada para a lente do equipamento, realizando-se o ajuste da distância focal, da ampliação e da iluminação até a obtenção de imagens com adequada nitidez.

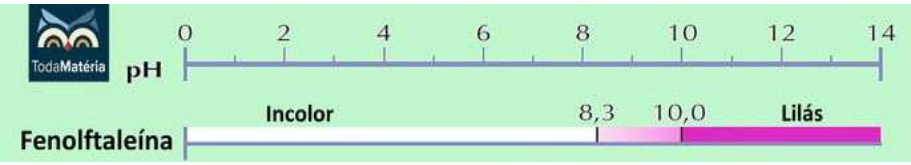
5.3.10 Procedimento de interrupção da reação de hidratação

Antes da realização dos ensaios microestruturais, as amostras foram submetidas a um procedimento de interrupção da reação de hidratação, com o objetivo de preservar o estado microestrutural correspondente ao tempo de exposição. Para isto, foi utilizado o álcool isopropílico como agente neutralizador da hidratação, deixando as amostras submersas durante 90 minutos. Na sequência, as mesmas foram colocadas em estufa a uma temperatura de 60ºC para secagem durante 90 minutos. Por fim, as amostras utilizadas para o ensaio do item 5.3.12 foram trituradas em almofariz, sendo utilizado o resíduo passante na peneira de 200 *mesh*, devidamente encapsulado em microtubos tipo *eppendorf*.

5.3.11 Profundidade de carbonatação

Para a determinação da profundidade de carbonatação foi feito um corte transversal nos corpos de prova, e em seguida, feita a aspersão de indicador químico fenolftaleína em uma das faces de fratura. Então, a partir da distinção visual de coloração (Figura 5.3) foram feitas fotos de boa resolução, as quais foram analisadas em 20 pontos distintos da mesma amostra e idade no *software* Imagej®, com o objetivo de quantificar a profundidade de carbonatação.

Figura 5.3 – Coloração de indicador fenolftaleína.



Fonte: Batista (2025).

5.3.12 Termogravimetria (TGA/DTG)

As amostras estudadas foram ensaiadas em um analisador térmico simultâneo NETZSCH STA 449 F1 Jupiter, disponível no CLMDCEM. As amostras de aproximadamente 25 mg foram adicionadas em cadinho de alumina, previamente pesadas em balança digital (0,0001 g de precisão) e posicionadas dentro do forno do equipamento. O equipamento funcionou a uma taxa de aquecimento de 10°C/min, em ambiente de nitrogênio com fluxo de 50 ml/min até atingir 1000°C.

5.3.13 Gravimetria por perda de massa em mufla

A determinação das perdas de massa foi realizada por método gravimétrico em mufla. Inicialmente, os cadinhos foram pesados e, após a adição das amostras, determinou-se a massa do conjunto cadinho mais amostra, obtendo-se a massa inicial da amostra por diferença. Em seguida, as amostras foram aquecidas da temperatura ambiente até 520 ºC, a uma taxa de 10 ºC/min, permanecendo nessa temperatura por 20 min. Após o resfriamento até a temperatura ambiente, os cadinhos foram novamente pesados, permitindo determinar a perda de massa ocorrida no primeiro estágio.

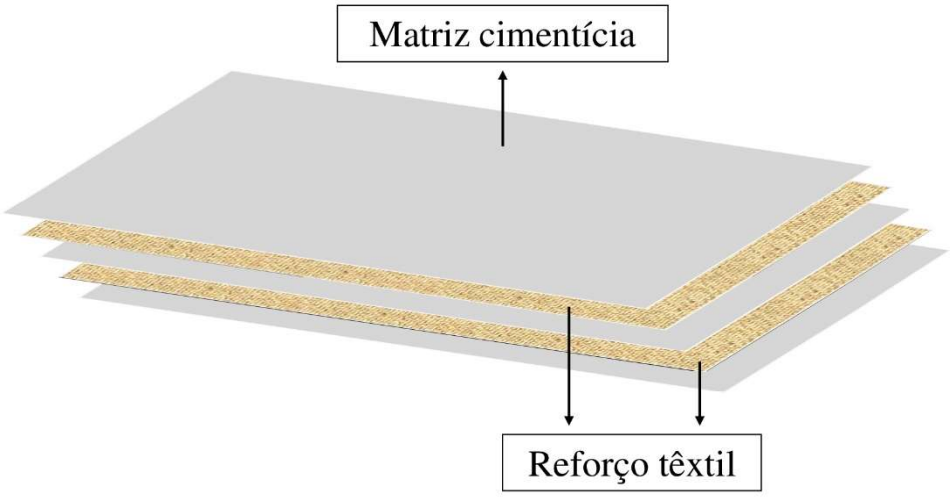
Posteriormente, as amostras foram aquecidas de 520 a 1000 ºC, mantendo-se a taxa de 10 ºC/min e um patamar de 20 min a 1000 ºC. Após o resfriamento, realizou-se a pesagem final, sendo a perda de massa entre 520 e 1000 ºC. Essa perda foi utilizada para estimar o teor de CO_2 liberado pela fração carbonatada, expresso em relação à massa seca da amostra. A quantidade de CO_2 efetivamente atribuída à carbonatação foi determinada pela diferença entre o teor de CO_2 da condição carbonatada e o teor correspondente à condição de referência, de modo a descontar o CO_2 originalmente presente na matriz e evitar sua contabilização como CO_2 adicionalmente capturado durante o processo de carbonatação.

5.4 PRODUÇÃO DAS AMOSTRAS

A produção das placas cimentícias no laboratório foi baseada no processo proposto por Rodrigues (2022), que intercalou camadas de matriz cimentícia e reforço têxtil até atingir a

quantidade de reforço proposta para cada amostra. Nesse contexto, as placas produzidas tiveram duas camadas têxteis intercaladas nas camadas de pasta cimentícia. A amostra de referência foi produzida em camada única, sem tecidos, com as fibras poliméricas uniformemente distribuídas na matriz. Essa composição e disposição dos têxteis é esquematizada na Figura 5.4.

Figura 5.4 – Configuração dos corpos de prova.



Fonte: Autoria própria (2026).

As placas retangulares tiveram variação em três parâmetros: a configuração do reforço (tecido ou fibra polimérica), a natureza do material utilizado (tecido de fibra de vidro álcali resistente, TNT ou fibras de PVA) e a condição de exposição (carbonatadas ou não carbonatadas). O esquema apresentado na Figura 5.5 esclarece a identificação das amostras que foram produzidas.

Figura 5.5 – Esquema de identificação das amostras.



Fonte: Autoria própria (2026).

A dispersão das fibras foi uma etapa importante, devido à dificuldade de desagregar feixes de fibras, tanto de celulose como de PVA. As fibras de PVA foram desagregadas com jatos de ar comprimido, que atuam mecanicamente separando as fibras umas das outras. Já as fibras de celulose foram dispersas em meio aquoso utilizando-se um agitador mecânico em diferentes rotações de 500 rpm e 1000 rpm. Esses procedimentos garantiram a homogeneidade da suspensão reativa, produzindo placas com boa distribuição de fibras na pasta cimentícia.

Quanto aos tecidos escolhidos, devido à propriedade anisotrópica do tecido de vidro álcali resistente (TVAR), o mesmo foi posicionado no sentido longitudinal (urdume) da placa, para maximizar a resistência à flexão e controlar a retração no material. Já com relação ao TNT, devido à sua propriedade pseudo-isotrópica, não foi necessária a definição de uma orientação do tecido na placa, pois não há distinção entre urdume e trama no mesmo.

Os tecidos TVAR e TNT, com gramaturas de 145 g/m² e 25 g/m², respectivamente, foram selecionados e cortados em dimensões de 40x25 cm. É importante destacar que o corte foi realizado de forma a não danificar a seção transversal dos tecidos. Além disso, não foi necessário realizar qualquer tratamento prévio nos tecidos, uma vez que, sendo materiais sintéticos, eles não reagem com a matriz cimentícia.

A mistura dos materiais envolveu a integração sequencial das fibras de celulose dispersas com a pasta formada de cimento, calcário e água potável previamente homogeneizados, sendo que exclusivamente para uma das composições, foram adicionadas também as fibras de PVA. O procedimento foi realizado em uma argamassadeira, alternando entre as velocidades de rotação baixa e alta, com cada etapa controlada por tempos específicos para garantir a padronização e a homogeneidade do processo. A formulação detalhada da matriz cimentícia, com o percentual de cada material utilizado na produção das placas está descrita na Tabela 5.1.

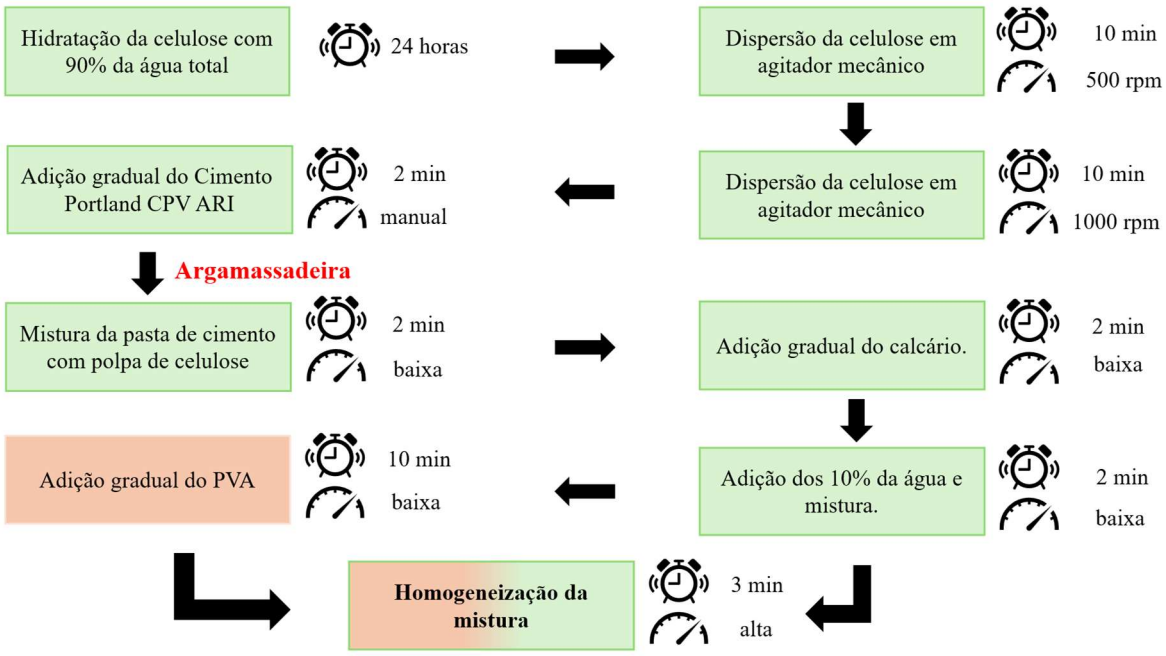
Tabela 5.1 – Formulação da matriz cimentícia em percentual.

Tipos de Amostras	Cimento (%)	Calcário (%)	Fibra de Celulose (%)	Fibra de PVA (%)	Reforço Têxtil	a/c	Total (%)
PFPVA	70	26,4	3	0,6	-	0,6	100
PTNT	70	27	3	-	TNT		
PTVAR	70	27	3	-	TVAR		

Fonte: Autoria própria (2026).

As fibras de celulose foram hidratadas previamente por 24 horas já com 90% da quantidade total da água, após este período, as fibras foram colocadas em agitador mecânico, em rotação de 500 rpm e 1000 rpm durante 10 minutos cada velocidade. Após a dispersão, foi adicionado aos poucos o cimento Portland CPV-ARI, sendo homogeneizado de forma manual durante 2 minutos. Na sequência, a mistura foi colocada na argamassadeira em velocidade baixa por 2 minutos, após o período foi colocado o calcário moído com argamassadeira na mesma velocidade durante 1 minuto e adicionado os 10% da água restante da mistura, deixando bater por mais 1 minuto, até mudar a velocidade para alta ficando mais 3 minutos nessa velocidade. No entanto, para as amostras com PVA antes de mudar para a velocidade alta, é necessário adicionar as fibras de forma gradual para que a mistura permaneça homogênea, este procedimento é esquematizado na Figura 5.6.

Figura 5.6 – Fluxograma de mistura das amostras.



Fonte: Autoria própria (2026).

A moldagem das placas foi conduzida em batelada (processo descontínuo). A suspensão reativa foi colocada em moldes retangulares com dimensões internas de 29,5x16x1 cm, especialmente projetado para acomodar os têxteis de reforço. Estes foram previamente cortados e fixados em parafusos distribuídos ao longo de uma faixa de 2,5 cm de espessura nas bordas dos moldes, conforme representado na Figura 5.7. Essa fixação tem como finalidade assegurar

o tensionamento adequado dos têxteis durante a moldagem, garantindo o alinhamento correto dos filamentos, fator crítico para o desempenho dos produtos.

Figura 5.7 - Molde das formas das placas.



Fonte: Autoria própria (2026)
Legenda: molde vazado com dimensões externas de 32x21x1 cm e medidas internas de 29,5x16x1 cm.

Após o posicionamento do tecido, a suspensão produzida foi vertida sobre o mesmo em camadas sucessivas, respeitando a ordem de deposição para garantir a adequada incorporação e evitar formação de vazios. A moldagem foi finalizada com leve vibração manual para nivelamento e adensamento da mistura. Em seguida, as placas foram armazenadas em sacos plásticos, que foram fechados, criando ambiente com umidade relativa > 95%, e mantidas em repouso por 24 horas. Estas foram desmoldadas e, em seguida, cortadas nas dimensões de 4x16x1 cm visando as análises posteriores.

Ao todo, foram produzidas amostras correspondentes a três composições de placas cimentícias (PVA, PTNT e PTVAR) submetidas às condições de carbonatação natural (CN) e carbonatação em câmara (CC). Após a produção, todos os corpos de prova foram submetidos à cura imersa em água saturada de cal durante 7 dias. Para cada composição, seis corpos de prova foram destinados à avaliação da variação dimensional e de massa, sendo submetidos às condições CN e CC e monitorados durante 14 dias. Durante esse mesmo período, só que nas idades de 0, 1, 3, 7 e 14 dias, foram avaliadas a profundidade de carbonatação nas diferentes

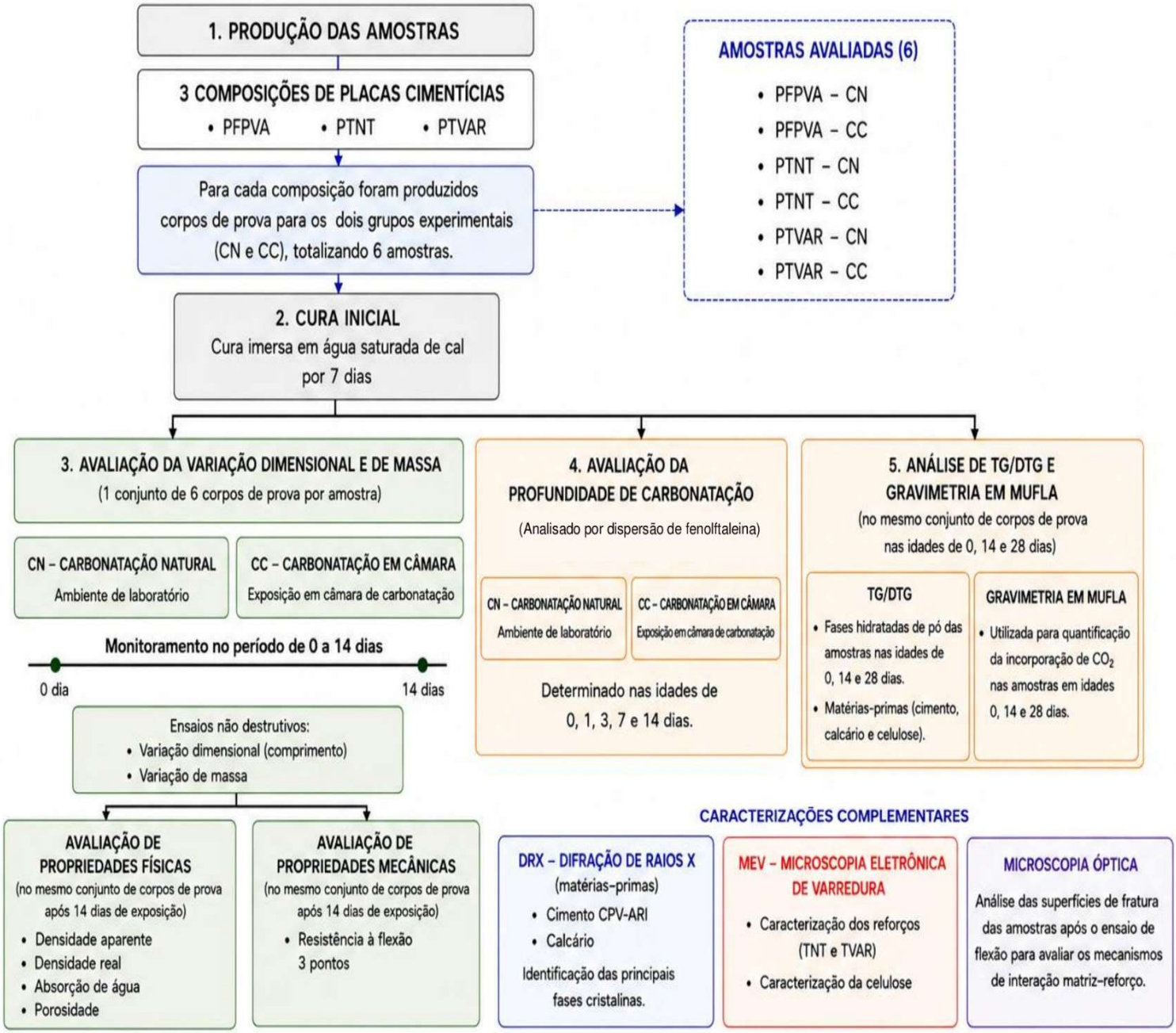
formulações.

As mesmas amostras da variação dimensional e de massa foram avaliadas quanto às propriedades físicas, por meio das densidades aparente e real, absorção de água e porosidade, e as propriedades mecânicas, por meio da resistência à flexão, comparando-se as condições CN e CC.

A análise termogravimétrica (TG/DTG) e a gravimetria por perda de massa em mufla foram empregues para acompanhar as transformações das amostras ao longo de 28 dias, possibilitando avaliar a evolução da hidratação, da carbonatação e da incorporação de CO_2. A difração de raios X (DRX) foi utilizada exclusivamente na caracterização das matérias-primas, especificamente cimento e calcário, para identificação das principais fases cristalinas. O MEV foi empregado na caracterização na caracterização dos tecidos e da celulose, enquanto a análise microscópica ótica das superfícies de fratura foi utilizada para avaliar os mecanismos de interação matriz-reforço após fissuração.

Dessa forma, o programa experimental permitiu relacionar a composição e arquitetura dos reforços, as características físicas e microestruturais da matriz, a evolução da carbonatação, a incorporação de CO_2 e o comportamento mecânico das placas, possibilitando a comparação entre as condições de carbonatação natural e acelerada. O fluxograma apresentado na Figura 5.8 sintetiza as etapas de produção, cura, exposição e caracterização das amostras.

Figura 5.8 - Fluxograma de amostras.



Fonte: Autoria própria (2026).

5.5 CARBONATAÇÃO DAS AMOSTRAS

5.5.1 Montagem da câmara de carbonatação

A escolha da produção da câmara de carbonatação em caixa de isopor se deu pela praticidade, baixo custo, além de oferecer uma boa vedação, o que permitiu o confinamento eficiente do gás carbônico e o seu controle interno. Além disso, a facilidade de corte dessas caixas facilitou a instalação dos dispositivos de controle de circulação interna dos gases e de

medição, como as ventoinhas e termo-higrômetros, respectivamente, sem a necessidade de abertura do sistema. A função dos outros materiais constituintes da câmara, assim como quantidades e fabricantes estão descritos no Quadro 5.2.

Quadro 5.2 - Função dos componentes da câmara de carbonatação.

Quantidade	Material	Fabricante	Função
01	Caixa isopor de 22L	Isoplast	Componente principal de isolamento dos gases da câmara de carbonatação
01	Graxa de silicone	Implastec	Vedação da tampa e das conexões da caixa
01	Cola de silicone líquida	Leonora	
02	Termo-higrômetro digital	Acurite	Monitoramento da temperatura e umidade interna da câmara.
04	Pilhas alcalinas de 1,5V (AAA)	Rayovac	Alimentar energeticamente o circuito eletrônico do termo-higrômetro
02	Ventoinhas Φ 12 cm	XL-Share	Circulação interna de ar e CO_2
01	Fonte de alimentação de 12V	Galaxy LED	Fornecer energia elétrica estável e contínua para o funcionamento das ventoinhas
02	Garrafas PET de 2L	Reutilizável	Armazenamento das soluções geradoras de CO_2
01	Recipiente (500g)	Reutilizável	Armazenamento da solução salina
1 metro	Mangueira de silicone	Force Line	Transporte do líquido / gás para dentro da câmara
500 g	Cloreto de sódio	Miramar	Controle de umidade
1 kg	Bicarbonato de sódio	Quero	Reagentes para geração de CO_2
2 litros	Ácido sulfúrico 30%	Baterias Duran	

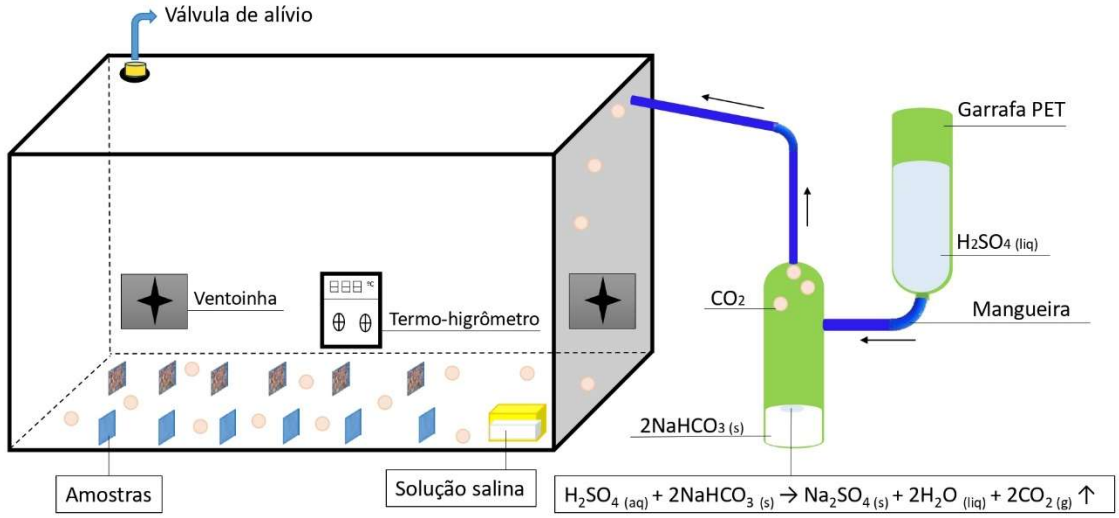
Fonte: Autoria própria (2026).

A metodologia de controle da umidade na câmara de carbonatação envolveu o uso de uma solução salina saturada de cloreto de sódio (NaCl), acondicionada em recipiente plástico, que manteve a umidade relativa próxima de 75% em temperaturas entre 0 e 40 ºC (Ditchfield, 2000). A fim de evitar o acúmulo de CO_2 na parte inferior da câmara, devido à sua maior densidade em relação ao ar, foi utilizada uma ventoinha para promover a circulação interna, homogeneizar a concentração gasosa e auxiliar na manutenção da umidade (Guimarães e Coelho, 2018).

A produção de CO_2 foi baseada no sistema proposto por Guimarães e Dorn (2015), onde foram usadas duas garrafas conectadas com bicarbonato de sódio e ácido sulfúrico 30% interligadas por mangueiras. A reação ocorreu na garrafa 1, onde o gás foi gerado e transportado para a câmara de carbonatação, conforme esquema da Figura 5.9. O controle da transferência

dos reagentes foi executado com cautela para evitar picos de pressão que poderiam comprometer a integridade da câmara. Após o equilíbrio de pressão, o CO_2 passou a se difundir lentamente para o interior da câmara, atingindo a concentração desejada.

Figura 5.9 – Esquema da câmara de carbonatação.



Fonte: Autoria própria (2026).

A estimativa da quantidade dos reagentes necessária para gerar dióxido de carbono na câmara se deu através de cálculos estequiométricos. A produção de CO_2 ocorre pela reação entre bicarbonato de cálcio ($2NaHCO_3$) e o ácido sulfúrico 30% (H_2SO_4). Conforme Guimarães e Coelho (2018), em condições ambientais de temperatura e pressão (CATP) normais, cada mol de gás ocupa cerca de 25 litros. Os autores ainda detalham que a reação completa gera dois mols de CO_2 para cada mol de ácido utilizado, conforme descreve a equação 5.10.

$$H_2SO_{4\,(aq)} + 2NaHCO_{3\,(s)} \rightarrow Na_2SO_{4\,(s)} + 2H_2O_{\,(aq)} + 2CO_{2\,(g)} \uparrow \quad (5.10)$$

A quantidade de CO_2 necessária depende do volume útil da câmara, que varia conforme o número de corpos de prova, garrafas conectadas e componentes internos. Os corpos de prova na câmara terão dimensões de 4x16x1 cm. A tabela 5.2 apresenta os volumes de reagentes correspondentes ao número de amostras fixando a concentração de CO_2 em 5%.

Tabela 5.2 - Relação do número de amostras com a concentração dos reagentes.

Nº de amostras	**Ácido sulfúrico 30% (g)**	**Bicarbonato de sódio (g)**	**Concentração de CO_2**

1	7,60	3,91	5 %
3	7,56	3,89	
6	7,50	3,86	
9	7,44	3,82	
12	7,37	3,79	
15	7,31	3,76	
18	7,25	3,73	
21	7,19	3,70	

Fonte: Autoria própria (2026).

5.5.2 Procedimento experimental de carbonatação em câmara

A carbonatação das placas cimentícias foi analisada em ambiente de envelhecimento natural e em câmara. Para a exposição natural foi utilizada uma caixa organizadora com ventilação do ambiente totalmente acessível e com solução salina para manter a umidade interna. Já na condição em câmara utilizou-se uma caixa de isopor, a qual foi adaptada, com controles de temperatura, umidade relativa do ar (em até 75%) e taxa de CO_2 manipulada em 5% de concentração. A configuração da câmara simulou, de forma intensificada, as condições ambientais responsáveis pela reação de carbonatação, permitindo a avaliar o comportamento das amostras. Essa abordagem não teve o objetivo de reproduzir fielmente a atmosfera real, mas exclusivamente de viabilizar o estudo experimental em menor tempo. Embora a elevada concentração de CO_2 acelere o processo, ela não garante equivalência cinética e microestrutural com a carbonatação atmosférica.

Posteriormente, os corpos de prova foram posicionados na câmara de carbonatação (Figura 5.10), distribuídos de forma a não obstruir o fluxo interno de ar e garantir a exposição homogênea das superfícies ao gás. A exposição ocorreu em intervalos programados de 0 a 28 dias, com amostras sendo retiradas e analisadas ao final de cada intervalo de análise. Esse procedimento permitiu o monitoramento da cinética de carbonatação ao longo do tempo, bem como a identificação das alterações físico-químicas induzidas nos compósitos.

Figura 5.10 – Câmara de carbonatação com disposição das amostras.



Fonte: Autoria própria (2026).

5.6 INDICADORES DE ECOEFICIÊNCIA

A avaliação da ecoeficiência das placas cimentícias foi realizada a partir da relação entre o consumo de recursos, o impacto associado às emissões de dióxido de carbono e o desempenho mecânico do produto. A metodologia foi fundamentada no conceito de intensidade ligante proposto por Damineli et al. (2010), originalmente desenvolvido para avaliar a eficiência de concretos, e adaptada neste trabalho às características específicas das placas cimentícias reforçadas. A adaptação foi necessária porque, diferentemente dos concretos convencionalmente avaliados por meio da resistência à compressão, o desempenho das placas está diretamente associado à resistência à flexão e ao comportamento do material após a fissuração.

Para a aplicação dos indicadores, foi adotada como unidade funcional 1 m² de placa cimentícia com espessura de 1 cm. Dessa forma, o consumo de cimento e as emissões de CO_2 equivalente foram expressos em relação à área de produto, permitindo a comparação direta entre as formulações PFPVA, PTNT e PTVAR, nas condições de carbonatação em câmara (CC) e natural (CN).

5.6.1 Intensidade Ligante-Flexão (IL_f)

A eficiência do consumo de cimento foi avaliada por meio da intensidade de ligante à flexão (ILf), obtida pela relação entre o consumo de cimento empregado na produção de 1 m^2 de placa e a resistência média à flexão determinada aos 14 dias. O indicador foi calculado pela equação (5.11):

$$IL_f = \frac{C}{MOR} \tag{5.11}$$

Em que:

- IL_f = intensidade ligante-flexão ($kg \cdot m^{-2} \cdot MPa^{-1}$);
- C = consumo de cimento ($kg \cdot m^{-2}$);
- MOR = resistência média à flexão (MPa).

A utilização do MOR como parâmetro de desempenho representa uma adaptação ao conceito de intensidade ligante de Damineli et al. (2010), substituindo-se a resistência à compressão, tradicionalmente utilizada para concretos, pela propriedade mecânica mais representativa do comportamento das placas estudadas.

Valores inferiores de IL_f indicam maior eficiência no emprego do cimento, uma vez que representam menor quantidade de ligante necessária para proporcionar determinada resistência à flexão.

5.6.2 Intensidade Carbono-Flexão (IC_f)

A intensidade das emissões associadas à produção das placas foi avaliada por meio da intensidade carbono-flexão (IC_f), adaptada do conceito de intensidade de CO_2 proposto por Damineli et al. (2010). Para essa adaptação, as emissões foram estimadas a partir do consumo de cimento de cada formulação, considerando o fator de emissão correspondente ao cimento utilizado, obtido no Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção (Sidac). O cálculo do indicador foi realizado por unidade funcional de 1 m^2 de placa, com espessura de 1 cm, relacionando as emissões de CO_2 associadas ao consumo de cimento e à respectiva resistência média à flexão, conforme as equações (5.12 e 5.13):

$$CO_{2\ emitido} = C \cdot FE \tag{5.12}$$

$$IC_f = \frac{CO_{2\ emitido}}{MOR} \tag{5.13}$$

Em que:

- $CO_{2\ emitido}$ = emissão estimada de CO_2 ($kg \cdot CO_2 \cdot m^{-2}$)

- C = consumo de cimento ($kg \cdot m^{-2}$);
- FE = fator de emissão do cimento disponível no Sidac ($kg \cdot CO_2 \cdot kg^{-1}$));
- IC_f = intensidade carbono-flexão ($kg \cdot CO_2 \cdot m^{-2} \cdot MPa^{-1}$);
- MOR = resistência média à flexão (MPa).

Embora o calcário constitua parte da composição das placas, seu fator de emissão não foi incorporado ao cálculo das emissões. Conforme os valores disponibilizados pelo Sidac considerados para o material, o fator de emissão do calcário situa-se entre 0,0009355 e 0,004382 $kg \cdot CO_2 \cdot kg^{-1}$. Essa ordem de grandeza é substancialmente inferior à contribuição associada ao cimento CPV, cuja faixa de referência declarada na mesma plataforma estende-se de 0,78 a 0,99 $kg \cdot CO_2 \cdot kg^{-1}$. Dessa forma, considerando também a fração de calcário empregada nas formulações, sua contribuição para as emissões estimadas por unidade funcional mostrou-se pouco significativa em comparação à contribuição do cimento. Optou-se, portanto, por não incluir essa fração no cálculo, mantendo o procedimento concentrado na principal fonte de emissão considerada no escopo desta avaliação.

Dessa forma, o indicador representa a quantidade estimada de CO_2 associada ao consumo de cimento necessária para produzir uma unidade de resistência à flexão por área de placa. Valores inferiores de IC_f indicam maior eficiência carbono-flexão, pois correspondem a menor emissão estimada de CO_2 para determinado desempenho mecânico.

Ressalta-se que o fator de emissão obtido no Sidac representa as emissões associadas ao cimento utilizado na composição das placas. Portanto, o IC_f determinado neste estudo não corresponde a uma avaliação completa das emissões do ciclo de vida das placas, visto que não contempla o impacto ambiental associado aos demais constituintes da matriz, como as fibras e os reforços têxteis.

5.6.3 Saldo de Intensidade Carbono-Flexão Equivalente ($SIC_{f\,eq}$)

O objetivo do indicador é adaptar a lógica de intensidade de ligante e intensidade de carbono para uma aplicação específica em placas cimentícias, incorporando simultaneamente uma variável relacionada à incorporação de CO_2 e ao desempenho à flexão. Assim, sua contribuição está na tentativa de estabelecer uma métrica integrada para comparação entre as formulações estudadas.

A incorporação de CO_2 decorrente da carbonatação foi avaliada experimentalmente por determinação gravimétrica das perdas de massa em mufla. Como os resultados deste ensaio são inicialmente expressos em porcentagem de massa, os valores foram corrigidos para a condição

de massa seca. Posteriormente, o teor de CO_2 foi convertido para massa de CO_2 por unidade de área de placa considerando a densidade aparente e a espessura do material, conforme:

$$CO_{2\ \ eq\ capturado} = \frac{CO_{2\ \ eq}}{100}\ \rho \cdot e \tag{5.14}$$

Em que:

- $CO_{2\ eq\ capturado}$ = quantidade de CO_2 equivalente capturado referente à massa da placa (kg $\cdot\ CO_2 \cdot m^{-2}$)
- $CO_{2\ eq}$ = teor de CO_2 equivalente determinado na mufla (%);
- ρ = densidade aparente da placa (kg $\cdot\ m^{-3}$);
- e = espessura da placa (m).

Para incorporar o efeito da captura de CO_2 decorrente da carbonatação à estimativa das emissões associadas ao cimento, foi proposto neste trabalho o Saldo de Intensidade Carbono-Flexão Equivalente ($SIC_{f\ eq}$). O indicador relaciona o saldo entre as emissões estimadas de CO_2 associadas ao consumo de cimento e o CO_2 equivalente capturado durante a carbonatação ao desempenho mecânico à flexão. O SIC_{eq} foi calculado por:

$$SIC_{\mathrm{f\,eq}} = \frac{CO_{2\ \ emitido} - CO_{2\ \ eq\ capturado}}{MOR} \tag{5.15}$$

Em que:

- $SIC_{f\ eq}$ = Saldo de Intensidade Carbono-Flexão Equivalente (kg $\cdot\ CO_2 \cdot m^{-2} \cdot MPa^{-1}$);
- $CO_{2\ emitido}$ = emissão estimada de CO_2 (kg $\cdot\ CO_2 \cdot m^{-2}$)
- $CO_{2\ eq\ capturado}$ = quantidade de CO_2 equivalente capturado referente à massa da placa (kg $\cdot\ CO_2 \cdot m^{-2}$)
- MOR = resistência média à flexão (MPa).

A diferença entre a emissão estimada e a quantidade equivalente capturada representa o saldo de carbono equivalente considerado na análise, permitindo incorporar o efeito da carbonatação como um mecanismo de redução do impacto climático associado à produção da placa. Assim, menores valores de $SIC_{f\ eq}$ indicam maior ecoeficiência, pois representam menor impacto climático estimado para determinado nível de resistência à flexão. No entanto, este indicador não deve ser interpretado como uma avaliação completa de ciclo de vida, uma vez que as demais contribuições ambientais não foram incluídas no cálculo.

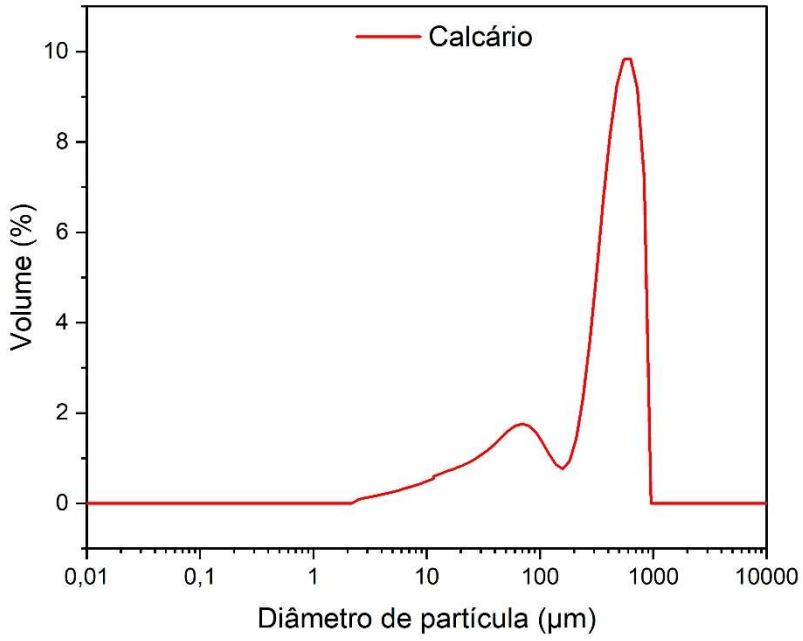
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

6.1.1 Granulometria e massa específica

A caracterização granulométrica do calcário foi realizada por difração a laser, com faixa de medição entre 0,1 e 1000 µm. A curva de distribuição granulométrica mostra que o calcário apresenta predominância de partículas relativamente grossas, concentradas entre aproximadamente 400 e 800 µm, com um pico máximo próximo de 600 µm. Observa-se ainda uma pequena fração de partículas abaixo de 100 µm, porém em menor proporção, conforme mostra a figura 6.1.

Figura 6.1 – Granulometria por difração a laser do calcário.



Fonte: Autoria própria (2026).

A Figura 6.1 apresenta um comportamento bimodal, onde estabelece dois picos distintos de frequência. Essa característica indica a existência de duas populações predominantes de partículas no material analisado, sendo a primeira de menor intensidade e de característica fina, enquanto a segunda, de maior intensidade tem característica grosseira, sugerindo uma distribuição heterogênea dos tamanhos dos grãos. De acordo com Mcgeary (1961), a presença simultânea de partículas finas e grosseiras pode favorecer o empacotamento granular da matriz cimentícia, uma vez que as partículas menores tendem a preencher os vazios existentes entre as partículas de maior dimensão.

Os valores de D10, D50 e D90 demonstram, respectivamente, que 10% das partículas apresentam diâmetro inferior a 34,88 μm, 50% possuem diâmetro inferior a 443,14 μm e 90% apresentam tamanho inferior a 795,75 μm. Esses resultados, junto ao índice *Span* de 1,717 reforçam a predominância de partículas grossas, refletindo numa dispersão maior da amostra, o que é compatível com a distribuição granulométrica bimodal.

Outro fator que reforça a análise, é a diferença significativa entre os diâmetros médios $D_{[3,2]}$ (75,67 μm) e $D_{[4,3]}$ (423,44 μm). O primeiro é influenciado pelas partículas finas e está relacionado à área superficial específica (0,0294 m²/g). Já o segundo é ponderado pelo volume e sofre maior influência das partículas grossas. A discrepância entre esses dois parâmetros confirma que, embora exista uma fração fina considerável, o volume do material é constituído por partículas de maior diâmetro.

A análise granulométrica do calcário, portanto, evidencia um material com distribuição heterogênea de tamanhos de partícula, combinando frações finas e grossas em proporções significativas. Essa heterogeneidade é coerente com o papel do calcário como *filler* na matriz cimentícia, uma vez que as partículas mais finas contribuem para o preenchimento de vazios entre os grãos de cimento, enquanto as partículas mais grossas auxiliam na construção de uma rede granular que mantém caminhos de difusão para o CO_2.

Embora a curva granulométrica apresentada se refira especificamente ao calcário, o comportamento típico do cimento CPV-ARI, de granulometria mais fina e distribuição centrada em diâmetros menores, complementa esse efeito. A associação entre partículas de diferentes dimensões favorece o preenchimento de vazios e pode modificar a estrutura porosa da matriz, resultando em alterações na porosidade total, na distribuição e na conectividade dos poros (Li, 2022; Xiong et al., 2024; Zhang et al., 2020). Esses aspectos serão retomados na discussão dos resultados de porosidade, densidade e profundidade de carbonatação das placas.

As massas específicas do cimento CPV-ARI e do calcário foram determinadas através da norma NBR 16605 (ABNT, 2017), conforme a Tabela 6.2.

Tabela 6.1 – Caracterização da massa específica pelo método de *le chatelier*.

Amostras	V1	Massa (g)	V2	Massa Específica (g/cm³)
Cimento	0	60	19,6	3,0612
Calcário	0	60	21,9	2,7397

Fonte: Autoria própria (2026).

Os valores de massa específica obtidos foram de 3,06 g/cm³ para o cimento CPV-ARI e 2,74 g/cm³ para o calcário, sendo compatíveis com os valores reportados na literatura para materiais de natureza semelhante (Khatib et al., 2022; Padilha; Lemos; Silva, 2023). A maior massa específica do cimento está associada à predominância de fases do clínquer, como alita e belita, minerais que apresentam elevada densidade. Em contrapartida, a menor massa específica do calcário é atribuída ao $CaCO_3$, cuja densidade varia entre 2,70 e 2,75 g/cm^3, corroborando com os resultados obtidos por FRX.

Estudos de Scrivener, John e Gartner (2018) destacam que a diferença de massa específica entre os materiais influencia o proporcionamento volumétrico das misturas. Uma vez que o calcário apresenta menor massa específica que o cimento, uma mesma massa de calcário ocupa um volume maior no sistema. Esse comportamento, aliado a uma distribuição granulométrica adequada, otimiza o empacotamento das partículas e o efeito *fíller*, contribuindo para a densificação da matriz cimentícia.

6.1.2 Composição química por FRX

A composição química do calcário e do cimento Portland CPV-ARI foi determinada por Fluorescência de Raios X, sendo os resultados apresentados na tabela 6.2.

Tabela 6.2 – Caracterização química das matérias-primas por FRX.

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

Fonte: Autoria própria (2026).

O calcário apresentou como principal constituinte o óxido de cálcio (CaO), com teor de 49,89%, seguido por uma elevada perda ao fogo (39,56%). Essa composição é característica de materiais constituídos por carbonato de cálcio ($CaCO_3$), cuja decomposição térmica durante o ensaio libera dióxido de carbono (CO_2), resultando em elevados valores de perda ao fogo. Dessa forma, o alto valor de LOI confirma a natureza carbonática do material.

Os teores de sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3) e óxido de ferro (Fe_2O_3) foram relativamente baixos, correspondendo a 4,50%, 0,92% e 0,55%, respectivamente. Esses resultados indicam reduzida presença de fases silicosas e de impurezas aluminosas, evidenciando que o material possui características compatíveis com os padrões comerciais.

O teor de óxido de magnésio (MgO), igual a 3,32%, sugere a presença de pequenas quantidades de dolomita ou substituições isomórficas de magnésio na estrutura cristalina de calcita, sem representar concentrações elevadas para caracterizar um calcário dolomítico.

Em comparação, o cimento CPV-ARI apresentou maior teor de CaO (60,65%), resultado esperado devido à predominância das fases do clínquer, como alita (C_3S) e belita (C_2S). Além disso, os maiores teores de SiO_2 (16,69%), Al_2O_3 (3,76%) e Fe_2O_3 (2,46%) refletem a composição mineralógica típica do clínquer Portland, responsável pela formação dos silicatos e aluminatos de cálcio durante a fabricação do cimento.

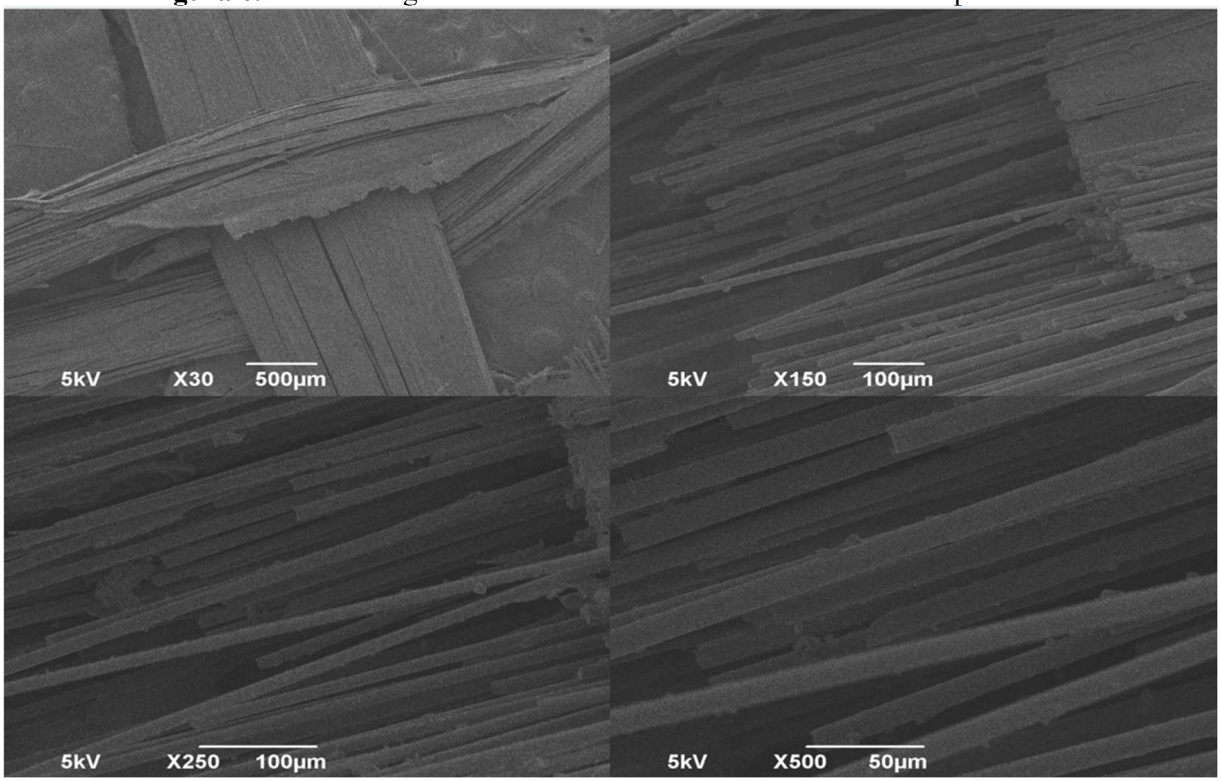
A perda ao fogo do CPV-ARI foi de 6,29%, valor inferior ao observado para o calcário, o que está relacionado principalmente à presença de material carbonático utilizado como *filler* em sua composição. No cimento CPV-ARI, essa fração carbonática é adicionada posteriormente à etapa de calcinação do clínquer, durante a moagem, podendo representar uma parcela de sua composição e contribuir para a perda de massa observada no ensaio.

6.1.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A caracterização morfológica dos reforços têxteis e das fibras de celulose (Figuras 6.2 a 6.4) foi realizada por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), com o objetivo de analisar a geometria, a distribuição dos filamentos e a presença de vazios na estrutura dos tecidos.

A Figura 6.2 apresenta a morfologia do tecido de vidro álcali resistente (TVAR) antes de sua incorporação à matriz cimentícia. Estas imagens mostram que cada fio do tecido é formado por filamentos de pouco menos de 10 micrômetros, alinhados, que podem incorporar vazios entre eles.

Figura 6.2 – Morfologia da fibra de vidro álcali resistente analisada por MEV.

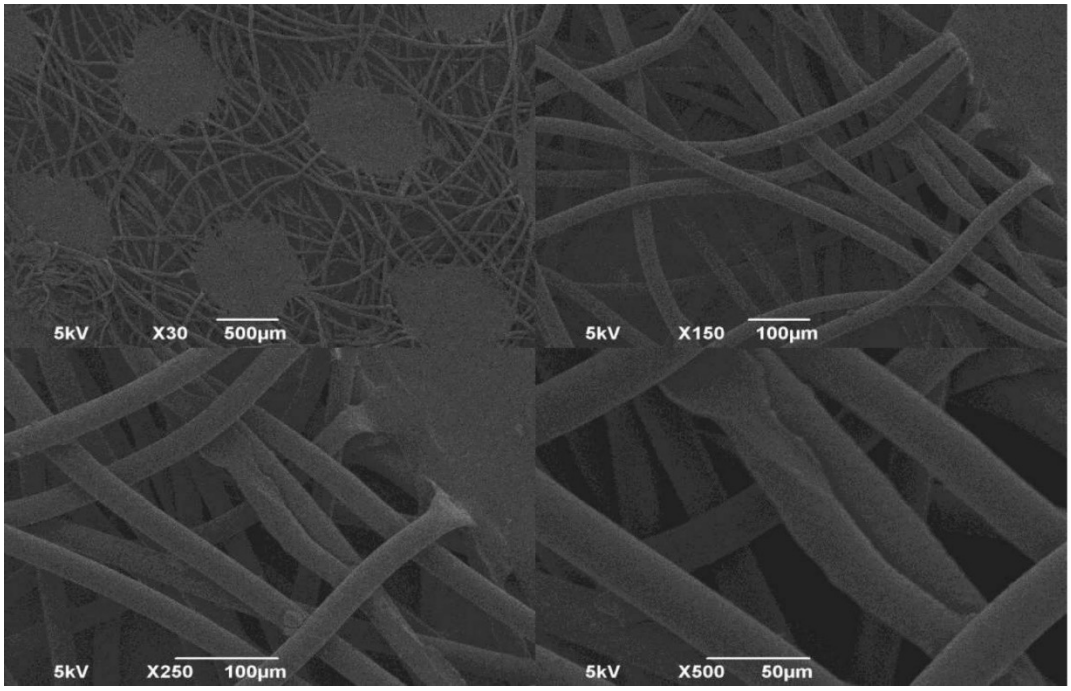


Fonte: Autoria própria (2026).

Em escala macroscópica (X30) já se observa uma malha bidimensional bem definida, composta por fios orientados em duas direções principais, formando aberturas quadradas regulares. Essa estrutura confere ao tecido elevada capacidade de distribuição de tensões ao longo dos filamentos, além de criar canais preferenciais para a passagem de água da pasta de cimento durante a moldagem das placas. A regularidade da malha favorece também a formação de zonas de aderência entre a matriz e os fios, o que contribui no comportamento à flexão das placas reforçadas com TVAR.

Na Figura 6.3 é mostrada a morfologia do tecido não tecido (TNT), a qual é formada por filamentos contínuos extrudados e unidos termicamente, característica típica de materiais produzidos pelo processo *spunbond* (Midha; Dakuri, 2017).

Figura 6.3 – Morfologia do tecido não tecido analisada por MEV.

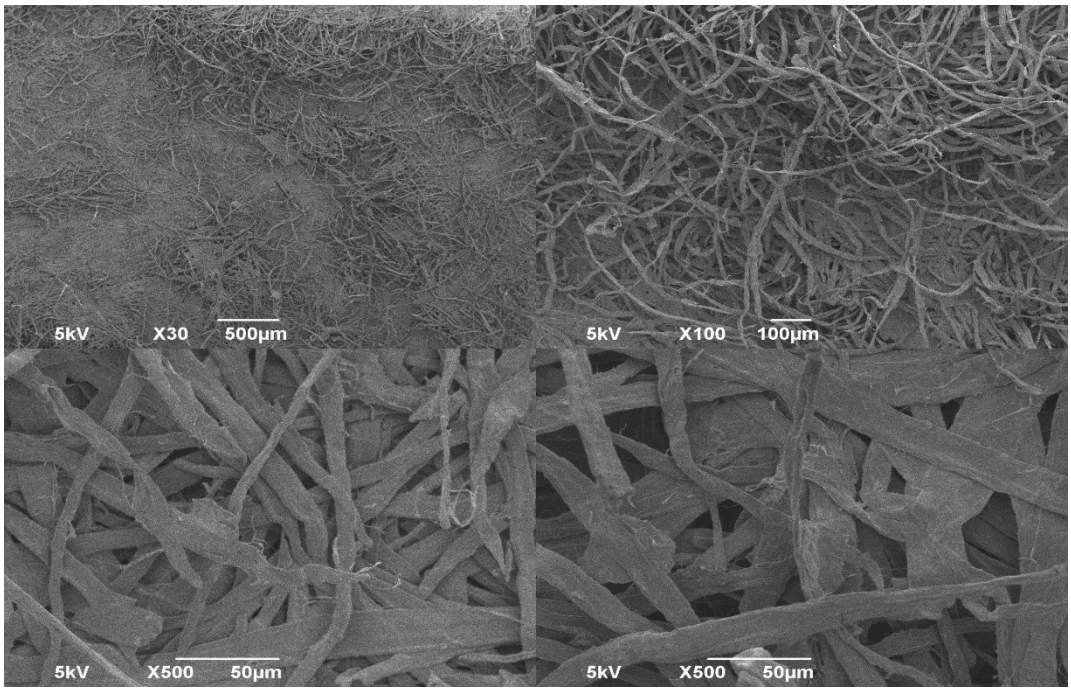


Fonte: Autoria própria (2026).

Diferentemente do TVAR, o TNT apresenta uma distribuição pseudo-isotrópica de filamentos, dispostos de forma aleatória. Essa configuração resulta em uma rede de poros descontínuos, que tende a aumentar a superfície específica de contato entre o reforço e a pasta cimentícia. Do ponto de vista microestrutural, o TNT pode atuar como um elemento de reforço difuso, contribuindo para o controle da fissuração em múltiplas direções e para a formação de caminhos de difusão mais tortuosos para o CO_2.

No caso da fibra curta de celulose branqueada (Figura 6.4), as imagens de MEV evidenciam uma estrutura fibrosa, distribuídos de forma relativamente homogênea e aleatória na matriz. Além disso, observam-se fibras com diferentes larguras, superfície irregular, entrelaçamento intenso e alguns graus de achatamentos decorrentes da prensagem da folha, que em geral não resulta em grandes contribuições nas propriedades mecânicas dos fibrocimentos.

Figura 6.4 – Morfologia da fibra curta de celulose analisada por MEV.



Fonte: Autoria própria (2026).

As fibras de celulose, com superfície mais rugosa e tendência à fibrilação, apresentam maior área de interface potencial com a pasta, favorecendo a ancoragem mecânica e a transferência de tensões em escala microscópica. No entanto, sua geometria tem vazios interconectados entre as fibras, o que favorece a retenção de água, entretanto essas características indicam uma menor resistência mecânica, pois aumentam a relação a/c (Lacerda et al., 2023).

Já as fibras de PVA, de superfície lisa, diâmetro uniforme e carácter hidrofílico, atuam como reforço disperso na matriz cimentícia, favorecendo a interação mútua, contribuindo para a tenacidade e a mitigação da abertura de fissuras (Curosu et al., 2020; Fan et al., 2025).

De forma integrada, as observações de MEV mostram que cada tipo de reforço modifica de maneira distinta a microestrutura das placas cimentícias. O TVAR, com malha aberta e orientação definida, promove a formação de canais de maior dimensão e seções de matriz mais contínuas entre os fios, o que pode favorecer tanto a difusão do CO_2 quanto a resistência à flexão em direções específicas. O TNT, por sua vez, gera uma rede de filamentos menos densa em escala microestrutural, e aleatória, associada a poros distribuídos, potencialmente contribuindo para maior superfície de contato e para uma distribuição mais homogênea de tensões. As fibras de celulose e PVA complementam esse cenário, atuando em escalas menores e influenciando o fechamento de microfissuras e a formação de caminhos não contínuos de

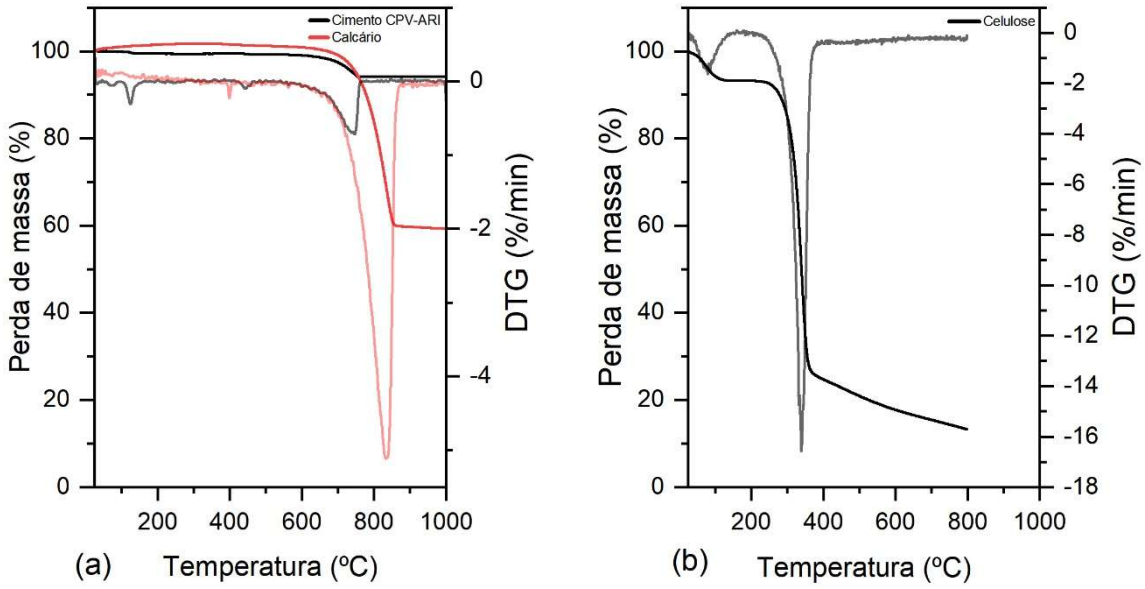
transporte na matriz.

Esses resultados microestruturais serão retomados na seção 6.5, ao se discutir a profundidade de carbonatação, a frente carbonatada e a interface matriz-reforço. Em conjunto com os dados de granulometria, massa específica e composição química, as imagens de MEV permitem compreender como a geometria e a distribuição dos reforços têxteis condicionam a rede porosa das placas cimentícias e, consequentemente, seu potencial de captura de CO_2 por carbonatação.

6.1.4 Termogravimetria das matérias-primas (TGA)

A figura 6.5 apresenta as curvas de termogravimetria (TG) e sua derivada (DTG) das matérias-primas utilizadas na produção das placas cimentícias, correspondentes ao cimento CPV-ARI, ao calcário e à celulose. A análise termogravimétrica permitiu identificar os principais eventos de decomposição térmica de cada material, fornecendo informações relevantes sobre sua composição mineralógica e estabilidade térmica, aspectos que influenciam diretamente o comportamento do compósito durante a hidratação e a carbonatação.

Figura 6.5 – Análise termogravimétrica das matérias-primas empregadas na produção do fibrocimento.



Fonte: Autoria própria (2026).

Observa-se que o cimento CPV-ARI (Figura 6.5a) apresentou elevada estabilidade térmica até aproximadamente 600ºC, mantendo praticamente constante sua massa nessa faixa de temperatura. Pequenas perdas de massa observadas entre 50 e 170ºC estão associadas à evaporação da água fisicamente adsorvida e à desidratação inicial dos produtos hidratados.

Entre 400 e 520 ºC, verifica-se um discreto evento na curva DTG relacionado à desidroxilação da portlandita ($Ca(OH)_2$). Esses eventos termogravimétricos são compatíveis com a desidratação e decomposição dos produtos de hidratação em materiais cimentícios (Hallet et al., 2022; Vogler et al., 2022). A presença dessas pequenas quantidades de fases hidratadas no cimento pode estar relacionada à exposição do produto comercial à umidade durante o período anterior à sua aquisição e utilização nesta pesquisa. Dessa forma, o evento observado não indica necessariamente hidratação significativa do cimento, mas pode refletir uma hidratação parcial decorrente das condições de armazenamento.

A perda de massa mais pronunciada ocorre entre 650 e 780 ºC, sendo atribuída à decomposição do carbonato de cálcio presente no cimento, proveniente da adição de *fíller* calcário e da carbonatação parcial ocorrida durante o armazenamento do material (Zhang; Wang; Chen, 2024).

O calcário apresentou comportamento térmico característico de um material predominantemente carbonático (Figura 6.5a). A curva TG permaneceu praticamente constante até 600 ºC, indicando elevada estabilidade térmica nessa faixa de temperatura. Entretanto, observa-se um discreto evento na curva DTG em torno de 400 ºC, acompanhado de uma pequena variação de massa, que pode ser atribuído à decomposição inicial da fração de magnésio presente no material na forma de $Mg(OH)_2$. Essa interpretação é coerente com a composição química obtida por FRX, que revelou teor de 3,32% de MgO, sugerindo a presença de pequenas quantidades de minerais carbonáticos magnesianos, como a brucita como sugestão para esse evento, frequentemente encontrada como fase acessória em calcários naturais (Molano et al., 2022).

O principal evento térmico ocorreu entre 635 e 880 ºC, sendo evidenciado por uma acentuada perda de massa na curva TG e por um intenso pico negativo na curva DTG, característico da descarbonatação da calcita. Nessa etapa ocorre a decomposição do $CaCO_3$, com formação de CaO e liberação de CO_2 (Possan et al., 2017). A perda de massa observada foi de 40,79%, valor muito próximo do teor de CO_2 esperado para a decomposição do carbonato de cálcio puro (43,9%), indicando que o material apresenta elevado teor de fase carbonática.

Esse comportamento térmico está em concordância com os resultados da caracterização química, que evidenciaram teores elevados de CaO (49,89%) e perda ao fogo de 39,56%, confirmando que o calcário empregado é predominante constituído por calcita, contendo apenas pequenas quantidades de impurezas minerais.

A celulose apresentada na Figura 6.5b obteve uma curva térmica diferente dos materiais minerais apresentados, caracterizada pela degradação em faixas intermediárias. Inicialmente,

observa-se pequena perda de massa até 100 ºC, correspondente à evaporação da umidade absorvida pelas fibras, consequência do caráter altamente hidrofílico da celulose (Yan; Kasal; Huang, 2016). Entre 250 e 380 ºC ocorre o principal evento de degradação térmica evidenciando por um pico na curva DTG próximo de 340 ºC, associando à ruptura das cadeias de celulose e à degradação da estrutura polissacarídica (Poletto et al., 2012).

Esse processo envolve inicialmente a degradação das regiões amorfas da fibra, seguida pela decomposição das regiões cristalinas, produzindo compostos voláteis, alcatrão, água e gases como CO, CO_2 e hidrocarbonetos leves (Mamleev; Bourbigot; Yvon, 2007). Após essa etapa principal, verifica-se uma perda gradual de massa até 800 ºC, atribuída à degradação lenta do carbono residual (char) formado durante a pirólise (Poletto et al., 2012). Ao final do ensaio, permanece apenas pequena fração residual, inferior a 15%, indicando elevada conversão térmica do material orgânico.

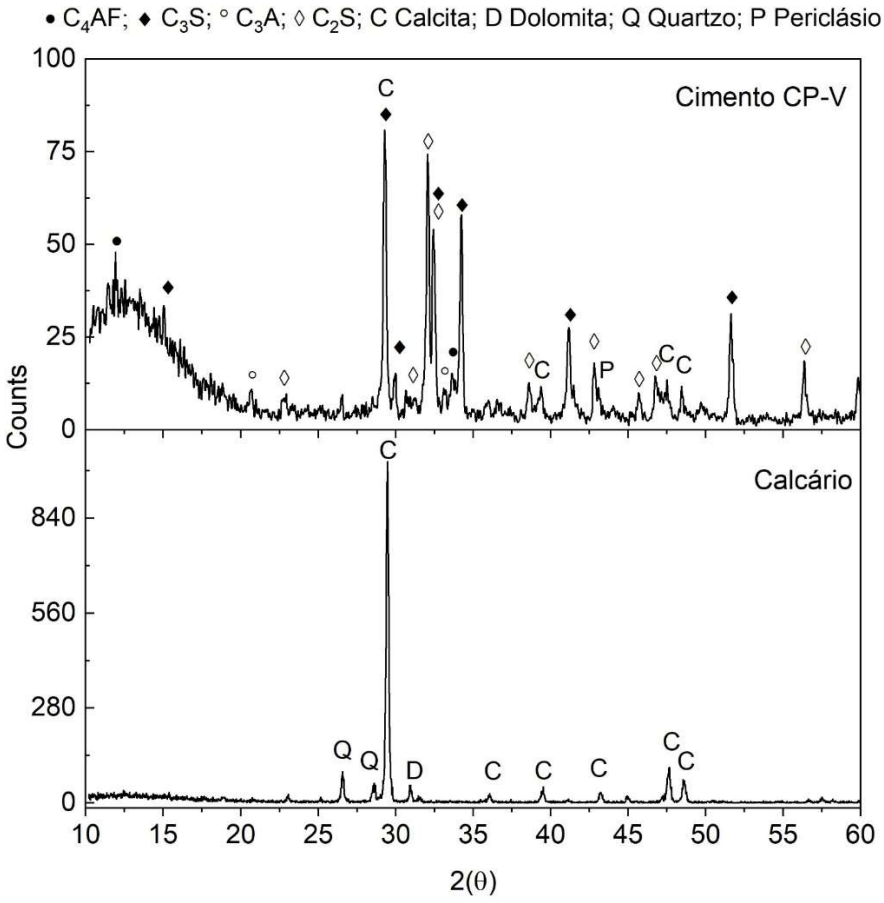
O intenso pico observado na DTG demonstra que a celulose possui uma faixa estreita de decomposição, típica de fibras lignocelulósicas com baixo teor de lignina. Esse comportamento está de acordo com Mamleev, Bourbigot e Yvon (2007) que relatam a degradação da celulose entre 300 e 380 ºC, assim como descrevem a elevada estabilidade térmica da celulose até 250 ºC, seguida por rápida decomposição das cadeias poliméricas.

De maneira geral, a análise termogravimétrica evidencia comportamentos térmicos distintos entre as matérias-primas utilizadas na produção do fibrocimento. Enquanto o cimento e o calcário apresentam estabilidade térmica devido a predominância de fases minerais, a celulose exibe intensa degradação em temperaturas intermediárias, inerentes aos materiais orgânicos. Esses resultados são importantes para a interpretação das análises termogravimétricas das placas cimentícias produzidas, pois permitem identificar posteriormente as contribuições individuais da desidratação dos produtos de hidratação, da desidroxilação da portlandita, da descarbonatação dos carbonatos e da degradação das fibras celulósicas, possibilitando uma avaliação mais precisas da evolução da hidratação e do processo de carbonatação dos compósitos ao longo do tempo.

6.1.5 Difração de Raios X (DRX) e discussão mineralógica

A análise mineralógica qualitativa por difração de raios X (DRX), apresentada na Figura 6.6, permitiu a identificação rigorosa das fases cristalinas presentes na matéria-prima de calcário moído e no cimento Portland CPV-ARI. Os perfis de difração revelam dinâmicas estruturais distintas que são corroboradas pelas análises complementares de FRX (Tabela 6.1) e TG/DTG (Figura 6.5a).

Figura 6.6 – Difratogramas de raios X do cimento CP-V e do calcário.



Fonte: Autoria própria (2026).

Para a amostra de cimento CPV-ARI, o padrão de DRX exibe um perfil de alta complexidade estrutural, caracterizado pela sobreposição de múltiplos picos na região entre 32º e 34º (2θ). Foram indexadas as fases anidras majoritárias do clínquer: o silicato tricálcico (alita ou C_3S, ICDD 00-016-0407) e o silicato dicálcico (belita ou C_2S, ICDD 01-087-1259), fundamentais para o desempenho mecânico do aglomerante. A formação dessas fases é quimicamente viabilizada pela abundância de CaO (60,65%) e SiO_2 (16,69%) na FRX. Além disso, foram identificadas as fases cristalinas do aluminato tricálcico (C_3A, ICDD 00-033-0251) e do ferroaluminato tetracálcico (ferrita ou C_4F, ICDD 00-030-0226), alinhando-se aos teores de Al_2O_3 (3,76%) e Fe_2O_3 (2,46%) da análise química. Adicionalmente, o DRX acusou picos residuais de periclásio (MgO, ICDD 00-019-0771), mineral associado ao teor de MgO (4,57%) do cimento.

No difratograma do cimento é possível destacar a identificação de picos de calcita ($CaCO_3$). Essa evidência mineralógica é de suma importância, pois justifica a LOI de 6,29%

observada na FRX e relaciona-se diretamente com o segundo evento térmico registrado na DTG do cimento (faixa entre 650 ºC e 750 ºC). Essa descarbonatação em temperatura inferior à do calcário comprova o estado finamente dividido do mineral, confirmando que a fase identificada por DRX decorre da incorporação de *filler* calcário na formulação do cimento comercial e/ou de processos de carbonatação ambiental durante o manuseio.

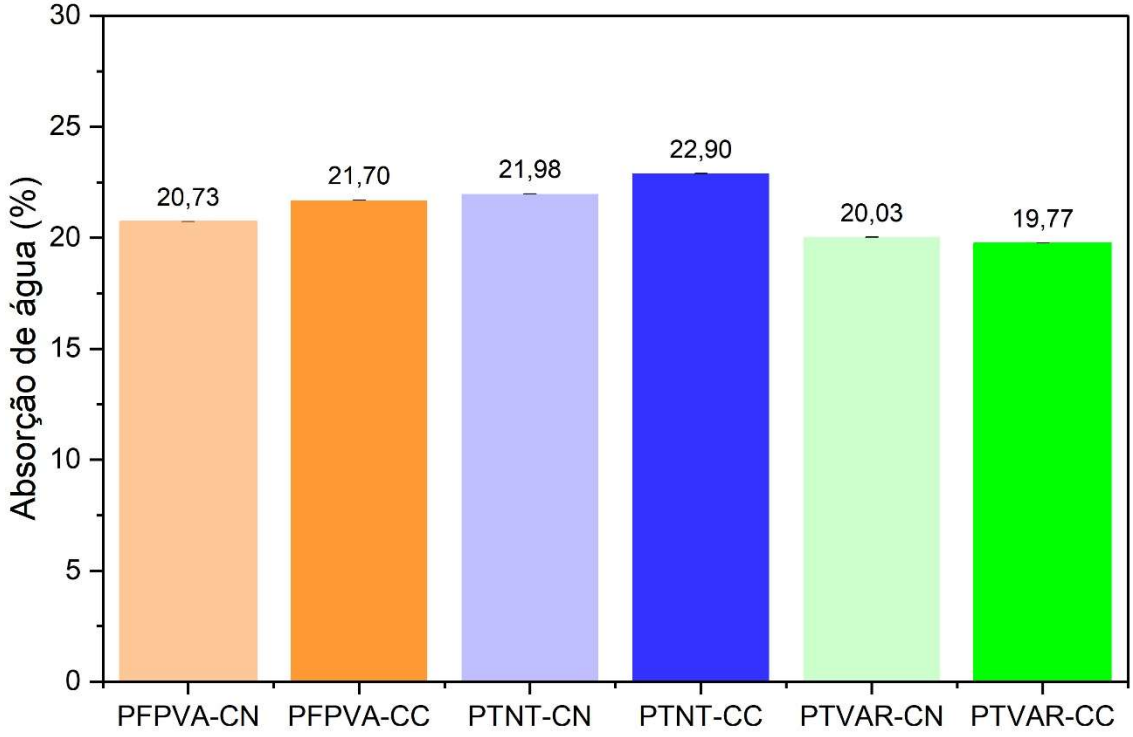
No difratograma do calcário, observa-se uma matriz constituída por calcita, indexada sob o código de referência ICDD 01-081-2027, cujo pico principal de máxima intensidade ocorre de forma proeminente em aproximadamente 2θ = 29,4º. Essa soberania de fase é respaldada quimicamente pelo elevado teor de CaO (49,89%) obtido via FRX, e fisicamente pelo intenso e único evento de perda de massa observado na curva TG/DTG entre 600 e 850 ºC, característico da descarbonatação da calcita. A perda de massa de total na TG (aproximadamente 40%) apresenta perfeita equivalência com a perda ao fogo (LOI de 39,56%) da FRX, chancelando a natureza carbonática da rocha. Como fases minoritárias associadas a impurezas cristalinas, o DRX revelou picos de quartzo livre (SiO_2, ICDD 01-074-1811) e dolomita [$CaMg(CO_3)_2$, ICDD 00-036-0426]. A presença dessas fases secundárias justifica os teores medidos por FRX de SiO_2 (4,50%) e MgO (3,32%). No entanto, a curva DTG não permite inferir a presença de dolomita, uma vez que o traçado do calcário exibe um evento característico da descarbonatação da calcita e outro referente a brucita devido a quantificação do MgO presente no calcário, evidenciando que a baixa concentração do mineral duplo tem sua decomposição térmica cineticamente sobreposta e incorporada pelo massivo evento de liberação de CO_2 da calcita.

6.2 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DAS PLACAS CIMENTÍCIAS

6.2.1 Absorção de água e Porosidade total

A Figura 6.7 apresenta os valores de absorção de água das placas cimentícias para as três configurações de reforço (PFPVA, PTNT e PTVAR), sob carbonatação natural (CN) e carbonatação em câmara (CC). A absorção de água, em percentual de massa, quantifica a quantidade de água que penetra nos vazios acessíveis da amostra em relação à sua massa seca, sendo, portanto, uma propriedade associada à massa do compósito.

Figura 6.7 – Absorção de água das amostras em condições de carbonatação natural e acelerada.



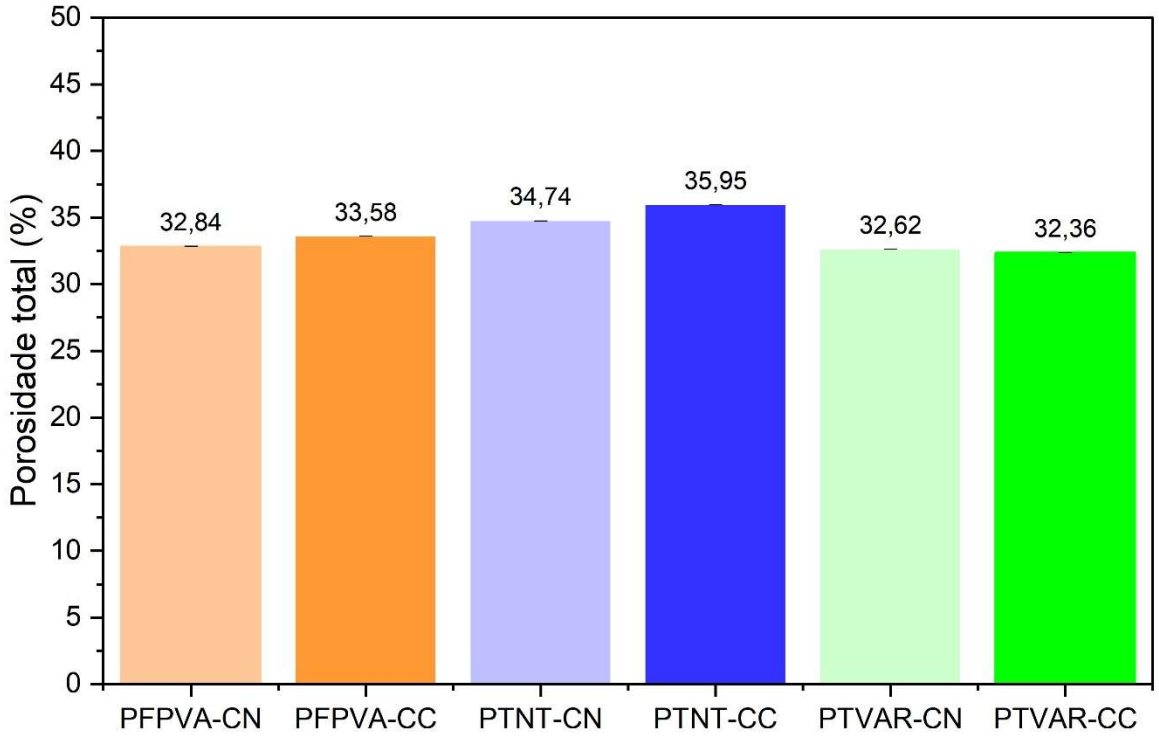
Fonte: Autoria própria (2026).

Sob carbonatação natural, as placas com fibras de PVA (PFPVA-CN) apresentaram absorção média de 20,73%, as placas com TNT (PTNT-CN) atingiram 21,98% e as placas com TVAR (PTVAR-CN) registraram 20,03%. Na carbonatação em câmara, esses valores passaram para 21,70% (PFPVA-CC), 22,90% (PTNT-CC) e 19,77% (PTVAR-CC). Em ambos os regimes, o sistema PTNT apresenta os maiores valores de absorção de água, seguido pelo PFPVA, enquanto o PTVAR mantém as menores absorções.

Esse comportamento indica que o reforço com TNT tende a gerar uma matriz com maior quantidade de vazios acessíveis à água, favorecendo a penetração de fluido por capilaridade. Em termos físicos, significa que, para um mesmo volume de placa, o sistema PTNT possui uma fração maior de massa de água capaz de ocupar os vazios, sugerindo uma estrutura menos densificada quando comparada às placas com PVA e, sobretudo, com TVAR. Já as menores absorções observadas para PTVAR, especialmente em CC (19,77%), são coerentes com a malha de vidro álcali resistente, porém, considerando que a camada de proteção álcali-resistente dos fios impedem que a água penetre na região dos filamentos, o que na prática favorece a formação de regiões de matriz mais contínuas entre os fios, reduzindo a conectividade dos poros capilares. A afinidade entre a água dos poros e a superfície dos fios, também pode ter favorecido uma zona de transição mais densa e consequentemente menos permeável.

A Figura 6.8 apresenta os valores de porosidade total das placas, calculada como a razão entre o volume de vazios e o volume total da amostra. Ao contrário da absorção de água, que é uma propriedade de massa, a porosidade total é uma propriedade volumétrica, pois descreve o percentual de volume ocupado por vazios no interior do compósito. Sob carbonatação natural, PFPVA-CN apresenta porosidade de 32,84%, PTNT-CN de 34,74% e PTVAR-CN de 32,62%. Na carbonatação em câmara, esses valores passam para 33,58% (PFPVA-CC), 35,95% (PTNT-CC) e 32,36% (PTVAR-CC).

Figura 6.8 – Porosidade total das amostras em condições de carbonatação natural e acelerada.



Fonte: Autoria própria (2026).

Observa-se que as placas com TNT mantêm os maiores valores de porosidade total em ambos os regimes, com um incremento de aproximadamente 1,2 pontos percentuais de CN para CC (34,74% → 35,95%). As placas com PVA também apresentam aumento moderado de porosidade (32,84% → 33,58%), enquanto as placas com TVAR exibem porosidade praticamente estável, com leve redução de 32,62% para 32,36%. Essa combinação de maior absorção de água e maior porosidade total para PTNT reforça a interpretação de que o tecido não tecido gera uma matriz mais aberta, com maior volume de vazios interconectados, ao passo que o TVAR produz uma estrutura interna mais compacta e com menor variação de porosidade entre CN e CC.

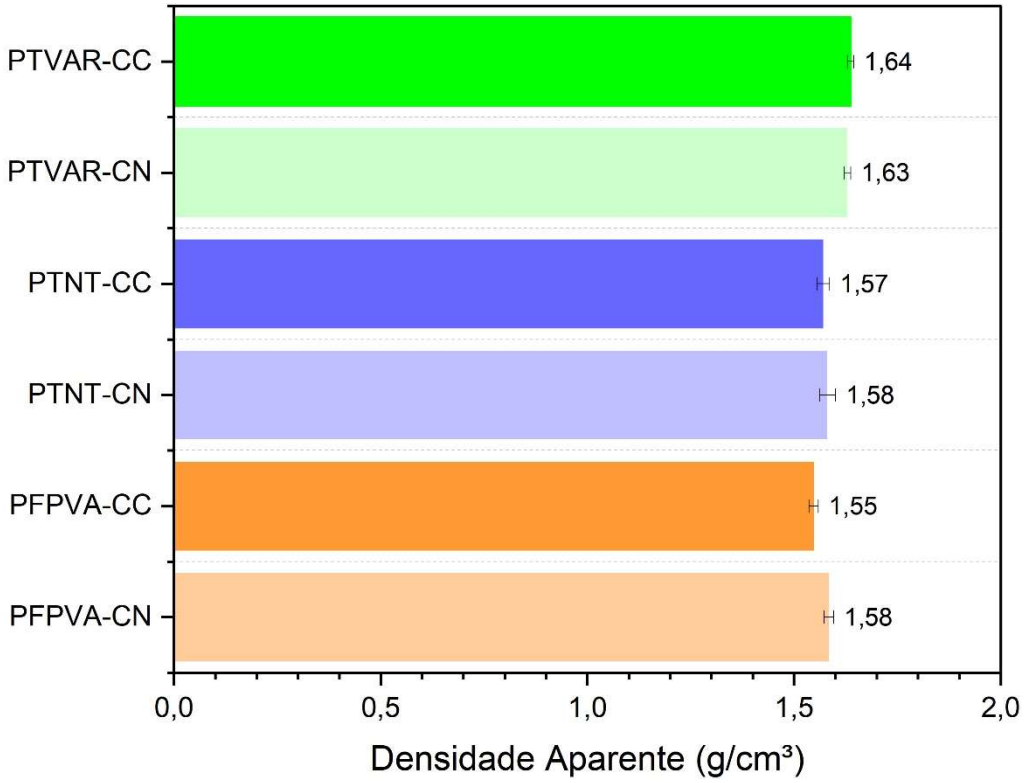
Em síntese, a análise conjunta de absorção de água e porosidade total confirma que o reforço com TNT tende a produzir placas mais porosas e menos densas em termos de massa de sólido por unidade de volume de vazios acessíveis, enquanto os sistemas com PVA e TVAR resultam em matrizes mais compactas. Essa diferenciação da estrutura porosa é fundamental para entender o comportamento subsequente das placas frente à carbonatação natural e em câmara, pois influencia diretamente a difusão de CO_2, a velocidade de reação e os ganhos de densidade decorrentes da formação de produtos carbonatados, que serão discutidos nas seções 6.3, 6.5 e 6.6.

6.2.2 Densidade aparente e real

A densidade das placas cimentícias foi avaliada em termos de densidade aparente (ρ_{ap}) e densidade real (ρ_{real}), permitindo analisar, respectivamente, a quantidade de massa total por unidade de volume da placa, incluindo vazios, e a quantidade de massa de sólido por unidade de volume efetivamente ocupado pela fase sólida. Enquanto a densidade aparente reflete diretamente o efeito da porosidade global do compósito, a densidade real está mais ligada à compactação da matriz e à composição da fase sólida.

A Figura 6.9 apresenta os valores médios de densidade aparente das placas sob carbonatação natural (CN) e acelerada (CC). Para o sistema com TVAR, ρ_{ap} é de 1,64 g/cm^3 em CA e 1,63 g/cm^3 em CN. Nas placas com TNT, os valores são 1,57 g/cm^3 (CC) e 1,58 g/cm^3 (CN). Já nas placas com PVA, a densidade aparente é de 1,55 g/cm^3 em CC e 1,58 g/cm^3 em CN. Observa-se que, em todos os casos, as diferenças entre CN e CC são pequenas, com variações da ordem de centésimos ou décimos de g/cm^3.

Figura 6.9 – Densidade aparente das amostras em condições de carbonatação natural e em câmara.

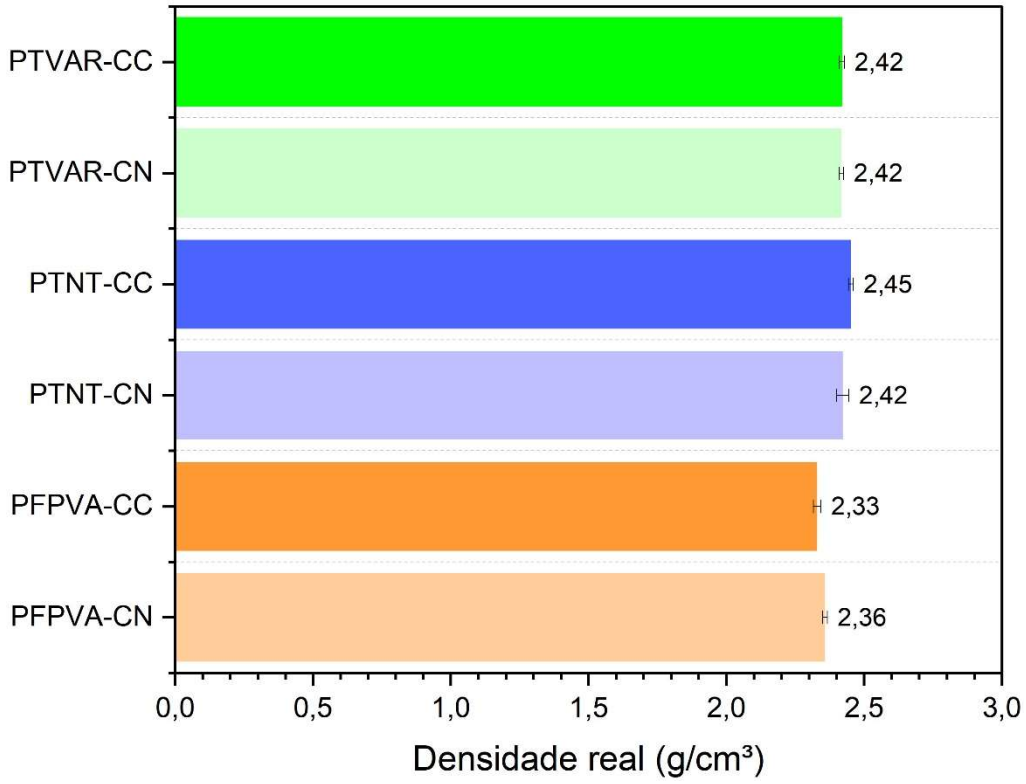


Fonte: Autoria própria (2026).

Em termos comparativos, as placas com TVAR apresentam as maiores densidades aparentes (≈1,63–1,64 g/cm³), seguidas de perto pelas placas PFPVA (≈1,55–1,58 g/cm^3) e, por último, pelas placas PTNT (≈1,57–1,58 g/cm^3). Essas diferenças, embora mínimas, são coerentes com os resultados de absorção de água e porosidade total: o sistema TVAR, com menores absorções e porosidades mais baixas, tende a formar uma matriz ligeiramente mais compacta, enquanto o TNT, com maiores porosidades e absorções, e o PVA, com porosidade intermediária, resultam em densidades aparentes ligeiramente menores.

A densidade real das placas (Figura 6.10) complementa essa leitura. Para o TVAR, ρ_{real} permaneceu estável em ambas condições com 2,42 g/cm^3; para o TNT, a densidade real é de 2,42 g/cm^3 em CN e 2,45 g/cm^3 em CC; e, para o PVA, ρ_{real} passa de 2,36 g/cm^3 em CN para 2,33 g/cm^3 em CC. Esses valores indicam que, na escala da fase sólida, há uma tendência de leve aumento de densidade em CC para TVAR e TNT, enquanto o PVA apresenta uma pequena redução. Mais uma vez, as variações são relativamente modestas.

Figura 6.10 – Densidade real das amostras em condições de carbonatação natural e em câmara.



Fonte: Autoria própria (2026).

Do ponto de vista teórico, é esperado que a carbonatação, sobretudo em regime acelerado, promova alguma densificação da matriz pela formação de $CaCO_3$ em poros capilares e pela transformação de produtos hidratados, o que se traduz em aumento de densidade e redução de porosidade em muitos estudos com pastas e concretos. No presente trabalho, os resultados mostraram um quadro mais nuançado: a porosidade total aumentou em CC para PFPVA e PTNT, e manteve-se praticamente estável para PTVAR, enquanto as densidades aparente e real variaram apenas discretamente. Esse balanço sugere que, nas condições de ensaio utilizadas, a carbonatação em câmara não produziu um fechamento de poros tão marcado como o que se observa em concretos convencionais, possivelmente devido ao tipo de matriz, ao grau de saturação e à presença dos reforços têxteis e fibrosos.

Em síntese, os resultados de densidade aparente e real indicam que as placas com TVAR tendem a apresentar matriz ligeiramente mais compacta, em linha com suas menores porosidades e absorções de água, enquanto as placas com TNT e PVA exibem densidades um pouco menores, associadas a estruturas mais porosas. As diferenças entre CN e CC são pequenas e devem ser interpretadas com prudência, como indicações de tendência e não como evidências definitivas de mecanismos distintos. Essa leitura será retomada na discussão

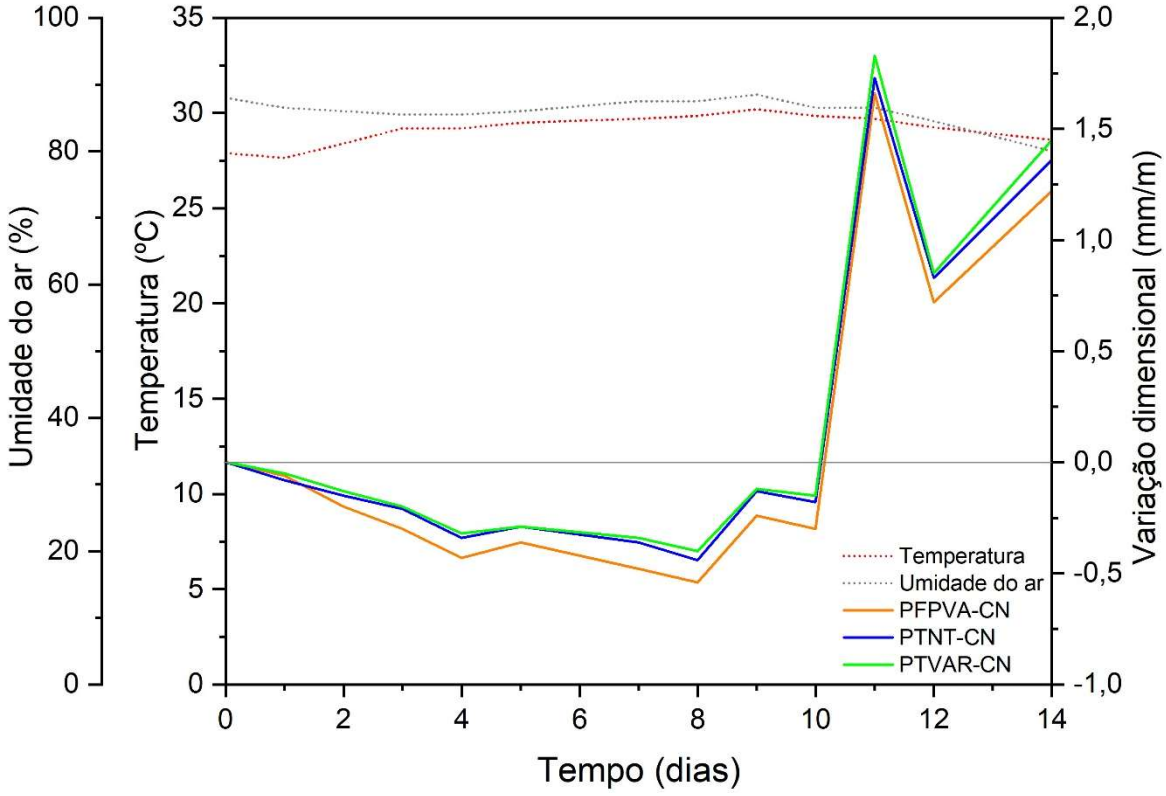
integrada das seções 6.4 e 6.5, ao relacionar densidade, porosidade e carbonatação com o desempenho mecânico das placas.

6.3 VARIAÇÃO DIMENSIONAL POR CARBONATAÇÃO

6.3.1 Carbonatação natural

A Figura 6.11 apresenta a variação dimensional longitudinal das placas cimentícias submetidas à exposição natural, monitorada diariamente ao longo de 14 dias. A variação dimensional foi expressa em mm/m, tomando como referência a leitura inicial no tempo zero. Observou-se um comportamento dividido em duas etapas distintas: uma fase inicial de retração, seguida por uma fase de expansão relativamente pronunciada.

Figura 6.11 – Variação dimensional por carbonatação natural das amostras.



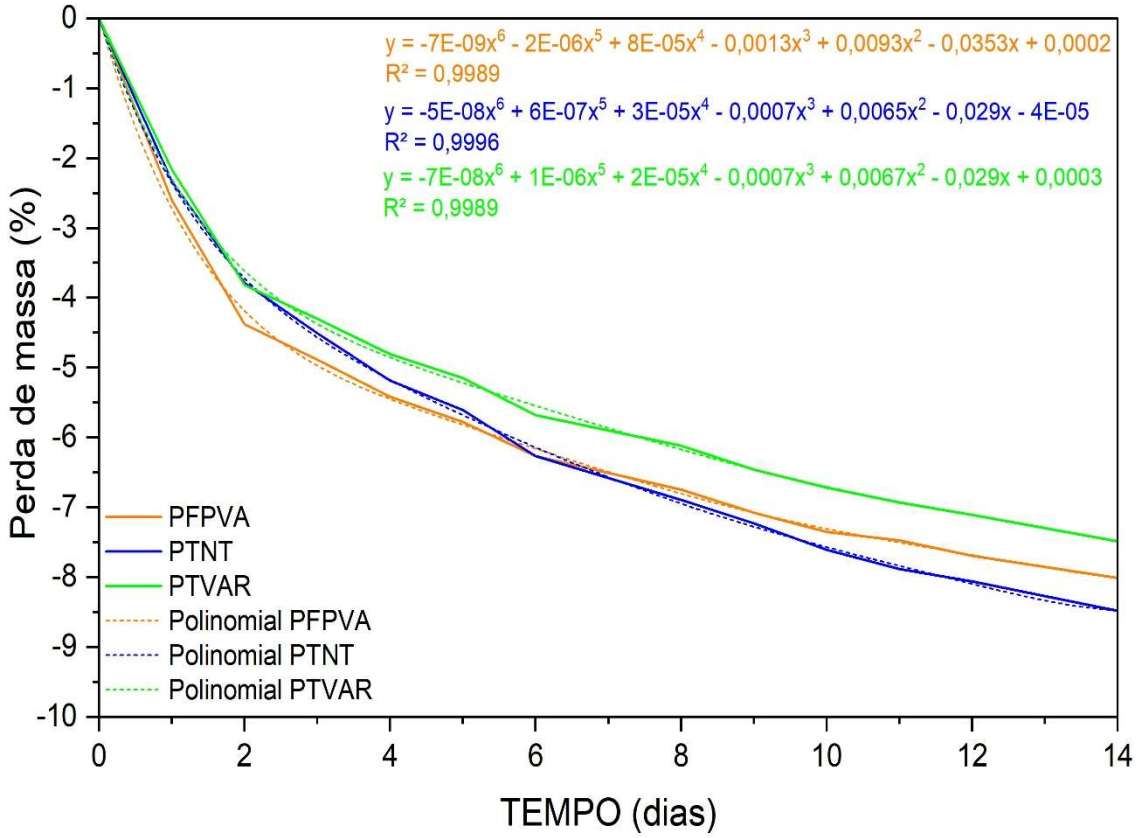
Fonte: Autoria própria (2026).

Na primeira fase, até aproximadamente o 8º dia, as placas apresentaram pequena retração, com valores progressivamente mais negativos. No 10º dia, a variação dimensional retornou a valores próximos de zero, indicando uma compensação do encurtamento inicial. A partir desse ponto, a tendência se inverteu, e as placas passaram a apresentar expansão. Entre

o 10º e o 11º dia, a variação dimensional evoluiu para aproximadamente 1,8 mm/m, o que representa um incremento de ordem 2 mm/m em 24 horas. Ao final do período de 14 dias, a variação dimensional estabilizou em torno de 1,4 mm/m, indicando uma expansão líquida significativa em escala de placa cimentícia.

A perda de massa por secagem (Figura 6.12), monitorada em paralelo, mostrou-se relativamente uniforme e compatível com uma secagem progressiva da placa (variação de aproximadamente 8% por corpo de prova entre 0 e 14 dias), o que sugere que a retração por secagem não foi o mecanismo dominante para explicar a evolução dimensional observada. Em materiais cimentícios, a retração por secagem tende a provocar encurtamento contínuo, enquanto a carbonatação pode causar, dependendo das fases hidratadas envolvidas, tanto retração quanto expansão, em função da transformação volumétrica dos produtos formados (Li et al., 2023b).

Figura 6.12 – Perda de massa por carbonatação natural das amostras.



Fonte: Autoria própria (2026).

Estudos recentes indicam que a carbonatação de diferentes fases hidratadas pode ter efeitos opostos sobre o volume (Li et al., 2023b; Xian; Logan; Shao, 2022; Ye; Radlińska;

Neves, 2017): a carbonatação de $Ca(OH)_2$ e de parte dos silicatos cálcicos (C_2S e C_3S) tende a causar expansão, enquanto a carbonatação de C-S-H e de etringita pode levar à retração (Li et al., 2023b). Além disso, o balanço entre colmatação de poros por $CaCO_3$ e formação de novos vazios pela descalcificação de C-S-H influencia diretamente a estabilidade dimensional de pastas e concretos carbonatados (Xian; Logan; Shao, 2022). Como conclusão dessa discussão sobre variação dimensional de pasta cimentícia na carbonatação, Ye, H.; Radlinska, A; Neves, J. (2017) afirmam que a carbonatação resulta em retração (denominada retração por carbonatação na literatura) em pastas de cimento comum (OPC – *ordinary Portland cement*, que se enquadra aos cimentos do tipo CPI e CPV-ARI, segundo as normas técnicas brasileiras), mas resultam em expansão em pastas de cimento comum que tenha alto teor de álcalis (Ye; Radlińska; Neves, 2017).

No presente estudo, a combinação de pequena retração inicial seguida de expansão sugere que, nos primeiros dias, mecanismos associados à secagem e à carbonatação de fases mais sensíveis à retração podem ter predominado, enquanto, em um segundo momento, a formação de carbonatos em maior escala passou a dominar o comportamento volumétrico, resultando em aumento de comprimento das amostras.

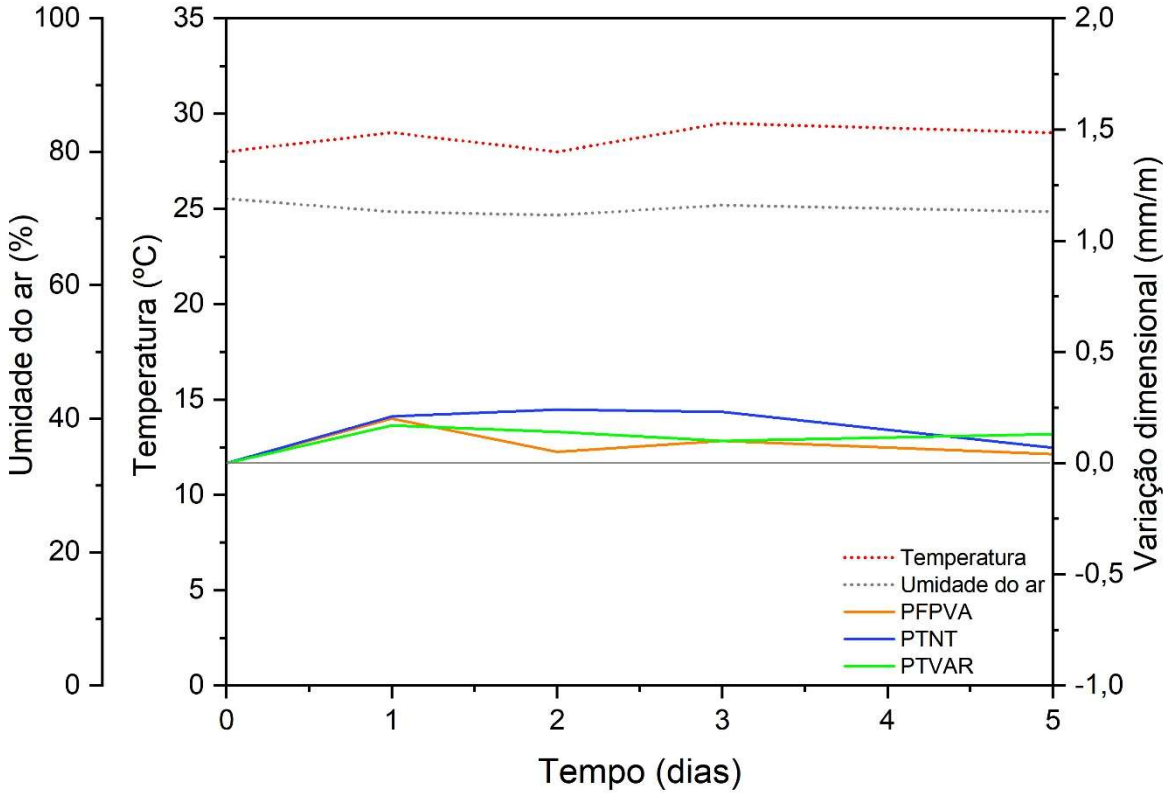
A magnitude da expansão medida, com pico em torno de 1,8 mm/m e valor final próximo de 1,4 mm/m, é elevada quando comparada a concretos de uso comum. Entretanto, em placas delgadas de fibrocimento e compósitos cimentícios reforçados, deformações lineares nessa ordem de grandeza podem ocorrer em função da combinação de matriz mais porosa, presença de fibras de celulose e maior suscetibilidade a variações de umidade e temperatura. Cabe destacar que, na ausência de monitoramento microestrutural contínuo ou de ensaios complementares específicos (por exemplo, calorimetria ou distribuição de produtos carbonatados ao longo do tempo), não é possível atribuir com segurança uma causa única para o comportamento observado, devendo essas interpretações ser tratadas como hipóteses de trabalho.

Em resumo, a carbonatação natural das placas analisadas resultou em um comportamento volumétrico composto por retração inicial e expansão subsequente, com deformações máximas da ordem de 1–2 mm/m em escala de 14 dias. Esse resultado reforça a necessidade de considerar, em placas cimentícias planas, não apenas a retração por secagem, mas também os efeitos da carbonatação natural e da interação com reforços têxteis na avaliação da estabilidade dimensional. A compreensão detalhada desses mecanismos será aprofundada na seção 6.5, em conjunto com as análises de profundidade de carbonatação e de microestrutura.

6.3.2 Carbonatação em câmara

A Figura 6.13 apresenta a variação dimensional longitudinal das placas cimentícias durante o período de sazonamento, realizado antes da exposição em câmara com atmosfera enriquecida em CO_2. A variação dimensional foi expressa em mm/m, tomando como referência a leitura inicial no tempo zero. Observa-se que todas as formulações apresentaram comportamento semelhante, caracterizado por uma expansão inicial, decorrente da absorção de água do ambiente após a secagem de 18h em estufa, com variações conduzidas especialmente pelo tipo de reforço ao longo dos cinco dias de monitoramento.

Figura 6.13 – Variação dimensional durante sazonamento de amostras pré-carbonatação em câmara.



Fonte: Autoria própria (2026).

Nos primeiros dias de sazonamento ocorreu a maior expansão, atingindo 0,18 mm/m para PTVAR, 0,20 mm/m para a PFPVA e cerca de 0,24 mm/m para a PTNT. Após esse período, as deformações tenderam à estabilização, embora com comportamentos distintos entre as formulações. A amostra PFPVA apresentou redução gradual da variação dimensional atingindo o menor valor após o ensaio, enquanto a PTVAR permaneceu estável em 0,10 mm/m.

A PTNT manteve os maiores valores durante os 4 primeiros dias, apresentando uma redução nos últimos dois dias do ensaio, encerrando próxima de 0,08 mm/m.

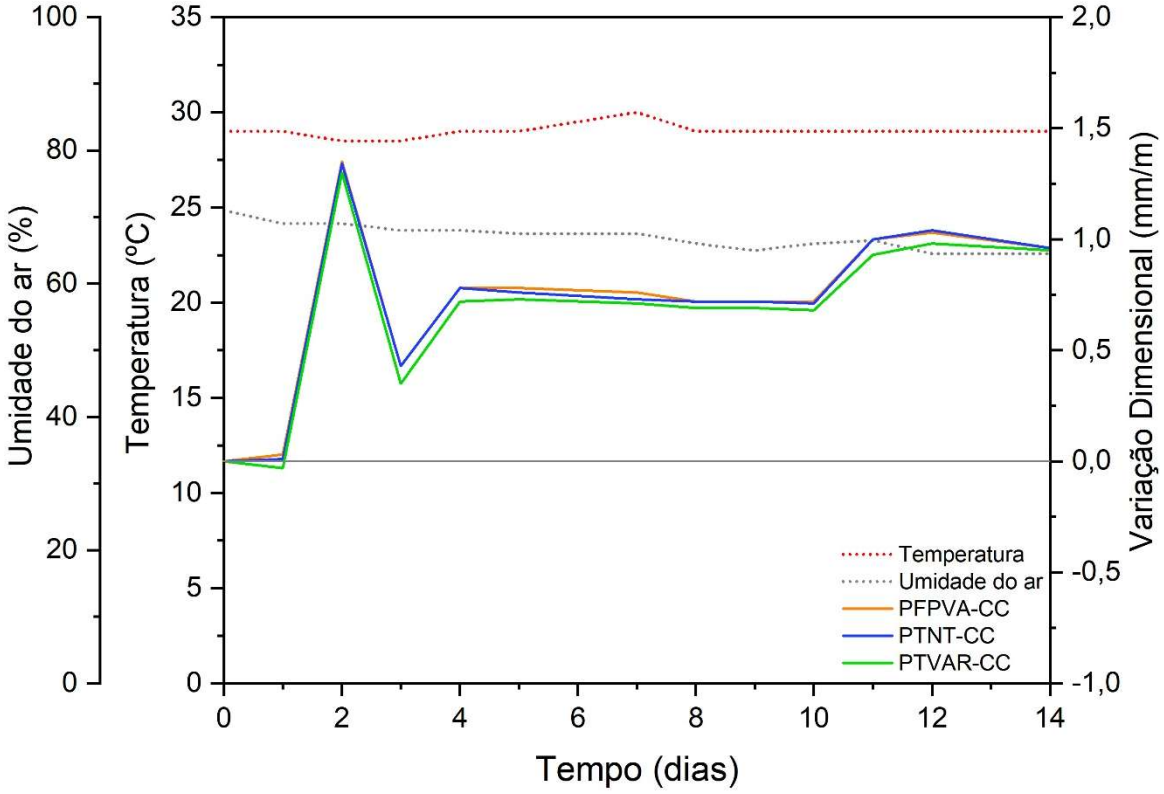
Esse comportamento é característico da retração por secagem em materiais cimentícios, fenômeno provocado pela evaporação da água livre presente nos poros capilares e pela continuidade das reações de hidratação do cimento. Durante essa etapa, a redução da umidade interna promove tensões capilares responsáveis pela contração da matriz cimentícia, sendo sua intensidade influenciada pela porosidade do material, pela relação água/cimento e pela presença de fibras de reforço (Neville, 2016; Mehta e Monteiro, 2014).

As diferenças observadas entre as formulações sugerem que o tipo de reforço influenciou a restrição das deformações de secagem. A menor retração final da PFPVA pode estar relacionada à elevada capacidade das fibras de PVA em controlar a abertura de microfissuras e redistribuir tensões internas, comportamento amplamente descrito na literatura para compósitos reforçados com fibras sintéticas. Por outro lado, a formulação PTNT apresentou maior suscetibilidade às deformações durante o sazonamento, enquanto PTVAR apresentou comportamento intermediário, indicando capacidade moderada de restringir a variação dimensional da matriz.

Ao final do sazonamento, todas as placas apresentavam deformações pequenas e estabilizadas, indicando que a retração por secagem das amostras já havia ocorrido antes do início da exposição em câmara. Essa condição é importante, pois reduz a influência desse fenômeno durante a exposição ao CO_2, permitindo que as deformações observadas posteriormente sejam atribuídas somente aos efeitos da carbonatação e às alterações microestruturais decorrentes dessa reação.

Após o período de sazonamento, as placas foram submetidas a exposição de 5% de concentração de CO_2 ao longo de 14 dias, onde a Figura 6.14 apresenta a evolução da variação dimensional longitudinal durante o ensaio. Foi observado que o comportamento entre as três formulações (PFPVA, PTNT e PTVAR) ocorreu de forma similar, caracterizado por uma expansão inicial acentuada, seguida por uma fase de estabilização e, posteriormente, por um novo incremento das deformações até o final do período experimental em todas as amostras.

Figura 6.14 – Variação dimensional por carbonatação das amostras em câmara.

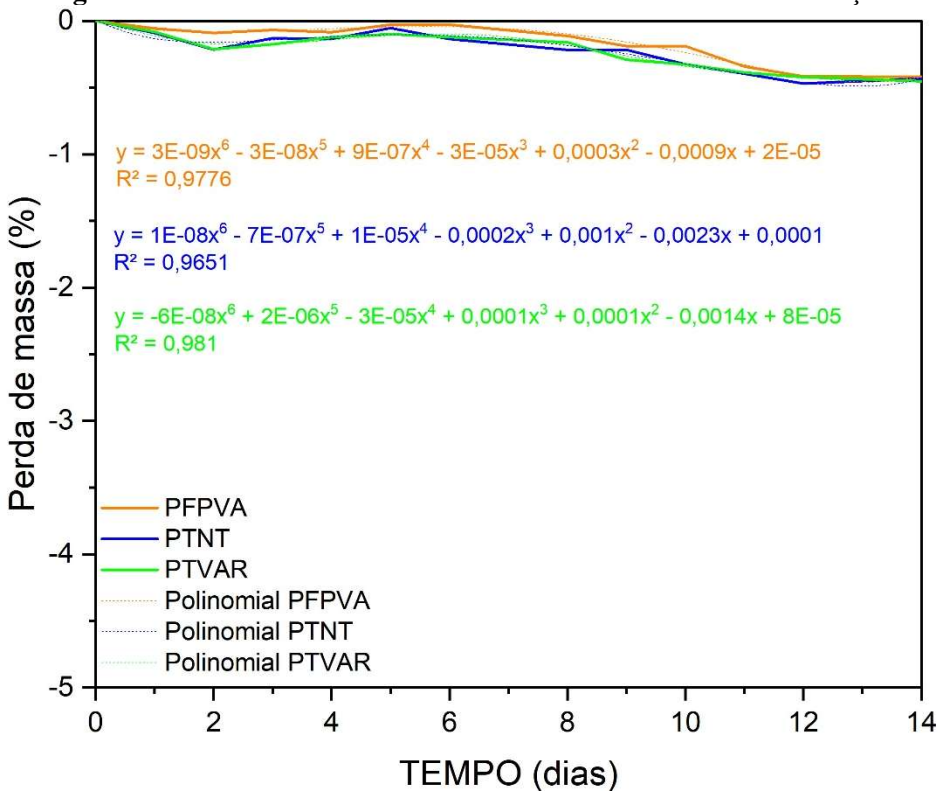


Fonte: Autoria própria (2026).

Nos dois primeiros dias de exposição ocorreu o maior incremento da expansão, atingindo aproximadamente 1,3 mm/m para todas as formulações. Após esse período, verificou-se uma redução dos valores para aproximadamente 0,7 mm/m, permanecendo relativamente constantes entre o 4º e o 10º dia. A partir do 11º dia ocorreu um novo aumento da variação dimensional, alcançando valores próximos a 1 mm/m ao final do ensaio. Embora as diferenças entre as formulações tenham sido pequenas, a amostra PTNT apresentou, de forma geral, os maiores valores de variação dimensional, enquanto a PTVAR apresentou comportamento ligeiramente mais estável, sugerindo maior restrição às deformações proporcionadas pelo reforço têxtil.

A perda de massa das placas, apresentada na Figura 6.15, ocorreu de forma gradual ao longo do período, atingindo 0,5g ao final do ensaio para todas as formulações, sem diferenças significativas aparentes. As curvas polinomiais ajustadas apresentaram elevados coeficientes de determinação (R^2 entre 0,96 e 0,98), indicando boa representatividade da tendência experimental. A perda de massa está associada principalmente à evaporação da água livre e da água fisicamente adsorvida, favorecida pelas condições controladas da câmara de carbonatação.

Figura 6.15 – Perda de massa das amostras em câmara de carbonatação.



Fonte: Autoria própria (2026).

A evolução simultânea da variação dimensional e da perda de massa indica que, nos primeiros dias de exposição, a remoção da água dos poros exerceu influência sobre as deformações observadas. Entretanto, à medida que a carbonatação avançou, outros mecanismos passaram a atuar de forma concomitante. A reação entre o dióxido de carbono e os produtos de hidratação do cimento promove a precipitação de carbonato de cálcio ($CaCO_3$), resultando no refinamento da estrutura porosa, enquanto a descalcificação do gel C-S-H pode induzir alterações volumétricas na matriz cimentícia (Li et al., 2023b; Ye; Radlińska; Neves, 2017). Dessa forma, a estabilização observada entre o quarto e o décimo dia representa um equilíbrio temporário entre a retração decorrente da secagem e as modificações microestruturais promovidas pela carbonatação.

Conforme discutido por Li et al. (2023) e Ye; Radlińska; Neves (2017), a resposta dimensional durante a carbonatação depende das fases hidratadas predominantes e das condições de exposição. A carbonatação do $Ca(OH)_2$ e de parte dos silicatos de cálcio hidratados pode resultar em alterações volumétricas distintas daquelas observadas durante a carbonatação do gel C-S-H, sendo o comportamento final consequência do balanço entre a

densificação promovida pela precipitação de $CaCO_3$, a descalcificação da matriz e a redistribuição da umidade dos poros. Em sistemas delgados, como placas cimentícias reforçadas com fibras, esses efeitos tendem a ser potencializados pela elevada relação área/volume, favorecendo uma carbonatação mais uniforme e rápida em toda a espessura do material.

Em síntese, a variação dimensional observada durante a carbonatação em câmara promoveu uma expansão inicial intensa, seguida por um período de estabilização e posterior aumento moderado das deformações até o final do ensaio. Associada à baixa perda gradual de massa, essa evolução indica que a estabilidade dimensional das placas resulta da interação entre os processos de secagem, hidratação residual e carbonatação da matriz cimentícia. Esses resultados serão complementados pelas análises de profundidade de carbonatação e microestrutura apresentada na seção 6.5, permitindo uma compreensão mais abrangente dos mecanismos envolvidos.

6.4 COMPORTAMENTO MECÂNICO DO FIBROCIMENTO

A Tabela 6.3 apresenta os resultados do ensaio de flexão em três pontos das placas cimentícias submetidas à condição de carbonatação natural (CN) e carbonatação em câmara (CC), ambas após 14 dias de exposição. Os parâmetros avaliados incluem o módulo de ruptura (MOR), limite de proporcionalidade (LOP), deflexão máxima, módulo de elasticidade e tenacidade, permitindo analisar tanto a capacidade resistente quanto o comportamento pós-fissuração dos diferentes sistemas de reforço.

Tabela 6.3 – Caracterização da resistência mecânica à flexão 3 pontos sob CN e CC.

AMOSTRAS	MOR (MPa)	LOP (MPa)	DEFLEXÃO MÁXIMA (mm)	MÓDULO DE ELASTICIDADE (GPa)	TENACIDADE (KJ/m²)
PFPVA - CN	5,08	4,58	0,11	13,25	2210,72
PTNT - CN	5,63	5,57	0,11	12,72	1023,02
PTVAR - CN	13,45	5,91	0,26	12,98	11067,73
PFPVA - CC	5,19	4,63	0,11	12,71	2798,84
PTNT - CC	5,10	4,42	0,11	11,82	1116,63
PTVAR - CC	10,94	6,01	0,24	11,69	9700,20

Fonte: Autoria própria (2026).

Sob carbonatação natural, as placas PFPVA e PTNT atingiram a classe 1, enquanto a PTVAR alcançou a classe 3, conforme a norma NBR 15498 (ABNT, 2016). Após a exposição em câmara, PFPVA e PTNT mantiveram-se na classe 1, enquanto a PTVAR apresentou

desempenho correspondente a classe 2, indicando potencial de aplicação em ambientes internos, considerando exclusivamente o requisito de resistência à flexão.

6.4.1 Resistência à flexão (MOR e LOP)

Foi observado que a amostra PTVAR apresentou desempenho mecânico significativamente superior às demais formulações em ambas as condições de exposição. Sob carbonatação natural, o MOR atingiu 13,45 MPa, enquanto na exposição em câmara houve redução para 10,94 MPa, o que corresponde a uma diminuição aproximada de 18,7%. Apesar dessa redução, os valores permaneceram muito superiores aos obtidos pelas placas reforçadas com TNT e fibras de PVA, indicando que o TVAR foi mais eficiente na absorção e transferência das tensões após o surgimento da primeira fissura, promovendo um comportamento pseudodúctil característico de compósitos reforçados com fibras contínuas.

As placas PFPVA apresentaram comportamento estável em relação ao MOR, passando de 5,08 MPa (CN) para 5,19 MPa (CC), representando um aumento discreto de aproximadamente 2,1% dentro da variabilidade observada para esse tipo de ensaio. Já as placas PTNT sofreram pequena redução, de 5,63 MPa para 5,10 MPa, equivalente a cerca de 9,4%, indicando que a carbonatação acelerada exerceu influência moderada sobre sua resistência última à flexão.

O limite de proporcionalidade (LOP), associado ao início da fissuração da matriz, apresentou comportamento distinto do MOR. Enquanto PFPVA e PTVAR registraram pequenos aumentos após a carbonatação em câmara (1,0% e 1,7%, respectivamente), a formulação PTNT apresentou redução de 20,6%, evidenciando menor capacidade de suportar tensões na fase elástica inicial. Esses resultados indicam que a influência do tipo de reforço antes da primeira fissura é relativamente limitada, uma vez que essa propriedade depende da matriz cimentícia. O ganho observado para a PTVAR decorre da melhor interação entre o tecido e a matriz, proporcionando ligeiro aumento da rigidez inicial do compósito.

6.4.2 Módulo de elasticidade e Tenacidade

Quanto ao módulo de elasticidade, todas as formulações apresentaram redução após a carbonatação em câmara. A diminuição foi de aproximadamente 4,1% para PFPVA, 7,1% para PTNT e 10% para TVAR. Os valores desse índice permaneceram relativamente próximos entre as três formulações em diferentes condições de exposição, variando de 11,69 GPa (PTVAR-CC a 13,25 GPa (PFPVA-CN). A pequena variação indica que a rigidez inicial do compósito

foi governada pela matriz cimentícia, enquanto o tipo de reforço exerceu maior influência apenas após o início da fissuração. Esse comportamento é observado em compósitos cimentícios reforçados com fibras, nos quais o reforço atua na fase pós-elástica (Silva; Mobasher; Filho, 2009; Teixeira et al., 2022).

A diferença mais significativa entre as amostras foi observada na tenacidade, parâmetro que representa a energia absorvida até a ruptura. A PTVAR apresentou valores superiores aos demais, atingindo 11067,73 kJ/m^2 na condição natural e 9700,20 kJ/m^2 após carbonatação acelerada, redução de 12,4%. Apesar desta queda, a capacidade de absorção de energia permaneceu cerca de quatro vezes superior às placas PFPVA e quase dez vezes superior às placas PTNT, mostrando a elevada eficiência do TVAR em promover um comportamento mais dúctil, permitindo maior dissipação de energia durante o carregamento. Por outro lado, as placas PFPVA apresentaram aumento expressivo da tenacidade, passando de 2210,72 para 2798,84 kJ/m², incremento de 26,6% com a exposição em câmara. As placas PTNT também apresentou aumento da tenacidade de 9,2% com a aceleração da carbonatação (1023,02 para 1116,63 kJ/m²), embora seus valores absolutos ainda sejam inferiores às demais formulações.

Os resultados da Tabela 6.3 demonstram que a carbonatação em câmara não afetou todas as formulações da mesma maneira. Enquanto os indicadores mecânicos do PTVAR apresentaram redução, ainda assim, sua superioridade mecânica foi preservada independente da condição de exposição, devido à contribuição do reforço como elemento estrutural na placa. Em contrapartida, a carbonatação acelerada favoreceu o comportamento pós-fissuração da PFPVA, aumentando a tenacidade sem comprometer a resistência mecânica. Esses resultados corroboram a literatura, a qual aponta que reforços contínuos, organizados em tecidos bidirecionais, promovem maior eficiência estrutural em compósitos cimentícios do que fibras curtas ou reforços de orientação aleatória, especialmente em solicitações de flexão (Rodrigues, 2022).

6.4.3 Deflexão máxima e discussão do comportamento mecânico

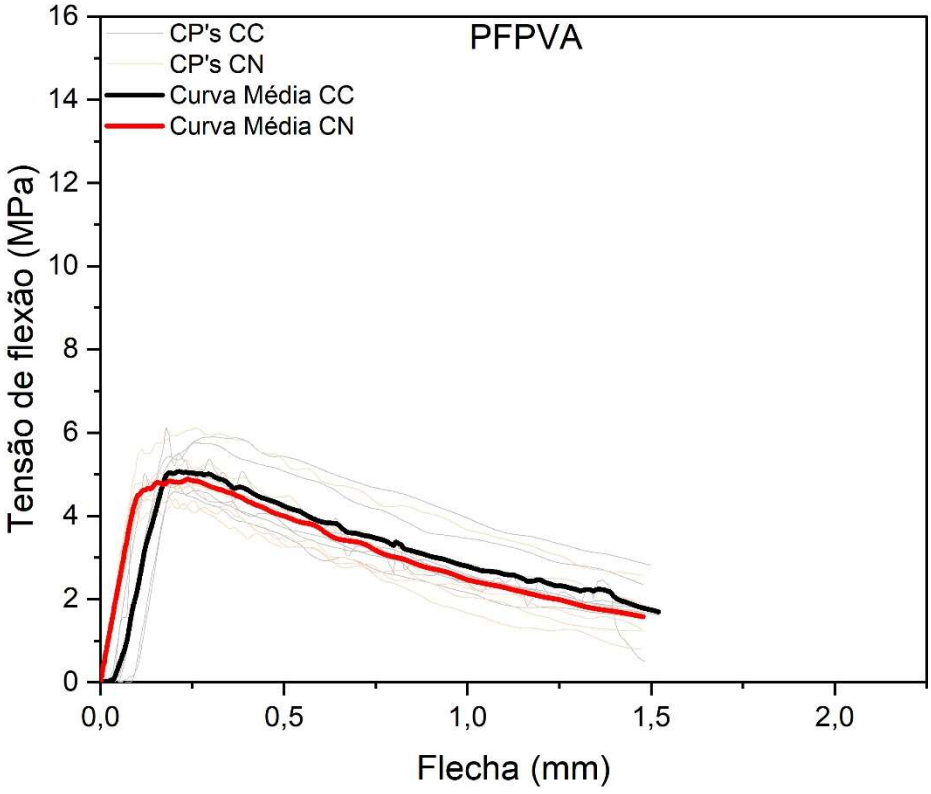
A deflexão máxima permaneceu constante para PFPVA (0,11 mm em ambas as condições) e PTNT (0,11 mm em ambas as condições), enquanto a PTVAR apresentou redução de aproximadamente 10% (0,26 para 0,24 mm). Embora tenha ocorrido diminuição da deformabilidade, a placa reforçada com TVAR continuou apresentando deslocamentos superiores às demais formulações, mostrando maior capacidade de deformação antes da ruptura. Em contraste, as amostras reforçadas com PVA e TNT apresentaram ruptura mais

precoce, característica de materiais com menor capacidade de absorção de deformações após a fissuração inicial.

As curvas tensão x flecha (Figuras 6.16 a 6.18) corroboram com os resultados quantitativos apresentados na Tabela 6.3 e permitem compreender melhor o comportamento mecânico de cada sistema de reforço durante o carregamento. Em todas as formulações foi observado um trecho inicial linear, correspondente ao comportamento elástico da matriz cimentícia, seguido pela carga máxima e pela fase pós-fissuração, cuja inclinação está diretamente relacionada à capacidade do reforço nas disposições das tensões após os surgimento das fissuras.

Nas placas reforçadas com fibras de PVA (PFPVA), tanto sob CN quanto CC, as curvas apresentam comportamento similar, conforme figura 6.16. Após atingir a carga máxima, ocorre uma redução gradual da carga, sem ruptura brusca, caracterizando um comportamento pseudo-dúctil promovido pelo mecanismo de ponte de fissuras das fibras de PVA. A dispersão entre os corpos de prova é baixa, indicando boa repetibilidade experimental.

Figura 6.16 – Gráfico de tensão x flecha de amostras de PVA sob CN e CC.

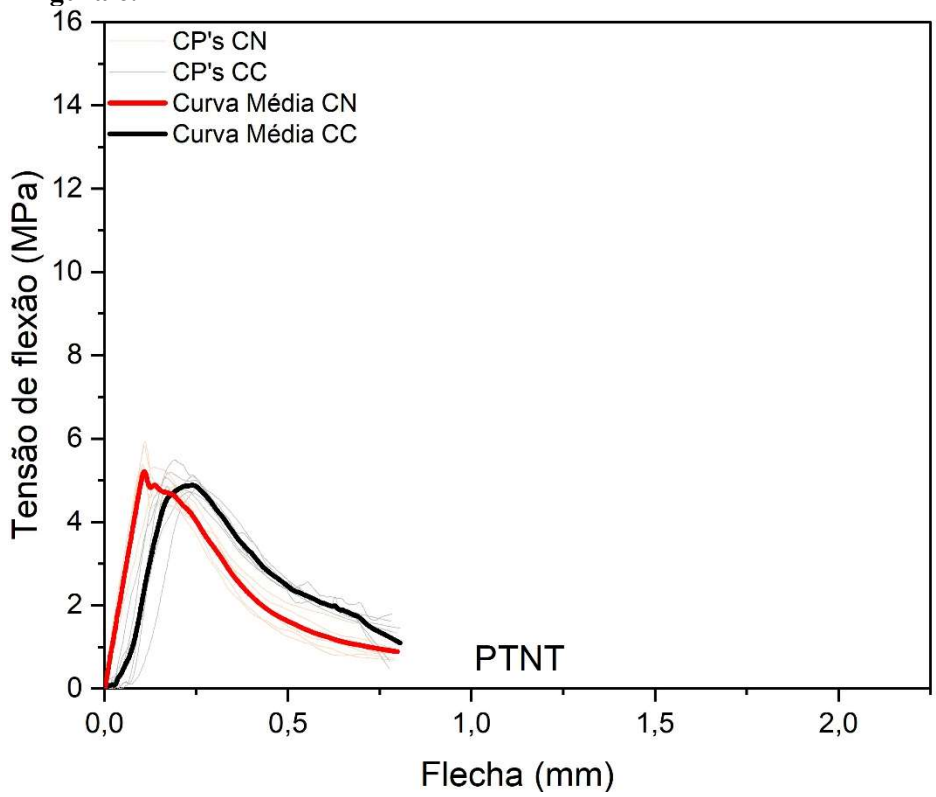


Fonte: Autoria própria (2026).

Sob carbonatação em câmara foi obtida uma ligeira elevação da região pós-pico para parte das amostras, sugerindo maior capacidade de manutenção da carga durante a propagação das fissuras. Esse comportado explica o aumento da tenacidade em 26,6%, mesmo sem alterações significativas no MOR.

As curvas das placas reforçadas com TNT, conforme Figura 6.17, diferentemente das reforçadas com PVA, têm comportamento similar em ambas condições de exposição. Os gráficos mostram um pico pronunciado, seguidos por queda progressiva da carga resistente (*strain-softening*), indicando menor capacidade de redistribuição das tensões após a fissuração da matriz (Figueiredo, 2012).

Figura 6.17 – Gráfico de tensão x flecha de amostras de TNT sob CN e CC.



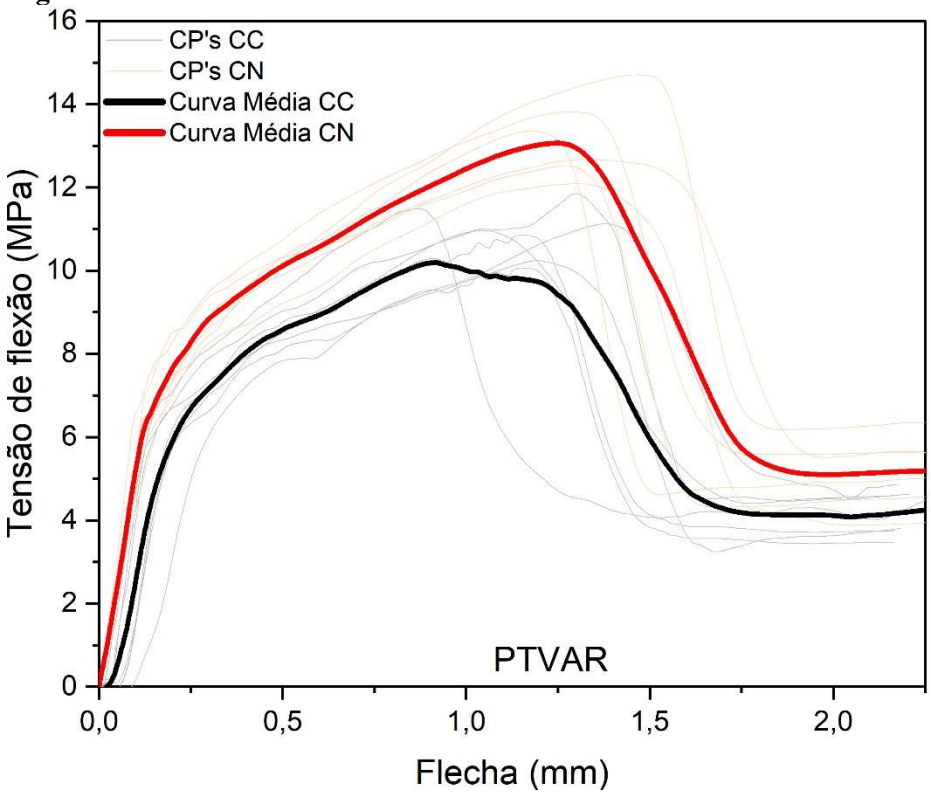
Fonte: Autoria própria (2026).

Sob carbonatação natural, algumas curvas mostram pequena extensão da região pós-pico, porém a perda de capacidade resistente ocorre de forma relativamente acelerada. Após a exposição em câmara, o formato médio permance inalterado, corroborando com os resultados da Tabela 6.3, que mostram pequenas diferenças no MOR, na deflexão máxima e na tenacidade. Dessa forma, é possível afirmar que a carbonatação em câmara exerceu baixa influência no comportamento mecânico dos fibrocimentos PTNT, mantendo praticamente inalterado seu

mecanismo de ruptura. A maior inclinação da curva descendente em comparação ao fibrocimento PFPVA mostra que o TNT possui menor eficiência na formação de pontes de fissuras e, consequentemente, menor capacidade de absorção de energia durante o carregamento.

As curvas tensão x fecha da formulação PTVAR sob condição natural evidenciam o melhor desempenho mecânico entre todas as placas avaliadas (Figura 6.18).

Figura 6.18 – Gráfico de tensão x flecha de amostras de TVAR sob CN e CC.



Fonte: Autoria própria (2026).

Foi observado na Figura 6.18 que o comportamento inicial linear, seguido por um aumento contínuo da carga até o pico máximo (*strain-hardening*), indicam elevada capacidade de transferência de tensões entre a matriz cimentícia e o TVAR. Após a carga máxima, ocorre uma queda abrupta da resistência, característica da fissuração da matriz. Entretanto, diferentemente das formulações PFPVA e PTNT, a PTVAR mantém uma carga residual siginificativa por um longo intervalo de deformação, formando um patamar pós-pico. Esse comportamento demonstra que o TVAR continua promovendo a transferência de tensões entre as faces fissuradas, retardando a ruptura completa da placa e favorecendo mecanismos de múltipla fissuração e ponte de fissuras.

A extensa área sob as curvas confirma a elevada capacidade de absorção de energia do compósito, refletida na maior tenacidade. Embora exista certa dispersão entre as amostras na região pós-fissuração, todas apresentam o mesmo padrão de comportamento, evidenciando a eficiência do reforço têxtil na manutenção da resistência residual e na melhoria da ductilidade do compósito, essa extensa área é reflexo do comportamento *strain-hardening*, o qual prolonga a deformação do material (Figueiredo, 2012).

Em ambos os reforços, a dispersão das curvas individuais é relativamente baixa, indicando boa uniformidade na fabricação dos fibrocimentos e consistência dos resultados experimentais.

6.4.4 Interface matriz-reforço

As Figuras 6.19 a 6.21 complementam os resultados mecânicos exibidos anteriormente ao permitir observar a disposição dos reforços após o rompimento das placas. As superfícies fraturadas mostram que a resposta pós-fissuração está associada à interação entre a matriz e o sistema de reforço, especialmente à capacidade de transferência de tensões e ao comportamento das fibras após a formação das fissuras. (Goda; Padayodi; Raoelison, 2024) destacam que a eficiência dessa transferência está associada à combinação entre adesão, intertravamento mecânico e atrito.

Nas placas reforçadas com fibras de PVA (Figura 6.19), observa-se uma fissura bem definida na matriz, acompanhada pela presença de fibras atravessando a abertura e conectando as superfícies fraturadas, caracterizando o mecanismo de ponte de fissuras (*crack-bridging*). (Fan et al., 2025) demonstram que a interface PVA-matriz apresenta componentes de adesão e resistência friccional que permitem a transferência progressiva de tensões durante o escorregamento das fibras.

Figura 6.19 – Interface matriz-reforço de amostra PFPVA após rompimento.



Fonte: Autoria própria (2026).

Nesse contexto, o incremento de 26,6% na tenacidade após carbonatação em câmara sugere que as alterações microestruturais da matriz contribuíram para condições mais favoráveis de interação fibra-matriz. Assim, o comportamento observado na PFPVA é compatível com a atuação conjunta de *crack-bridging*, descolamento progressivo, atrito e escorregamento das fibras, mecanismos que favorecem a dissipação de energia durante a fratura. Dessa maneira, (Ranjbar; Zhang, 2020) compreendem que ao redor de fibras hidrofílicas ou rugosas, a zona de transição interfacial pode desenvolver ancoragem mecânica mais forte ou interações físico-químicas, embora a ligação excessiva possa alterar o modo de falha de arrancamento para ruptura da fibra.

No sistema com TNT (Figura 6.20), foi observada a presença de matriz aderida ao tecido, o que sugere a penetração da pasta entre os filamentos e a boa adesão entre a matriz e o reforço, além de uma interface rugosa e um reforço com tendência elástica, característica das fibras de polipropileno. No entanto, suas características apresentam menor adesão interfacial devido à sua natureza hidrofóbica e baixa energia superficial, tornando as modificações de superfície um fator determinante no desempenho da ligação (Azevedo et al., 2026).

Figura 6.20 – Interface matriz-reforço de amostra PTNT após rompimento.

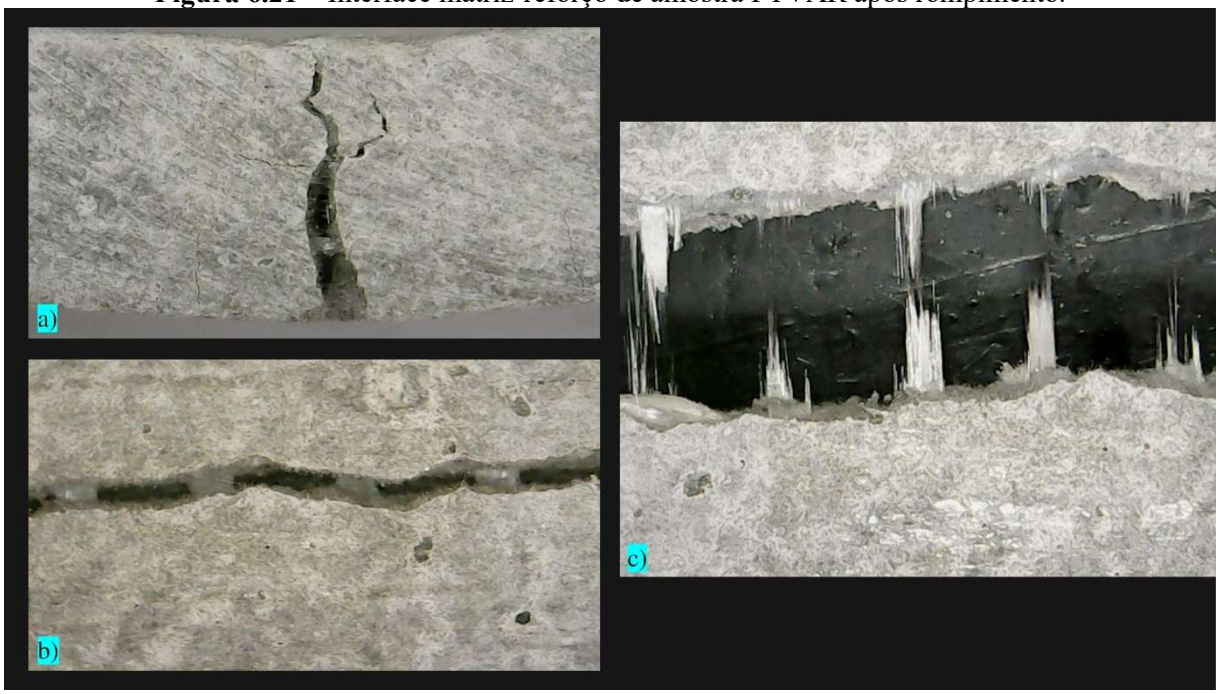


Fonte: Autoria própria (2026).

Assim, a menor capacidade de sustentação de carga após a fissuração e a menor tenacidade registrada para o PTNT podem ser relacionadas à quantidade e à configuração dos elementos efetivamente mobilizados na região fissurada. Estudos com tecidos não tecidos em matrizes cimentícias mostram que a eficiência desse tipo de reforço depende da impregnação da matriz, da arquitetura do não tecido e do envolvimento dos filamentos pela pasta cimentícia (Claramunt et al., 2017; Pekmezci et al., 2014). Dessa forma, a limitada influência da carbonatação associada às alterações promovidas na matriz não foram suficientes para compensar as limitações impostas pela configuração do reforço e pela transferência de tensões na interface.

Em contraste, o compósito reforçado com TVAR, apresentado na Figura 6.21, exibe características associadas a uma maior eficiência interfacial. A trajetória sinuosa e ramificada da fissura, juntamente com os feixes de fios de vidro AR conectando as superfícies fraturadas, evidencia a participação do reforço no controle da propagação da trinca. A arquitetura têxtil desse reforço permite a penetração da matriz entre os filamentos, aumentando a área de contato e favorecendo a ancoragem mecânica e a transferência de tensões (Kohan et al., 2025).

Figura 6.21 – Interface matriz-reforço de amostra PTVAR após rompimento.



Fonte: Autoria própria (2026).

A continuidade dos fios possibilita ainda a atuação simultânea de múltiplos filamentos, mantendo a capacidade resistente após a fissuração. Xu et al. (2025) observaram que a interação entre o tecido de vidro AR e a matriz cimentícia favorece a distribuição e controle das fissuras, enquanto a arquitetura do tecido contribui simultaneamente para o reforço e para a resposta mecânica do compósito. Essas características microestruturais são compatíveis com o comportamento de *strain-hardening*, estando associadas ao maior patamar residual de carga e à elevada capacidade de dissipação de energia observados para o PTVAR.

Em ambas as análises interfaciais, a carbonatação teve influência no comportamento resultante entre a matriz e o reforço. Portanto, a engenharia de interface assistida por carbonatação promove duplo benefício: otimiza a transferência de carga em regime de serviço e garante durabilidade do desempenho pós-fissuração sob exposição prolongada, conforme apontam Azevedo e Savastano (2024).

6.5 CARBONATAÇÃO, CAPTURA DE CO_2 E MICROESTRUTURA

6.5.1 Profundidade de carbonatação e frente carbonatada

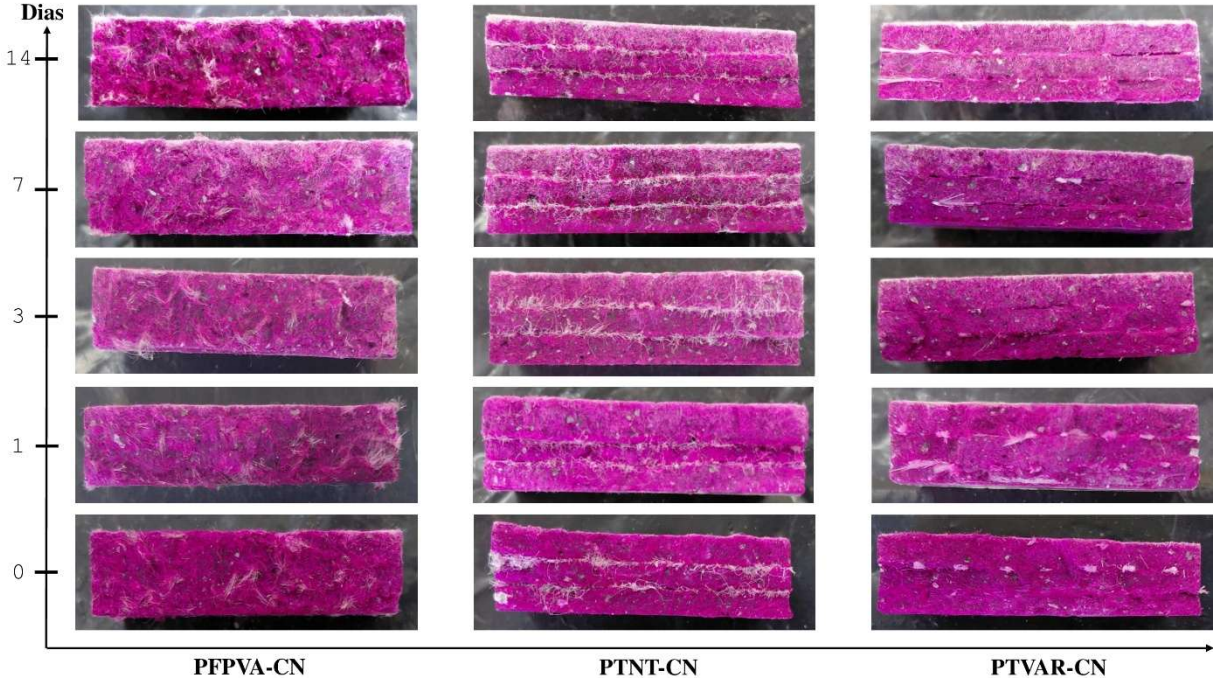
As figuras 6.22 e 6.23 apresentam a evolução da frente de carbonatação das placas cimentícias reforçadas com fibras de PVA (PFPVA), tecido não tecido (PTNT) e tecido de vidro álcali resistente (PTVAR), submetidas, respectivamente, à carbonatação natural (CN) e em

câmara (CC). A avaliação foi realizada por meio da aplicação de solução alcoólica de fenolftaleína, técnica empregada para identificar qualitativamente a redução da alcalinidade da matriz cimentícia. Conforme Batista (2025), a permanência da coloração rosa indica regiões com pH superior a 8,3, enquanto as regiões incolores correspondem às zonas carbonatadas, onde o consumo dos compostos alcalinos reduziu o pH da solução intersticial.

O avanço da frente carbonatada resulta da interação entre o transporte de CO_2 pelos poros e as reações químicas entre esse gás e os produtos de hidratação do cimento. Inicialmente, o dióxido de carbono reage preferencialmente com a portlandita ($Ca(OH)_2$, devido à sua maior disponibilidade e elevada reatividade. À medida que a carbonatação avança e a portlandita é consumida, inicia-se a descalcificação progressiva do gel C-S-H, processo que reduz a relação Ca/Si, modifica sua estrutura nanométrica e altera as propriedades físico-químicas da matriz cimentícia. Segundo Morandeau; Thiéry e Dangla (2014), essas duas etapas apresentam cinéticas distintas e são fortemente controladas pela umidade interna, pela conectividade da rede porosa e pela velocidade de difusão do CO_2. Dessa forma, a profundidade da carbonatação não depende exclusivamente da concentração de CO_2, mas principalmente da facilidade de transporte do gás através da microestrutura do compósito.

Nas amostras submetidas à carbonatação natural (Figura 6.22), observa-se predominância da coloração rosa durante os 14 dias de exposição, indicando que a maior parte da matriz manteve elevada alcalinidade. Embora seja perceptível uma redução gradual da intensidade da coloração nas regiões superficiais, não se verifica uma frente carbonatada contínua ao longo da espessura das placas, evidenciando que, nesse período, a carbonatação ocorreu de forma predominante nas camadas mais externas. Esse comportamento está de acordo com os resultados obtidos por Yu et al. (2023), que avaliaram concretos de cimento supersulfatado após oito anos de exposição natural e verificaram que a progressão da frente carbonatada ocorre de maneira lenta e controlada pela difusão do CO_2, sendo fortemente influenciada pela densificação microestrutural promovida pela precipitação gradual de carbonato de cálcio.

Figura 6.22 – Frente de carbonatação por indicador fenolftaleína em amostras sob CN.

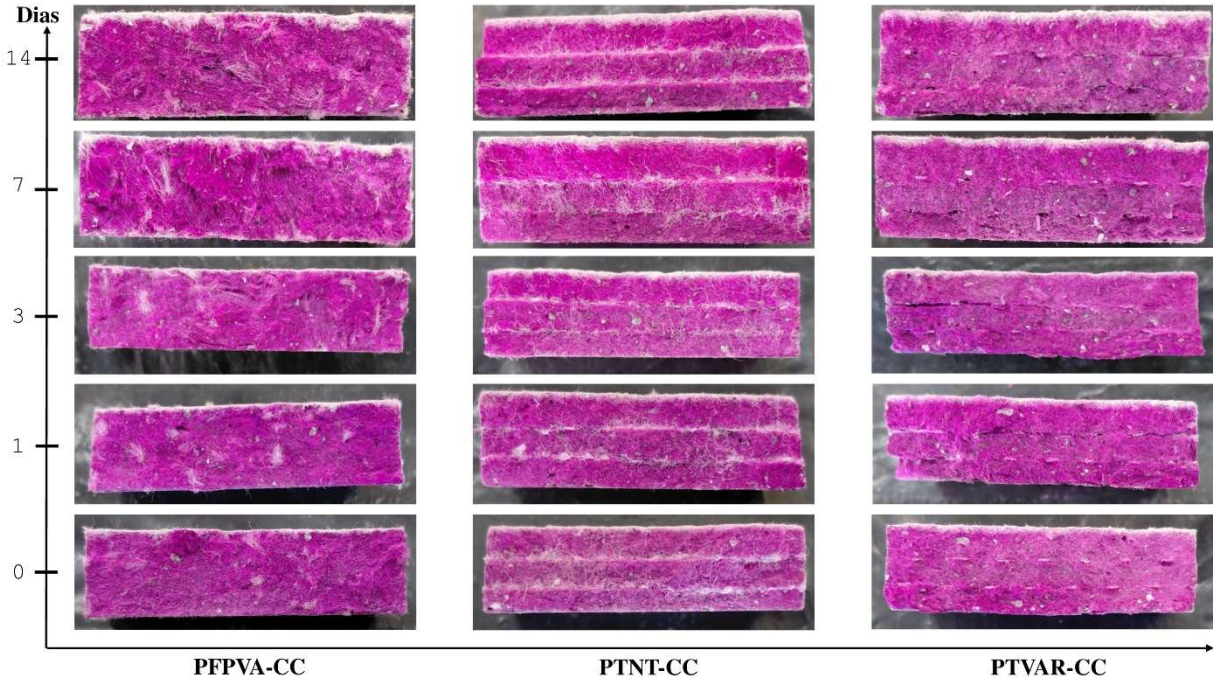


Fonte: Autoria própria (2026).

A comparação entre os diferentes compósitos evidencia a influência da microestrutura na propagação da frente carbonatada. A amostra PFPVA-CN apresenta distribuição mais heterogênea da coloração na superfície, indicando maior variabilidade na difusão do CO_2. A PTNT-CN apresenta comportamento homogêneo, com carbonatação uniforme nas regiões superficiais. Já a PTVAR-CN preserva coloração rosa mais intensa e homogênea durante todo o período de exposição, sugerindo menor avanço da frente carbonatação. Esse comportamento é coerente com os resultados de absorção de água, porosidade e densidade aparente obtidos anteriormente, indicando que uma matriz mais compacta reduz a permeabilidade ao CO_2 e retarda sua difusão para o interior do material.

Na condição de carbonatação em câmara (Figura 6.23), observa-se menor intensidade da coloração rosa já no tempo inicial (0 dias) quando comparada às amostras submetidas à CN. Esse comportamento sugere que, durante o período de sazonamento anterior ao início dos ensaios em câmara, as placas já estavam expostas ao CO_2 atmosférico, permitindo o desenvolvimento de uma carbonatação superficial inicial. Dessa forma, as amostras ingressaram na câmara de carbonatação com uma frente carbonatada previamente estabelecida, a qual foi posteriormente intensificada pela elevada concentração de CO_2 presente no ambiente em câmara.

Figura 6.23 – Frente de carbonatação por indicador fenolftaleína em amostras sob CC.



Fonte: Autoria própria (2026).

Esse fenômeno é consistente com os mecanismos descritos por Yu et al. (2023), que demonstraram que a carbonatação natural inicia-se imediatamente após a exposição do material ao ambiente, ainda que sua cinética seja significativamente inferior à observada em condições aceleradas. De maneira semelhante, Morandeau; Thiéry e Dangla (2014) destacam que a evolução da frente carbonatada depende da difusão contínua do CO_2 e das condições de umidade da matriz, permitindo que ocorra carbonatação superficial mesmo antes da exposição a ambientes com elevada concentração de CO_2. Assim, a condição inicial das amostras influencia diretamente a velocidade de propagação da frente carbonatada durante os ensaios em câmara.

Essas alterações microestruturais explicam as diferenças observadas entre as formulações. A PTNT-CC apresentou maior profundidade aparente da frente carbonatada, evidenciada pela menor intensidade da coloração rosa após 14 dias de exposição, indicando maior facilidade de difusão do CO_2 através da matriz cimentícia, comportamento compatível com sua maior porosidade aberta observada nos ensaios físicos. Em contrapartida, a amostra PFPVA-CC apresentou carbonatação superficial mais heterogênea, possivelmente em decorrência da distribuição aleatória das fibras de PVA e das variações locais na interface fibra-matriz, favorecendo diferentes trajetórias de difusão do dióxido de carbono. Já a PTVAR-CC manteve regiões com maior intensidade da coloração rosa ao final do período experimental,

sugerindo menor profundidade da frente carbonatada. Esse comportamento indica que a matriz mais compacta e com menor conectividade dos poros atuou como barreira ao transporte do CO_2, retardando o avanço da carbonatação.

Esse mecanismo está de acordo com os resultados obtidos por Silva et al. (2002). Que demonstraram que a carbonatação promove redução de 5 a 12% da porosidade aberta, decorrente da precipitação de carbonato de cálcio no interior dos poros. A análise por porosimetria de intrusão de mercúrio evidenciou que o processo de carbonatação reduz significativamente o diâmetro médio dos poros, diminui o diâmetro limite da rede porosa e promove o fechamento progressivo dos poros capilares em toda a distribuição granulométrica. Segundo os autores, esse refinamento microestrutural reduz a permeabilidade do material e dificulta a continuidade da difusão do CO_2 para regiões mais internas, tornando a própria carbonatação um mecanismo de autolimitação da sua velocidade de propagação.

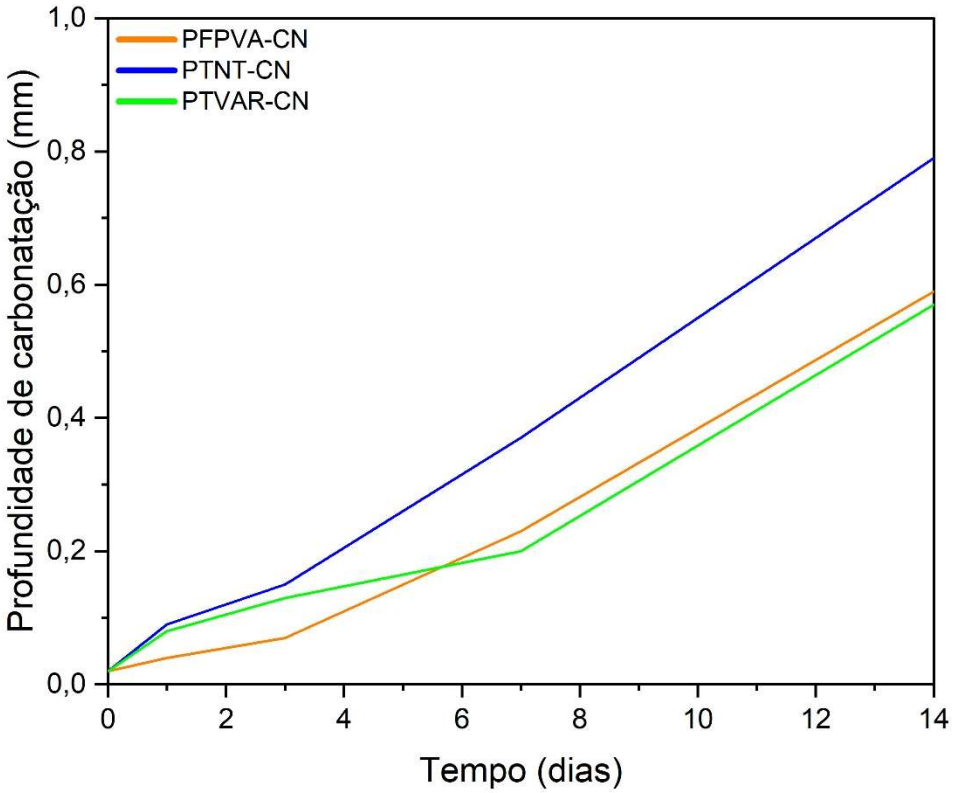
Dessa forma, embora a PTNT tenha apresentado maior avanço em ambos os ensaios da frente carbonatada em razão de sua maior porosidade, a precipitação de $CaCO_3$ tende a promover o refinamento da estrutura porosa durante a exposição, reduzindo gradativamente a permeabilidade ao CO_2. Por outro lado, a PTVAR, que já apresentou uma matriz inicialmente mais densa e menor porosidade, oferece maior resistência ao transporte do CO_2 desde os estágios iniciais, justificando a menor profundidade da frente carbonatada observada nas imagens de fenolftaleína. Esse comportamento corrobora com os estudos da literatura, os quais descrevem que a evolução da frente de carbonatação é controlada pela interação entre difusão do CO_2, precipitação de carbonatos e refinamento progressivo da rede porosa (Morandeau; Thiéry; Dangla, 2014; Zajac et al., 2023).

As Figuras 6.24 e 6.25 apresentam a evolução da profundidade de carbonatação das placas cimentícias submetidas, respectivamente, à CN e CC medidas com o auxílio do *software* Imagej®. A profundidade foi determinada a partir da aplicação de fenolftaleína à superfície recém-fraturada das placas, permitindo identificar a região que apresentou redução da alcalinidade associada ao avanço da frente de carbonatação. Entretanto, Lo e Lee (2002), ressaltam que o indicador de pH identifica essencialmente uma frente de redução de alcalinidade e pode subestimar a extensão química efetiva da carbonatação, uma vez que pode existir uma zona parcialmente carbonatada à frente da região visualizada pelo indicador.

No gráfico abaixo observa-se que as três formulações apresentaram evolução progressiva da profundidade de carbonatação ao longo dos 14 dias de exposição natural. No início do ensaio, não foram detectadas diferenças entre as amostras, na qual ambas iniciaram com 0,02 mm. Entretanto, com o avanço da exposição, o PTNT-CN apresentou maior

desenvolvimento da frente de carbonatação, atingindo aproximadamente 0,79 mm aos 14 dias, enquanto PFPVA-CN e PTVAR-CN atingiram aproximadamente 0,59 e 0,57 mm, respectivamente.

Figura 6.24 – Profundidade de carbonatação natural.



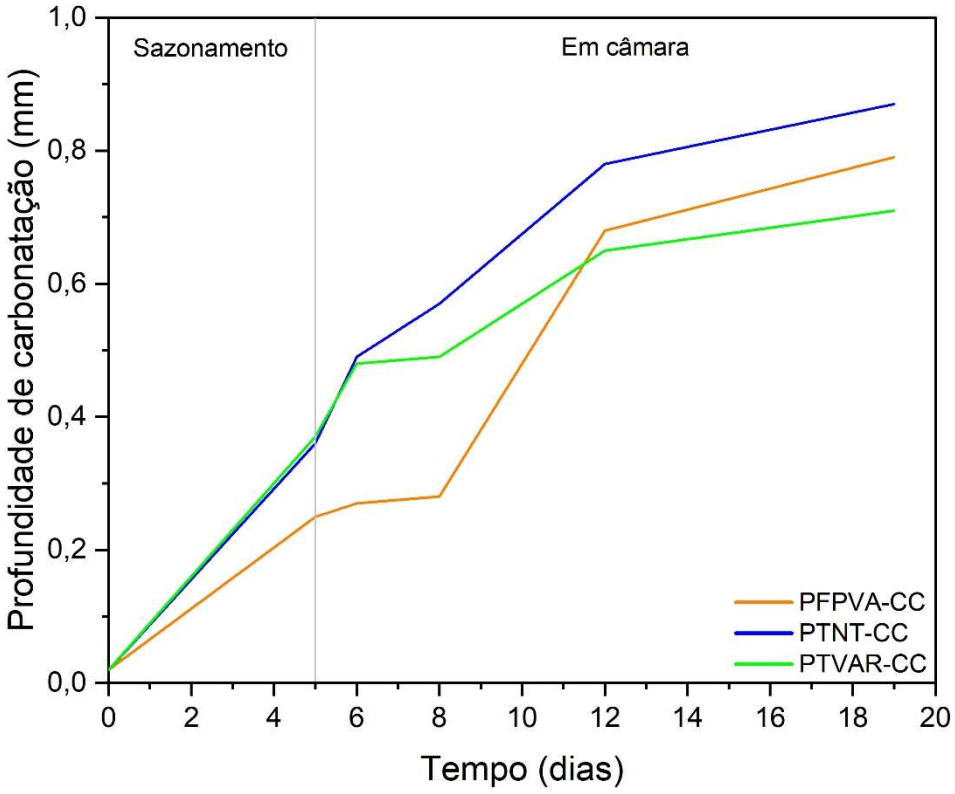
Fonte: Autoria própria (2026).

A maior profundidade do PTNT-CN pode estar relacionada à sua maior porosidade, que foi determinada anteriormente como 35,95%, superior aos valores obtidos para PFPVA (33,58%) e PTVAR (32,36%) na condição em câmara. Entretanto, essa relação não deve ser atribuída exclusivamente à porosidade total. A resistência à carbonatação também depende da distribuição dos poros, de sua interconectividade, tortuosidade e do grau de saturação, fatores que condicionam o transporte de CO_2 na matriz (Bernal et al., 2024). Portanto, os resultados sugerem que a estrutura interna do PTNT pode ter proporcionado condições internas mais favoráveis ao ingresso do CO_2, embora a confirmação desse mecanismo exigisse caracterizações específicas da rede porosa.

A Figura 6.25 apresenta a evolução da profundidade de carbonatação das placas submetidas à câmara de carbonatação. Diferentemente da condição natural, observa-se uma evolução mais pronunciada da profundidade durante o período avaliado, que ocorre após o

sazonamento por 5 dias sem a inserção do gás, com o objetivo de controle da umidade interna das amostras após secagem em estufa.

Figura 6.25 – Profundidade de carbonatação em câmara.



Fonte: Autoria própria (2026).

Na condição em câmara, o PTNT-CC novamente apresentou a maior profundidade ao final do período, atingindo aproximadamente 0,87 mm, enquanto PFPVA-CC e PTVAR-CC atingiram aproximadamente 0,79 e 0,71 mm, respectivamente. A manutenção da tendência de maior profundidade para o PTNT nas duas condições de exposição é relevante, pois indica que a maior velocidade observada para essa formulação não ocorreu exclusivamente em função de uma condição ambiental específica, sugerindo que características intrínsecas da placa PTNT favorecem o transporte do CO_2 durante os tipos de exposição.

Entretanto, essa diferença entre os resultados de carbonatação natural e em câmara deve ainda ser analisada considerando o período de sazonamento das placas. Bernal et al. (2024) destacam a importância do condicionamento e da umidade nas metodologias de avaliação da resistência à carbonatação, enquanto Šavija e Luković (2016) ressaltam que o estado de saturação da rede porosa constitui um dos principais fatores que controlam a interação entre transporte de CO_2 e reação química. Assim, a etapa de sazonamento representada na Figura

6.22 não deve ser considerada apenas como um período anterior ao ensaio, mas como uma etapa capaz de influenciar diretamente as condições iniciais de transporte no material.

Outro aspecto metodológico importante é que os valores de profundidade obtidos nas Figuras 6.24 e 6.25 foram determinados pelo mesmo método de fenolftaleína. Essa uniformidade metodológica aumenta a confiabilidade da comparação relativa entre as formulações e entre as condições exposição, ainda que não elimine a possibilidade de subestimação da profundidade química efetiva. A ressalva apresentada por Lo e Lee (2002) é relevante nesse contexto, pois uma região parcialmente carbonatada pode permanecer fora da fronteira visualizada pelo indicador. Dessa maneira, diferenças relativamente pequenas entre as formulações, especialmente na condição em câmara devem ser interpretadas com cautela e não necessariamente representam diferenças equivalentes na quantidade total de CO_2 efetivamente reagida com a matriz.

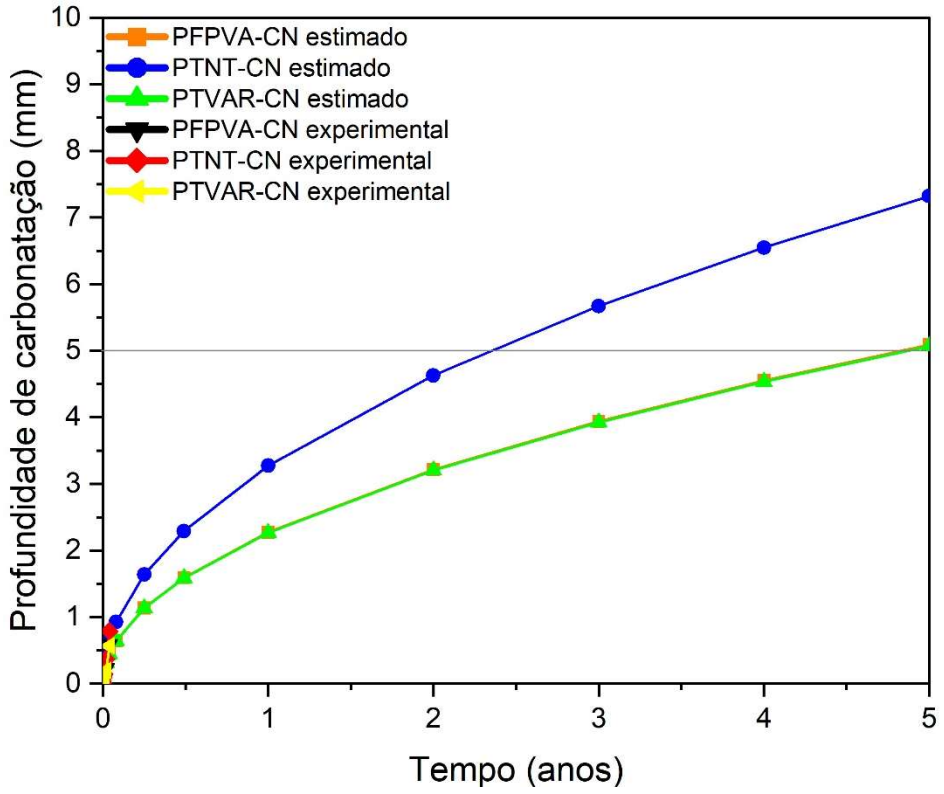
A Figura 6.26 representa uma etapa adicional da análise, na qual os resultados experimentais de carbonatação natural foram utilizados para estimar a evolução da profundidade ao longo de períodos superiores ao tempo efetivamente monitorado experimentalmente. Para isso, foi adotado o modelo de Tuutti (1982):

$$X = k \cdot \sqrt{T} \tag{6.1}$$

em que X representa a profundidade de carbonatação, k é o coeficiente de carbonatação e a raiz de T representa o tempo de exposição. Para os resultados deste estudo, os coeficientes foram expressos em mm/$\sqrt{ano}$, obtendo-se os valores de 2,275 mm/$\sqrt{ano}$ para PFPVA, 3,274 mm/$\sqrt{ano}$ para PTNT e 2,267 mm/$\sqrt{ano}$ para PTVAR. A ordem dos coeficientes reproduz a tendência observada experimentalmente.

A utilização da relação possui ampla aplicação na modelagem da carbonatação de materiais cimentícios. Wang et al. (2024) destacam que os modelos baseados na raiz quadrada do tempo estão entre as abordagens mais empregadas para estimar a profundidade de carbonatação, principalmente pela sua simplicidade e pela relação com mecanismos de transporte controlados por difusão. Entretanto, os autores também ressaltam que modelos desse tipo apresentam limitações quando aplicados a períodos prolongados, pois o coeficiente incorpora, de maneira simplificada, diversos fatores que podem variar ao longo do tempo. Portanto, sua aplicação no presente estudo é adequada como modelo de extrapolação da tendência experimental, mas não deve ser interpretada como uma descrição completa dos mecanismos que ocorrerão durante vários anos de exposição. Os resultados desse modelo estão expressos na Figura 6.26.

Figura 6.26 – Profundidade de carbonatação estimada pelo modelo de Tuutti (1982).



Fonte: Autoria própria (2026).

A representação gráfica da Figura 6.26 evidencia ainda que o avanço da carbonatação apresenta comportamento sublinear. Isso ocorre porque, segundo o modelo, a profundidade cresce proporcionalmente à raiz quadrada do tempo e não de maneira linear. Consequentemente, o incremento de profundidade tende a diminuir como aumento do tempo de exposição. Esse comportamento possui coerência física com o avanço da carbonatação, uma vez que a região carbonatada passa a constituir uma camada adicional através da qual o CO_2 precisa se transportar para alcançar regiões ainda não carbonatadas. Šavija e Luković (2016) destacam que essas modificações tornam a carbonatação um processo dinâmico, no qual transporte e reação se retroalimentam ao longo da exposição.

A projeção também permite relacionar a cinética obtida aos valores reais de espessura das placas. Considerando que o CO_2 pode ingressar pelas duas faces expostas, o encontro das frentes de carbonatação ocorre teoricamente quando a profundidade atingida em cada face corresponde à metade da espessura da placa. Considerando uma espessura média de 10 mm e o avanço da carbonatação pelas duas faces, estima-se que o encontro das frentes de carbonatação ocorra em aproximadamente 2,33 anos para PTNT, de 4,83 e 4,86 anos para PFPVA e PTVAR, respectivamente.

A menor estimativa para PTNT decorre exclusivamente do maior coeficiente entre as três placas. O resultado é consistente com a tendência experimental observada na Figura 6.21 e demonstra que a comparação da profundidade absoluta não deve ser dissociada da espessura do elemento. Entretanto, esses períodos devem ser apresentados como estimativas matemáticas para a condição de carbonatação natural, e não como determinação experimental do tempo necessário para a carbonatação completa da seção. A extrapolação de 14 dias para períodos de anos envolve incertezas associadas à variação das condições ambientais, à disponibilidade de fases carbonatáveis e às alterações progressivas da microestrutura.

Por fim, os resultados reforçam que profundidade de carbonatação, cinética de avanço e quantidade de CO_2 incorporada não são parâmetros equivalentes. Uma maior profundidade indica maior avanço da frente detectável pelo indicador, mas não permite, isoladamente, concluir determinada placa tenha necessariamente maior capacidade de sequestro de CO_2. Essa distinção é fundamental para a interpretação dos resultados desta pesquisa, uma vez que a eficiência de captura de CO_2 deve ser analisada conjuntamente com a quantidade efetivamente incorporada à matriz, a composição dos materiais, a massa de cimento disponível e as alterações das propriedades físicas e mecânicas. Assim, a análise das Figuras 6.24 a 6.26 constitui uma etapa de caracterização da cinética e extensão do processo de carbonatação, que deve ser posteriormente integrada aos resultados de absorção de CO_2 e aos indicadores de desempenho e ecoeficiência das placas.

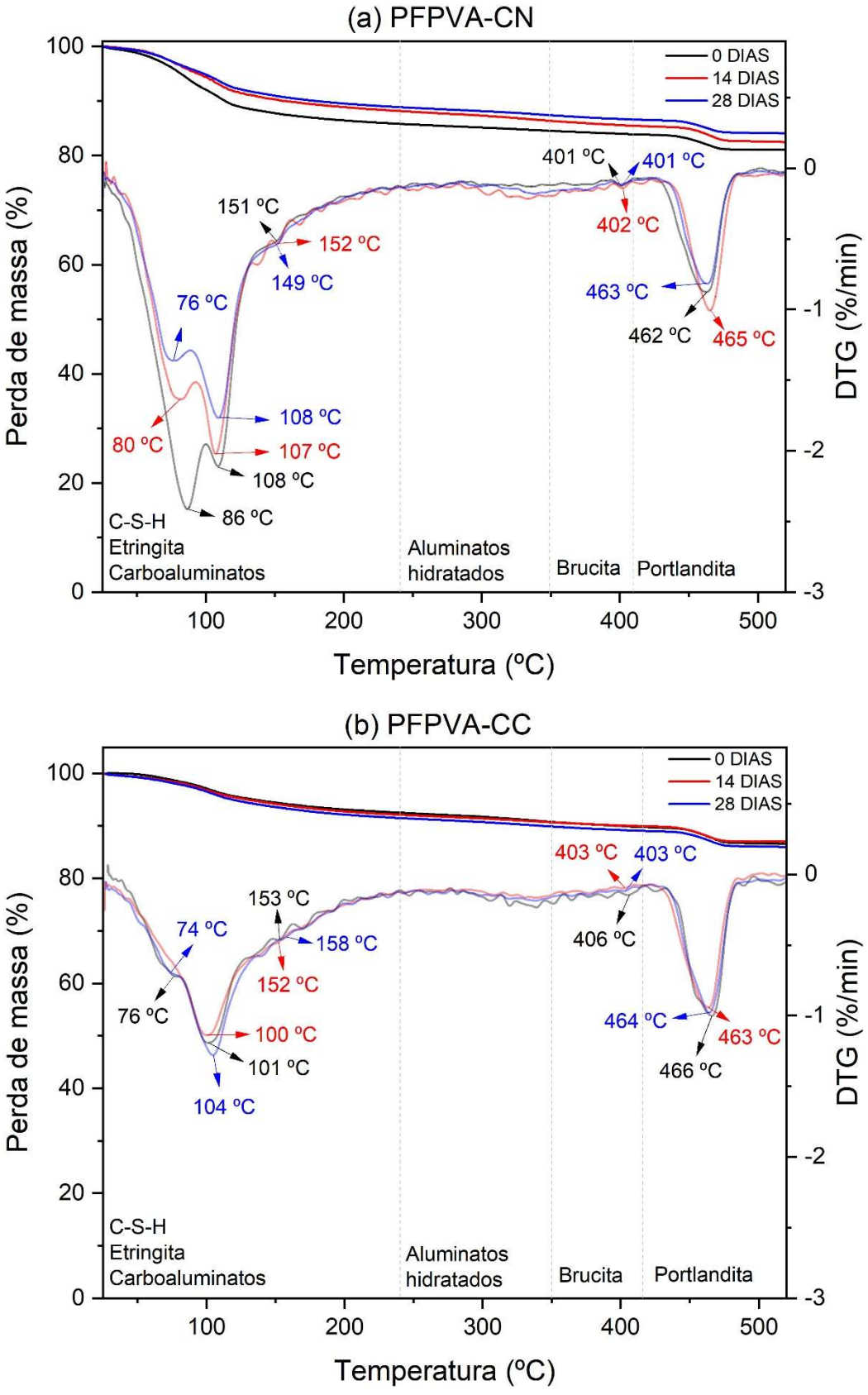
6.5.2 Análise dos efeitos da carbonatação nas fases hidratadas das placas

Na TG/DTG apresentada nesta seção (Figuras 6.27 a 6.29), a análise foi realizada com o pó cimentício, proveniente da trituração das placas de PFPVA, PTNT e PTVAR, submetidas à CN e CC. As curvas termogravimétricas apresentam eventos térmicos de perdas de massa distribuídas abaixo de aproximadamente 200 ºC e nas regiões próximas de 400 e 460 ºC. A interpretação desses eventos permite identificar qualitativamente as principais transformações térmicas associadas aos produtos de hidratação e à portlandita presentes na matriz. Hoppe Filho et al. (2017) discute que a TG/DTG aplicados a pastas de cimento Portland demonstram que a técnica é útil para acompanhar a formação e o consumo de hidróxido de cálcio e a evolução dos produtos hidratados.

A presença de calcário na composição das placas também deve ser considerada nessa interpretação, pois sua presença pode modificar a cinética de hidratação do cimento e a formação dos produtos hidratados. Zhang, Wang e Chen (2024) verificaram, em pastas de cimento Portland incorporadas com o pó de calcário ultrafino, que a presença do calcário

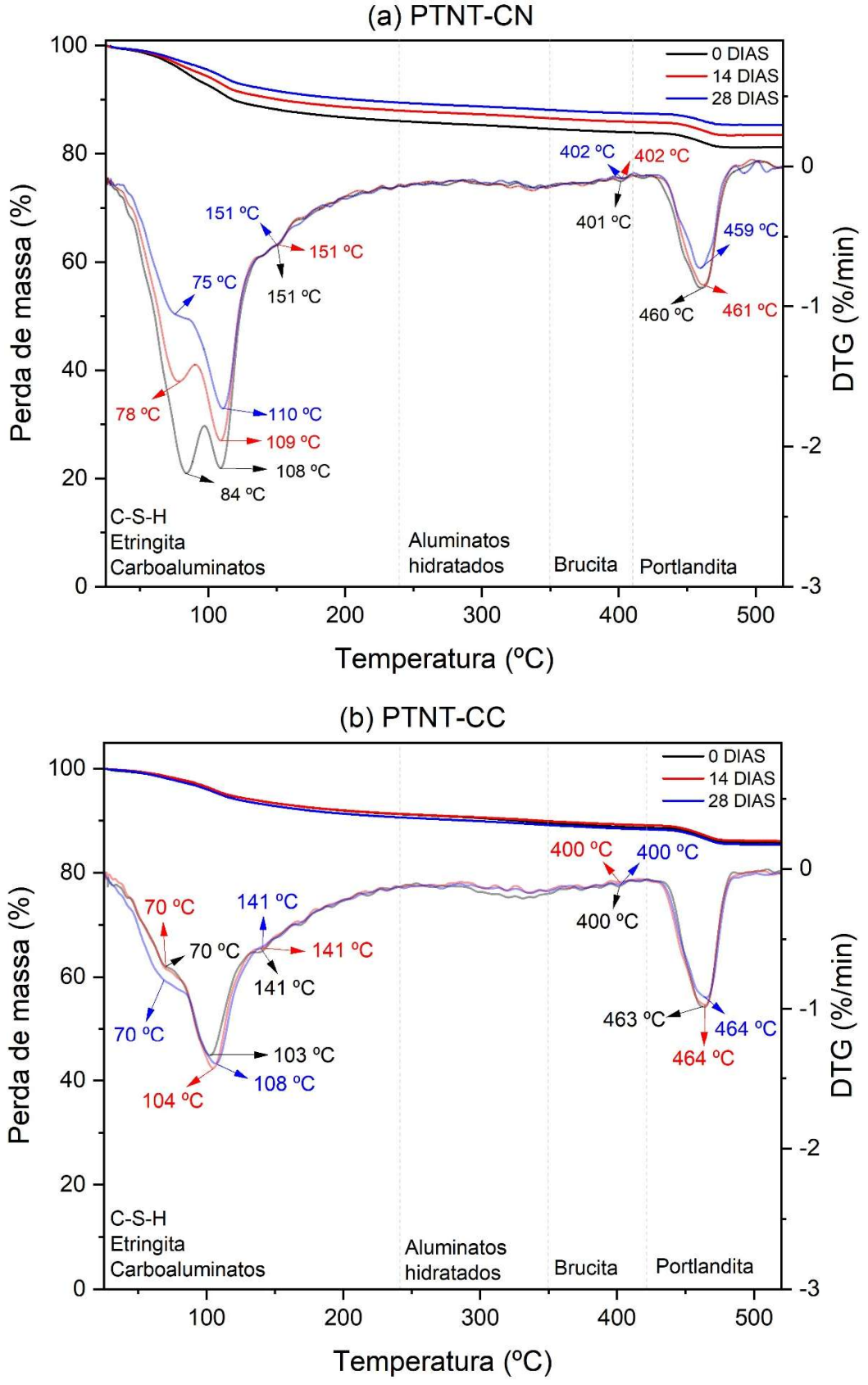
influenciou a cinética de hidratação, sendo observados maiores graus de hidratação em determinadas condições e idades. Os autores verificaram também que o refinamento das partículas de calcário pode aumentar a taxa de hidratação da pasta.

Figura 6.27 – Termogravimetria de amostra PFPVA sob carbonatação natural (a) e em câmara (b).



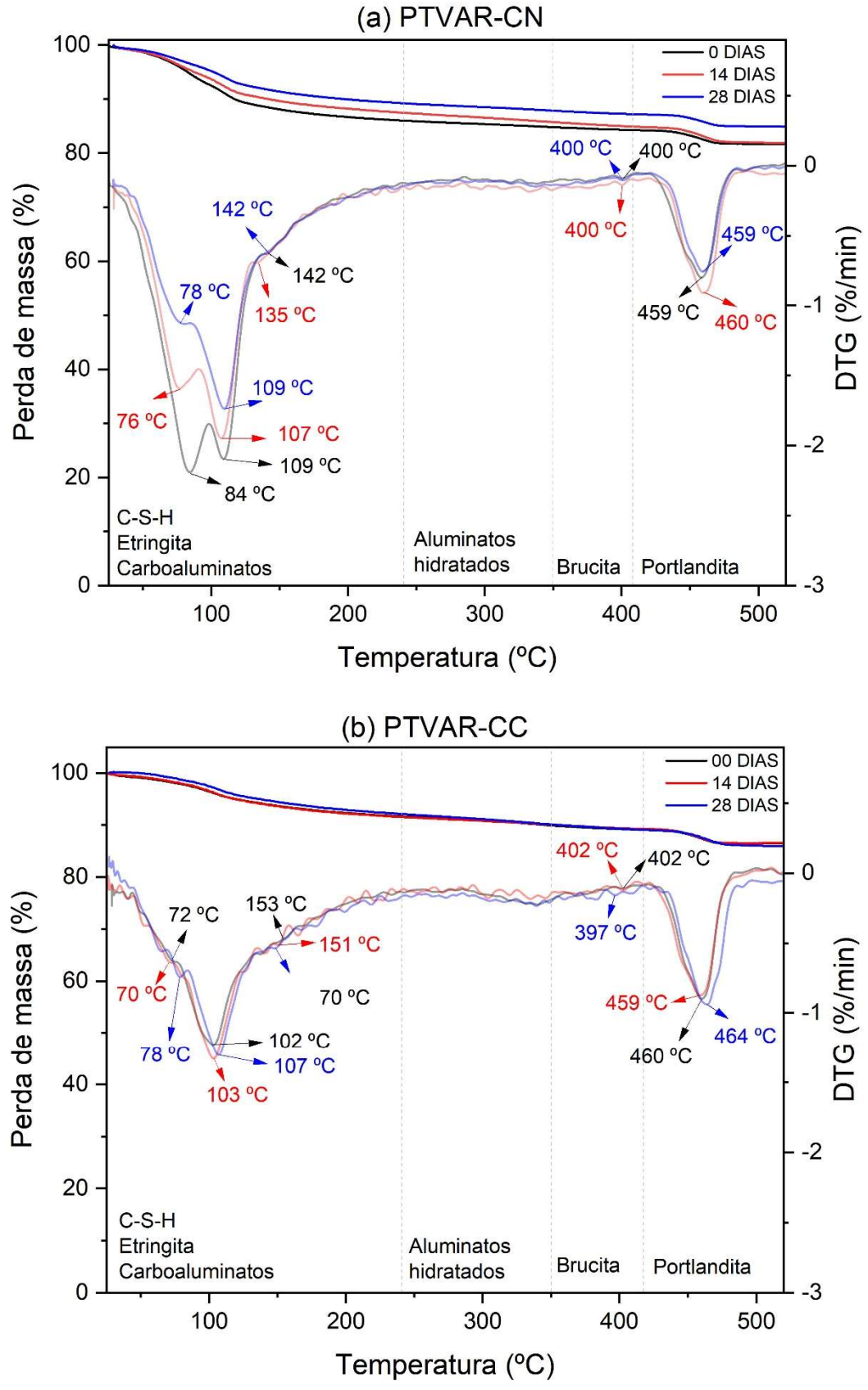
Fonte: Autoria própria (2026).

Figura 6.28 – Termogravimetria de amostra PTNT sob carbonatação natural (a) e em câmara (b).



Fonte: Autoria própria (2026).

Figura 6.29 – Termogravimetria de amostra PTVAR sob carbonatação natural (a) e em câmara (b).



Fonte: Autoria própria (2026).

Nas três formulações, os primeiros eventos térmicos concentram-se entre 70 e 158 ºC. Essas perdas de massa estão relacionadas principalmente à eliminação de água fisicamente adsorvida e à desidratação de produtos de hidratação, especialmente C-S-H, etringita e fases aluminadas hidratadas. A presença de carbonato proveniente do calcário é relevante para o sistema aluminado, uma vez que pode participar das reações envolvendo as fases aluminadas do cimento e favorecer a formação de carboaluminatos. Entretanto, devido à sobreposição dos intervalos de decomposição dessas fases, não é possível atribuir individualmente cada pico exclusivamente a um único produto de hidratação apenas pela posição da temperatura. A análise termogravimétrica de pastas cimentícias mostra justamente essa sobreposição entre os eventos de desidratação das diferentes fases hidratadas (Alarcon-Ruiz et al., 2005; Hoppe Filho et al., 2017). Dessa maneira, as diferenças observadas entre PFPVA, TNT e TVAR nessa região devem ser interpretadas como modificações no conjunto de produtos hidratados, e não como evidência isolada da presença ou ausência de uma única fase.

A influência da carbonatação sobre esses produtos deve ser considerada. A reação com o CO_2 não se restringe à portlandita, podendo envolver progressivamente C-S-H e etringita, dependendo das condições de umidade e transporte do CO_2 na matriz. Steiner et al. (2020) discutem que a influência da umidade relativa demonstra que a taxa de carbonatação da portlandita, do C-S-H e da etringita apresenta forte dependência das condições de umidade, sendo possível ocorrer comportamento distinto entre essas fases sob diferentes condições de exposição. Assim, alterações na intensidade e na forma dos eventos de baixa temperatura entre as idades analisadas podem estar relacionadas às modificações dos produtos hidratados decorrentes da exposição ao gás.

Um evento distinto é observado entre 397 e 406 ºC nas três formulações. Esse evento foi associado à desidroxilação da brucita [$Mg(OH)_2$]. A atribuição é consistente com Azevedo et al. (2024), que, em placas cimentícias reforçadas com fibras à base de cimento de oxissulfato de magnésio, identificaram a decomposição da brucita na faixa aproximada de 390 a 500 ºC por TG/DTG. Embora o sistema estudado pelos autores seja distinto da matriz à base de cimento Portland empregada neste trabalho, a proximidade entre as temperaturas observadas fornece suporte à atribuição desse evento à fase contendo $Mg(OH)_2$. O estudo de Molano et al. (2022) também identificou brucita por meio da caracterização de matrizes cimentícias à base de MgO, reforçando a ocorrência dessa fase em sistemas cimentícios contendo magnésio.

Na sequência, observa-se um evento mais pronunciado entre 459 e 466 ºC, associado à desidroxilação da portlandita [$Ca(OH)_2$]. Essa faixa de decomposição é compatível com a caracterização termogravimétrica de pastas cimentícias, na qual a portlandita apresenta seu

principal evento de desidroxilação na região de aproximadamente 400 a 500 ºC. A TG/DTG é, inclusive, utilizada para estimar o teor de $Ca(OH)_2$ a partir da perda de massa correspondente à sua desidroxilação (Hoppe Filho et al., 2017; Wang et al., 2025).

A comparação entre as idades evidencia a persistência do evento de portlandita nas amostras com 14 e 28 dias, tanto em CN quanto CC. Esse comportamento demonstra qualitativamente que o hidróxido de cálcio não foi completamente consumido durante os períodos de exposição empregados. Esse resultado é coerente com a natureza progressiva da carbonatação das pastas cimentícias. Além disso, a carbonatação pode atingir posteriormente C-S-H e etringita, de modo que a evolução da matriz não deve ser interpretada exclusivamente pela quantidade de portlandita (Steiner et al., 2020).

Conforme o estudo de Wang et al. (2025), a TG/DTG de pastas cimentícias carbonatadas identificaram a decomposição dos carbonatos em regiões de temperatura mais elevada, permitindo separar termicamente a desidratação dos hidratos de descarbonatação. Por isso, as curvas apresentadas nesta etapa se estendem somente até aproximadamente 520 ºC.

Esses resultados de TG/DTG (Figuras 6.24 a 6.26) permitem estabelecer qualitativamente a evolução dos produtos de hidratação e, principalmente, demonstrar a presença de portlandita residual após a carbonatação.

A tabela 6.4 evidencia que a partir da quantificação da perda de massa associada à desidroxilação da portlandita, é possível determinar o teor de portlandita remanescente e, posteriormente, estimar através da estequiometria, a quantidade de $CaCO_3$ que poderia ser formada a partir dessa fração potencialmente carbonatável (Kim et al., 2024). Essa análise ainda permite avaliar a quantidade de CO_2 potencialmente incorporável pela matriz cimentícia ao longo do tempo, servindo como um indicador direto da capacidade de armazenamento de carbono ainda disponível no material (Pyzalski et al., 2025).

Tabela 6.4 – Estimativa estequiométrica do potencial carbonatável do $Ca(OH)_2$ residual aos 28 dias.

Amostra aos 28 dias	Portlandita remanescente (%)		$CaCO_3$ potencial (%)	CO_2 potencial (%)
	Δ massa	$Ca(OH)_2$		
PFPVA-CN	2,52	10,36	14,00	6,16
PTNT-CN	2,14	8,80	11,89	5,23
PTVAR-CN	2,27	9,34	12,61	5,55
PFPVA-CC	3,11	12,79	17,28	7,60
PTNT-CC	3,07	12,63	17,06	7,50
PTVAR-CC	3,25	13,37	18,06	7,94

Fonte: Autoria própria (2026).

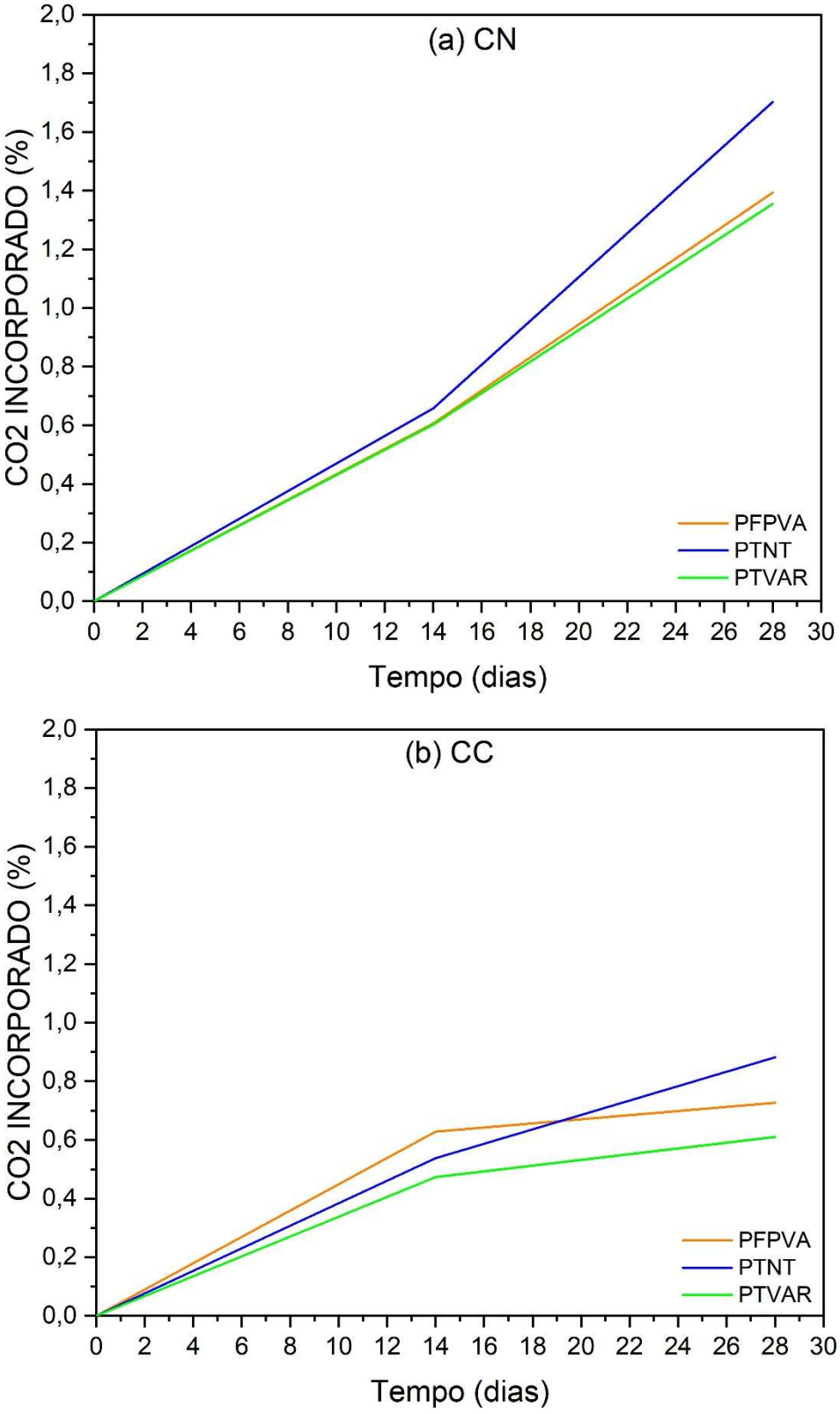
As divergências quantitativas entre os sistemas, expostas na Tabela 6.4, concentram-se no potencial estequiométrico de carbonatação associado à portlandita remanescente. Na condição natural, observaram-se menores teores de $Ca(OH)_2$ residual e, consequentemente, menores potenciais adicionais de formação de $CaCO_3$ e fixação de CO_2. Esses resultados indicam uma menor disponibilidade de portlandita para futuras reações de carbonatação, uma vez que parte dessa fase já pode ter sido consumida durante a exposição. Já na condição em câmara, os maiores teores de portlandita remanescente calculados resultam no incremento do potencial de carbonatação. Essa relação linear ocorre porque os potenciais dependem diretamente da massa residual de $Ca(OH)_2$. Tal comportamento decorre da estequiometria da reação entre o CO_2 e o $Ca(OH)_2$, na qual o consumo da portlandita promove a formação de carbonato de cálcio e a liberação de água (FELIX; POSSAN, 2018).

6.6 ECOEFICIÊNCIA E POTENCIAL DE INCORPORAÇÃO DE CARBONO

6.6.1 Absorção de CO_2

A Figura 6.30 apresenta a evolução da fixação de CO_2 pelas amostras PFPVA, PTNT e PTVAR durante 28 dias em duas condições: CN (a) e CC (b). Os valores plotados representam o ganho líquido de incorporação, calculados a partir da diferença entre a massa medida em cada período e a massa inicial de referência registrada no dia 0 em ambas as formulações. Por meio desse desconto analítico temporal, eliminou-se a influência do CO2 constituinte do calcário moído original da mistura, garantindo que as curvas traduzam exclusivamente o aporte de gás absorvido durante o ensaio.

Figura 6.30 – Incorporação de CO_2 em amostras sob carbonatação natural (a) e em câmara (b).



Fonte: Autoria própria (2026).

De maneira geral, nota-se um incremento progressivo do gás retido em todas as formulações, indicando a continuidade do processo ao longo do período avaliado. Na condição natural (Figura 6.30a), as três formulações exibiram um perfil cinético semelhante até os 14 dias, com teores absorvidos de 0,60% (PTVAR), 0,61% (PFPVA) e 0,66% (PTNT). Após esse marco, as curvas divergiram, com destaque para a amostra PTNT, que manifestou uma evolução mais acentuada. Aos 28 dias, esta formulação alcançou 1,70% de CO_2 fixado, enquanto a PFPVA e a PTVAR atingiram 1,39% e 1,35%, respectivamente. Tal dinamismo reflete sua superior capacidade de absorção no cenário experimental, evidenciada pela maior inclinação gráfica no intervalo de 14 dias. Em contrapartida, as outras amostras encerraram o ensaio com desempenhos assemelhados, exibindo uma diferença de apenas 0,04%. Assim, para a exposição em ambiente aberto, a ordem de atividade foi: PTNT > PFPVA > PTVAR.

Já o panorama em câmara (Figura 6.30b) revelou uma dinâmica diferente. Até a metade do ensaio, o maior ganho acumulado pertenceu à PFPVA, que atingiu 0,63%, seguida pelos índices de 0,54% da PTNT e 0,47 da PTVAR. A partir dessa idade, houve uma mudança nas curvas do gráfico: a primeira desacelerou e passou a apresentar um traçado quase horizontal, enquanto a segunda manteve-se ascendente, gerando um cruzando entre as curvas por volta do 20º dia. Ao término do monitoramento, os valores fixados fecharam em 0,88% (PTNT), 0,72% (PFPVA) e 0,61% (PTVAR). Essa desaceleração precoce observada na curva da PFPVA correlaciona-se ao fenômeno discutido por Kalkreuth et al. (2024), no qual a rápida precipitação de cristais de $CaCO_3$ superficiais gera uma camada densa de bloqueio físico (*clogging*). Essa barreira obstrui os poros capilares e limita a difusão contínua do gás para o interior do material, demonstrando que as flutuações cinéticas refletem a resposta intrínseca de cada matriz frente às particularidades do meio.

Os teores de CO_2 retidos aos 28 dias foram utilizados para estimar, via cálculo estequiométrico, a massa de $CaCO_3$ gerada (Tabela 6.5). Tomando como base a relação molar do sistema, a fração estimada de carbonato equivale a aproximadamente 2,27 vezes o teor de gás absorvido. Sob exposição natural, a PTNT gerou uma massa teórica de $CaCO_3$ superior em 22,08% à da PFPVA e em 25,65% à da PTVAR. O mesmo ordenamento foi observado na câmara, onde os registros da PTNT superaram os das formulações PFPVA e PTVAR em 21,81% e 44,60%, respectivamente. No entanto, os índices consolidados sob exposição natural mantiveram-se entre 1,91 e 2,22 vezes acima daqueles registrados na câmara.

Tabela 6.5 – Estimativa estequiométrica do carbonato de cálcio formado aos 28 dias.

Amostra aos 28 dias	$CaCO3_{formado}$ (%)
PFPVA-CN	3,17
PTNT-CN	3,87
PTVAR-CN	3,08
PFPVA-CC	1,65
PTNT-CC	2,01
PTVAR-CC	1,39

Fonte: Autoria própria (2026).

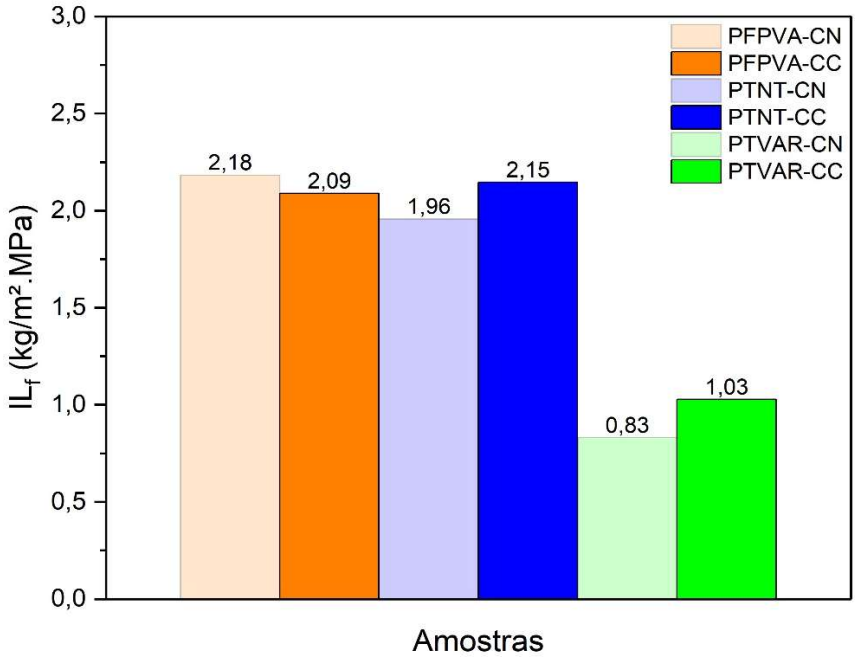
Esses resultados reforçam o potencial desses materiais como sumidouros de carbono, atuando na retenção do gás sob a forma de produtos mineralizados estáveis (Niu et al., 2025). Vale ressaltar, contudo, que por ser tratar de um potencial estequiométrico calculado a partir do ganho líquido de massa da Figura 6.30, os valores reportados traduzem estritamente a eficiência da reação ocorrida no período de exposição, distanciando-se de uma quantificação mineralógica absoluta das fases totais de calcita presentes amostras. Conforme discutido por Vogler et al. (2022), a determinação física direta e exata das fases carbonatadas totais por ensaios térmicos destrutivos costuma sofrer severas interferências e sobreposições devido a variações de cristalinidade de carbonatos amorfos ou desidratações tardias. Essa discussão valida o emprego do balanço de massa matemático a partir da linha de base zerada no dia 0 para isolamento e monitoramento da reação.

6.6.2 Indicadores de ecoeficiência

Os resultados das Figuras 6.31 a 6.33 permitem avaliar as formulações relacionando o consumo absoluto de cimento e pelas emissões de CO_2, mas pela relação entre esses parâmetros e a resistência à flexão obtida aos 14 dias. Aplicações mais recentes desses indicadores em sistemas cimentícios demonstram sua utilidade para comparar diferentes composições quanto à relação entre consumo de ligante, emissões e desempenho mecânico (Oliveira et al., 2024; Pastorini Proença et al., 2025).

A Figura 6.31 mostra que a PTVAR apresentou a maior eficiência no uso do ligante. Na CC, sua intensidade foi 52,1% menor que a PTNT e 50,7% menor que a PFPVA, enquanto, em CN, essa diferença aumentou para 57,7% e 61,9%, respectivamente. Assim, a superioridade da PTVAR está associada à sua capacidade de produzir maior resistência com quantidade semelhante de ligante, evidenciando melhor aproveitamento do material cimentício. Essa relação entre consumo de ligante e desempenho mecânico constitui o princípio empregado na avaliação do *binder intensity* (Damineli et al., 2010).

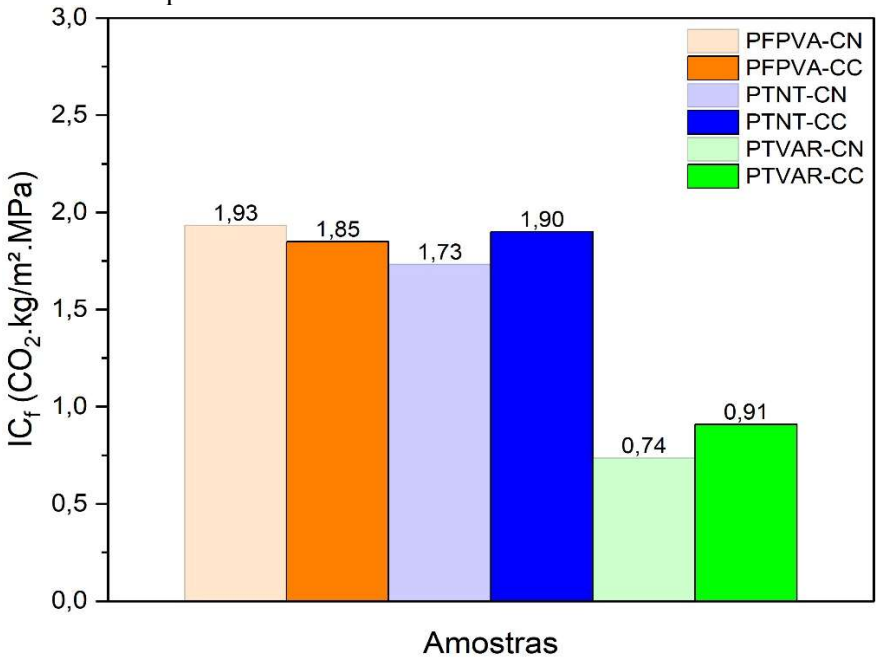
Figura 6.31 – Comparativo da intensidade ligante-flexão em amostras sob CN e CC.



Fonte: Autoria própria (2026).

Na Figura 6.32, a PTVAR também apresentou a menor intensidade de carbono. Em CC, o IC$_f$ foi 52,1% inferior ao da PTNT e 50,8% inferior ao da PFPVA; em CN, as reduções alcançaram 57,2% e 61,7%, respectivamente. Esses resultados evidenciam que a PTVAR apresentou uma vantagem mais pronunciada na condição CN.

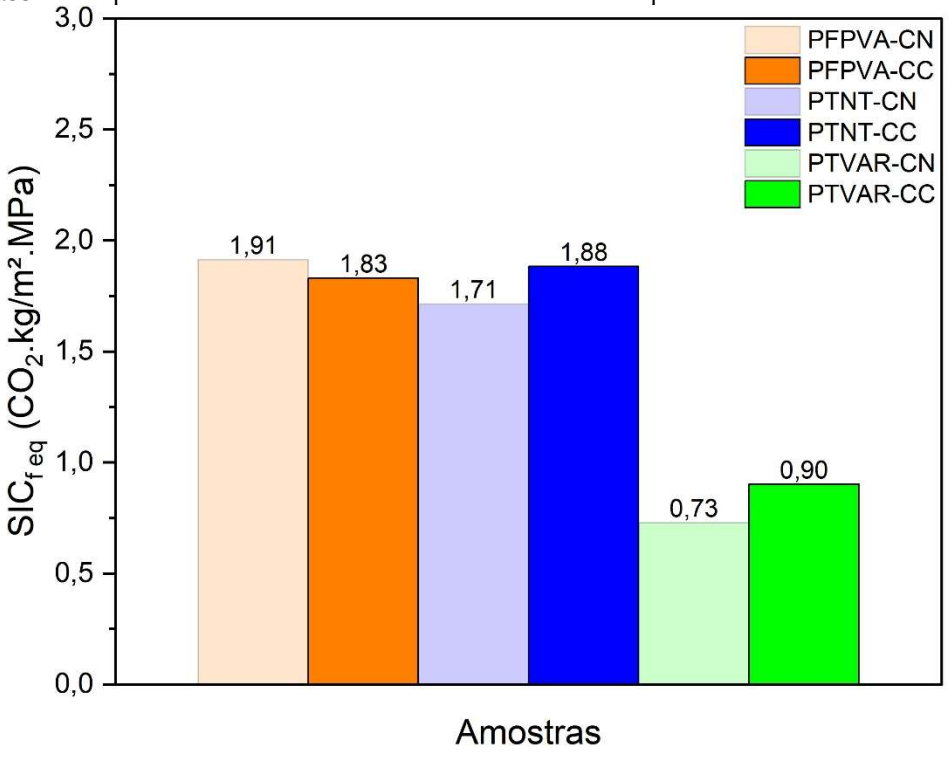
Figura 6.32 – Comparativo da intensidade carbono-flexão em amostras sob CN e CC.



Fonte: Autoria própria (2026).

A Figura 6.33 apresenta o saldo da intensidade carbono-flexão, a qual inclui o CO_2 equivalente como maneira de redução da intensidade carbono-flexão através da captura detectada. Entretanto, a diferença entre IC_f e $SIC_{f\ eq}$ foi pequena, indicando que apesar de mínima redução a captura através da carbonatação contribui para a redução do indicador e consequentemente a melhora da ecoeficiência do compósito. O tempo avaliado também condiciona a proximidade dos valores, mas permite identificar a compensação adicional no balanço. Entre as amostras que mais reduziram em relação a emissão, PTNT e PFPVA demonstraram mais reduções em relação ao emitido mostrado em IC_f, porém todas as formulações neste período de 14 dias ainda têm saldo de emissão maior que o absorvido.

Figura 6.33 – Comparativo do saldo de intensidade carbono-flexão equivalente em amostras sob CC e CN.



Fonte: Autoria própria (2026).

A comparação dos três indicadores confirma a PTVAR como a formulação de maior ecoeficiência, apresentando vantagens relativas entre 50 e 62% em relação às demais formulações. A tendência observada nos três indicadores, indicando que seu melhor desempenho está associado principalmente à relação entre consumo de ligante, emissões de CO_2 e resistência à flexão. A inclusão do CO_2 capturado pela carbonatação promoveu uma redução mínima, não alterando a tendência observada.

6.7 DISCUSSÃO INTEGRADA

Os resultados demonstram que o comportamento das placas é condicionado pela interação entre estrutura porosa, composição da matriz, tipo de reforço e condições de carbonatação. O PTNT apresentou maior porosidade e absorção de água entre os sistemas avaliados, acompanhadas pelo maior avanço da frente carbonatada e maior incorporação líquida de CO_2. Esses achados são compatíveis com a maior facilidade de transporte do gás pela estrutura porosa. Entretanto, a maior carbonatação não pode ser atribuída exclusivamente à porosidade, uma vez que o processo depende também da conectividade dos poros, da difusão do CO_2, do teor de umidade e da disponibilidade de fases carbonatáveis na matriz. Kumar, Gunasekaran e Govindarajan (2026) identificaram a porosidade, a disponibilidade de água, a composição das fases e a evolução microestrutural como fatores fundamentais para o transporte e a mineralização do CO_2 em materiais cimentícios. Portanto, os resultados do presente estudo demonstram uma associação entre essas características, mas não permitem estabelecer uma relação causal isolada entre a porosidade e a incorporação de CO_2.

Por outro lado, o PTVAR exibiu uma estrutura mais compacta e menor profundidade de carbonatação, indicando menor acessibilidade dos poros ao CO_2 e, consequentemente, restrição ao avanço da frente carbonatada. Dessa forma, os dados experimentais reforçam que a facilidade de transporte do CO_2 está relacionada à estrutura interna da matriz, embora não determine isoladamente a eficiência global do material. Esse comportamento converge com os achados de Lin et al. (2025), os quais demonstraram a influência da estrutura dos poros sobre a difusão do CO_2 e observaram que a formação de produtos de carbonatação pode obstruir os poros e limitando o avanço da reação.

O desempenho mecânico apresentou tendência distinta da carbonatação, com o PTVAR alcançando os maiores valores de MOR e tenacidade. Esse comportamento pode ser relacionado à arquitetura contínua e organizada do TVAR, que favorece a transferência de tensões e o controle da propagação das fissuras. Liu et al. (2024) demonstraram que a quantidade, a disposição e a configuração dos fios de vidro AR influenciam significativamente a resistência e a capacidade de deformação dos compósitos têxteis cimentícios. Resultados semelhantes são relatados para elementos com tecidos AR, nos quais o aumento da participação do reforço proporciona maior capacidade de carga e resistência à flexão (Yang; Zhu; Chen, 2023). Embora a magnitude exata da contribuição de cada mecanismo de interação fibra-matriz não tenha sido quantificada diretamente neste estudo, a superioridade mecânica do TVAR corrobora a

literatura e demonstra que uma matriz mais aberta, apesar de favorecer o transporte e a carbonatação, não necessariamente proporciona maior eficiência estrutural.

As alterações dimensionais e as análises térmicas (TG/DTG) revelaram a permanência da portlandita após a exposição, indicando que a carbonatação ocorreu de maneira parcial, enquanto as variações dimensionais observadas podem resultar da atuação simultânea de diferentes fases hidratadas. Li et al. (2023) destacam que a carbonatação da portlandita tende a produzir expansão, ao passo que a carbonatação do C-S-H pode contribuir para retração, sendo o comportamento final dependente das alterações na estrutura dos poros e da precipitação de $CaCO_3$. Além disso, Xu et al. (2023) mostram que o grau de hidratação e as condições de exposição modificam tanto a capacidade de absorção de CO_2 quanto as variações de massa e comprimento das pastas cimentícias.

Esses mecanismos ajudam a explicar por que a maior concentração de CO_2 na câmara não resultou obrigatoriamente em maior captura líquida nas placas. Essa elevada concentração, isoladamente, não controla a quantidade final incorporada no período analisado, pois o fenômeno depende simultaneamente do transporte do gás, da disponibilidade de água, da cinética química e da formação e distribuição dos produtos carbonatados. Além disso, a condição acelerada pode modificar o equilíbrio de umidade e a própria evolução microestrutural da matriz cimentícia.

Evidencia-se, assim, um *trade-off* entre a mineralização de CO_2 e o desempenho mecânico, mostrando que não existe um único critério para definir a formulação ideal. Se o objetivo tecnológico fosse exclusivamente maximizar a incorporação de CO_2 a curto prazo, o PTNT seria o sistema favorecido. Contudo, a formulação mais ecoeficiente não deve ser balizada apenas pela quantidade de gás capturado, mas sim pela combinação otimizada entre sequestro de carbono, consumo de ligante e desempenho mecânico. Sob essa ótica integrada, o PTVAR apresentou o melhor equilíbrio entre as propriedades avaliadas. Por fim, o baixo valor de $SIC_{f\ eq}$ obtido neste estudo não deve ser interpretado como ausência de contribuição ambiental, mas sim como resultado intrínseco ao curto período de exposição adotado (14 dias). Em escala industrial, a produção de grandes volumes de placas e a manutenção das condições favoráveis à carbonatação ao longo do tempo poderiam ampliar a quantidade absoluta de CO_2 mineralizado. Entretanto, essa extrapolação requer cautela, considerando que a taxa de carbonatação tende a diminuir com o avanço da frente carbonatada e que a disponibilidade de fases reativas e as condições de transporte do gás se modificam com o tempo.

Em síntese, enquanto o PTNT manifestou maior potencial de mineralização de CO2, impulsionado por sua maior porosidade e absorção, o PTVAR consolidou-se como a alternativa

de melhor eficiência global por aliar alta resistência mecânica a indicadores ambientais mais equilibrados. Os resultados reforçam a necessidade indispensável de avaliações integradas no desenvolvimento de materiais cimentícios ecoeficientes.

7 CONCLUSÃO

Os resultados permitiram atingir o objetivo geral de avaliar a incorporação de CO_2 por carbonatação em placas cimentícias reforçadas com PVA, TNT e TVAR, evidenciando que o tipo de reforço influencia diretamente o comportamento físico, mecânico, microestrutural e ambiental dos compósitos. O PTVAR apresentou o melhor desempenho mecânico, com maiores valores de resistência à flexão e tenacidade, enquanto o PTNT exibiu maior porosidade, maior avanço da frente carbonatada e maior incorporação equivalente de CO_2. O PFPVA, por sua vez, manifestou comportamento intermediário entre as formulações. Esses achados demonstram que a incorporação de CO_2 não deve ser analisada isoladamente, uma vez que o tipo de reforço modificou simultaneamente as características físicas, a microestrutura, a cinética de carbonatação e o desempenho mecânico dos compósitos.

Quanto aos efeitos da carbonatação, observaram-se alterações na variação dimensional e na microestrutura, associadas às transformações das fases hidratadas e à formação de carbonatos. As análises de TG/DTG revelaram a presença das principais fases da matriz, além de portlandita residual e indícios compatíveis com brucita, os quais estão relacionados com a variabilidade dimensional expansiva das placas. A relação entre porosidade, carbonatação e propriedades mecânicas provou que a facilidade de transporte do CO_2 não implica necessariamente maior desempenho estrutural. Assim, os dados evidenciam a importância do equilíbrio entre a difusão do gás, o adensamento da matriz e atuação mecânica do reforço.

Em relação à ecoeficiência, a incorporação de CO_2 apresentou contribuição limitada no período de 14 dias. Os prazos avaliados permitiram caracterizar o comportamento inicial e o potencial de mineralização dos sistemas, mas são insuficientes para determinar a quantidade de gás que seria retida ao longo de toda a vida útil das placas. Como a taxa de avanço da frente de carbonatação tende a diminuir com o tempo, uma extrapolação, ainda que sublinear e baseada em dados primários, não retrata fielmente a captura futura. Dessa forma, os resultados obtidos não devem ser interpretados como demonstração de sequestro líquido definitivo ou como evidência de que as placas pudessem atuar como sumidouros permanentes de carbono. A contribuição ambiental observada deve ser compreendida estritamente como potencial de mineralização de CO_2 nas condições experimentais avaliadas.

Nesse contexto, propôs-se o saldo de intensidade carbono-flexão equivalente ($SIC_{f\,eq}$), que relaciona o desempenho mecânico ao impacto ambiental associado ao consumo de cimento. O indicador evidenciou que, no intervalo de 14 dias, a incorporação de CO2 ainda não foi suficiente para compensar as emissões associadas à produção dos compósitos. Portanto, a contribuição da carbonatação para a ecoeficiência mostrou-se restrita no período analisado, reforçando a necessidade de janelas de exposição mais longas para avaliar a evolução desse equilíbrio. Apesar disso, a aplicação do $SIC_{f\,eq}$ viabilizou uma análise comparativa eficaz entre as formulações, ponderando simultaneamente os benefícios mecânicos e a contribuição da mineralização do gás.

Em suma, os resultados confirmam a complexidade de se estabelecer uma única formulação capaz de maximizar simultaneamente a resposta mecânica e captura de carbono. O PTVAR apresentou o melhor equilíbrio estrutural e de ecoeficiência, enquanto o PTNT destacou-se pelo maior potencial de mineralização de CO_2. Assim, o fechamento mais relevante deste estudo é demonstrar que uma maior incorporação de CO2 não significa necessariamente um melhor desempenho global do compósito, tornando indispensável uma avaliação conjunta de propriedades mecânicas, físicas, microestruturais e ambientais.

Como sugestões para trabalhos futuros, recomenda-se:

- Ampliar o período de exposição e as condições de carbonatação, incluindo ensaios de maior duração e estabelecendo a correlação entre carbonatação acelerada e a natural;
- Aprofundar a investigação sobre a incorporação do TNT em placas cimentícias, dado que esse reforço propiciou maior avanço da frente carbonatada e promissor potencial de mineralização de CO_2;
- Aplicar o indicador $SIC_{f\,eq}$ em diferentes formulações e em estudos de maior escala, incluindo avaliações em condições próximas às de aplicação industrial, de modo a consolidá-lo como ferramenta comparativa de ecoeficiência no campo dos materiais cimentícios.

8 REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15498**: Chapas cimentícias reforçadas com fios, fibras, filamentos ou telas - Requisitos e métodos de ensaio. 4. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

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

ADEM, Jemal Kedir et al. Effects of low-lime calcium silicate cement addition on the hydration, carbonation, and microstructural characteristics of OPC pastes by carbonation curing. **Journal of Building Engineering**, v. 107, 1 Aug. 2025. DOI: 10.1016/j.jobe.2025.112683.

ALARCON-RUIZ, Lucia et al. The use of thermal analysis in assessing the effect of temperature on a cement paste. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 3, p. 609–613, mar. 2005. DOI: 10.1016/j.cemconres.2004.06.015

ALVES, José Dafico. Manual de tecnologia do concreto. 4. ed. rev. atual. Goiânia: **Ed. da UCG**, 2002. 219 p. (Série Compêndios, v. 5). ISBN 85-7103-155-X.

AN, Yufei et al. Decalcification and carbonation actions investigated during alkali activation-induced calcium (alumino) silicate hydrates C-(A-)S-H gel evolution. **Materials Today Communications**, v. 42, 1 jan. 2025. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2024.110595

ANDRADE, Carmen; SANJUÁN, Miguel Ángel. Updating carbon storage capacity of Spanish cements. **Sustainability**, Switzerland, v. 10, n. 12, p. 1-13, Dec. 2018. DOI: 10.3390/su10124806

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C596-23**: Standard Test Method for Drying Shrinkage of Mortar Containing Hydraulic Cement. West Conshohocken: ASTM International, 2023. Disponível em: http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?C596-23. Acesso em: 1 aug. 2025.

AZEVEDO, Adriano G. S. et al. Effect of the Rehydration Method on the Physical–Mechanical Properties of CO2-Cured Magnesium-Based Fiber Cement Boards. **CivilEng**, v. 5, n. 1, p. 247-264, Mar. 2024. DOI: 10.3390/civileng5010013

AZEVEDO, Adriano G. S. et al. Fiber–Matrix Interface Engineering in Cementitious Composites: Surface Modification, Durability and Emerging Trends. **Coatings**, v. 16, n. 8, p. 922, Aug. 2026. DOI: 10.3390/coatings16080922

AZEVEDO, Adriano G. S.; SAVASTANO, Holmer. Assessment of carbonation as a complementary strategy to increase the durability of Magnesium Oxysulfate (MOS)-based fiber cement boards. **Construction and Building Materials**, v. 438, e174987, Aug. 2024. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.137086

BARBOSA, Meire Claudia. **Efeito da proteção superficial (pintura imobiliária) na difusão e captura de CO2 em argamassas de revestimento**. 2021. 145 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2021.

BATISTA, Carolina. Indicadores de ácido-base. **Toda Matéria**, [2022]. Disponível em: https://www.todamateria.com.br/indicadores-acido-base/. Acesso em: 12 jul. 2025.

BERNAL, Susan A. et al. Report of RILEM TC 281-CCC: A critical review of the standardised testing methods to determine carbonation resistance of concrete. **Materials and Structures**, v. 57, n. 8, p. 1-22, Oct. 2024. DOI: 10.1617/s11527-024-02424-9

BOLAT, Hakan et al. The effects of macro synthetic fiber reinforcement use on physical and mechanical properties of concrete. **Composites Part B: Engineering**, v. 61, p. 191–198, May 2014. DOI: 10.1016/j.compositesb.2014.01.043

BRAHIM, Mohamed Nadjib et al. Early stage ettringite and monosulfoaluminate carbonation investigated by in situ Raman spectroscopy coupled with principal component analysis. **Materials Today Communications**, v. 35, e105949, June 2023. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2023.105539

BRAMESHUBER, W. (ed.). Fibre-reinforced polymer reinforcement for concrete structures: proceedings of the Sixth International Symposium on FRP Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-6), Singapore, 8–10 July 2003. 2v. Singapore: **World Scientific**, 2003.

BRASILIT. **Placa cimentícia**. [2023]. Disponível em: https://www.brasilit.com.br/placa-cimenticia. Acesso em: 21 ago. 2025.

BUTH, Maryah Costa de Moraes et al. Indicadores de resistência à carbonatação em concretos com materiais cimentícios suplementares. **REEC – Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 20, n. 1, p. 1-15, Jan./Dec. 2024. DOI: 10.5216/reec.V20i1.80502

CAI, Yang et al. The compressive behavior of PVA fiber reinforced coral aggregate concrete under high-strain rate loading. **Construction and Building Materials**, v. 497, e140410, Oct. 2025. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2025.143843

CARVALHO, Ricardo Fernandes. **Compósitos de fibras de sisal para uso em reforço de estruturas de madeira**. 2005. 138 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

CHEN, Bao et al. Comparative kinetics study on carbonation of ettringite and meta-ettringite based materials. **Cement and Concrete Research**, v. 137, e106216, Nov. 2020. DOI: 10.1016/j.cemconres.2020.106209

CLARAMUNT, Josep et al. Tensile and flexural properties of cement composites reinforced with flax nonwoven fabrics. **Materials**, v. 10, n. 2, art. 215, Feb. 2017. DOI: 10.3390/ma10020215

CODISPOTI, Rosamaria et al. Mechanical performance of natural fiber-reinforced composites for the strengthening of masonry. **Composites Part B: Engineering**, v. 77, p. 74–83, July 2015. DOI: 10.1016/j.compositesb.2015.03.021

CORREIA, Viviane da Costa; SANTOS, Sergio Francisco; SAVASTANO JUNIOR, Holmer. Vegetable fiber as reinforcing elements for cement based composite in housing applications – a Brazilian experience. **MATEC Web of Conferences**, v. 149, p. 01007, Jan. 2018. DOI: 10.1051/matecconf/201814901007

COSTA, E. B. da et al. Clínquer Portland com reduzido impacto ambiental. **Ambiente Construído**, v. 13, n. 2, p. 75–86, abr./jun. 2013.

COSTA, Stefanny di Samuel da Silva. **Caracterização mecânica à flexão em placas cimentícias reforçadas com tecidos de fibras de malva e juta**. 2021. 76 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) — Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2021.

CRASTO, Renata Cristina Moraes de. **Arquitetura e tecnologia em sistemas construtivos industrializados: light steel framing**. 2005. 235 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2005.

CUROSU, Iurie et al. Tailoring the crack-bridging behavior of strain-hardening cement-based composites (SHCC) by chemical surface modification of poly(vinyl alcohol) (PVA) fibers. **Cement and Concrete Composites**, v. 114, e103722, Nov. 2020. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2020.103722

DAMINELI, Bruno L. et al. Measuring the eco-efficiency of cement use. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, n. 8, p. 555–562, Sept. 2010. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2010.07.009

DAMINELI, Bruno Luis; PILEGGI, Rafael G.; JOHN, Vanderley M. Eco-eficiência do uso do cimento em concreto: estado atual, possibilidades e tendências. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 54., 2012, Maceió. **Anais [...]**. São Paulo: IBRACON, 2012. p. 1–11.

DITCHFIELD, Cynthia. **Estudo dos métodos para a medida da atividade de água**. 2000. 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) — Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

DO AMARAL, Mariana Correa et al. Industrial textile recycling and reuse in Brazil: Case study and considerations concerning the circular economy. **Gestão & Produção**, v. 25, n. 3, p. 431–443, jul. 2018. DOI: 10.1590/0104-530X3305

DROUET, Emeline et al. Carbonation of hardened cement pastes: Influence of temperature. **Cement and Concrete Research**, v. 115, p. 445–459, Jan. 2019. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.09.019

FAN, Qichang et al. Effect of interfacial properties between polyethylene and polyvinyl alcohol fiber/cement matrix on properties of mortar and ECC. **Structural Concrete**, v. 26, n. 2, p. 1683–1698, Apr. 2025. DOI: 10.1002/suco.202400607

FELIX, E. F.; POSSAN, E. Balance emissions and CO_2 uptake in concrete structures: simulation based on the cement content and type. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 11, n. 1, p. 135–162, fev. 2018. DOI: 10.1590/s1983-41952018000100008

FIGUEIREDO, Antônio Domingues de. **Concreto reforçado com fibras**. 2011. 248 f. Tese (Livre-Docência em Engenharia Civil) — Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011. DOI: 10.11606/T.3.2012.tde-18052012-112833

FLOWER, David J. M.; SANJAYAN, Jay G. Green house gas emissions due to concrete manufacture. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 12, n. 5, p. 282–288, July 2007. DOI: 10.1065/lca2007.05.327

FONTOLAN, Beatrice Lorenz; GAVA, Giovanna Patrícia; POSSAN, Edna. Captura de CO_2 em argamassas de revestimento: avaliação de cenários. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 19., 2022, Canela. **Anais [...]**. Porto Alegre: ANTAC, 2022. p. 1-10.

FREITAS, Sânia Maria Belísio de Andrade. **Adição de geomanta e tecido não tecido de polipropileno em cimentos geopoliméricos de pega rápida**. 2008. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.

GALLARDO, Gustavo de Oliveira. **Reforço ao esforço cortante em vigas de concreto aplicando-se folhas flexíveis de fibras de carbono pré-impregnadas**. 2002. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

GAO, Peng et al. Calculation model for CO_2 emissions of blended cement production. **Journal of Cleaner Production**, v. 489, e144646, Jan. 2025. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.144646

GIESE, Andressa Cristine Hamilko. **Utilização de argamassa reforçada com têxtil de fibra de vidro álcali resistente para reforço à flexão de vigas de concreto armado**. 2019. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

GODA, Ibrahim; PADAYODI, Essolé; RAOELISON, Rija Nirina. Enhancing fiber/matrix interface adhesion in polymer composites: Mechanical characterization methods and progress in interface modification. **Journal of Composite Materials**, v. 58, n. 29, p. 3077–3110, Dec. 2024. DOI: 10.1177/00219983241283958

GORZELAŃCZYK, Tomasz; SCHABOWICZ, Krzysztof; SZYMKÓW, Mateusz. Tests of fiber cement materials containing recycled cellulose fibers. **Materials**, v. 13, n. 12, e2759, p. 1–20, June 2020. DOI: 10.3390/ma13122758

GUIMARÃES, Cleidson Carneiro; COELHO, Vinícius Almeida. Construção de câmara de carbonatação: alternativa para construção de saberes no curso de engenharia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE EDUCAÇÃO EM ENGENHARIA, 46., 2018, Salvador. **Anais [...]**. Brasília: ABENGE, 2018. p. 1-10.

GUIMARÃES, Cleidson Carneiro; DORN, Rejane Cristina. Efeito estufa usando material alternativo. **Química Nova na Escola**, v. 37, n. 2, p. 117-122, maio 2015. DOI: 10.5935/0104-8899.20150033

HAKAMY, A.; SHAIKH, F. U. A.; LOW, I. M. Thermal and mechanical properties of hemp fabric-reinforced nanoclay-cement nanocomposites. **Journal of Materials Science**, v. 49, n. 4, p. 1684–1694, Feb. 2014. DOI: 10.1007/s10853-013-7853-0

HALLET, Vincent et al. Hydration of blended cement with high volume iron-rich slag from non-ferrous metallurgy. **Cement and Concrete Research**, v. 151, e106624, Jan. 2022. DOI: 10.1016/j.cemconres.2021.106624

HOPPE FILHO, Juarez et al. Atividade pozolânica de adições minerais para cimento Portland (Parte I): Índice de atividade pozolânica (IAP) com cal, difração de raios-X (DRX), termogravimetria (TG/DTG) e Chapelle modificado. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 3, art. e-11867, Aug. 2017. DOI: 10.1590/s1517-707620170003.0206

HUTTEN, Irwin M. Raw Materials for Nonwoven Filter Media. In: HUTTEN, Irwin M. **Handbook of Nonwoven Filter Media**. [S. l.]: Elsevier, 2007. cap. 4, p. 103–194. DOI: 10.1016/B978-185617441-1/50019-6

IAC - INSTITUTE FOR ATMOSPHERIC AND CLIMATE SCIENCE. Historical CO_2 Datasets (1750 - Present). In: **CO_2 Earth**. 2025. Disponível em: https://www.co2.earth/historical-co2-datasets. Acesso em: 17 ago. 2025.

IKAI, S. et al. 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, Feb. 2010. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2009.06.019

JOHANNESSON, Björn; UTGENANNT, Peter. Microstructural changes caused by carbonation of cement mortar. **Cement and Concrete Research**, v. 31, n. 6, p. 925–931, Mai 2001. DOI: 10.1016/S0008-8846(01)00498-7

KALKREUTH, Jonas et al. Accelerated carbonation of hardened cement paste: Quantification of calcium carbonate via ATR infrared spectroscopy. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 107, n. 4, p. 2627–2640, Apr. 2024. DOI: 10.1111/jace.19546

KHATIB, J. M. et al. Chemical shrinkage of paste and mortar containing limestone fines. **Materials Today: Proceedings**, v. 61, p. 530-536, 2022. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.01.288

KIM, Naru et al. Synergistic effects of CO2 mixing and CO_2 curing in CO_2 uptake capacity of Portland cement. **Construction and Building Materials**, v. 448, e138217, Oct. 2024. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.138217

KOHAN, Lais et al. Cementitious Composites Reinforced with Multidimensional Epoxy-Coated Sisal/PET Braided Textile. **Textiles**, v. 5, n. 4, p. 442-457, Dec. 2025. DOI: 10.3390/textiles5040070

KOTTITITUM, Bundit et al. Early age carbonation of fiber-cement composites under real processing conditions: A parametric investigation. **Applied Sciences**, Switzerland, v. 8, n. 2, e176, Jan. 2018. DOI: 10.3390/app8020190

KUMAR, Sanjeev; GUNASEKARAN, Nithin Krisshna; GOVINDARAJAN, Ramesh. CO_2 mineralization in cementitious systems: Technological merits, limitations, and pathways to scalable deployment. **Journal of Building Engineering**, v. 118, e115157, Jan. 2026. DOI: 10.1016/j.jobe.2025.115157

LACERDA, Matheus Pereira de et al. Efeito da adição de polpa de celulose nanofibrilada nas propriedades de argamassas de revestimento. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 28, n. 2, e20220311, p. 1-13, maio 2023. DOI: 10.1590/1517-7076-rmat-2023-0063

LAGO, Gabriel Souza do. **Acompanhamento do processo de produção de cimento Portland na fábrica de cimento Mizu unidade Baraúna/RN**. 2022. 54 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) — Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2022.

LAVERDE, Valeria et al. Use of vegetable fibers as reinforcements in cement-matrix composite materials: A review. **Construction and Building Materials**, v. 340, e127729, Jul 2022. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127729

LEITE, A. M.; CASTRO, A. L. de. Influence of the cementitious matrix on the behavior of fiber reinforced concrete. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 13, n. 3, p. 543–562, Jun 2020. DOI: 10.1590/s1983-41952020000300006

LI, C. Relationship between water absorption and porosity in concrete with limestone powder addition. **Structural Concrete**, v. 23, n. 5, p. 3284-3293, 2022. DOI: 10.1002/suco.202100546

LI, Liang et al. Dimensional change of cement paste subjected to carbonation in CO_2 sequestration and utilization context: A critical review on the mechanisms. **Journal of CO_2 Utilization**, v. 70, e102444, Apr. 2023. DOI: 10.1016/j.jcou.2023.102444

LIN, Leqing et al. Carbonation of cement-based materials under different conditions: From multi-characterizations to mechanism exploration. **Construction and Building Materials**, v. 491, e142764, Sept. 2025. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2025.142764

LIU, Sai et al. Experimental study of dynamic mechanical properties and damage mechanism of textile reinforced concrete. **Structures**, v. 59, e105758, Jan. 2024. DOI: 10.1016/j.istruc.2023.105758

LO, Tommy Y. et al. Evaluation of carbonation resistance of paint coated concrete for buildings. **Construction and Building Materials**, v. 107, p. 299–306, Mar. 2016. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.01.026

LO, Y.; LEE, H. M. Curing effects on carbonation of concrete using a phenolphthalein indicator and Fourier-transform infrared spectroscopy. **Building and Environment**, v. 37, n. 5, p. 507–514, May 2002. DOI: 10.1016/S0360-1323(01)00052-X

MAFALDA, Ana; VENTURA, F. M.; VENTURA, M. Os Compósitos e a sua aplicação na Reabilitação de Estruturas metálicas. **Ciência & Tecnologia dos Materiais**, v. 21, n. 3/4, p. 10–19, jul./dez. 2009.

MAMLEEV, Vadim; BOURBIGOT, Serge; YVON, Jacques. Kinetic analysis of the thermal decomposition of cellulose: The main step of mass loss. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 80, n. 1, p. 151–165, Aug. 2007. DOI: 10.1016/j.jaap.2007.01.013

MAROTTA, Luiza Ignez Mollica et al. Considerações sobre patologias em edificações: medidas preventivas e recuperação. **Revista Contemporânea**, v. 3, n. 8, p. 11292–11318, ago. 2023. DOI: 10.56083/RCV3N8-074

MAZURANA, Lissandra. **Captura de CO2 em argamassas de revestimento através da carbonatação natural**. 2019. 114 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2019.

MCGEARY, R. K. **Mechanical Packing of Spherical Particles**. 1961. 35 p. Report (Technical Memoranda) — Westinghouse Electric Corporation, Pennsylvania, 1961. Disponível em: https://ptacts.uspto.gov/ptacts/public-informations/petitions/1549007/download-documents?artifactId=CZ6H1YYk0zQW2A5AJljkuPVyRbFpcntC20EYXoLHZF6Ru3VM5kmRhoo. Acesso em: 13 jul. 2026.

MEDEIROS, Marcelo Henrique Farias et al. Ecoeficiência do concreto considerando resistência à compressão, emissão de CO2, resistividade elétrica e migração de cloretos. **Revista Técnico-Científica do CREA-PR**, Curitiba, p. 1–13, set. 2019.

MIDHA, Vinay Kumar; DAKURI, Arjun. Spun bonding Technology and Fabric Properties: a Review. **Journal of Textile Engineering & Fashion Technology**, v. 1, n. 4, p. 114-122, Apr. 2017. DOI: 10.15406/jteft.2017.01.00023

MOLANO, J. C. A. et al. Envelhecimento acelerado de placas cimentícias à base de óxido de magnésio. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 65., 2021, Águas de Lindóia. **Anais [...]**. São Paulo: ABCERAM, 2021. p. 120-131. Disponível em: https://www.metallum.com.br/65cbc/sistema/anais/PDF/11-014.pdf. Acesso em: 10 ago. 2026.

MORANDEAU, A.; THIÉRY, M.; DANGLA, P. Investigation of the carbonation mechanism of CH and C-S-H in terms of kinetics, microstructure changes and moisture properties. **Cement and Concrete Research**, v. 56, p. 153–170, Feb. 2014. DOI: 10.1016/j.cemconres.2013.11.015

NAAMAN, A. E. Textile reinforced cement composites: competitive status and research directions. **International RILEM Conference on Material Science**, v. 1, n. 3, p. 1–20, Sept. 2010.

NIU, Le et al. Global and national CO2 uptake by cement carbonation from 1928 to 2024. **Earth System Science Data**, v. 17, n. 5, p. 2231–2247, May 2025. DOI: 10.5194/essd-17-2231-2025

OLIVEIRA, Dayana Ruth Bola et al. Mixed construction and demolition powder as a filler to Portland cement: study on packaged pastes. **Ambiente Construído**, v. 24, e139552, p. 1-17, dez. 2024. DOI: 10.1590/s1678-86212024000100715

OLIVEIRA, Luciana Alves de. **Metodologia para desenvolvimento de projeto de fachadas leves**. 2009. 296 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) — Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

PADILHA, F.; LEMOS, G.; SILVA, C. Effects of surface hardeners on the performance of concrete floors prepared with different mixture proportions. **REM - International Engineering Journal**, v. 76, n. 2, p. 147-158, 2023. DOI: 10.1590/0370-44672022760023

PASTORINI PROENÇA, M. et al. Eco-efficient particle-packing-optimized concrete incorporating supplementary cementitious materials. **Materiales de Construcción**, v. 75, n. 360, p. e393, Dec. 2025. DOI: 10.3989/mc.2025.402124

PAULETTI, Cristiane; POSSAN, Edna; DAL MOLIN, Denise Carpena Coitinho. Carbonatação acelerada: estado da arte das pesquisas no Brasil. **Coletânea Habitare**, Porto Alegre, v. 7, p. 7–20, nov. 2007.

PEKMEZCI, B. Y. et al. Utility of polyvinyl alcohol fiber-based needle punched nonwoven fabric as potential reinforcement in cementitious composites. **Journal of Composite Materials**, v. 48, n. 25, p. 3129–3140, Oct. 2014. DOI: 10.1177/0021998313507614

PELED, Alva; BENTUR, Arnon. Geometrical characteristics and efficiency of textile fabrics for reinforcing cement composites. **Cement and Concrete Research**, v. 30, n. 5, p. 781–790, May 2000. DOI: 10.1016/S0008-8846(00)00239-8

POLETTO, Matheus et al. Materials produced from plant biomass: part II: evaluation of crystallinity and degradation kinetics of cellulose. **Materials Research**, v. 15, n. 3, p. 421–427, May 2012. DOI: 10.1590/S1516-14392012005000048

POSSAN, Edna. **Contribuição ao estudo da carbonatação do concreto com adição de sílica ativa em ambiente natural e acelerado**. 2004. 198 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

POSSAN, Edna et al. CO2 uptake potential due to concrete carbonation: A case study. **Case Studies in Construction Materials**, v. 6, p. 147–161, June 2017. DOI: 10.1016/j.cscm.2017.01.007

PYZALSKI, Michał et al. Cement Carbonation Under Fermentation Conditions as a Tool for CO2 Emission Management—Technological, Environmental and Economic Analysis. **Energies**, v. 18, n. 17, e4588, p. 1-21, Aug. 2025. DOI: 10.3390/en18174588

QIU, Qiwen. A state-of-the-art review on the carbonation process in cementitious materials: Fundamentals and characterization techniques. **Construction and Building Materials**, v. 247, e118503, June 2020. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118503

RAMBO, Dimas Alan Strauss et al. Effect of elevated temperatures on the mechanical behavior of basalt textile reinforced refractory concrete. **Materials and Design**, v. 65, p. 24–33, Jan. 2015. DOI: 10.1016/j.matdes.2014.08.060

RANJBAR, Navid; ZHANG, Mingzhong. Fiber-reinforced geopolymer composites: A review. **Cement and Concrete Composites**, v. 107, art. 103498, p. 1-17, Mar. 2020. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2019.103498

REINHARDT, Hans W.; KRÜGER, Markus; GROSSE, Christian U. Concrete Prestressed with Textile Fabric. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 1, n. 3, p. 231–239, Oct. 2003.

RIGO, Eduardo. **Avaliação do potencial de captura de CO2 de concretos com resíduos de construção e demolição devido à carbonatação**. 2019. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2019.

RODRIGUES, Pedro. **Cimento**: história, produção, tipos e aplicações. Estruturas e BIM, 2024. Disponível em: https://estruturasebim.com/2024/12/20/cimento-historia-producao-tipos-e-aplicacoes/. Acesso em: 1 abr. 2025.

RODRIGUES, Renata do Nascimento. **Amianto e poluição labor-ambiental**: a efetividade do princípio da prevenção. 2020. 215 f. Tese (Doutorado em Direito do Trabalho) — Faculdade de Direito, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020.

RODRIGUES, Rennan Liberato. **Comportamento mecânico de compósitos cimentícios reforçados com tecido de fibras de vidro e sisal**: aspectos estruturais e durabilidade. 2018. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

SANTOS, Hericles Campos dos. **Influência de nanopartículas de carbonato de cálcio na formação de etringita tardia em pastas de cimento submetidas à cura térmica**. 2020. 98 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) — Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2020.

SAVASTANO JUNIOR, Holmer. **Materiais à base de cimento reforçado com fibra vegetal**: reciclagem de resíduos para a construção de baixo custo. 2007. 185 f. Tese (Livre-Docência em Engenharia de Materiais) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

ŠAVIJA, Branko; LUKOVIĆ, Mladena. Carbonation of cement paste: Understanding, challenges, and opportunities. **Construction and Building Materials**, v. 117, p. 285–301, Aug. 2016. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.04.138

SCRIVENER, Karen L.; JOHN, Vanderley M.; GARTNER, Ellis M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO2 cement-based materials industry. **Cement and Concrete Research**, v. 114, p. 2–26, Dec. 2018. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.03.015

SILVA, Cláudio A. Rigo da et al. Carbonation-Related Microstructural Changes in Long-Term Durability Concrete. **Materials Research**, v. 5, n. 3, p. 287–293, Sept. 2002. DOI: 10.1590/S1516-14392002000300012

SILVA, Flávio de Andrade; MOBASHER, Barzin; TOLEDO FILHO, Romildo Dias. Cracking mechanisms in durable sisal fiber reinforced cement composites. **Cement and Concrete Composites**, v. 31, n. 10, p. 721–730, Nov. 2009. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2009.07.004

SILVA, Martheus et al. Avanço da carbonatação em concretos para idades iniciais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE REABILITAÇÃO DAS CONSTRUÇÕES, 2., 2019, Salvador. **Anais [...]**. Salvador: UFBA, 2019. p. 1–9.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Relatório Anual 2023**. Rio de Janeiro: SNIC, 2023. Disponível em: http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio_anual/1732731328.pdf. Acesso em: 1 abr. 2025.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Roadmap tecnológico do cimento**: potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050. Rio de Janeiro: SNIC, 2019. Disponível em: http://snic.org.br/relatorio-roadmap.php. Acesso em: 1 abr. 2025.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Resultados preliminares de junho 2025**. Rio de Janeiro: SNIC, 2025. Disponível em: http://snic.org.br/numeros-resultados-preliminares-ver.php?id=110. Acesso em: 13 jul. 2025.

SOUZA, Rui Barbosa de. **Estudo da retração em fibrocimento reforçado com fibra polimérica**. 2014. 165 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014. Disponível em: http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-22102014-095743/. Acesso em: 15 nov. 2024.

STEINER, Sarah et al. Effect of relative humidity on the carbonation rate of portlandite, calcium silicate hydrates and ettringite. **Cement and Concrete Research**, v. 135, e106116, p. 1-12, Sept. 2020. DOI: 10.1016/j.cemconres.2020.106116

TEIXEIRA, Felipe Pinheiro et al. On the mechanical properties and crack pattern analysis of a strain hardening cement-based composite reinforced by natural sisal fibers. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 27, n. 4, e20220188, p. 1-15, nov. 2022. DOI: 10.1590/1517-7076-RMAT-2022-0181

TEXTILE EXCHANGE. **Materials Market Report 2024**. Lubbock: Textile Exchange, 2024. Disponível em: https://textileexchange.org/knowledge-center/reports/materials-market-report-2024/. Acesso em: 7 jul. 2025.

TUUTTI, Kyösti. **Corrosion of steel in concrete**. 1982. 230 p. Doctoral Thesis (Monograph) — Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, 1982.

VOGLER, Nico et al. Description of the concrete carbonation process with adjusted depth-resolved thermogravimetric analysis. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 147, n. 11, p. 6167–6180, June 2022. DOI: 10.1007/s10973-021-10966-1

WAGNER, Debora Turon; ARANHA, Isabele Bulhões. Método para análise de tamanho de partícula por espalhamento de luz para bentonita chocolate. In: JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DO CETEM, 15., 2007, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: CETEM, 2007. p. 1–8.

WANG, Jixiang et al. Internal carbonation reinforcement of cementitious materials: Mechanism and performance. **Journal of Building Engineering**, v. 77, e107435, p. 1-16, Oct. 2023. DOI: 10.1016/j.jobe.2023.107491

WANG, Xinhao et al. A Review of Concrete Carbonation Depth Evaluation Models. **Coatings**, v. 14, n. 4, e386, p. 1-24, Mar. 2024. DOI: 10.3390/coatings14040386

WANG, Zhiguang et al. Hydration behaviors, workability, and strength variations in direct aqueous carbonation (DAC) of Portland cement paste. **Scientific Reports**, v. 15, n. 1, e5517, p. 1-13, Feb. 2025. DOI: 10.1038/s41598-025-89875-4

WBCSD - WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT. **The cement sustainability initiative**: our agenda for action. Geneva: WBCSD, 2002. Disponível em: https://docs.wbcsd.org/2015/11/CSI-10YearsOfProgress.pdf. Acesso em: 1 jun. 2025.

XIAN, Xiangping; LOGAN, Chad; SHAO, Yixin. Dimensional stability of cement paste and concrete subject to early-age carbonation curing. **Materials and Structures**, v. 55, n. 3, e76, p. 1-15, Apr. 2022. DOI: 10.1617/s11527-022-01926-8

XIONG, Q. et al. Improved predictions of permeability properties in cement-based materials: A comparative study of pore size distribution-based models. **Construction and Building Materials**, v. 411, e133927, 2024. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.133927

XU, Xiaoli et al. Off-axis mechanical properties of AR-glass textile reinforced engineered cementitious composite: Experimental and theoretical study. **Construction and Building Materials**, v. 500, e144212, p. 1-14, Nov. 2025. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2025.144212

XU, Yaowen et al. Carbonation and related behaviors of hardened cement pastes under different hydration degrees. **Cement and Concrete Composites**, v. 140, e105079, p. 1-15, July 2023. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2023.105079

YAN, Libo; CHOUW, Nawawi; YUAN, Xiaowen. Improving the mechanical properties of natural fibre fabric reinforced epoxy composites by alkali treatment. **Journal of Reinforced**

Plastics and Composites, v. 31, n. 6, p. 425–437, Mar. 2012. DOI: 10.1177/0731684412439494

YAN, Libo; KASAL, Bohumil; HUANG, Liang. A review of recent research on the use of cellulosic fibres, their fibre fabric reinforced cementitious, geo-polymer and polymer composites in civil engineering. **Composites Part B: Engineering**, v. 92, p. 94–132, May 2016. DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.02.002

YANG, Ting; ZHU, Deju; CHEN, Chao. Mechanical properties and failure patterns of sandwich panels with AR-glass textile reinforced concrete face sheets subjected to quasi-static load. **Thin-Walled Structures**, v. 193, e111286, p. 1-15, Dec. 2023. DOI: 10.1016/j.tws.2023.111286

YE, Hailong; RADLIŃSKA, Aleksandra; NEVES, Juliana. Drying and carbonation shrinkage of cement paste containing alkalis. **Materials and Structures**, v. 50, n. 2, e124, p. 1-12, Apr. 2017. DOI: 10.1617/s11527-017-1006-x

YU, Baoying et al. Carbonation of supersulfated cement concrete after 8 years of natural exposure. **Cement and Concrete Composites**, v. 142, e105238, p. 1-11, Sept. 2023. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2023.105165

ZAJAC, Maciej et al. Enforced carbonation of cementitious materials. **Cement and Concrete Research**, v. 174, e107316, p. 1-18, Dec. 2023. DOI: 10.1016/j.cemconres.2023.107285

ZHANG, Wanli; WANG, Junyan; CHEN, Zhiwei. Hydration kinetics, strength, autogenous shrinkage, and sustainability of cement pastes incorporating ultrafine limestone powder. **Case Studies in Construction Materials**, v. 20, e03149, p. 1-16, July 2024. DOI: 10.1016/j.cscm.2024.e03149

ZHANG, Y. et al. Permeability of Concrete and Correlation with Microstructure Parameters Determined by H NMR. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2020, e4969680, p. 1-11, 2020. DOI: 10.1155/2020/4969680