



WALMIR DOS SANTOS TEIXEIRA JUNIOR

**EFEITO DA CURA EM AMBIENTE SATURADO DE CO₂ NO
DESEMPENHO FÍSICO E MECÂNICO DE TELHAS DE
FIBROCIMENTO.**

**LAVRAS-MG
2021**

WALMIR DOS SANTOS TEIXEIRA JUNIOR

**EFEITO DA CURA EM AMBIENTE SATURADO DE CO₂ NO DESEMPENHO
FÍSICO E MECÂNICO DE TELHAS DE FIBROCIMENTO.**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais, área de Concentração em compósitos e Nanocompósitos Lignocelulósicos para a obtenção de título de mestre.

Prof^a. Dra. Maria Alice Martins
Orientadora
Prof. Dr. Gustavo Henrique Denzin Tonoli
Coorientador
Prof. Dr. Holmer Savastano Junior
Coorientador

**LAVRAS-MG
2021**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Teixeira Junior, Walmir Dos Santos.

Efeito da cura em ambiente saturado de CO₂ no desempenho físico e mecânico de telhas de fibrocimento. / Walmir Dos Santos Teixeira Junior. - 2021.

99 p. : il.

Orientador(a): Maria Alice Martins.

Coorientador(a): Gustavo Henrique Denzin Tonoli, Holmer Savastano Junior.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Lavras, 2021.

Bibliografia.

1. Fibrocimento. 2. Carbonatação acelerada. 3. Hidratação. I. Martins, Maria Alice. II. Tonoli, Gustavo Henrique Denzin. III. Junior, Holmer Savastano. IV. Título.

WALMIR DOS SANTOS TEIXEIRA JUNIOR

**EFEITO DA CURA EM AMBIENTE SATURADO DE CO₂ NO DESEMPENHO
FÍSICO E MECÂNICO DE TELHAS DE FIBROCIMENTO.**

**EFFECT OF CURE IN A CO₂ SATURATED ENVIRONMENT ON THE PHYSICAL
AND MECHANICAL PERFORMANCE OF FIBROCEMENT TILES.**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais, área de concentração em Compósitos e Nanocompósitos Lignocelulósicos, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 06 de agosto de 2021.

Profa. Dra. Maria Alice Martins

Embrapa Instrumentação

Dr. Keoma Defáveri do Carmo e Silva

UFLA

Dr. Flávio de Andrade Silva

PUC-RJ

Prof^a. Dra. Maria Alice Martins
Orientadora

Prof. Dr. Gustavo Henrique Denzin Tonoli
Coorientador

Prof. Dr. Holmer Savastano Junior
Coorientador

LAVRAS - MG

2021

A minha esposa e minha filha

Dedico

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e a Mãe Rainha pelas bênçãos em minha vida, por me manter de pé nos dias difíceis e por me proporcionar dias felizes.

A minha esposa Marina por me apoiar em todas as decisões da minha vida, por ser minha companheira e acreditar sempre em mim.

Aos meus pais e minha irmã por me ajudarem a ser o homem que me tornei. A meus avós, tios, primos, minha grande família, meu suporte de vida, e a meus amigos.

A minha orientadora, Prof^ª. Dra. Maria Alice Martins por toda paciência, disponibilidade, confiança, atenção, amizade e pelo ensinamento passado durante esses anos.

A meu coorientador Prof. Dr. Gustavo Henrique Denzin Tonoli pelo conhecimento passado, disponibilidade de seu tempo, atenção e amizade.

A meu coorientador Prof. Dr. Holmer Savastano Junior e toda sua equipe de pesquisadores, em especial, Carlos Alexandre Fioroni, Rafael Henrique Filomeno e Zaqueu Freitas.

Aos professores que de prontidão aceitaram o convite para participarem desta banca.

Aos Laboratórios do complexo de Engenharia de Biomateriais da Universidade Federal de Lavras.

Ao Laboratório de Construções rurais e ambiência FZEA/USP da Universidade de São Paulo pela disponibilidade e ajuda em realizarem os ensaios propostos neste trabalho.

A empresa Infibra S.A. pelos materiais fornecidos e aos funcionários pelo apoio.

A Embrapa Instrumentação pela realização de ensaios complementares a esta pesquisa.

Ao programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais por me proporcionarem esta grande oportunidade de conhecimento e um mundo a ser explorado.

Aos professores do programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais.

Aos amigos da Biomateriais, em especial, Elise, Ana Carolina e Rodrigo pela ajuda incansável neste trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal do Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro.

Por fim, a todos que contribuíram de alguma forma para realização deste trabalho e torceram pelo seu sucesso.

Muito obrigado!

“O mais competente não discute, domina a sua ciência e cala-se.” (Voltaire)

RESUMO

A motivação deste trabalho se baseou no fato das fibras celulósicas sofrerem com o ambiente alcalino gerado pelos produtos de hidratação da matriz cimentícia, principalmente o hidróxido de cálcio. Uma das formas encontradas para diminuir esse ambiente alcalino é induzir a reação de hidróxido de cálcio com o dióxido de carbono (carbonatação acelerada), além dessa redução de alcalinidade, o produto gerado dessa reação, o carbonato de cálcio, densifica e preenche os poros da matriz cimentícia, dando ao material menos porosidade e melhorando as propriedades mecânicas. Neste trabalho foi avaliado a carbonatação acelerada de telhas de fibrocimento e parâmetros que podem influenciar o processo de carbonatação, como espaçamento, hidratação e fornecimento de dióxido de carbono proveniente da combustão de gás natural. Para avaliação das telhas carbonatadas foram realizados ensaios físicos-mecânicos, termogravimetria, difração de raios X, envelhecimento acelerado e teste de retração por secagem. Os resultados obtidos em termogravimetria e difração de raios X mostraram que no tempo de exposição ao dióxido de carbono de 48h foi possível obter um aumento de 5,26% na densidade aparente e um aumento de 28% no módulo de ruptura, atingindo um grau de carbonatação de 24,3 %. O uso de espaçadores entre as telhas de fibrocimento se mostrou um método benéfico para otimização do processo de carbonatação, pois ao serem espaçadas, as telhas ficaram mais propensas à difusão de dióxido de carbono e às vantagens proporcionadas pela carbonatação. Através deles, foi possível obter uma redução de 2,29 % na absorção de água e um aumento de 28% no módulo de ruptura, além do aumento expressivo no grau de carbonatação em 22,1 %. O dióxido de carbono proveniente da queima do gás natural se mostrou uma fonte promissora para utilização no processo de carbonatação de telhas de fibrocimento. Na avaliação da hidratação por imersão, os resultados mostraram que a imersão em água antes e após o processo não levou a melhoria das propriedades físicas e mecânicas. Em linhas gerais, a carbonatação acelerada, melhorou as propriedades das telhas de fibrocimento quanto às propriedades físicas e mecânicas.

Palavras-chave: Carbonatação acelerada. Fibrocimento. Hidratação. Carbonatação. Cura por Carbonatação. Carbonatação com gases de combustão.

ABSTRACT

The motivation of this work was based on the fact that cellulosic fibers suffer from the alkaline environment generated by the hydration products of the cement matrix, mainly calcium hydroxide. One of the ways found to reduce this alkaline environment is to induce the reaction of calcium hydroxide with carbon dioxide (accelerated carbonation), in addition to this alkalinity reduction, the product generated from this reaction, calcium carbonate, densifies and fills the pores of the cementitious matrix, giving the material less porosity and improving mechanical properties. In this work, the accelerated carbonation of fiber cement tiles and parameters that can influence the carbonation process, such as spacing, hydration and supply of carbon dioxide from natural gas combustion, were evaluated. To evaluate the carbonated tiles, physical-mechanical tests, thermogravimetry, X-ray diffraction, accelerated aging and drying shrinkage tests were carried out. The results obtained in thermogravimetry and X-ray diffraction showed that in the 48h exposure time to carbon dioxide it was possible to obtain an increase of 5.26% in the bulk density and a 28% increase in the modulus of rupture, reaching a degree of carbonation of 24.3%. The use of spacers between the fiber-cement tiles proved to be a beneficial method for optimizing the carbonation process, because when they were spaced, the tiles were more prone to the diffusion of carbon dioxide and to the advantages provided by carbonation. Through them, it was possible to obtain a reduction of 2.29% in the absorption of water and a 28% increase in the modulus of rupture, in addition to a significant increase in the degree of carbonation of 22.1%. Carbon dioxide from natural gas burning proved to be a promising source for use in the carbonation process of fiber cement tiles. In the evaluation of hydration by immersion, the results showed that immersion in water before and after the process did not lead to improvement in physical and mechanical properties. Generally speaking, accelerated carbonation improved the properties of fiber cement tiles in terms of physical and mechanical properties.

Keywords: Accelerated carbonation. Fiber cement. Hydration. Carbonation. Carbonation cure. Carbonation with flue gases.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Regiões das telhas de fibrocimento.	22
Figura 2 - Estrutura simplificada da parede celular de fibras vegetais.....	24
Figura 3 - Evolução da taxa de calor do cimento Portland.....	28
Figura 4 - Esquemática do processo Hatscheck.....	30
Figura 5 - Telhas de fibrocimento em formas metálicas onduladas	31
Figura 6 – Partes funcionais de uma extrusora.....	32
Figura 7 – Fluxograma das etapas do tratamento das telhas de fibrocimento.....	35
Figura 8 – Telhas espaçadas antes do processo de (A) e telhas dispostas na autoclave cilíndrica horizontal FHAIZER para o processo de carbonatação acelerada (B).....	49
Figura 9 – Curvas TG/DTG para as telhas de fibrocimento imersas e não imersas inicialmente.	55
Figura 10 – Difratoograma de raios X (DRX) de telhas de fibrocimento com e sem imersão inicial.	57
Figura 11 – Absorção de água na avaliação do efeito da imersão inicial de telhas de fibrocimento carbonatadas.....	58
Figura 12 – Valores de porosidade aparente para avaliação do efeito da imersão inicial em telhas de fibrocimento carbonatadas.....	59
Figura 13 – Valores de densidade aparente para avaliar o efeito da imersão inicial em telhas de fibrocimento carbonatadas.	60
Figura 14 – Valores médios de módulo de ruptura (MOR) para avaliação do efeito da imersão inicial em telhas de fibrocimento carbonatadas.....	61
Figura 15 – Valores médios de limite de proporcionalidade (LOP) para avaliação do efeito da imersão inicial em telhas de fibrocimento carbonatadas.	62
Figura 16 – Valores médios de módulo de elasticidade (MOE) para avaliação do efeito da imersão inicial em telhas de fibrocimento carbonatadas.	62
Figura 17 – Valores médios de módulo de energia específica (EE) para avaliação do efeito da imersão inicial em telhas de fibrocimento carbonatadas.	63
Figura 18 – Módulo de ruptura (MOR) versus densidade aparente (DA) das telhas de fibrocimento com imersão inicial e sem imersão inicial.	63
Figura 19 – Curvas TG/DTG para as telhas de fibrocimento carbonatadas por 6, 24 e 48 h e sua referência não carbonatada.....	65

Figura 20 – Difratoograma de raios X (DRX) sobre tempo de carbonatação das telhas de fibrocimento	67
Figura 21 – Indicador de fenolftaleína sobre telhas de fibrocimento para avaliação das reações de carbonatação	68
Figura 22 – Valores de absorção de água para telhas de fibrocimento carbonatadas por 6, 24 e 48h antes e após ensaios de envelhecimento acelerado (Env.).....	69
Figura 23 – Valores de porosidade aparente para telhas de fibrocimento carbonatadas por 6, 24 e 48h antes e após ensaios de envelhecimento acelerado (Env.).....	70
Figura 24 – Valores de densidade aparente para telhas de fibrocimento carbonatadas por 6, 24 e 48h antes e após ensaios de envelhecimento acelerado (Env.).....	70
Figura 25 – Retração por secagem em telhas de fibrocimento carbonatadas por 6 e 48 h e sua referência (não carbonatada) durante 7 dias.	72
Figura 26 – Valores médios para o módulo de ruptura (MOR) na avaliação do efeito do tempo de carbonatação, antes e após o processo de envelhecimento acelerado (Env.).	73
Figura 27 – Valores médios para o limite de proporcionalidade na avaliação do efeito de tempo de carbonatação, antes e após o processo de envelhecimento acelerado.....	73
Figura 28 - Valores médios para o módulo de elasticidade na avaliação do efeito de tempo de carbonatação, antes e após o processo de envelhecimento acelerado (Env.).	74
Figura 29 – Valores médios para energia específica na avaliação do efeito tempo de carbonatação, antes e após o processo de envelhecimento acelerado (Env.).	75
Figura 30- Curvas TG/DTG para as telhas de fibrocimento com e sem espaçamento.....	77
Figura 31 – Difratoograma de raios X sobre o efeito do espaçamento durante a reação de carbonatação em telhas de fibrocimento.	78
Figura 32 – Valores médios para absorção de água (AA) avaliando o efeito do espaçamento em telhas de fibrocimento carbonatadas antes e após o processo de envelhecimento acelerado (Env.).....	79
Figura 33 – Valores médios para densidade aparente (DA) avaliando o efeito do espaçamento em telhas de fibrocimento carbonatadas antes e após o processo de envelhecimento acelerado (Env.).....	79
Figura 34 – Valores médios para porosidade aparente (PA) avaliando o efeito do espaçamento em telhas de fibrocimento carbonatadas antes e após o processo de envelhecimento acelerado (Env.).....	80
Figura 35– Valores médios para módulo de ruptura (MOR) avaliando o efeito do espaçamento em telhas de fibrocimento carbonatadas.....	82

Figura 36 – Valores médios para limite de proporcionalidade (LOP) avaliando o efeito do espaçamento em telhas de fibrocimento carbonatadas.	82
Figura 37 – Valores médios para módulo de elasticidade (MOE) avaliando o efeito do espaçamento em telhas de fibrocimento carbonatadas.	83
Figura 38 – Valores médios para energia específica (EE) avaliando o efeito do espaçamento em telhas de fibrocimento carbonatadas.	83
Figura 39 – Valores médios para módulo de ruptura (MOR) avaliando o efeito do espaçamento em telhas de fibrocimento carbonatadas.	84
Figura 40- Curvas TG/DTG para as telhas de fibrocimento carbonatadas por 48 h com e sem imersão final.	86
Figura 41– Difratoograma de raios X (DRX) das telhas de fibrocimento em função da hidratação por imersão final	87
Figura 42 – Valores de absorção de água para imersão final das telhas de fibrocimento.	88
Figura 43– Valores de densidade aparente para imersão final das telhas de fibrocimento.	88
Figura 44 – Valores de porosidade aparente para imersão final das telhas de fibrocimento. ..	89
Figura 45– Valores de módulo de ruptura (MOR) para avaliação da imersão final das telhas de fibrocimento antes e após o ensaio de envelhecimento acelerado.....	91
Figura 46 – Valores de módulo de elasticidade (MOE) para avaliação da imersão final das telhas de fibrocimento antes e após o ensaio de envelhecimento acelerado.	91
Figura 47– Valores de limite de proporcionalidade para avaliação da imersão final das telhas de fibrocimento antes e após o ensaio de envelhecimento acelerado.....	92
Figura 48– Valores de energia específica para avaliação da imersão final das telhas de fibrocimento antes e após o ensaio de envelhecimento acelerado.....	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características das fibras poliméricas.....	26
Tabela 2 – Constituintes do cimento Portland.....	27
Tabela 3 – Composição das matérias primas para fabricação das telhas no estado sólido (antes da mistura em meio aquoso)	47
Tabela 4 – Parâmetros de ensaio	48
Tabela 5 - Grau de carbonatação calculado a partir do conteúdo de carbonatos formados nas telhas de fibrocimento e a umidade das telhas.	56
Tabela 6 – Valores médios do ensaio físico para telhas de fibrocimento, imersas e não imersas, antes do processo de carbonatação acelerada, seguidas de suas análises estatísticas.	60
Tabela 7 – Valores médios do ensaio físico para telhas de fibrocimento, imersas e não imersas, antes do processo de carbonatação acelerada, seguidas de suas análises estatísticas, após ensaio de envelhecimento acelerado (Env.).....	60
Tabela 8 – Valores médios para os ensaios mecânicos na avaliação da imersão inicial e seus respectivos desvios padrão.	64
Tabela 9 – Valores médios para os ensaios mecânicos na avaliação da imersão inicial e seus respectivos desvios padrão, após ensaios de envelhecimento acelerado.....	64
Tabela 10 – Grau de carbonatação e umidade de telhas de fibrocimento por 6, 24 e 48h.	66
Tabela 11 – Valores de ensaios físicos (AA, DA e PA) para diferentes tempos de carbonatação (0h, 6h, 24h e 48h).....	71
Tabela 12 – Valores de ensaios físicos (AA, DA e PA) para diferentes tempos de carbonatação (0h, 6h, 24h e 48h) após o ensaio de envelhecimento acelerado (Env.)....	71
Tabela 13 - Valores médios e seus respectivos desvios padrão para os resultados mecânicos na avaliação do tempo de carbonatação.	75
Tabela 14 – Valores médios e seus respectivos desvios padrão para os resultados mecânicos na avaliação do tempo de carbonatação após os ensaios de envelhecimento acelerado. .	76
Tabela 15 – Grau de carbonatação e umidade de telhas de fibrocimento com e sem espaçamento.....	77
Tabela 16 – Valores de ensaios físicos antes do ensaio de envelhecimento acelerado para avaliação do efeito do espaçamento.	80

Tabela 17 – Valores de ensaios físicos após o ensaio de envelhecimento acelerado, para avaliar o efeito do espaçamento.....	81
Tabela 18 – Valores de ensaios mecânicos para avaliar o efeito do espaçamento.....	84
Tabela 19 – Valores de ensaios mecânicos após o ensaio de envelhecimento acelerado, para avaliar o efeito do espaçamento.....	84
Tabela 20 - Grau de carbonatação (GC) calculados a partir do conteúdo de carbonatos formados nas telhas de fibrocimento.....	86
Tabela 21 – Valores de AA, DA e PA para avaliação da imersão final das telhas de fibrocimento.	89
Tabela 22 – Valores de AA, DA e PA para avaliação da imersão final das telhas de fibrocimento após o ensaio de envelhecimento acelerado (Env.).	89
Tabela 23 – Valores de MOR, LOP, MOE e EE para avaliação da imersão final das telhas de fibrocimento.	93
Tabela 24 – Valores de MOR, LOP, MOE e EE para avaliação da imersão final das telhas de fibrocimento após o ensaio de envelhecimento acelerado.....	93

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AA	Absorção de água
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANOVA	Análise de variância
ASTM	American Society for Testing Materials
CA	Carbonatação acelerada
CO ₂	Dióxido de Carbono
CP	Corpo de prova
DA	Densidade aparente
DRX	Difração de raios X
DTG	Primeira derivada da perda de massa em termogravimetria
EE	Energia específica
ENV	Envelhecimento acelerado
ESP	Espaçamento
FZEA	Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos
GC	Grau de carbonatação
IM	Telhas de fibrocimento imersas em água
LOP	Limite de proporcionalidade
MOE	Módulo de Elasticidade
MOR	Módulo de Ruptura
NBR	Norma Brasileira Registrada
PA	Porosidade aparente
PP	Polipropileno
PVA	Álcool polivinílico

REF	Referência
TG	Termogravimetria
UFLA	Universidade Federal de Lavras
USP	Universidade de São Paulo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
2	OBJETIVOS	21
2.1	Objetivo geral	21
2.2	Objetivos específicos.....	21
3	REFERENCIAL TEÓRICO	22
3.1	Fibrocimento	22
3.1.1	Fibras Vegetais	24
3.1.2	Fibras poliméricas	26
3.1.3	Cimento Portland e calcário	27
3.2	Hidratação do cimento	27
3.3	Processo de produção do fibrocimento.....	29
3.4	Carbonatação acelerada	32
4	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	35
	REFERÊNCIAS	37
	SEGUNDA PARTE - ARTIGO.....	42
	TELHAS DE FIBROCIMENTO: EFEITO DA HIDRATAÇÃO E ESPAÇAMENTO DURANTE A CARBONATAÇÃO ACELERADA NAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS.	42
1	INTRODUÇÃO	45
2	MATERIAL E MÉTODOS	47
2.1	Material	47
2.2	Métodos	48
2.2.1	Hidratação, espaçamento e tempo de carbonatação	48
2.3	Termogravimetria (TG).....	49
2.4	Grau de carbonatação (GC)	50
2.5	Difração de raios X (DRX)	50
2.6	Aplicação de solução fenolftaleína	51
2.7	Envelhecimento acelerado	51
2.8	Ensaio físicos	51

2.9	Retração por secagem	52
2.10	Ensaio mecânico	53
2.11	Análise estatística	54
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
3.1	Efeito da hidratação inicial por imersão	55
3.2	Efeito do tempo de carbonatação.....	64
3.3	Efeito do espaçamento das telhas.....	76
3.4	Efeito da hidratação por imersão final.....	85
4	CONCLUSÃO	94
5	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	95
	REFERÊNCIAS	96

1 INTRODUÇÃO

Na construção civil as telhas onduladas de fibrocimento são amplamente utilizadas nas coberturas de obras residenciais e comerciais (ARDANUY et al., 2015). Produzidas principalmente pelo método Hatschek (INNOCENTINI et al., 2019), elas são compostas de uma matriz cimentícia, água, calcário, reforço fibroso celulósico e polimérico (IKAI et al, 2010; TONOLI et al., 2010a). Por muitos anos, o reforço utilizado juntamente com a matriz cimentícia era realizado pela fibra mineral de amianto, entretanto devido a doenças pulmonares relacionadas a essas fibras, houve a necessidade de substituição (FARUK et al, 2012).

Entre os tipos de fibras utilizados como reforço no fibrocimento atualmente tem-se as fibras poliméricas, em geral fibras de álcool polivinílico (PVA) e polipropileno (PP), porém são fibras não renováveis e com alto custo (IKAI et al., 2010). Em relação às fibras celulósicas, o ambiente alcalino causado pelos produtos de hidratação do cimento Portland às degradam e fazem com que sua característica de reforço seja diminuída (FARUK et al., 2012). Devido à grande importância comercial deste produto e os problemas enfrentados pelo reforço fibroso, diversas pesquisas têm sido realizadas para aumentar a qualidade e desempenho do fibrocimento (FILOMENO, 2018; FIORONI et al., 2020; SCHIAVI, 2019; TONOLI et al., 2016; TONOLI et al., 2019).

Os estudos realizados têm-se concentrado em diminuir a hidrofobicidade das fibras vegetais através de tratamentos (SCHIAVI, 2019) e diminuir o ambiente alcalino do fibrocimento (ALMEIDA et al., 2013; FIORONI et al., 2020; TONOLI et al., 2019). A carbonatação acelerada, um método de cura de compósitos cimentícios em ambiente enriquecido com dióxido de carbono (CO_2), surge com potencial para ajudar a diminuir este ambiente alcalino (CHEN; BAI; GAO, 2021; SOROUSHIAN; MON; HASSAN, 2012). Ela promove a precipitação do carbonato de cálcio (CaCO_3) na matriz cimentícia pela reação do ácido carbônico (H_2CO_3) e os produtos de hidratação do cimento Portland como o hidróxido de cálcio (LIU; MENG, 2021; WANG; NOGUCHI, 2019). Essa reação faz com que o hidróxido de cálcio seja consumido, diminuindo o ambiente alcalino prejudicial às fibras celulósicas e aumentando a concentração de carbonato de cálcio (EBRAHIMI et al., 2017; TONOLI et al., 2010a).

Resultados sobre propriedades físicas encontrados na literatura quanto à carbonatação acelerada em compósitos cimentícios apontam para um aumento da densidade da matriz cimentícia (LESTI; TIEMEYER; PLANK, 2013), diminuição da porosidade e absorção de água (ZHAN et al., 2014). Em relação ao desempenho mecânico os estudos demonstraram um

aumento no módulo de ruptura, no limite de proporcionalidade e módulo de elasticidade (FIORONI, 2019; LI; FARZADNIA; SHI, 2017; PAN et al., 2017).

Para o processo de carbonatação acelerada tem-se utilizado dióxido de carbono puro, como agente de cura em fibrocimentos, proveniente da compra de cilindros preenchidos com este gás. Porém, este agente de cura pode ser obtido através da combustão de gases, levando a uma nova aplicação para o dióxido de carbono gerado, o que poderia ajudar na diminuição da concentração deste gás na atmosfera (XIAN; ZHANG; SHAO, 2021), já que ele é considerado o principal gás de efeito estufa e sua concentração excessiva na atmosfera pode levar a mudanças climáticas (CHEN; BAI; GAO, 2021).

Dentro deste contexto, o objetivo do presente estudo foi estudar os efeitos da carbonatação acelerada em telhas de fibrocimento e alguns parâmetros que podem otimizar este processo, como o espaçamento e a hidratação das telhas de fibrocimento, além do fornecimento de gás natural em contrapartida ao fornecimento do gás puro. Esses parâmetros foram avaliados através de ensaios físicos, mecânicos, mineralógicos por difração de raios X (DRX), térmicas por termogravimetria (TG), e de durabilidade por envelhecimento acelerado e retração por secagem.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O estudo tem como objetivo geral avaliar a influência da carbonatação acelerada como método de cura em telhas de fibrocimento produzidas pelo método Hatschek e a mudança nos parâmetros do processo, como espaçamento e hidratação, além de avaliar o uso do dióxido de carbono proveniente da combustão do gás natural.

2.2 Objetivos específicos

- a) Avaliar os efeitos da hidratação, antes e após o processo de carbonatação
- b) Avaliar a utilização de dióxido de carbono proveniente da queima do gás natural
- c) Avaliar o uso de espaçadores entre as telhas de fibrocimento durante o processo de carbonatação acelerada.
- d) Avaliar o desempenho físico-mecânico de telhas de fibrocimento carbonatadas em função do envelhecimento acelerado.

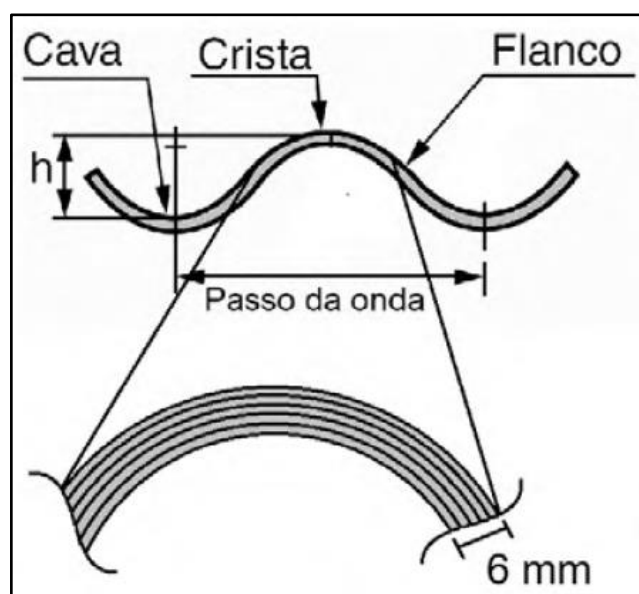
3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Fibrocimento

O fibrocimento é um compósito formado por uma matriz cimentícia e fibras distribuídas ao longo dessa matriz (ALREKABI et al., 2017; DA COSTA CORREIA et al., 2018; TEIXEIRA, 2010). Ele vem sendo utilizado em alguns setores da construção civil, como segmentos comerciais, construções rurais e habitações residenciais, gerando valor agregado ao produto (FIORONI, 2019) podendo ser encontrados em formas de telhas, caixas d'água, placas planas, forros e divisórias (IKAI et al., 2010; TEIXEIRA, 2010).

As telhas de fibrocimento possuem formato ondulado e geralmente são vendidas com espessuras de 5 e 6 mm. A Figura 1 ilustra as regiões existentes nas telhas de fibrocimento, onde a crista é considerada o ponto mais alto da telha. A altura (h) é a distância entre a crista e a cava. O flanco é considerado a única parte plana das telhas e o passo da onda é a medida entre duas cavas (NBR 15210-1, 2014).

Figura 1 - Regiões das telhas de fibrocimento.



Fonte: NBR 15210-1 (2014) citado por Fioroni (2019).

Os materiais cimentícios quando submetidos a tensões de flexão apresentam baixa resistência a fraturas (ALREKABI et al., 2017; DA COSTA CORREIA et al., 2018), devido a essa característica mecânica, a matriz cimentícia necessita de um reforço capaz de resistir a tensões de tração. No compósito concreto armado, esse reforço é realizado através de barras de

aço e no fibrocimento esse reforço é feito com adição de fibras à matriz. As fibras utilizadas como reforço no fibrocimento são as fibras poliméricas, as fibras naturais ou de celulose natural e as fibras inorgânicas. Inserir essas fibras em matriz cimentícia a torna mais tenaz (CALLISTER JR.; RETHWISCH, 2016), auxilia no controle da fissuração (DA COSTA CORREIA et al., 2018), além de melhorar seu comportamento dúctil na ruptura (TEIXEIRA, 2010).

Alguns fatores como o tipo de fibras, dispersão e amplitude da ligação interfacial fibra-matriz, fornecem características mecânicas ao fibrocimento (CALLISTER JR., RETHWISCH, 2016). O reforço das fibras deve agir de forma que haja distribuição de cargas entre matriz e fase dispersa, aumentando a durabilidade do compósito (TEIXEIRA et al., 2018). A concentração de fibras na matriz pode chegar a 12% do compósito em volume (ALREKABI et al., 2017). O auxílio das fibras na compatibilização de cargas com a matriz cimentícia fica evidenciado após o início da fissuração do compósito. O reforço fibroso consegue retardar o aparecimento de fissuras e trincas no material. Essa tenacidade pós-fissuração pode permitir um uso mais intensivo desses compósitos na construção (BENTCHIKOU et al., 2012; DA COSTA CORREIA et al., 2018).

Por muitos anos, o reforço fibroso utilizado era composto de uma fibra mineral, o amianto, devido a excelentes propriedades físicas, químicas e sua disponibilidade de obtenção (URREA-CEFERRINO; PANESAR; SAVASTANO, 2019). Entretanto, no decorrer de seu uso, os trabalhadores começaram a relatar doenças ao inalarem a fibra, que ao entrar em contato com o pulmão, levava a uma doença conhecida como o “pulmão de pedra” (ARDANUY; CLARAMUNT; TOLEDO FILHO, 2015). Devido a essa enfermidade, surgiu então a necessidade de pesquisas para encontrar fibras substitutas, seguras quanto ao seu uso (TEIXEIRA, 2010)

As fibras vegetais mais utilizadas e consolidadas no mercado do fibrocimento são as fibras de celulose, obtidas a partir da madeira de pinus e eucalipto com comprimentos na ordem entre 1 e 2,5 mm (TONOLI et al., 2010). As poliméricas possuem comprimentos na ordem entre 6 e 10 mm, entre as mais utilizadas, destacam-se as fibras de polipropileno e de poli vinil álcool.

Pesquisas sobre fibrocimento utilizando como reforço apenas fibras vegetais tem demonstrado resultados promissores (BALLESTEROS et al., 2019; SAVASTANO; WARDEN; COUTTS, 2003; TONOLI et al., 2010a). A utilização de fibras vegetais no lugar de fibras poliméricas pode diminuir o custo de produção do fibrocimento, tornando as ainda mais atraentes para aplicação em construções de baixa renda, contribuindo para o desenvolvimento de países emergentes (TONOLI et al., 2010b). Apesar das telhas de

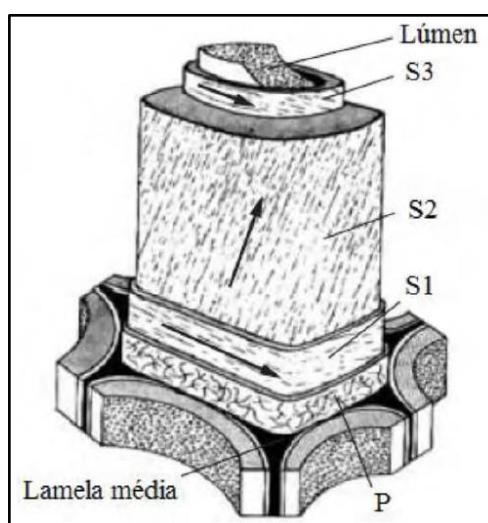
fibrocimento produzidas apenas com reforço fibroso vegetal ainda não ser realidade no mercado, placas cimentícias planas autoclavadas, ou seja, curadas em ambiente com pressurização, umidade e temperatura elevada, utilizando apenas fibras vegetais como reforço em sua produção, já estão sendo disponibilizadas comercialmente (FERNÁNDEZ-CARRASCO; CLARAMUNT; ARDANUY, 2014).

3.1.1 Fibras Vegetais

As fibras vegetais são compostas principalmente por celulose, com quantidades variadas de lignina, hemiceluloses e alguns extrativos (SILVA et al., 2009). Elas possuem variedades morfológicas como diferentes tipos de diâmetro, comprimento e rugosidade da superfície (FARUK et al., 2012), podendo ser encontradas em formas de fios ou polpa (ARDANUY; CLARAMUNT; TOLEDO FILHO, 2015).

Elas podem ser obtidas através de variadas fontes naturais, através de folhas (sisal, abacaxi e curauá), caule (juta), tronco (madeira), colmo (bambu), fruto (coco) e semente (algodão) (FARUK et al., 2012). A estrutura de camadas das fibras lignocelulósicas é complexa, a parede primária (P) é fina, depositada durante o crescimento das células que circunda uma parede secundária, esta composta por três camadas (S1, S2, S3). A camada S2 determina as propriedades mecânicas das fibras e consiste em várias microfibras formadas por longas cadeias de celulose, organizando o sentido das fibras (FIGURA 2) (SILVA et al., 2009).

Figura 2 - Estrutura simplificada da parede celular de fibras vegetais.



Fonte: Adaptado de Filomeno (2018)

Para a utilização de fibras vegetais no fibrocimento, é de suma importância observar a sua degradação ao entrar em contato com materiais cimentícios. Esta degradação ocorre principalmente devido à presença de hidróxido de cálcio que ao entrar em contato com a água, se aloca em poros (vazios) da matriz cimentícia tornando o meio alcalino. Essa alcalinidade enfraquece as ligações de suas células individuais e decompõe lignina e hemicelulose interferindo na resistência dessas fibras de reforço (ALMEIDA et al., 2013; CLARAMUNT et al., 2011; TONOLI et al., 2016; TONOLI et al., 2019).

A degradação das fibras vegetais por ataque alcalino ocorre em três etapas. A primeira devido à hidrofiliabilidade das fibras que absorvem a água alcalina presente nos poros do composto provocando um inchamento das fibras. A precipitação do hidróxido de cálcio no lúmen das fibras como uma segunda fase, as mineralizando (TONOLI et al., 2019) e em uma terceira fase, a perda da água por evaporação, há uma redução de sua seção comprometendo quanto as suas características de reforço. Essa instabilidade dimensional é responsável por formar uma região porosa em torno das fibras (SAVASTANO JUNIOR, 2000; SAVASTANO JUNIOR; AGOPYAN, 1999).

Pesquisadores e empresas buscam alternativas para diminuir a degradação das fibras, entre elas o uso de cinzas pozzolânicas, variação no tamanho das fibras (TONOLI et al., 2010b) e tratamentos químicos para melhorar a hidrofobicidade das fibras (SANTOS et al., 2015a). No fibrocimento, o caráter hidrofílico das fibras vegetais é a principal causa da mineralização e perda da aderência fibra-matriz (TONOLI et al., 2010a).

O processo de hornificação avaliada por Ballesteros et al., (2015) e Claramunt et al., (2011) se mostrou eficaz para solucionar problemas de instabilidade dimensional. O processo consiste em ciclos de secagem e molhagem das fibras, reduzindo a capacidade da absorção de água e conseqüentemente o inchamento delas. Aplicando polpas celulósicas hornificadas em matrizes cimentícias os autores Ballesteros et al., (2015) e Claramunt et al., (2011) obtiveram uma redução no teor de hidróxido de cálcio presente no lúmen das fibras.

A utilização de pozolanas é uma possibilidade para conter o ataque alcalino às fibras vegetais. Por serem ricas em sílica, ao entrarem em contato com a água reagem com o hidróxido de cálcio e formam o silicato de cálcio hidratado (SANTOS et al., 2015b; VILLAR-COCIÑA et al., 2011). A utilização de pozolanas em materiais cimentícios tem sido testada (cinzas de bagaço da cana de açúcar, cinzas das cascas de café, arroz e da folha de bambu) (BEZERRA et al., 2011; RODRIGUES et al., 2013; VILLAR-COCIÑA et al., 2011). A substituição parcial do cimento Portland por pozolanas consome o hidróxido de cálcio, aumenta a durabilidade do

composto, além de reduzir custos ao diminuir a utilização do cimento Portland (FAIRBAIRN et al., 2012).

Pesquisas sobre o processo de carbonatação acelerada também tem sido direcionada para melhorar a durabilidade das fibras vegetais em ambiente alcalino provocado pelas matrizes cimentícias e por seus produtos de hidratação (ALMEIDA et al, 2013; FILOMENO, 2018; FIORONI, 2019; PIZZOL, 2013; SANTOS et al., 2015a; TONOLI et al., 2010b; TONOLI et al., 2016; TONOLI et al., 2019).

3.1.2 Fibras poliméricas

Na produção de telhas onduladas de fibrocimento, há a necessidade da utilização de fibras poliméricas que possam atuar como reforço. Dentre as fibras mais utilizadas tem-se as fibras de álcool polivinílico (PVA) e polipropileno (PP) (TABELA 1).

Tabela 1 – Características das fibras poliméricas.

Características	Polipropileno - PP	Álcool Polivinílico - PVA
Densidade (g/cm ³)	0,9	1,3
Comprimento (mm)	10,0	6,0
Diâmetro médio (µm)	12,0	14,0
Resistência ao ataque alcalino	sim	sim

Fonte: Adaptado de Ikai et al. (2010).

As fibras de PVA foram desenvolvidas principalmente para substituir o uso da fibra mineral de amianto nas indústrias de telhas de fibrocimento (FIORONI, 2019). Alta durabilidade em matriz alcalina, comportamento hidrofílico e resistência à tração fazem com que as fibras de PVA sejam amplamente utilizadas como fibras de reforço (IKAI et al.,2010).

As fibras de PP sofrem pouca degradação em matrizes alcalinas, além de apresentar boa compatibilidade com o cimento Portland e alta tenacidade (TONOLI et al. 2019). Porém, para a sua utilização no fibrocimento, é preciso que alguns aspectos como o comportamento hidrofóbico e a dispersão das fibras, sejam melhorados (IKAI et al.,2010).

3.1.3 Cimento Portland e calcário

O cimento Portland é constituído por clínquer e aditivos e sua principal característica é ser um ligante hidráulico que reage quimicamente na presença de água obtendo um produto com elevada resistência e durabilidade (ABCP, 2002). O calcário é obtido em jazidas, que geralmente tem fábricas de cimento Portland localizadas nas proximidades. Após a obtenção, o calcário é britado e moído para que se adquira o tamanho de partículas desejado, há então a mistura entre o calcário e argila. Essa mistura é novamente moída e então levada ao forno em temperaturas próximas a 1450 °C, após este processo, o clínquer formado, é então resfriado e adicionado a gipsita, onde posteriormente são moídos a granulometria inferiores a 75 µm (ABCP,2002; METHA; MONTEIRO, 2008).

Os aditivos adicionados ao clínquer para a produção do cimento Portland são responsáveis por características intrínsecas a cada tipo disponível no mercado, podendo ser adicionado gesso, escórias de alto forno, materiais carbonáticos e pozolânicos (FILOMENO,2018). A adição de gesso e alguns sulfatos, como o sulfato de cálcio (CaSO₄) tem como objetivo retardar o tempo de enrijecimento da pasta, dando trabalhabilidade ao material (SCHIAVI, 2019).

3.2 Hidratação do cimento

De acordo com Taylor (1990) o clínquer é formado essencialmente por CaO, SiO₂, Al₂O₃ Fe₂O₃. Em sua produção são formados silicatos e aluminatos que ao entrar em contato com água formam produtos hidratados como o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), hidróxido de cálcio (CH), etringita (AFt) e aluminatos de cálcio hidratado (CAH) (TABELA 2) (FILOMENO, 2018; NEIVILLE; BROOKS, 2010).

Tabela 2 – Constituintes do cimento Portland

Composto	Composição	Simbologia
Silicato tricálcico	3CaO.SiO ₂	C ₃ S
Silicato dicálcico	2CaO.SiO ₂	C ₂ S
Aluminato tricálcico	3CaO.Al ₂ O ₃	C ₃ A
Ferro aluminato tetracálcico	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	C ₄ AF

Fonte: Filomeno (2018); Neville e Brooks (2010); Taylor (1990).

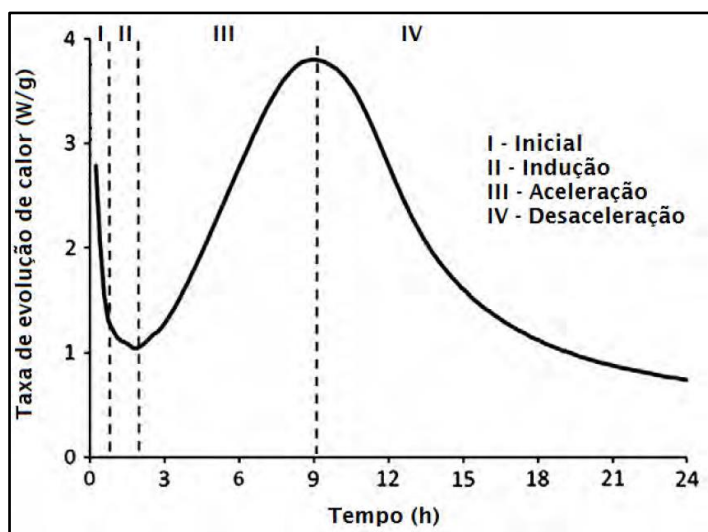
O tempo de pega do cimento é definido como o tempo para que aconteça a transformação do estado fluido para o estado rígido. Na fase de enrijecimento da mistura cimento-água há um ganho de resistência do material. O enrijecimento da pasta é devido a um sistema complexo de reações químicas da hidratação do cimento influenciadas por condições de temperatura e pressão (FILOMENO, 2018; NEVILLE; BROOKS, 2010; TAYLOR, 1990).

O tempo de reação da hidratação do cimento é de suma importância para o seu uso final, uma vez que esta reação deve ser suficientemente lenta para que os produtos gerados possam acontecer, porém devem também acontecer de forma rápida para que o enrijecimento da pasta ocorra (FILOMENO, 2018).

A reação de hidratação do cimento acontece através de dois processos, dissolução-precipitação e topoquímico. Nas fases iniciais dessa hidratação, há a dissolução de compostos anidros em íons, seguida da precipitação dos hidratos. Posteriormente acontece a reação topoquímica na superfície dos compostos do cimento anidro. A progressão dessas reações pode ser acompanhada através da determinação dos teores das fases anidras e hidratadas ou também pela determinação da concentração de água quimicamente combinada (FILOMENO, 2018; TAYLOR, 1990).

O grau de hidratação do cimento também pode ser verificado através da concentração iônica na fase aquosa da mistura e a evolução do calor liberado pelas reações, em se tratando de uma reação exotérmica, a liberação do calor pode ser expressa pela curva de taxa de evolução de calor pelo tempo (FIGURA 3) (TAYLOR, 1990).

Figura 3 - Evolução da taxa de calor do cimento Portland.



Fonte: Filomeno (2018).

No estágio inicial (I) há o contato de partículas com a água, nesta primeira fase há a dissolução dos sulfatos alcalinos e a liberação dos íons K^+ , Na^+ , Ca^{2+} e SO_4^{2-} . Após este processo, inicia-se a dissolução das fases anidras C_3S , C_3A e C_4AF , essa dissolução dá aos grãos anidros um revestimento em camada de gel de C-S-H, com a liberação de íons Ca^{2+} e OH^- em solução. Há também a formação de pequenas agulhas de etringita (AFt) sobre o gel e na solução (FILOMENO, 2018).

No estágio da indução (II) há uma taxa de evolução (liberação) de calor baixa onde há a hidratação da cal livre (CaO) e também uma reação em pequenas quantidades de C_3S . Essas reações são desaceleradas devido a barreira entre grãos anidros e fase aquosa, formada por um gel hidratado, originado pela precipitação da etringita e do C-S-H iniciando um período de dormência das reações. Um alto grau de saturação do hidróxido de cálcio é atingido, antes de começar o processo de precipitação. Este processo de dormência pode ter duração de 30 min até 3 h e só é finalizando quando este gel sobre os grãos de cimento é rompido ou se torna permeável (FILOMENO, 2018).

No estágio da aceleração (III) há um aumento na taxa de evolução de calor, este aumento acontece devido à intensa liberação de calor e formação do C-S-H, do hidróxido de cálcio e o declínio de íons Ca^{2+} na solução. A formação destes compósitos é responsável pelo desenvolvimento da resistência mecânica, bem como a diminuição da porosidade. O sulfato de cálcio é dissolvido e a concentração de íons SO_4^{2-} em solução é reduzida, isto ocorre devido a etringita formada e a adsorção dos íons na superfície do C-S-H que faz com que a geração de calor comece a diminuir, simbolizando o fim desta etapa (FILOMENO, 2018).

No estágio de desaceleração (IV) há a diminuição gradativa de íons na solução junto a precipitação de hidratos na superfície das partículas de cimento que dificultam a solubilidade das fases anidras. No estágio final desta complexa reação de hidratação do cimento, tem-se a formação do AFm (monossulfoaluminato de cálcio), hidratação da ferrita e densificação da microestrutura. O final da hidratação ocorre quando os grãos de cimento foram completamente hidratados ou não há a presença de água (FILOMENO, 2018).

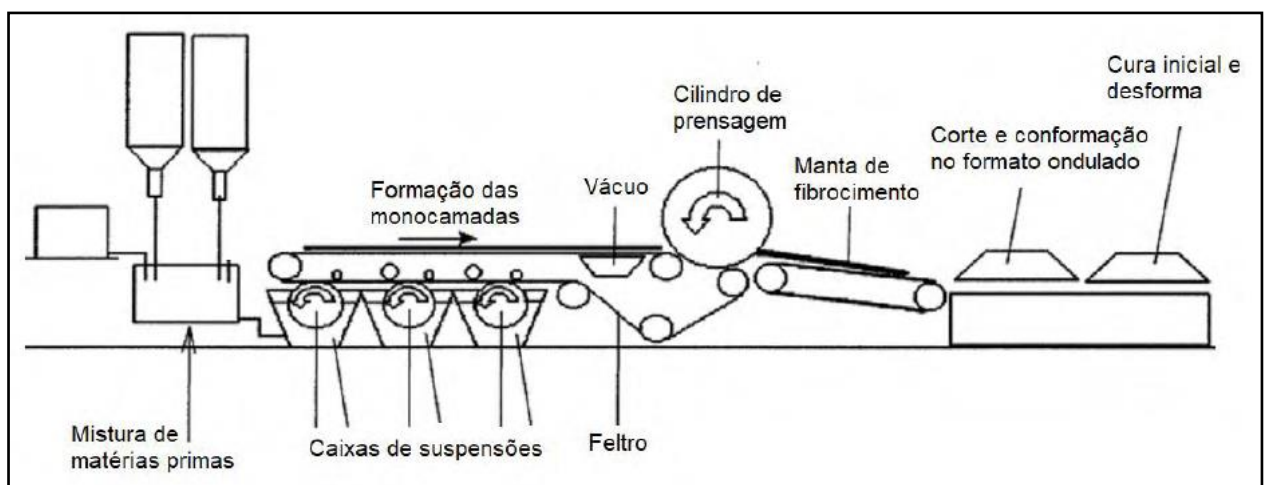
3.3 Processo de produção do fibrocimento

Quando comparados entre si os processos de produção do fibrocimento podem diferir quanto as suas vantagens e desvantagens, esses processos podem ser realizados por diferentes métodos, entre eles estão o processo *Hatschek* e o processo de extrusão (SAUNDERS; DAVIDSON, 2014).

O método de produção mais utilizado por indústrias de telhas de fibrocimento é o processo Hatschek, desenvolvido pelo austríaco Ludwig Hatschek tendo como base o processo utilizado na indústria de papel no final do século XIX e desde então tem sido constantemente submetido a melhorias de produção (IKAI et al., 2010). As máquinas utilizadas nesse processo produzem o fibrocimento com homogeneidade adequada para a produção de telhas onduladas e placas planas (DIAS; SAVASTANO JUNIOR; JOHN, 2010), porém é importante o cuidado na produção para que se evitem defeitos nas telhas como fissuras e baixa resistência no produto final (FIORONI, 2019).

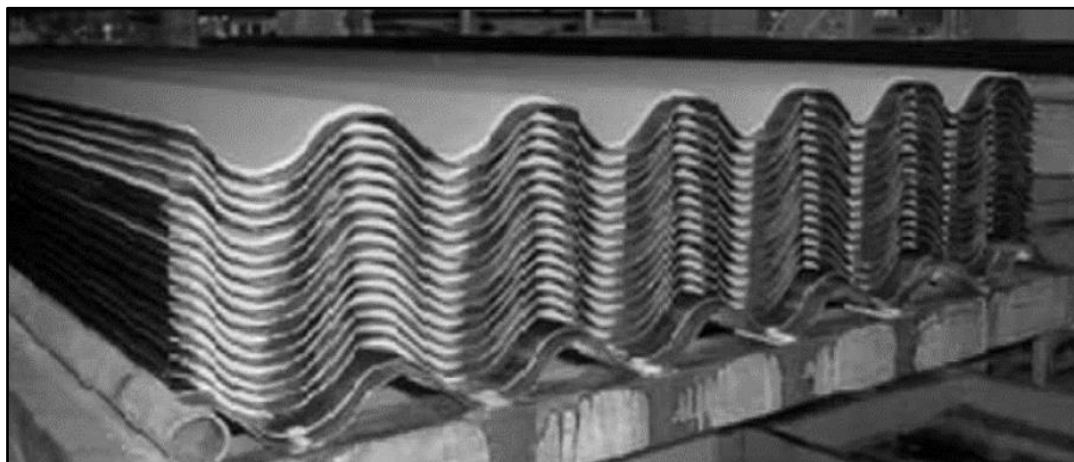
O processo consiste em uma suspensão composta por água, cimento, minerais e uma mistura de fibras celulósicas e sintéticas que são misturados em tanques. Os cilindros captam os materiais sólidos, enquanto o líquido fica retido em seu interior. Após este processo o material formado nos cilindros se agrupa em um feltro que rola ao longo das caixas de vácuo para que se retire o excesso de água. O material segue pelo feltro até o cilindro de prensagem que prensa e uniformiza o produto. A espessura desejada é obtida pelo acúmulo das camadas no cilindro de prensagem. Após adquirir a espessura desejada, o material é então prensado para a eliminação do excesso de água, em seguida é cortado em seu tamanho planejado (FIGURA 4). O formato ondulado das telhas é obtido através de um sistema de vácuo, sendo que em seguida elas são empilhadas com formas metálicas onduladas onde se inicia o processo de cura do material (FIGURA 5).

Figura 4 - Esquemática do processo Hatschek.



Fonte: Adaptado de Dias; Savastano Junior; John (2010).

Figura 5 - Telhas de fibrocimento em formas metálicas onduladas



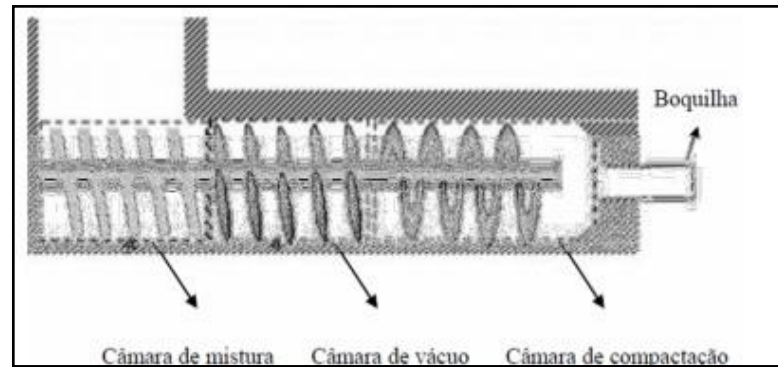
Fonte: Ikai et al. (2010).

A principal desvantagem do processo de Hatschek é a grande quantidade de água residual produzida. Os esforços para reduzir a quantidade de água desperdiçada incluem a instalação de sistemas de filtragem ou o ajuste do pH da água para reutilização (IKAI et al., 2010; TEIXEIRA, 2010).

Um método alternativo de fabricação, que permite a produção de blocos tridimensionais de fibrocimento com características mecânicas e físicas similar ao processo Hatschek é o processo de Extrusão (ZHOU; LI, 2012). Nesse processo, o compósito é produzido com uma geometria correspondente ao da boquilha da extrusora, o material a ser extrudado passa por um pistão e um conjunto de roscas forçando a saída pela boquilha. (CALLISTER JR.; RETHWISCH, 2016). A escolha do material com propriedades adequadas é de suma importância, pois ele deve ter plasticidade para permitir seu fluxo, e rígido para se obter a forma desejada (TEIXEIRA, 2010). A obtenção da viscosidade desejada muitas vezes é dependente de aditivos com o intuito de melhorar a tensão de escoamento, entre os aditivos mais utilizados estão o hidroxipropilmetilcelulose (HPMC) e o poliéster carboxílico (ADVA) (SILVA, 2015; SOTO, 2010).

Na Figura 6 é apresentado o esquema básico de uma extrusora, detalhando a câmara de mistura, a câmara de vácuo, a câmara de compactação e a boquilha. A câmara de mistura homogeneiza a massa, a câmara de vácuo elimina possíveis bolsas de ar e o excesso de água, a câmara de compactação pressiona a massa contra a saída da boquilha, compactando e auxiliando a orientação das fibras, a boquilha é responsável pela compactação final e molde da massa (SILVA, 2015).

Figura 6 – Partes funcionais de uma extrusora.

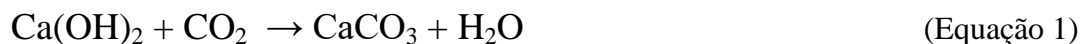


Fonte: Soto (2010).

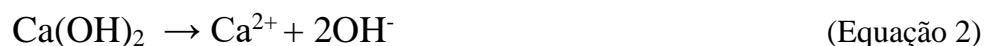
3.4 Carbonatação acelerada

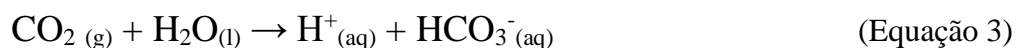
A carbonatação é uma reação química que ocorre naturalmente ao ar, iniciando na superfície do material e progredindo para o seu interior (LIM et al., 2010; TONOLI et al., 2010a). Esse fenômeno ocorre em materiais cimentícios ao entrarem em contato com o CO₂ presente na atmosfera, ocorrendo durante toda vida útil do material (ALMEIDA et al., 2013; SANTOS et al., 2015b).

A reação de carbonatação (EQUAÇÃO 1) ocorre pela reação do hidróxido de cálcio presente na matriz cimentícia com o dióxido de carbono formando carbonato de cálcio e água. Este processo pode ser influenciado por diversos fatores como temperatura, pressão, umidade, tempo de exposição, concentração de dióxido de carbono e algumas características do cimento utilizado (ALMEIDA et al., 2013; CHEN; BAI; GAO, 2021).



Inicialmente o hidróxido de cálcio sofre uma dissociação (EQUAÇÃO 2), em seguida o CO₂ é dissolvido nos poros da matriz cimentícia formando íons carbonatos (EQUAÇÕES 3 e 4). Ocorre então a reação dos produtos dissolvidos (Ca e CO₃) para a formação do carbonato de cálcio (EQUAÇÃO 5).





A carbonatação acelerada (CA) consiste na reação entre o CO₂ e os produtos de hidratação do cimento, quando o fibrocimento é colocado em câmaras com ambiente rico em CO₂ com controle de temperatura, pressão e umidade. Porém, este tipo de cura é estudado apenas em escala laboratorial devido a dois fatores principais que precisam ser investigados: a limitação da difusão de CO₂ na matriz cimentícia durante a carbonatação, gerando uma utilização de CO₂ entre apenas 20%-50% do potencial teórico, e o efeito deste tipo de cura na durabilidade do compósito em alguns aspectos críticos como corrosão e o ataque de sulfato.

A CA como método de cura em ambiente enriquecido com dióxido de carbono em idades iniciais, tem demonstrado bons resultados, melhorando as propriedades mecânicas do fibrocimento e a sua durabilidade (ASHRAF; OBLEK; SAHU, 2019; TONOLI et al., 2019), além de ter um gasto energético menor do que a cura a vapor, para qual é preciso a manutenção da temperatura elevada (LIU; MENG, 2021).

Na reação de CA, o carbonato de cálcio é obtido em maior quantidade e de forma mais rápida, consumindo o hidróxido de cálcio presente no composto. Este consumo de hidróxido de cálcio é benéfico às fibras vegetais, pois diminui o pH do meio, diminuindo assim parte da degradação destas fibras causada pelo ataque alcalino (ALMEIDA et al., 2010; CHEN; BAI; GAO, 2021; SOROUSHIAN; MON; HASSAN, 2012). Além de consumir o hidróxido de cálcio reduzindo o ataque alcalino às fibras, a carbonatação acelerada ao formar carbonatos de cálcio, preenche e densifica os poros da matriz (LESTI; TIEMEYER; PLANK, 2013), promovendo assim melhoria nas propriedades físicas e mecânicas do material (FIORONI, 2019).

O aumento de dióxido de carbono na atmosfera, tem sido uma preocupação ambiental mundial e diversas soluções de consumo deste gás têm sido pesquisadas. Dentre estes estudos, a carbonatação acelerada de fibrocimentos tem demonstrado grande potencial de uso para este gás (CHEN; BAI; GAO, 2021; LIU; MENG, 2021). Os estudos sobre CA em escalas laboratoriais utilizam câmaras fechadas com dióxido de carbono fornecidos em cilindros puros (PAN et al., 2017), porém, utilizar o dióxido de carbono, proveniente da combustão de gases, pode ser mais viável em relação ao aspecto custo/benefício do processo. A baixa taxa de carbonatação obtida, poderia ser compensada pelo custo, e assim utilizar no processo, alta

pressão e tempos mais longos de exposição ao dióxido de carbono (HE et al., 2020). Outro aspecto a ser considerado é que, para um grau de carbonatação inferior a 50%, o hidróxido de cálcio não pode ser totalmente reagido no processo de carbonatação, necessitando assim de um pós-condicionamento (SAVIJA; LUKOVIC, 2016). A cura subsequente com água pode ser aplicada neste caso, permitindo uma hidratação adicional, visando melhorar a microestrutura e contribuir para um ganho nas propriedades mecânica (LIU; MENG, 2021).

Dentre os experimentos realizados com carbonatação acelerada, Li, Farzadnia e Shi (2017) compararam amostras de argamassa feito de Cimento Portland e amostras de argamassa feito de escória álcali-ativada, carbonatadas e não carbonatadas e observaram a precipitação de carbonato de cálcio nos poros da matriz cimentícia, melhorando a resistência à compressão e diminuindo a porosidade capilar da argamassa.

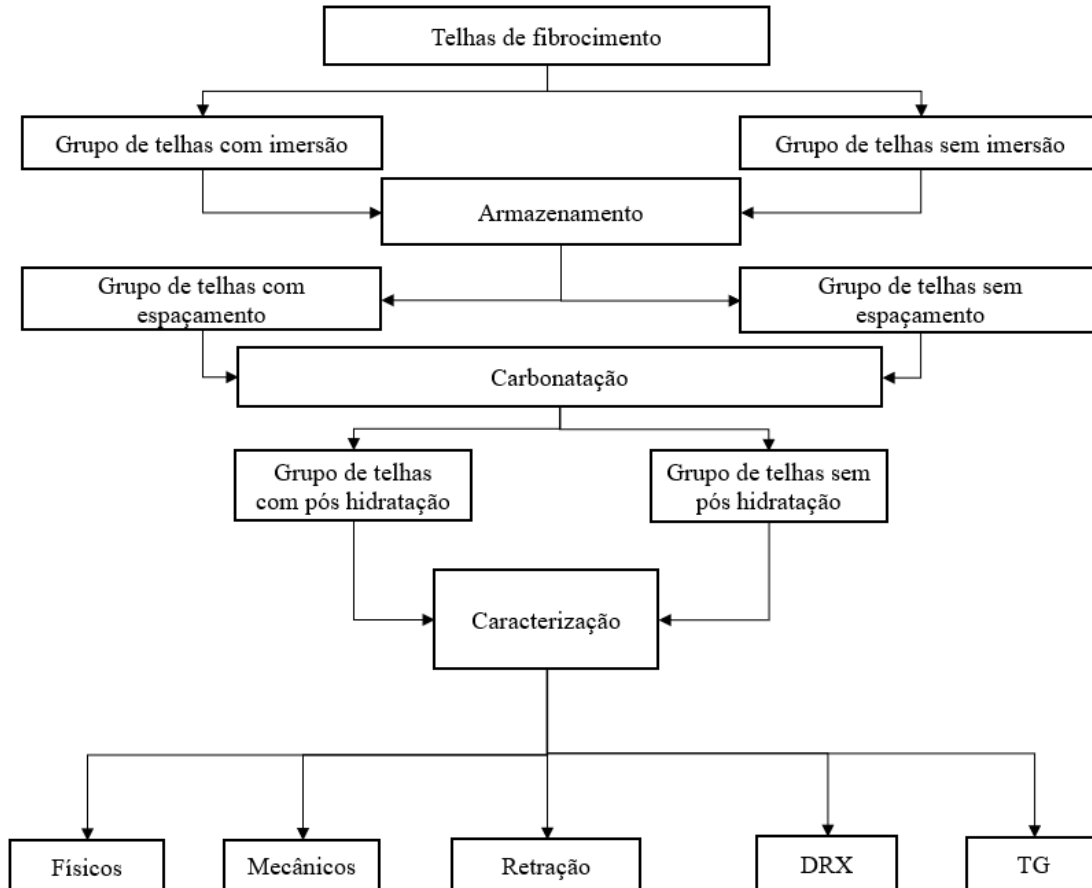
A diminuição da permeabilidade e da absorção de água foram resultados de estudo envolvendo o tratamento superficial de argamassa de escória álcali-ativada utilizando a carbonatação acelerada (PAN et al., 2017). Urrea-Ceferino et al. (2017) utilizaram câmara de carbonatação com concentração próxima a 100% de CO₂, umidade relativa de 90% e temperatura de 60 °C, variando o tempo de carbonatação acelerada em 1 e 2 h, essas amostras foram comparadas com amostras referência não carbonatadas. Os autores concluíram que a carbonatação acelerada diminuiu o pH da matriz e a degradação das fibras vegetais utilizadas, além de obter uma melhoria nas propriedades físico-mecânica dos compostos. Filomeno (2018) teve como variáveis em seu estudo diferentes faixas de umidade com temperatura constante a 60 °C e concluiu que um ambiente com 60% de umidade trouxe melhores resultados físico-mecânico, além de um grau de carbonatação maior.

Fioroni (2019) comparou telhas de fibrocimento carbonatadas reforçadas com PP e telhas de fibrocimento reforçadas com polipropileno curadas ao ar e constatou que a CA diminuiu a absorção de água em 28% e aumentou a densidade aparente em 13%, além de aumentar o limite de proporcionalidade e o módulo de elasticidade. Em estudo proposto por Tonoli et al. (2010a), os autores concluíram que após ensaios de envelhecimento acelerado, os compósitos carbonatados mantiveram um bom desempenho mecânico e físico, sugerindo a preservação das fibras vegetais perante o ataque alcalino.

4 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

O fluxograma do planejamento experimental definido para o presente trabalho é apresentado na Figura 7.

Figura 7 – Fluxograma das etapas do tratamento das telhas de fibrocimento.



Fonte: Do autor (2021).

Foram utilizadas telhas de fibrocimento comerciais com espessura de 5 mm fornecidas pela empresa Infibra S.A. composta de cimento, calcário, fibras celulósicas e fibras poliméricas. Para avaliar o efeito da imersão em água antes do processo de carbonatação, foi separado um grupo de telhas de fibrocimento para que fossem imersas em água alcalina (pH~13) por 1,5 min logo após o processo de conformação e desforma no dia 0 (produção das telhas de fibrocimento). Esse processo foi idealizado de maneira a fornecer uma umidade ideal para o processo de carbonatação, tendo em vista que a hidratação do cimento necessita de água para que ocorra. Após este processo, ambos os grupos de telhas de fibrocimento (imersas e não imersas) foram mantidas em filmes plásticos de polietileno (armazenamento) por 8 dias até o início da carbonatação, para que fossem preservadas as umidades.

No 8º dia, durante a preparação para carbonatação, um grupo de telhas foi espaçado com tubos de PVC (50 mm) e disposto em autoclave juntamente com um grupo de telhas sem espaçamento. Espaçar as telhas de fibrocimento durante a carbonatação em autoclave pode favorecer a circulação de dióxido de carbono e assim aumentar o grau de carbonatação. Os tempos de carbonatação escolhidos para este trabalho foram 6, 24 e 48 h. Devido à baixa concentração de dióxido de carbono (4,5 %) foram escolhidos maiores tempos de carbonatação. O processo foi realizado em uma autoclave horizontal com pressão atmosférica, 100 % de umidade, 4,5 % de concentração de dióxido de carbono e temperatura de 80 °C. O fornecimento de dióxido de carbono foi realizado através de combustão do gás natural (equipamento Curetec NDG). Para avaliar os efeitos da hidratação após o término do processo de carbonatação, um grupo de telhas foi imerso em água alcalina (pH~13) por 30 min.

Para avaliar a efetividade da carbonatação e a influência dos parâmetros espaçamento e hidratação, foram realizados ensaios de caracterização microestruturais e estruturais. Nos ensaios físicos, foram avaliados densidade aparente, absorção de água e porosidade aparente. Nos ensaios mecânicos, foram avaliados o módulo de ruptura, limite de proporcionalidade, módulo de elasticidade e a energia específica dos compósitos, além da avaliação de retração. Nas análises de termogravimetria e difração de raios X, foram avaliados as fases presentes nos compósitos, antes e após o processo de carbonatação, assim é possível determinar o grau de carbonatação e a formação de hidróxido de cálcio e carbonato de cálcio. Os resultados obtidos passaram por análise de variância para validar os resultados obtidos.

REFERÊNCIAS

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland. Guia básico de utilização do cimento Portland. **ABCP**, 7ª edição, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15210-1**: Telha ondulada de fibrocimento sem amianto e seus acessórios. Parte 1: Classificação e requisitos. Rio de Janeiro, Brasil, 2014.

ALMEIDA, A. E. F. S. et al. Improved durability of vegetable fiber reinforced cement composite subject to accelerated carbonation at early age. **Cement and Concrete Composites**, v. 42, p.49-58, 2013.

ALMEIDA, A. E. F. S. et al. Carbonatação acelerada efetuada nas primeiras idades em compósitos cimentícios reforçados com polpas celulósicas. **Ambiente Construído**, v.10, n.4, p. 233-246, 2010.

ALREKABI, S. et al. Mechanical performance of novel cement-based composites prepared with nano-fibres, and hybrid nano- and micro-fibres. **Composite Structures**, v. 178, p. 145–156, 2017.

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

ASHRAF, W.; OBLEK, J.; SAHU, S. Phase evolution and strength development during carbonation of low-lime calcium silicate cement (CSC). **Construction and Building Materials**, v.210, p. 473-482, 2019.

BALLESTEROS, J. E. M. et al. Evaluation of cellulosic pulps treated by hornification as reinforcement of cementitious composites. **Construction and Building Materials**, v. 100, p. 83-90, 2015.

BALLESTEROS, J. E. M. et al. Synergic effect of fiber and matrix treatments for vegetable fiber reinforced cement of improved performance. **Construction and Building Materials**, v. 205, p. 52–60, 2019.

BENTCHIKOU, M. et al. Effect of recycled cellulose fibres on the properties of lightweight cement composite matrix. **Construction and Building Materials**, v. 34, p. 451–456, 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.097>

BEZERRA, I. M. T. et al. Aplicação da cinza de casca de arroz em argamassas de assentamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n.6, p.639-645, 2011.

CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D. G. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução. **LTC**, 9ª edição, 2016.

CHEN, T.; BAI, M.; GAO, X. Carbonation curing of cement mortars incorporating carbonated fly ash for performance improvement and CO₂ sequestration. **Journal of CO₂ Utilization**, v.51, n., p., 2021.

CLARAMUNT, J. et al. The hornification of vegetable fibers to improve the durability of cement mortar composites. **Cement and Concrete Composites**, v. 33, n. 5, p. 586-95, 2011.

DA COSTA CORREIA, V. et al. Nanofibrillated cellulose and cellulosic pulp for reinforcement of the extruded cement-based materials. **Construction and Building Materials**, v. 160, p. 376–384, 2018.

DIAS, C. M. R.; SAVASTANO JUNIOR, H.; JOHN, V. M. Exploring the potential of functionally graded materials concept for the development of fiber cement. **Construction and Building Materials**, v.24, p.140-146, 2010.

EBRAHIMI, A. et al., Sustainable transformation of fly ash industrial waste into a construction cement blend via CO₂ carbonation. **Journal of Cleaner Production**, v. 156, n., p. 660-669, 2017.

FAIRBAIRN, E. M. R. et al. Avaliação da substituição parcial de clínquer por cinza de bagaço de cana: redução de emissão de CO₂ e potencial de créditos de carbono. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, v. 5, n. 2, 2012.

FARUK, O. et al. Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000-2010. **Progress in Polymer Science**, v. 37, n. 11, p. 1552–1596, 2012.

FERNÁNDEZ-CARRASCO, L.; CLARAMUNT, J.; ARDANUY, M. Autoclaved cellulose fibre reinforced cement: Effects of silica fume. **Construction and Building Materials**, v. 66, p. 138–145, 2014.

FILOMENO, R. H. **Avaliação da influência da umidade relativa da atmosfera de cura na carbonatação de materiais de fibrocimento**. 100p. Dissertação (Mestre em Ciências) – Universidade de São Paulo, Pirassununga-SP, 2018.

FIORONI, C. A. **Avaliação da influência de diferentes métodos de cura na permeabilidade e no desempenho físico-mecânico de telhas de fibrocimento reforçadas com fibras poliméricas**. 111p. Dissertação (Mestre em Ciências) – Universidade de São Paulo, Pirassununga-SP, 2019.

FIORONI, C. A. et al. Cement-based corrugated sheets reinforced with polypropylene fibres subjected to a high-performance curing method. **Construction and Building Materials**, v. 262, p. 120791, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120791>>.

HE, Z. et al. Flue gas carbonation of cement-based building products. **Journal of CO₂ Utilization**, v.37, p. 309-319, 2020.

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, 2010.

INNOCENTINI, M. D. M. et al. Air permeability assessment of corrugated fiber-cement roofing sheets. **Cement and Concrete Composites**, v.97, p.259-267, 2019.

LESTI, M.; TIEMEYER, C.; PLANK, J. CO₂ stability of Portland cement based well cementing systems for use on carbon capture & storage (CCS) wells. **Cement and Concrete Research**, v.45, p. 45-54, 2013.

LI, N.; FARZADNIA, N.; SHI, C. Microstructural changes in alkali-activated slag mortars induced by accelerated carbonation. **Cement and Concrete Research**, v.100, p. 214-226, 2017.

LIM, M et al. Environmental remediation and conversion of carbon dioxide (CO₂) into useful green products by accelerated carbonation technology. **International Journal of Environment Research Public Health**, v. 7, p.203-228, 2010.

LIU, Z; MENG, W. Fundamental understanding of carbonation curing and durability of carbonation-cured cement-based composites: A review. **Journal of CO₂ Utilization**, v.44, n., p., 2021. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2020.101428>>.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 3th ed. São Paulo: Ibracon, 2008.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. Tecnologia do concreto. **Techbooks**, 2ªedição, 2010.

PAN, X. et al. Effects of CO₂ surface treatment on strength and permeability of one-day-aged cement mortar. **Construction and Building Materials**, v. 154, p. 1087-1095, 2017.

PIZZOL, V. D. **Carbonatação acelerada: Nova tecnologia de cura para fibrocimento sem amianto**. 60p. Dissertação (Mestre em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras-MG, 2013.

RODRIGUES, M. S. et al. Cinza de palha de cana-de-açúcar como adição mineral em fibrocimento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, p. 1347-1354, 2013.

SANTOS, S. F. et al. Supercritical carbonation treatment on extruded fibre-cement reinforced with vegetable fibres. **Cement and Concrete Composites**, v. 56, p. 84–94, 2015a.

SANTOS, S. F. et al. Non-conventional cement-based composites reinforced with vegetable fibers: A review of strategies to improve durability. **Materiales de Construcción**, v. 65, n. 317, 2015b.

SAUNDERS, A.; DAVIDSON, E. Cement Boards 101. **Global Cement Magazine**, v. 32, n. January, p. 1–7, 2014.

SAVASTANO JUNIOR, H. **Materiais a base de cimento reforçado com fibra vegetal: reciclagem de resíduos para a construção de baixo custo**. 152p. Tese (Livre-Docência) – Universidade de São Paulo, São Paulo – SP, 2000.

SAVASTANO JUNIOR, H.; AGOPYAN, V. Transition zone studies of vegetable fibre-cement paste composites. **Cement and Concrete Composites**, v.21, n.1, p. 49-57, 1999.

SAVASTANO JUNIOR, H.; WARDEN, P. G.; COUTTS, R. S. P. Potential of alternative fibre cements as building materials for developing areas. **Cement and Concrete Composites**, v. 25, n. 6, p. 585–592, 2003.

SAVIJA, B.; LUKOVIC, M. Carbonation of cement paste: Understanding, challenges, and opportunities. **Construction and Building Materials**, v.117, n., p.285-301, 2016

SCHIAVI, L. S de O. **Produção e avaliação de desempenho físico-mecânico de fibrocimento produzido com fibras de celulose tratadas a plasma**. 130p. Dissertação (Mestre em Engenharia de Biomateriais) – Universidade Federal de Lavras, Lavras-MG, 2019.

SILVA, D. W. **Propriedades físico-mecânicas de fibrocimento reforçado com fibras de eucalipto tratadas termicamente**. 66p. Dissertação (Mestre em Engenharia de Biomateriais) – Universidade Federal de Lavras, Lavras – MG, 2015.

SILVA, R. et al. Aplicações de fibras lignocelulósicas na química de polímeros e em compósitos. **Química Nova**, v. 32, n. 3, p. 661–671, 2009.

SOTO, Y. J. M. **Adequações de formulações para a produção de placas de fibrocimento por extrusão**. 199p. Tese (Doutor em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Paulo - SP, 2010.

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

TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry**. London: Academic Press, 1990,

TEIXEIRA, R. S. **Utilização de resíduos sucro-alcooleiros na fabricação de fibrocimento pelo processo de extrusão**. 133p. Dissertação (Mestre em Ciência) – Universidade de São Paulo, São Carlos – SP,2010.

TEIXEIRA, R. S. et al. Nanoindentation study of the interfacial zone between cellulose fiber and cement matrix in extruded composites. **Cement and Concrete Composites**, v. 85, p. 1–8, 2018.

TONOLI, G. H. D. et al. Effect of accelerated carbonation on cementitious roofing tiles reinforced with lignocellulosic fibre. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 2, p. 193–201, 2010a.

TONOLI, G. H. D. et al. Effects of natural weathering on microstructure and mineral composition of cementitious roofing tiles reinforced with fique fibre. **Cement and Concrete Composites**, v. 33, n. 2, p. 225–232, 2010b.

TONOLI, G. H. D. et al. Rationalizing the impact of aging on fiber–matrix interface and stability of cement-based composites submitted to carbonation at early ages. **Journal of Materials Science**, v. 51, n. 17, p. 7929–7943, 2016.

TONOLI, G. H. D. et al. Influence of the initial moisture content on the carbonation degree and performance of fiber-cement composites. **Construction and Building Materials**, v. 215, n. Special Issue, p. 22–29, 2019.

URREA-CEFERINO, G. E. et al. Definition of optimal parameters for supercritical carbonation treatment of vegetable fiber-cement composites at a very Early age. **Construction and Building Materials**, v. 152, p. 424-433, 2017.

URREA-CEFERINO, G. E.; PANESAR, D. K.; SAVASTANO, H. Adjusting curing parameters for innovative and durable vegetable fibre-cement composites. **Cement and Concrete Composites**, v. 103, n. 97, p. 121–133, 2019.

VILLAR-COCIÑA, E. Pozzolanic behavior of bamboo leaf ash: Characterization and determination of the kinetic parameters. **Cement and Concrete Composites**, v. 33, n. 1, p. 68-73, 2011.

XIAN, X.; ZHANG, D.; SHAO, Y., Flue gas carbonation curing of cement paste and concrete at ambient pressure. **Journal of Cleaner Production**, v. 313, n., p., 2021.

WANG, D.; NOGUCHI, T.; NOZAKI, T. Increasing efficiency of carbon dioxide sequestration through high temperature carbonation of cement-based materials. **Journal of Cleaner Production**, v. 238, n., p.117980, 2021.

ZHAN, B. et al., Experimental study on CO₂ curing for enhancement of recycled aggregate properties. **Construction and Building Materials**, v. 67, p. 3-7, 2014.

ZHOU, X.; LI, Z. Light-weight wood-magnesium oxychloride cement composite building products made by extrusion. **Construction and Building Materials**, v. 27, n. 1, p. 382–389, 2012.

SEGUNDA PARTE - ARTIGO**TELHAS DE FIBROCIMENTO: EFEITO DA HIDRATAÇÃO E ESPAÇAMENTO DURANTE A CARBONATAÇÃO ACELERADA NAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS.**

TEIXEIRA JUNIOR, W. S.; FIORONI, C.A.; FILOMENO, R.H.; SCHWEIG, E. O
SAVASTANO JUNIOR, H. S.; TONOLI, G.H.D; MARTINS, M.A.

RESUMO

A motivação deste trabalho se baseou no fato das fibras celulósicas sofrerem com o ambiente alcalino gerado pelos produtos de hidratação da matriz cimentícia, principalmente o hidróxido de cálcio. Uma das formas encontradas para diminuir esse ambiente alcalino é induzir a reação de hidróxido de cálcio com o dióxido de carbono (carbonatação acelerada), além dessa redução de alcalinidade, o produto gerado dessa reação, o carbonato de cálcio, densifica e preenche os poros da matriz cimentícia, dando ao material menos porosidade e melhorando as propriedades mecânicas. Neste trabalho foi avaliado a carbonatação acelerada de telhas de fibrocimento e parâmetros que podem influenciar o processo de carbonatação, como espaçamento, hidratação e fornecimento de dióxido de carbono proveniente da combustão de gás natural. Para avaliação das telhas carbonatadas foram realizados ensaios físicos-mecânicos, termogravimetria, difração de raios X, envelhecimento acelerado e teste de retração por secagem. Os resultados obtidos em termogravimetria e difração de raios X mostraram que no tempo de exposição ao dióxido de carbono de 48h foi possível obter um aumento de 5,26% na densidade aparente e um aumento de 28% no módulo de ruptura, atingindo um grau de carbonatação de 24,3 %. O uso de espaçadores entre as telhas de fibrocimento se mostrou um método benéfico para otimização do processo de carbonatação, pois ao serem espaçadas, as telhas ficaram mais propensas à difusão de dióxido de carbono e às vantagens proporcionadas pela carbonatação. Através deles, foi possível obter uma redução de 2,29 % na absorção de água e um aumento de 28% no módulo de ruptura, além do aumento expressivo no grau de carbonatação em 22,1 %. O dióxido de carbono proveniente da queima do gás natural se mostrou uma fonte promissora para utilização no processo de carbonatação de telhas de fibrocimento. Na avaliação da hidratação por imersão, os resultados mostraram que a imersão em água antes e após o processo não levou a melhoria das propriedades físicas e mecânicas. Em linhas gerais, a carbonatação acelerada, melhorou as propriedades das telhas de fibrocimento quanto às propriedades físicas e mecânicas.

Palavras-chave: Carbonatação acelerada. Fibrocimento. Hidratação. Carbonatação. Cura por Carbonatação. Carbonatação com gases de combustão

ABSTRACT

The motivation for this work was based on the fact that cellulosic fibers suffer from the alkaline environment generated by the hydration products of the cement matrix, mainly calcium hydroxide. One of the ways found to reduce this alkaline environment is to induce the reaction of calcium hydroxide with carbon dioxide (accelerated carbonation), in addition to this alkalinity reduction, the product generated from this reaction, calcium carbonate, densifies and fills the pores of the cementitious matrix, giving the material less porosity and improving mechanical properties. In this work, the accelerated carbonation of fiber cement tiles and parameters that can influence the carbonation process, such as spacing, hydration and supply of carbon dioxide from natural gas combustion, were evaluated. To evaluate the carbonated tiles, physical-mechanical tests, thermogravimetry, X-ray diffraction, accelerated aging and drying shrinkage tests were carried out. The results obtained in thermogravimetry and X-ray diffraction showed that in the 48h exposure time to carbon dioxide it was possible to obtain an increase of 5.26% in the bulk density and a 28% increase in the modulus of rupture, reaching a degree of carbonation of 24.3%. The use of spacers between the fiber-cement tiles proved to be a beneficial method for optimizing the carbonation process, because when they were spaced, the tiles were more prone to the diffusion of carbon dioxide and to the advantages provided by carbonation. Through them, it was possible to obtain a reduction of 2.29% in the absorption of water and a 28% increase in the modulus of rupture, in addition to a significant increase in the degree of carbonation of 22.1%. Carbon dioxide from the burning of natural gas proved to be a promising source for use in the carbonation process of fiber cement tiles. In the evaluation of hydration by immersion, the results showed that immersion in water before and after the process did not lead to improvement in physical and mechanical properties. In general terms, accelerated carbonation improved the properties of fiber cement tiles in terms of physical and mechanical properties.

Keywords: Accelerated carbonation. Fiber cement. Hydration. Carbonation. Carbonation cure. Carbonation with flue gases

1 INTRODUÇÃO

Na construção civil as telhas onduladas de fibrocimento são amplamente utilizadas nas coberturas de obras residenciais e comerciais (ARDANUY et al., 2015). Produzidas principalmente pelo método Hatschek (INNOCENTINI et al., 2019), elas são compostas de uma matriz cimentícia, água, calcário, reforço fibroso celulósico e polimérico (IKAI et al., 2010; TONOLI et al., 2010a). Por muitos anos, o reforço utilizado juntamente com a matriz cimentícia era realizado pela fibra mineral de amianto, entretanto devido a doenças pulmonares relacionadas a essas fibras, houve a necessidade de substituição (FARUK et al., 2012).

Entre os tipos de fibras utilizados como reforço no fibrocimento atualmente tem-se as fibras poliméricas, em geral fibras de álcool polivinílico (PVA) e polipropileno (PP), porém são fibras não renováveis e com alto custo (IKAI et al., 2010). Em relação às fibras celulósicas, o ambiente alcalino causado pelos produtos de hidratação do cimento Portland as degradam e fazem com que sua característica de reforço seja diminuída (FARUK et al., 2012). Devido à grande importância comercial deste produto e os problemas enfrentados pelo reforço fibroso, diversas pesquisas têm sido realizadas para aumentar a qualidade e desempenho do fibrocimento (FILOMENO, 2018; FIORONI et al., 2020; SCHIAVI, 2019; TONOLI et al., 2016; TONOLI et al., 2019).

Os estudos realizados têm-se concentrado em diminuir a hidrofobicidade das fibras vegetais através de tratamentos (SCHIAVI, 2019) e diminuir o ambiente alcalino do fibrocimento (ALMEIDA et al., 2013; FIORONI et al., 2020; TONOLI et al., 2019). A carbonatação acelerada, um método de cura de compósitos cimentícios em ambiente enriquecido com dióxido de carbono (CO_2), surge com potencial para ajudar a diminuir este ambiente alcalino (CHEN; BAI; GAO, 2021; SOROUSIAN; MON; HASSAN, 2012). Ela promove a precipitação do carbonato de cálcio (CaCO_3) na matriz cimentícia pela reação do ácido carbônico (H_2CO_3) e os produtos de hidratação do cimento Portland como o hidróxido de cálcio (LIU; MENG, 2021; WANG; NOGUCHI, 2019). Essa reação faz com que o hidróxido de cálcio seja consumido, diminuindo o ambiente alcalino prejudicial às fibras celulósicas e aumentando a concentração de carbonato de cálcio (EBRAHIMI et al., 2017; TONOLI et al., 2010a).

Resultados sobre propriedades físicas encontrados na literatura quanto à carbonatação acelerada em compósitos cimentícios apontam para um aumento da densidade da matriz cimentícia (LESTI; TIEMEYER; PLANK, 2013), diminuição da porosidade e absorção de água (ZHAN et al., 2014). Em relação ao desempenho mecânico os estudos demonstraram um

aumento no módulo de ruptura, no limite de proporcionalidade e módulo de elasticidade (FIORONI, 2019; LI; FARZADNIA; SHI, 2017; PAN et al., 2017).

Para o processo de carbonatação acelerada tem-se utilizado dióxido de carbono puro, como agente de cura em fibrocimentos, proveniente da compra de cilindros preenchidos com este gás. Porém, este agente de cura pode ser obtido através da combustão de gases, levando a uma nova aplicação para o dióxido de carbono gerado, o que poderia ajudar na diminuição da concentração deste gás na atmosfera (XIAN; ZHANG; SHAO, 2021), já que ele é considerado o principal gás de efeito estufa e sua concentração excessiva na atmosfera pode levar a mudanças climáticas (CHEN; BAI; GAO, 2021).

Dentro deste contexto, o objetivo do presente estudo foi estudar os efeitos da carbonatação acelerada em telhas de fibrocimento e alguns parâmetros que podem otimizar este processo, como o espaçamento e a hidratação das telhas de fibrocimento, além do fornecimento de gás natural em contrapartida ao fornecimento do gás puro. Esses parâmetros foram avaliados através de ensaios físicos, mecânicos, mineralógicos por difração de raios X (DRX), térmicas por termogravimetria (TG), e de durabilidade por envelhecimento acelerado e retração por secagem.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O desenvolvimento do estudo proposto foi realizado no complexo de laboratórios da Biomateriais da Universidade Federal de Lavras – MG, em parceria com a empresa Infibra S.A. – Leme - SP, Embrapa Instrumentação – São Carlos – SP e o Laboratório de Construções e Ambiência FZEA/USP, Pirassununga - SP

2.1 Material

Foram utilizadas telhas onduladas de fibrocimento com reforço de fibras poliméricas e de polpa celulósica, produzidas pelo método industrial Hatschek com 1220 mm de comprimento, 920 mm de largura, 5 mm de espessura, 51 mm de altura e 177 mm de passo de onda, sendo da classe 2, telhas tipo grandes ondas (GO) com a massa de 12 kg e a carga na ruptura saturada em 2500 N/m, fornecidas pela indústria Infibra. Após o processo de conformação, as telhas passaram pela cura inicial em túnel com temperatura média de 65 °C e saturação de umidade (~95%UR) por aproximadamente 22 h em um processo contínuo de fabricação da empresa Infibra. As telhas foram embaladas em filme de polietileno após a desforma para preservação da umidade e permaneceram assim até o início do processo de carbonatação acelerada realizada aos 8 dias de idade contados a partir da conformação. As porcentagens de matérias primas no estado sólido utilizadas na composição das telhas (antes da mistura em meio aquoso) estão apresentadas na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

Tabela 3 – Composição das matérias primas para fabricação das telhas no estado sólido (antes da mistura em meio aquoso)

Matéria prima	Composição (% em massa)
Cimento	63,7
Calcário e adições	31,3
Fibra de PP	1,4
Polpa de celulose	3,6

Fonte: Do autor (2021).

A carbonatação acelerada foi realizada em câmara climática, autoclave horizontal cilíndrica com diâmetro de 1,60 m da marca FHAIZER. O fornecimento de dióxido de carbono para a carbonatação foi proveniente da combustão de gás natural, realizado através de um gerador de vapor de água enriquecido com dióxido de carbono, denominado CURETEC NDG, da marca CureTec Energietechnik GmbH & Co. KG. A umidade relativa dentro da autoclave manteve-se em 100 % devido à injeção constante de vapor (135 kg de vapor/h) saturado enriquecido com CO₂ a uma temperatura constante de 80 °C. A concentração de dióxido de carbono no vapor injetado pelo equipamento CureTec NDG é de cerca de 4,5 %. Os parâmetros da carbonatação acelerada estão descritos na Tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros de ensaio

Parâmetro	Valor
Temperatura	80 °C
Umidade relativa	100 %
Concentração de CO ₂	~ 4,5 %
Vapor	135 kg / h

Fonte: Do autor (2021).

2.2 Métodos

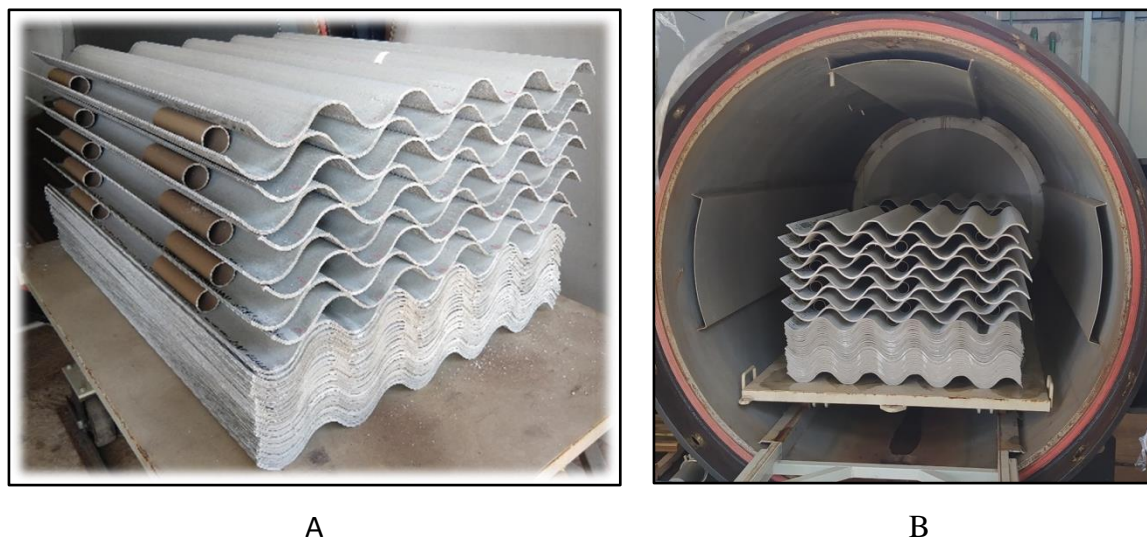
2.2.1 Hidratação, espaçamento e tempo de carbonatação

Para avaliar o efeito da hidratação, algumas telhas foram imersas em água alcalina (~pH=13) durante 1,5 min, antes de serem carbonatadas. Após a imersão, as telhas foram embaladas em filme de polietileno por 8 dias até o início da carbonatação acelerada, para que sua umidade fosse preservada e que não houvesse contato com o dióxido de carbono presente na atmosfera. Na avaliação do espaçamento, foram montadas duas pilhas de telhas, espaçadas e não espaçadas, Figura 8-A, e colocadas para carbonatação na autoclave cilíndrica horizontal, Figura 8-B. Os espaçadores utilizados foram feitos de tubo de PVC com 50 mm de diâmetro.

As telhas de fibrocimento ficaram na autoclave, expostas ao CO₂, em um tempo total de 48 h, durante este período foram retiradas amostras com 6 h e 24 h para avaliação do efeito do tempo de carbonatação. Após o término da carbonatação, um grupo de telhas foram imersas em

água alcalina (pH=13) por 30 min de forma análoga a imersão prévia para avaliar uma hidratação complementar ao processo.

Figura 8 – Telhas espaçadas antes do processo de (A) e telhas dispostas na autoclave cilíndrica horizontal FHAIZER para o processo de carbonatação acelerada (B)



Fonte: Do autor (2021).

2.3 Termogravimetria (TG)

A técnica de termogravimetria foi utilizada para caracterização térmica do material, avaliação da reação de carbonatação, determinação do grau de carbonatação e da quantidade de dióxido de carbono fixada e absorvida nas amostras de telhas de fibrocimento. Foram coletados fragmentos das amostras na região da crista e moídos em moinho almofariz/pistilo marca Marconi, modelo MA 590 (Brasil) por 20 min e em seguida peneirados (600 μ m). O pó obtido em cada amostra foi colocado em cápsulas, envoltos em sacos plásticos a vácuo com 5g de sílica gel para a inibição da umidade do ambiente externo. Esta embalagem foi novamente envolta em saco plástico selado com 5 de cal sodada (absorvente de dióxido de carbono) para evitar o contato das amostras com o dióxido de carbono presente no ambiente.

Para a realização dos ensaios, foi utilizado o equipamento TG/DSC STA449 F3 Netzch Thermal Analyzer, com razão de aquecimento de 10 °C/min e atmosfera de N₂ (60 mL/min) (FIORONI et al., 2020; TONOLI et al., 2019). Os valores de dióxido de carbono absorvido foram determinados pela avaliação da perda de massa nas curvas TG/DTG na faixa entre aproximadamente 550 °C a 1000 °C, descontando-se a quantidade de carbonatos presentes nos

compósitos antes da exposição ao dióxido de carbono. (HUNTZINGER et al., 2009; MATSUSHITA; AONO; SHIBATA, 2000).

2.4 Grau de carbonatação (GC)

O grau de carbonatação foi determinado pela Equação 6, conforme apresentado em Matsushita et al. (2000).

$$GC = (C - C_0) / (C_{\max} - C_0) \times 100 \quad (\text{Equação 6})$$

Onde, C – Quantidade de dióxido de carbono na amostra carbonatada; C_0 é a quantidade de dióxido de carbono na amostra sem carbonatação; C_{\max} – Quantidade teórica de dióxido de carbono necessária para reagir com o total de óxido de cálcio na amostra para formar carbonato de cálcio. A fórmula teórica usada para estimar a capacidade máxima de absorção de CO_2 (C_{\max}) foi a fórmula de Huntzinger na Equação 7 (HUNTZINGER et al., 2009).

$$C_{\max} (\%) = 0,785(\text{CaO} - 0,56\text{CaCO}_3 - 0,7\text{SO}_3) + 1,091\text{MgO} + 0,71\text{Na}_2\text{O} + 0,468\text{K}_2\text{O} \quad (\text{Equação 7})$$

A quantidade de CO_2 absorvida para cada amostra (em porcentagem) foi então multiplicada pela porcentagem de massa residual (após 1000°C) e dividida por 100, a fim de obter os valores em base não volátil.

2.5 Difração de raios X (DRX)

A metodologia usada na preparação das amostras de DRX foi semelhante ao processo descrito no item 2.3 Termogravimetria (TG). O ensaio de DRX foi utilizado para identificar as fases formadas pela carbonatação das telhas, sendo realizados em um difratômetro da marca Rigaku modelo Miniflex 600 (Japão), com radiação $\text{CuK}\alpha$ gerado por voltagem de 40 kV, 30 mA, velocidade de $2^\circ/\text{min}$ em passo de $0,02^\circ$ e na faixa angular 2θ de 5 a 75° . Os ensaios de DRX foram realizados no Laboratório Multiusuário do Departamento de Engenharia de Biosistemas (ZEB) da FZEA – USP.

2.6 Aplicação de solução fenolftaleína

A aplicação de solução de fenolftaleína é uma técnica simples que pode auxiliar na identificação da efetividade das reações de carbonatação, consistindo em um indicador químico de pH, preparado por uma solução de 2% de fenolftaleína diluída em etanol (AGOPYAN et al., 2005). Em contato com compostos básicos (pH~13) como os produtos de hidratação alcalino do cimento, a solução obtém coloração roxa. Já em contato com compostos ácidos ela tem uma coloração incolor, podendo indicar visualmente a ocorrência da carbonatação (FILOMENO,2018).

2.7 Envelhecimento acelerado

A degradação dos compósitos expostos às intempéries foi avaliada após ciclos de envelhecimento acelerado. O procedimento foi adaptado da norma EN 494 (1994) com o objetivo de analisar comparativamente o desempenho das telhas antes e após a realização dos ciclos de envelhecimento. Foi utilizada uma câmara automática de envelhecimento acelerado, marca Marconi, modelo MA 035, onde os corpos de provas foram imersos em água por 170 min a $(20 \pm 5) ^\circ\text{C}$ e após 10 minutos de intervalo, foram aquecidos a $(70 \pm 5) ^\circ\text{C}$ por igual período de 170 min. Este procedimento foi repetido até 200 ciclos com 10 replicatas para cada tratamento, conforme procedimento definido em Tonoli et al., (2013) para fibrocimentos carbonatados.

2.8 Ensaio físicos

Com base no princípio de Arquimedes foram determinadas a absorção de água (AA), a densidade aparente (DA) e a porosidade aparente (PA). Foram utilizados os procedimentos descritos na norma ASTM C-948-81 (2016). Os corpos de prova nas dimensões nominais de 165 mm x 40 mm x 5 mm foram submersos em água por 24 h, a temperatura ambiente ($\sim 23 ^\circ\text{C}$), sendo medida a sua massa imersa (M_i) em uma balança da marca Ohaus, modelo Adventurer (China) com precisão de 0,01 g. Após a retirada da amostra imersa, sua superfície foi levemente enxugada com pano limpo e seco para retirar o excesso de água, e medido a sua massa úmida (M_u). Após a secagem das amostras por 24 h, realizada em estufa, marca Nova Ética, modelo 400/5ND (Brasil) com circulação de ar a $(105 \pm 5 ^\circ\text{C})$, obteve-se a massa seca

(M_s). As Equações 8, 9 e 10 foram utilizadas para a determinação das propriedades físicas citadas. Para este ensaio, foram utilizados 12 corpos de prova para cada condição.

$$\text{Absorção de água aparente (\%)} = \frac{M_u - M_s}{M_s} \quad (\text{Equação 8})$$

$$\text{Densidade aparente } \left(\frac{g}{cm^3} \right) = \frac{M_s}{M_u - M_i} * d \quad (\text{Equação 9})$$

$$\text{Porosidade aparente (\%)} = \frac{M_u - M_s}{M_u - M_i} * 100 \quad (\text{Equação 10})$$

Onde, d - Densidade da água = 1 g/cm³; M_s - massa seca; M_i - massa imersa; M_u - massa úmida.

2.9 Retração por secagem

O ensaio de retração por secagem foi realizado a fim de verificar a variação dimensional das telhas durante sua secagem. Foram utilizados 10 corpos de provas para cada condição, que após o processo de carbonatação, foram cortados nas dimensões de 160 mm x 30 mm x 6 mm. Os corpos de prova foram mantidos em embalagem de polietileno até o dia do ensaio (15º dia), para evitar que houvesse uma carbonatação adicional. Para garantir que as medições pelo relógio comparador fossem realizadas sempre no mesmo ponto, foram colocados discos de aço inox com encaixe côncavo colados com cola epóxi nas extremidades dos corpos de prova. O relógio comparador digital da marca Mitutoyo, (Japão), com precisão de 1 µm foi utilizado para as medições.

Os corpos de prova foram saturados em água durante 24 h e após esse processo, foi realizado a medida referência para o cálculo da retração durante a secagem. Os corpos de prova foram colocados em sala climatizada, localizada no Complexo da Engenharia de Biomateriais (Complexo BioMat) na Universidade Federal de Lavras (UFLA) com os parâmetros ajustados em 23 °C e 65% UR. Foram aferidas medições diariamente para verificação da variação no comprimento devido à retração por secagem do fibrocimento durante 07 (Sete) dias, ou até que a variação dimensional fosse estabilizada (EQUAÇÃO 11).

$$R_{sec} = \frac{C_i - C_m}{C_i \times 1000} \quad (\text{Equação 11})$$

em que: R_{sec} é a retração por secagem em mm/m; C_i é o comprimento inicial (referência); C_m é o comprimento do CP medido diariamente em mm. O multiplicador 1000 no denominador confere o resultado em mm/m.

2.10 Ensaio mecânicos

As propriedades mecânicas foram determinadas através de corpos de provas retirados dos flancos das telhas de fibrocimento, nas diferentes condições, e com as dimensões nominais de 165 mm x 40 mm x 5 mm, medida com um paquímetro digital em três pontos diferentes da largura e espessura. Os corpos de prova foram mantidos em filmes de polietileno até o 10º dia onde se deu início ao ensaio. Foi realizado o ensaio de tração na flexão com quatro cutelos, com vão inferior igual a 135 mm, vão superior igual a 45 mm e velocidade de deslocamento de 5 mm/min, baseado nas recomendações da RILEM (Testing Methods for Fibre Reinforced Cement-Based Composites) (RILEM, 1984). O ensaio foi realizado em máquina universal, modelo DL 30000, marca EMIC com capacidade de carga de 1 kN.e um deflectômetro para a medição da deformação.

O módulo de ruptura (EQUAÇÃO 12), limite de proporcionalidade (EQUAÇÃO 13), módulo de elasticidade (EQUAÇÃO 14), e energia específica (EQUAÇÃO 15) foram determinados pelas Equações 7 a 10. O ensaio foi finalizado ao constatar a redução de 70% da carga máxima de ruptura, para cálculo da energia específica, que é a energia absorvida dividida pela área da seção transversal do corpo de prova. Os corpos de prova foram imersos em água (~23 °C) por 24h antes da realização dos ensaios. Foram utilizados 12 corpos de prova para cada condição, neste ensaio.

$$\text{Módulo de Ruptura (MPa)} = \frac{3 * P_{\text{máx}} * (L_{\text{inf}} - L_{\text{sup}})}{2 * b * d^2} \quad (\text{Equação 12})$$

$$\text{Limite de Proporcionalidade (MPa)} = \frac{3 * P_{\text{Lop}} * (L_{\text{inf}} - L_{\text{sup}})}{2 * b * d^2} \quad (\text{Equação 13})$$

$$\text{Módulo Elástico (MPa)} = \frac{276 * (L_{\text{inf}})^3}{1296 * b * d} * \alpha \quad (\text{Equação 14})$$

$$\text{Energia Específica } \left(\frac{\text{kJ}}{\text{m}^2} \right) = \frac{\text{Energia absorvida}}{A} \quad (\text{Equação 15})$$

Onde: $P_{\text{máx}}$ = carga máxima aplicada (N); P_{Lop} = carga máxima aplicada antes da curva carga x deformação desviar-se da linearidade (N); L_{inf} = distância entre apoios inferiores (mm); L_{sup} = distância entre apoios superiores (mm); b = largura do corpo-de-prova (mm); d = espessura do corpo-de-prova (mm); Energia absorvida = área sob a curva do gráfico carga x deformação (N.mm); A = área da seção transversal do corpo de prova (mm^2); α = coeficiente angular da região linear da curva carga x deformação.

2.11 Análise estatística

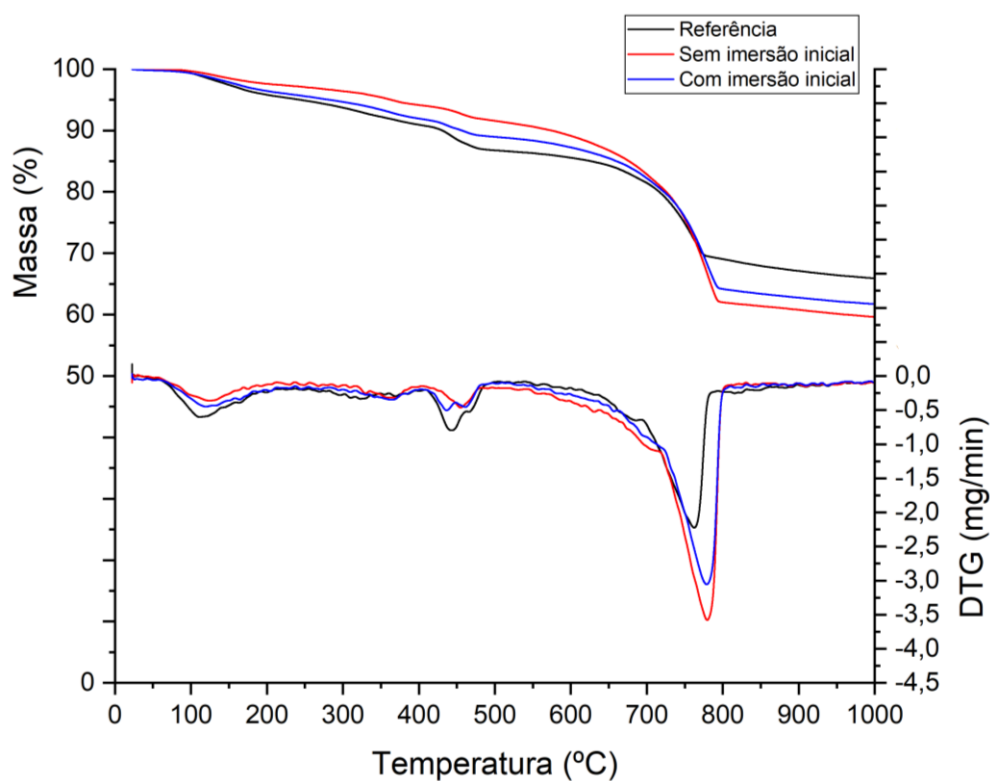
A análise estatística dos resultados obtidos nos ensaios físicos e mecânicos foi realizada através do método de análise de variância (ANOVA) ao nível de 5%, seguido do teste de Tukey. Foi utilizado o software *Sisvar* versão 5.8 para a realização das análises.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Efeito da hidratação inicial por imersão

Os resultados de termogravimetria para análise da hidratação, anterior ao processo de carbonatação, estão representados na Figura 9. Nela é possível observar os componentes presentes nas amostras através da decomposição em faixas de temperaturas conhecidas para cada constituinte.

Figura 9 – Curvas TG/DTG para as telhas de fibrocimento imersas e não imersas inicialmente.



Fonte: Do autor (2021).

A perda de água e voláteis é identificada na faixa de temperatura de 100 °C. No gráfico de DTG notamos um pico maior na faixa dos 100 °C nas amostras de referência (amostras não carbonatadas). Entre as faixas de 100 °C e 300 °C, acontece a desidratação do silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e a decomposição do AFm e Aft (ROSTAMI e al., 2012). O pequeno desvio da curva de DTG entre 300 e 380 °C sugere o início do processo de decomposição das polpas celulósicas de eucalipto presentes nas telhas de fibrocimento (SANTOS et al., 2015). O hidróxido de cálcio é o constituinte mais consumido nas reações de carbonatação, seu consumo

é representado por picos entre 400 - 500 °C no gráfico de DTG, nesta faixa de temperatura há um pico maior nas amostras de referência, onde há uma presença maior de hidróxido de cálcio.

As temperaturas entre 550 e 1.000 °C referem-se aos carbonatos de cálcio presentes no cimento, na composição das telhas, e os resultantes do processo de carbonatação (TONOLI et al., 2019). A partir da temperatura de 600 °C, observamos nas curvas TG que há perda de massa característica da decomposição de carbonato de cálcio ainda não cristalizado (ROSTAMI; SHAO; BOYD, 2011). Entre 700 - 850 °C há grandes picos de decomposição no gráfico de DTG, picos estes, referentes ao carbonato de cálcio já cristalizado (THIERRY et al., 2007). Nota-se maiores picos de carbonato de cálcio nas amostras carbonatadas, demonstrando a ocorrência do processo de carbonatação acelerada. Nos gráficos de DTG entende-se que os maiores picos de decomposição, representam uma quantidade maior do componente avaliado. Desta forma, sugere-se que as telhas sem imersão inicial, obtiveram uma formação maior de carbonato de cálcio após a carbonatação. O grau de carbonatação é uma forma de avaliar a efetividade do processo de carbonatação levando em conta a quantidade de carbonato de cálcio formado (TABELA 5).

Tabela 5 - Grau de carbonatação calculado a partir do conteúdo de carbonatos formados nas telhas de fibrocimento e a umidade das telhas.

Experimento	GC (%)	Umidade (%)
Referência	0	17,3 ± 1,6
Sem imersão inicial	24,3	7,2 ± 0,3
Com imersão inicial	15,3	8,6 ± 0,9

Fonte: Do autor (2021)

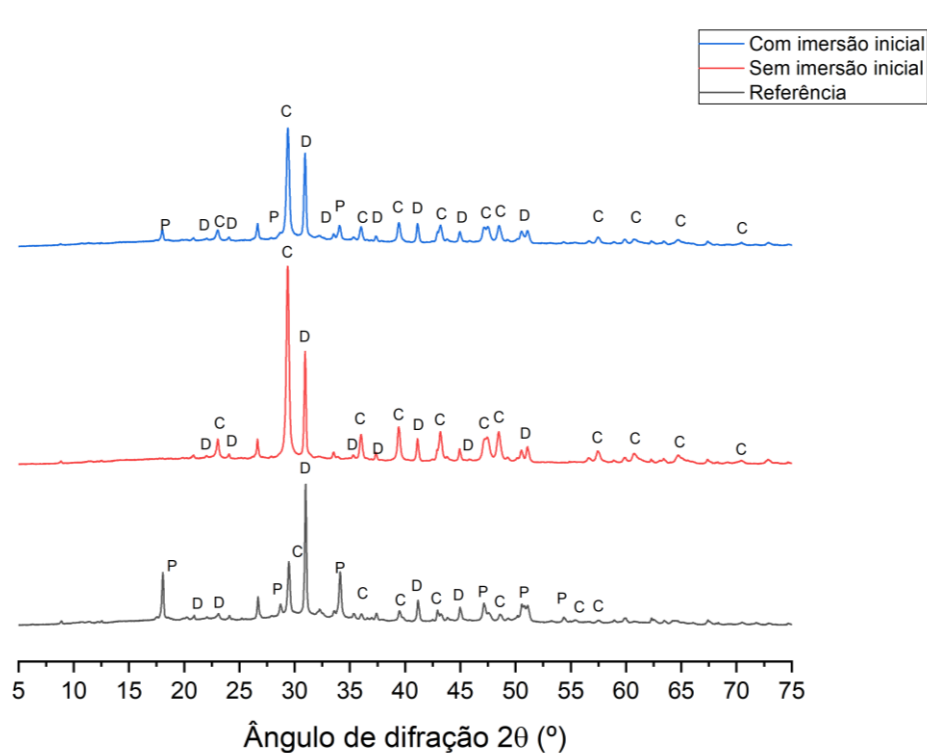
As telhas que não passaram pela imersão inicial obtiveram um grau de carbonatação maior, esse resultado pode indicar que a quantidade de água presente nas telhas era suficiente para a carbonatação. A imersão das telhas em água antes da carbonatação acelerada pode ter causado uma obstrução parcial dos poros que dificultou a difusão de dióxido de carbono e conseqüentemente a reação de carbonatação e a obtenção de maiores graus de carbonatação.

A técnica de difração de raios X (DRX) foi escolhida de forma a complementar a avaliação do grau de carbonatação. Com ela é possível identificar as fases cristalinas presentes nas telhas de fibrocimento como a portlandita, a calcita e a dolomita. A carbonatação é

evidenciada pela diminuição ou desaparecimento de picos de portlandita e o aumento de picos de calcita (FIGURA 10) (ALMEIDA et al., 2013; SANTOS et al., 2015; URREA-CEFERINO et al., 2017).

De acordo com os difratogramas da Figura 10, as telhas que não passaram pela imersão inicial em água alcalina, não apresentaram picos de portlandita. Os resultados apresentados em DRX corroboram com os resultados obtidos na termogravimetria, onde pode-se notar que a imersão inicial deva ter obstruído poros da matriz e dificultado a difusão de dióxido de carbono.

Figura 10 – Difratograma de raios X (DRX) de telhas de fibrocimento com e sem imersão inicial.



Legenda: Portlandita (hidróxido de cálcio) - P, calcita (carbonato de cálcio) – C, e a dolomita– D
Fonte: Do autor (2021).

Os resultados obtidos nos ensaios físicos das telhas de fibrocimento carbonatadas e sua referência não carbonatada, em função da hidratação inicial, estão apresentados nas Figuras 11, 12 e 13.

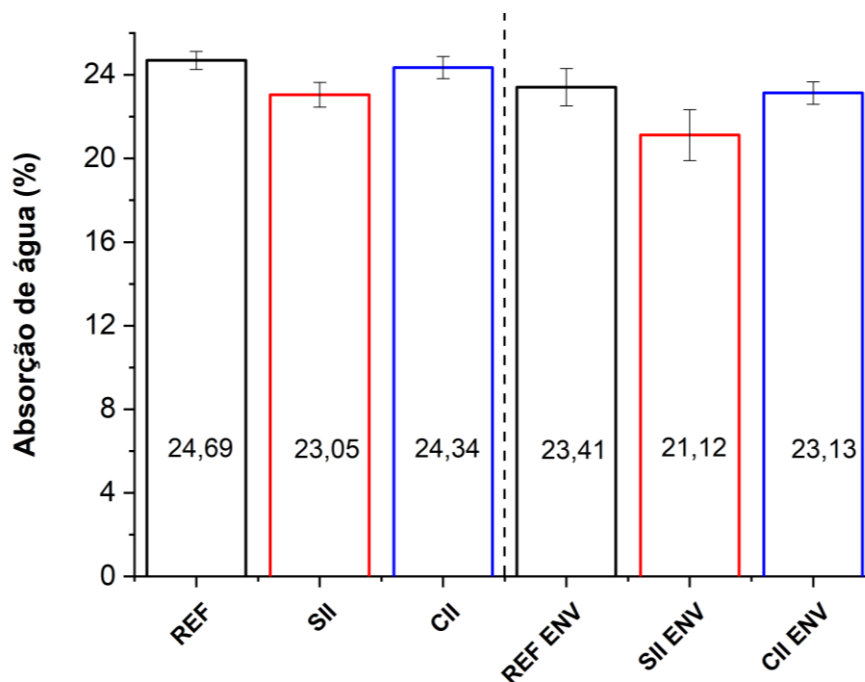
Corroborando com os resultados de TG e DRX é possível notar que as telhas sem imersão inicial, tiveram uma carbonatação mais efetiva se comparado às telhas com imersão inicial, este resultado pode estar relacionado ao fato de que a maior formação de carbonatos de cálcio pode preencher os poros da matriz cimentícia obtendo compósitos menos porosos e

consequentemente uma menor capacidade de absorver a água. O mesmo comportamento foi observado após o envelhecimento acelerado das amostras.

A redução da absorção de água é importante para os compósitos de fibrocimentos reforçados com fibras de polpas celulósicas, pois essa redução pode diminuir a instabilidade dimensional dos compósitos ao evitar que as fibras vegetais, hidrofílicas, entrem em contato com a água presente nos poros da matriz. A diminuição da porosidade aparente e o preenchimento desses poros através da formação de carbonatos de cálcio podem contribuir para a melhoria da resistência mecânica destes compósitos (PIZZOL et al., 2014b).

As telhas sem imersão inicial tiveram uma redução na absorção de água de 1,64 % e uma redução de 0,7 % na porosidade aparente. Em Tonoli et al., (2019), os autores também obtiveram uma redução na absorção de água e porosidade aparente, em compósitos que passaram por carbonatação acelerada durante 10h com CO₂ puro (15%) e prévia secagem dos compósitos. Esta redução de AA e PA também foi relatada por Pizzol et al., (2014b).

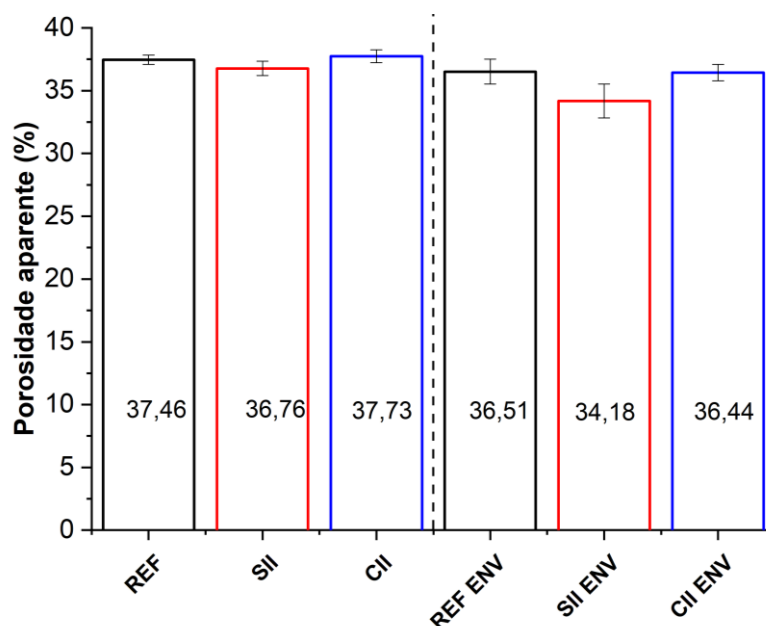
Figura 11 – Absorção de água na avaliação do efeito da imersão inicial de telhas de fibrocimento carbonatadas.



Legenda: REF – Telha referência não carbonatada, SII – Telhas carbonatadas sem imersão inicial em água alcalina, CII – telhas carbonatadas com imersão inicial, ENV – Envelhecimento acelerado

Fonte: Do autor (2021).

Figura 12 – Valores de porosidade aparente para avaliação do efeito da imersão inicial em telhas de fibrocimento carbonatadas.



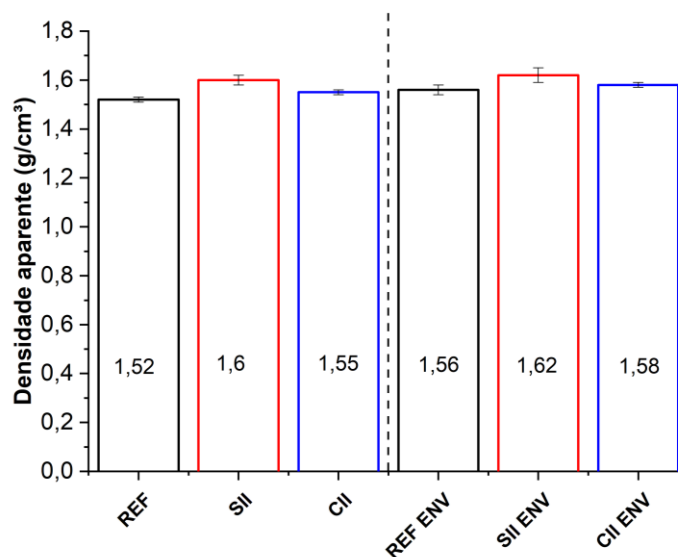
Legenda: REF – Telha referência não carbonatada, SII – Telhas carbonatadas sem imersão inicial em água alcalina, CII – telhas carbonatadas com imersão inicial, ENV – Envelhecimento acelerado

Fonte: Do autor (2021).

Segundo Lesti; Tiemeyer; Plank, (2013), é esperado um aumento na densidade dos compósitos de fibrocimento ao passarem pelo processo de carbonatação acelerada devido a reações entre o hidróxido de cálcio e o dióxido de carbono, que ao reagirem, formam carbonatos de cálcio, estes, mais densos que o hidróxido de cálcio. Em relação à densidade, observou-se um aumento de 3,23 % nas telhas não imersas, comparadas a telhas imersas. Este aumento na densidade após a carbonatação acelerada também é relatado em Almeida et al. (2013), Pizzol et al., (2014), Santos et al. (2015), e Urrea-Ceferino et al. (2017). Nota-se um ganho ainda maior (5,26 %) sobre as telhas que não passaram pelo processo de carbonatação, evidenciando que a CA é responsável por esta densificação.

Analisando os resultados obtidos após o processo de envelhecimento acelerado, estes demonstram que apesar do término da carbonatação acelerada, há indícios da continuidade de possíveis reações de hidratação do cimento, comportamento parecido obtido em estudo realizado por Tonoli et al. (2019). O que indica que os ciclos de imersão e secagem possibilita uma nova precipitação dos produtos de hidratação do cimento, responsáveis por preenchimento dos poros, densificação do material e diminuição da absorção de água (TABELAS 6 e 7).

Figura 13 – Valores de densidade aparente para avaliar o efeito da imersão inicial em telhas de fibrocimento carbonatadas.



Legenda: REF – Telha referência não carbonatada, SII – Telhas carbonatadas sem imersão inicial em água alcalina, CII – telhas carbonatadas com imersão inicial, ENV – Envelhecimento acelerado
 Fonte: Do autor (2021).

Tabela 6 – Valores médios do ensaio físico para telhas de fibrocimento, imersas e não imersas, antes do processo de carbonatação acelerada, seguidas de suas análises estatísticas.

Experimento	AA (%)	DA (g/cm ³)	PA (%)
Referência	24,69 ± 0,43 a	1,52 ± 0,01 c	37,46 ± 0,38 a
Sem imersão inicial	23,05 ± 0,59 b	1,60 ± 0,02 a	36,76 ± 0,57 b
Com imersão inicial	24,34 ± 0,53 a	1,55 ± 0,01 b	37,73 ± 0,51 a

Legenda: Letras diferentes em uma mesma coluna representa diferença significativa no teste de Tukey.
 Fonte: Do autor (2021).

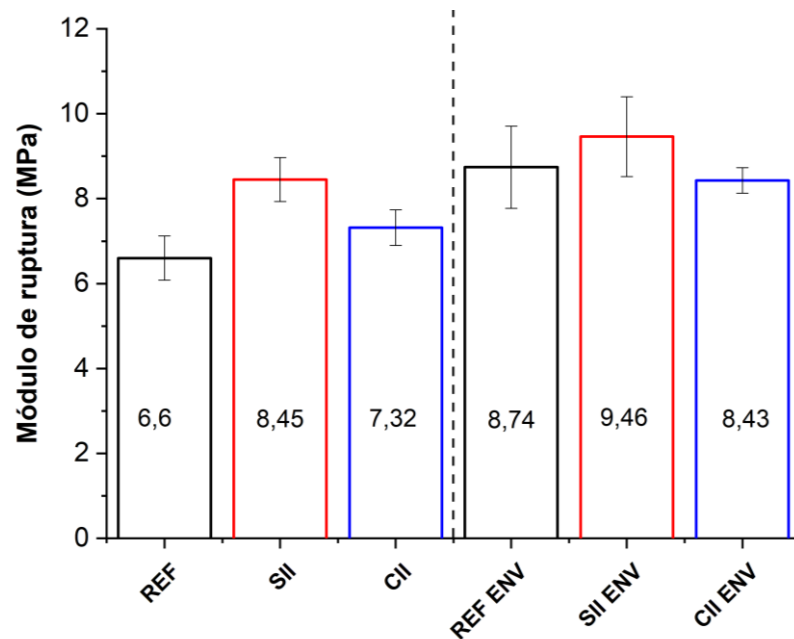
Tabela 7 – Valores médios do ensaio físico para telhas de fibrocimento, imersas e não imersas, antes do processo de carbonatação acelerada, seguidas de suas análises estatísticas, após ensaio de envelhecimento acelerado (Env.).

Experimento	AA (%)	DA (g/cm ³)	PA (%)
Ref. Env.	23,41 ± 0,89 a	1,56 ± 0,02 b	36,51 ± 0,99 a
Sem imersão inicial Env.	21,12 ± 1,22 b	1,62 ± 0,03 a	34,18 ± 1,35 b
Com imersão inicial Env.	23,13 ± 0,54 a	1,58 ± 0,01 b	36,44 ± 0,65 a

Legenda: Letras diferentes em uma mesma coluna representam diferença significativa no teste de Tukey.
 Fonte: Do autor (2021).

Os valores médios obtidos pelos ensaios mecânicos são apresentados nas Figuras 14, 15, 16 e 17 e nas Tabelas 8 e 9, que apresentam os valores de módulo de ruptura (MOR), energia específica (EE), módulo de elasticidade (MOE) e limite de proporcionalidade (LOP) com seus respectivos valores após o ensaio de envelhecimento acelerado.

Figura 14 – Valores médios de módulo de ruptura (MOR) para avaliação do efeito da imersão inicial em telhas de fibrocimento carbonatadas.

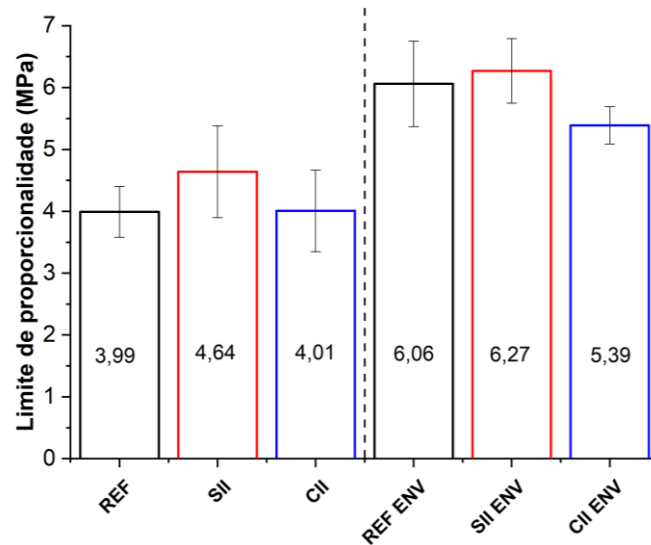


Legenda: REF – Telha referência não carbonatada, SII – Telhas carbonatadas sem imersão inicial em água alcalina, CII – telhas carbonatadas com imersão inicial, ENV – Envelhecimento acelerado
Fonte: Do autor (2021).

O módulo de ruptura (MOR) está associado à carga máxima a ser resistida pelo material em análise antes que ocorra a fratura (FIGURA 14). O compósito sem imersão inicial apresentou um valor de 8,45 Mpa em seu MOR, um aumento de 28,00 % em relação à referência, já as telhas que passaram por imersão inicial, com valor de MOR de 7,32 MPa obtiveram um aumento de 10,91 % em relação à referência. Em relação ao ensaio de envelhecimento acelerado, a diminuição dos valores obtidos entre a referência e as telhas carbonatadas sugere que a carbonatação auxilia no ganho de resistência em idades iniciais onde é necessária esta resistência para manuseio e transporte das telhas comerciais.

O limite de proporcionalidade (LOP) (FIGURA 15) é o limite onde há a passagem do regime elástico para o regime plástico, nesse quesito, obtivemos resultados próximos, dentro do erro experimental, com tendência a limites maiores em telhas sem a imersão inicial.

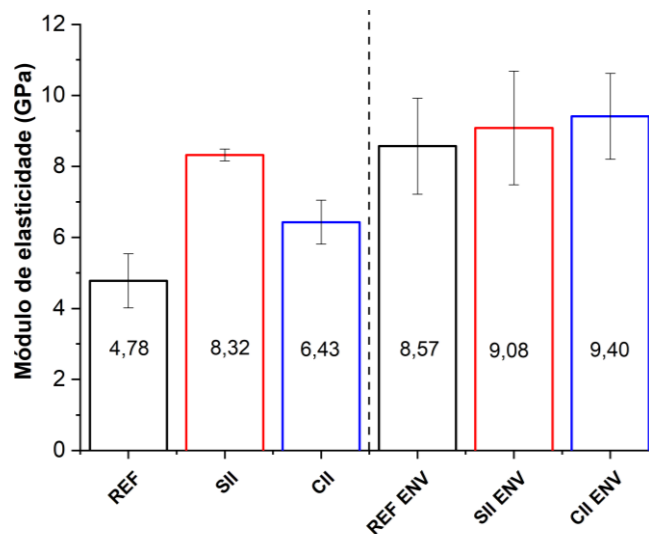
Figura 15 – Valores médios de limite de proporcionalidade (LOP) para avaliação do efeito da imersão inicial em telhas de fibrocimento carbonatadas.



Legenda: REF – Telha referência não carbonatada, SII – Telhas carbonatadas sem imersão inicial em água alcalina, CII – telhas carbonatadas com imersão inicial, ENV – Envelhecimento acelerado
 Fonte: Do autor (2021).

O módulo de elasticidade (MOE) é a relação entre a tensão e a deformação do material no regime elástico, quanto maior a inclinação da curva tensão x deformação, maior será o módulo de elasticidade. Nota-se que as telhas sem imersão inicial obtiveram um aumento de aproximadamente 74% no módulo de elasticidade em comparação às telhas referências não carbonatadas (FIGURA 16).

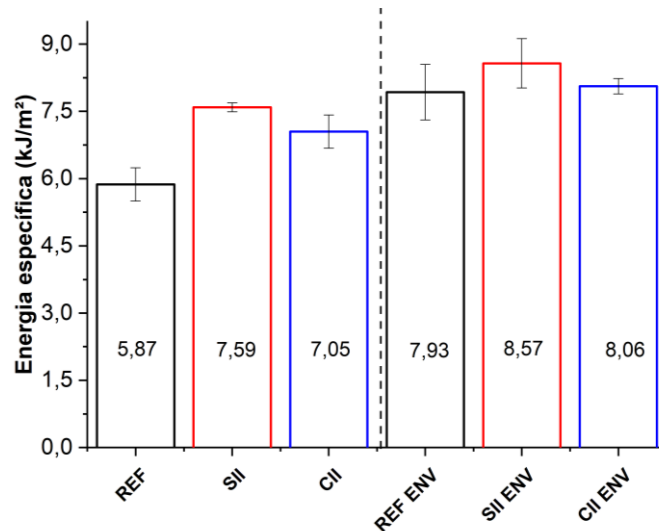
Figura 16 – Valores médios de módulo de elasticidade (MOE) para avaliação do efeito da imersão inicial em telhas de fibrocimento carbonatadas.



Legenda: REF – Telha referência não carbonatada, SII – Telhas carbonatadas sem imersão inicial em água alcalina, CII – telhas carbonatadas com imersão inicial, ENV – Envelhecimento acelerado
 Fonte: Do autor (2021).

A energia específica (EE) é a propriedade do material absorver energia até a sua ruptura. Nos resultados obtidos para a EE podemos observar um aumento de 29,30% nos corpos de prova sem imersão inicial em relação aos corpos de prova sem carbonatação (FIGURA 17). Na Figura 18 podemos observar que o aumento da densidade aparente esta diretamente ligada ao aumento do módulo de ruptura.

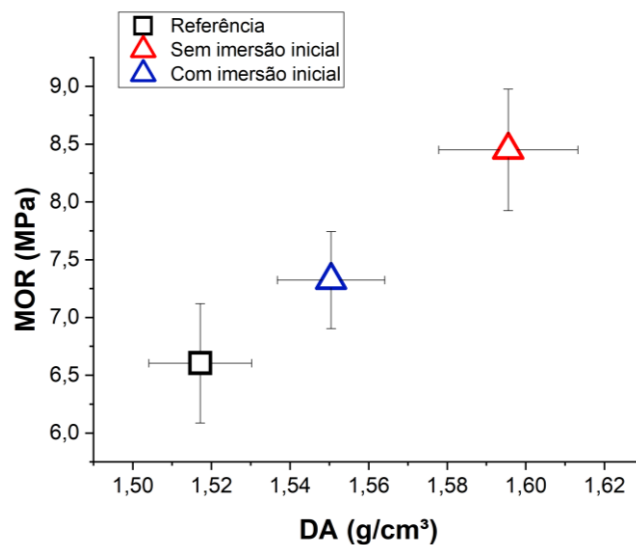
Figura 17 – Valores médios de módulo de energia específica (EE) para avaliação do efeito da imersão inicial em telhas de fibrocimento carbonatadas.



REF – Telha referência não carbonatada, SII – Telhas carbonatadas sem imersão inicial em água alcalina, CII – telhas carbonatadas com imersão inicial, ENV – Envelhecimento acelerado

Fonte: Do autor (2021).

Figura 18 – Módulo de ruptura (MOR) versus densidade aparente (DA) das telhas de fibrocimento com imersão inicial e sem imersão inicial.



Fonte: Do autor (2021).

Os resultados mecânicos mostraram em linhas gerais, que a imersão inicial em água alcalina por 1,5 min após o processo de formação das telhas de fibrocimento, não foi benéfica para o processo de carbonatação. Nota-se que as telhas que não passaram por esse processo de imersão e hidratação prévia, obtiveram valores maiores em relação aos ensaios mecânicos. Os resultados mantiveram os mesmos padrões após os 200 ciclos de envelhecimento acelerado. De acordo com Pizzol et al., (2014b) o aumento no teor de carbonato de cálcio nas amostras carbonatadas podem chegar a 50%. Segundo Tonoli et al., (2019), a carbonatação acelerada tem maior eficiência, quando as amostras tem baixo teor de umidade inicial, em geral, os compósitos fabricados pelo método Hatschek confere ao material, alta porosidade inicial ocasionado pelo grande volume de fibras e pelo processo de drenagem utilizado neste método de fabricação. Após o período de cura, grande parte desses poros são preenchidos com água capilar residual, o que pode interferir na eficiência da carbonatação.

Tabela 8 – Valores médios para os ensaios mecânicos na avaliação da imersão inicial e seus respectivos desvios padrão.

Experimento	MOR (MPa)	LOP (MPa)	MOE (GPa)	EE (kJ/m²)
Referência	6,60 ± 0,52 c	3,99 ± 0,41 a	4,78 ± 0,76 c	5,87 ± 0,37 c
Sem imersão inicial	8,45 ± 0,52 a	4,64 ± 0,74 a	8,32 ± 0,17 a	7,59 ± 0,1 a
Com imersão inicial	7,32 ± 0,42 b	4,01 ± 0,66 a	6,43 ± 0,62 b	7,05 ± 0,37 b

Legenda: Letras diferentes em uma mesma coluna, representa diferença significativa no teste de Tukey.
Fonte: Do autor (2021).

Tabela 9 – Valores médios para os ensaios mecânicos na avaliação da imersão inicial e seus respectivos desvios padrão, após ensaios de envelhecimento acelerado.

Experimento	MOR (MPa)	LOP (MPa)	MOE (MPa)	EE (kJ/m²)
Referência Env.	8,74 ± 0,97 a	6,06 ± 0,69 ab	8,57 ± 1,35 a	7,93 ± 0,62 a
Sem imersão inicial Env.	9,46 ± 0,94 a	6,27 ± 0,52 a	9,08 ± 1,60 a	8,57 ± 0,55 a
Com imersão inicial Env.	8,43 ± 0,30 a	5,39 ± 0,30 b	9,40 ± 1,21 a	8,06 ± 0,17 a

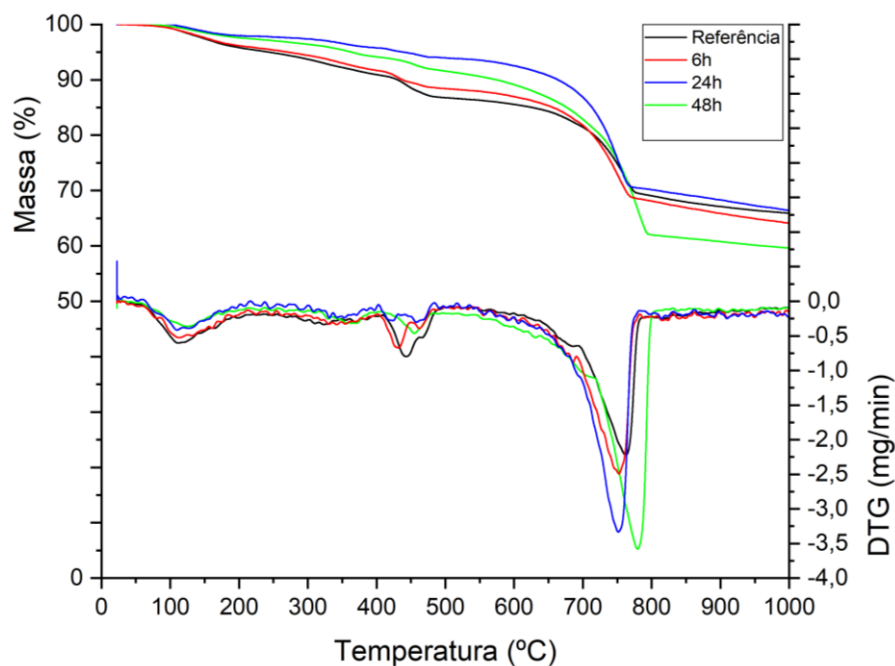
Legenda: Letras diferentes em uma mesma coluna, representa diferença significativa no teste de Tukey.
Fonte: Do autor (2021).

3.2 Efeito do tempo de carbonatação

A Figura 19 mostra os resultados da termogravimetria sobre o tempo de exposição ao

dióxido de carbono durante a carbonatação acelerada em telhas de fibrocimento. Neste estudo, foram avaliados os tempos de 0, 6, 24 e 48h. A perda de água e voláteis é identificada na faixa de temperatura de 100 °C. Entre 100 °C e 300 °C acontece a desidratação do silicato de cálcio hidratado (C-S-H) (MORANDEAU; THIERRY, M.; DANGLA, P, 2014). O desvio da curva de DTG entre 300 e 380 °C sugere, como já mencionado, a decomposição de polpas celulósicas de eucalipto (SANTOS et al., 2015).

Figura 19 – Curvas TG/DTG para as telhas de fibrocimento carbonatadas por 6, 24 e 48 h e sua referência não carbonatada.



Fonte: Do autor (2021).

O hidróxido de cálcio é representado por picos entre 400-500 °C no gráfico de DTG. As temperaturas entre 550 e 1.000 °C referem-se aos carbonatos adicionados como matéria prima e os resultantes do processo de carbonatação (TONOLI et al., 2019). A partir da temperatura de 600 °C há perda de massa característica da decomposição de carbonato de cálcio ainda não cristalizado e entre 700 - 850 °C há decomposição referente ao carbonato de cálcio cristalizado (ROSTAMI et al., 2012).

Nas curvas do gráfico de DTG na Figura 19, podemos observar picos na faixa de temperatura entre 400 – 500 °C indicando à decomposição do hidróxido de cálcio. Nota-se que nas telhas que não passaram pelo processo de carbonatação, há picos elevados nesta faixa (400-500 °C), sugerindo maior quantidade de hidróxido de cálcio. Em relação à faixa de temperatura

do carbonato de cálcio bem cristalizado 700-850 °C, nota-se que as telhas carbonatadas durante 24 e 48h obtiveram uma declividade maior, sugerindo uma quantidade elevada de carbonato de cálcio formado após a carbonatação.

Observa-se que há um aumento gradativo no GC à medida que se aumenta o tempo de exposição das telhas ao processo de carbonatação acelerada. Logo nas primeiras 6 h de carbonatação acelerada, pode-se observar um valor de 8,8% de grau de carbonatação quando comparado às telhas referência. Estes valores aumentam para os tempos de 24 h e 48 h devido ao próprio efeito da carbonatação sobre as telhas (TABELA 10).

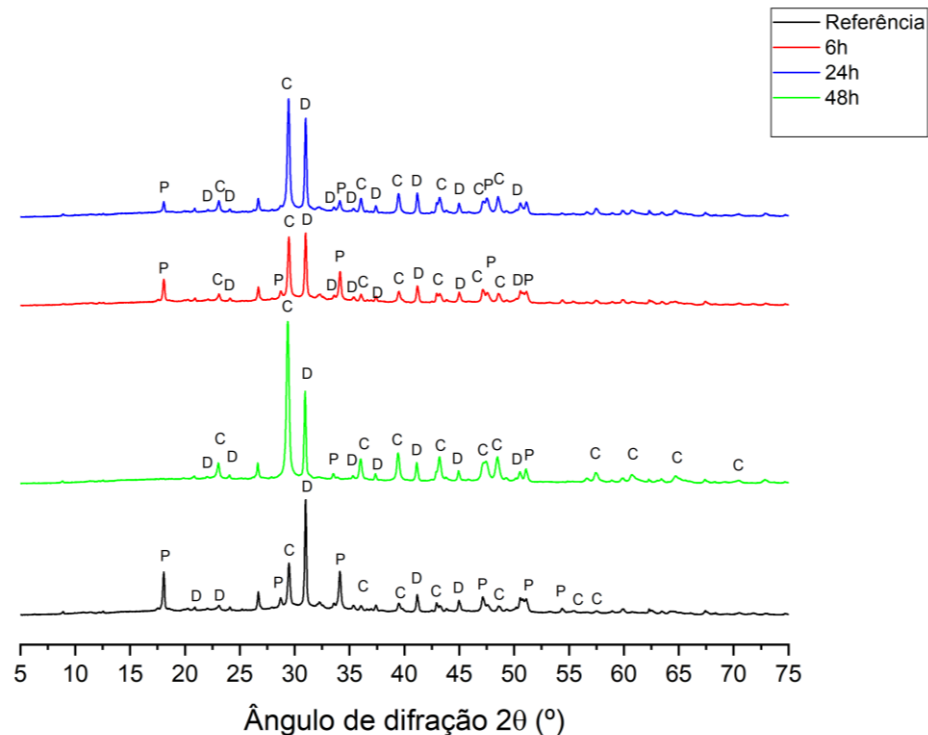
Tabela 10 – Grau de carbonatação e umidade de telhas de fibrocimento por 6, 24 e 48h.

Experimento	GC (%)	Umidade (%)
Ref.	0	17,3 ± 1,6
6h	8,8	14,2 ± 0,4
24h	21,8	7,7 ± 0,7
48h	24,3	7,2 ± 0,3

Fonte: Do autor (2021).

Da mesma forma que descrito para a avaliação do efeito da hidratação inicial, a difração de raios X (DRX) foi utilizada para avaliação da carbonatação. Sendo que na Figura 20, a portlandita (hidróxido de cálcio) é representada com a letra P, a calcita (carbonato de cálcio) pela letra C e a dolomita representada pela letra D. Analisando os difratogramas, podemos notar que o tempo de carbonatação é importante para a difusão de dióxido de carbono, sendo que o mesmo foi observado em trabalhos como de Filomeno (2018), Fioroni et al. (2020) e Tonoli et al., (2019), nos quais a carbonatação foi realizada através do fornecimento de dióxido de carbono puro. Neste trabalho, o fornecimento de dióxido de carbono foi realizado através da combustão de gás natural. A utilização desta fonte de dióxido de carbono foi usada a fim de verificar a possibilidade de utilização de dióxido de carbono proveniente da combustão de gases fósseis, entretanto observou-se que devido a concentração menor de dióxido de carbono durante a carbonatação (4,5%) é necessário tempos maiores de exposição.

Figura 20 – Difratoograma de raios X (DRX) sobre tempo de carbonatação das telhas de fibrocimento



Legenda: Portlandita (hidróxido de cálcio) - P, calcita (carbonato de cálcio) – C, e a dolomita - D
 Fonte: Do autor (2021).

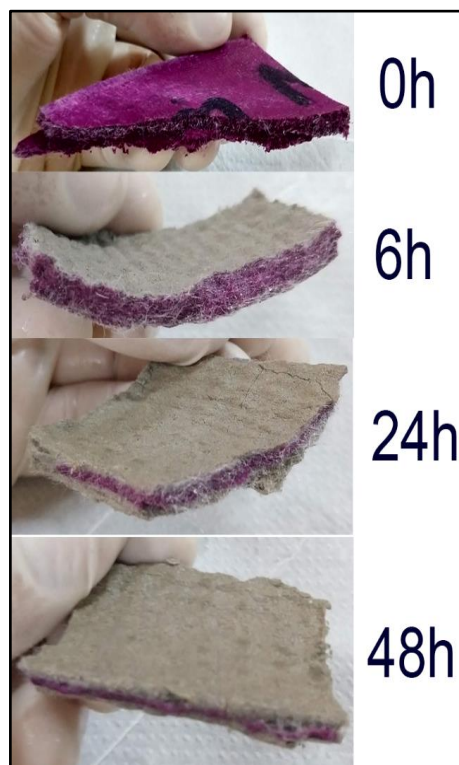
Em estudos recentes, Fioroni et al., (2020) obteve um GC de 86% com 15 % de concentração de dióxido de carbono e 6 h de carbonatação acelerada em câmara climatizada e Tonoli et al., (2019) um GC de 44% com 15% de concentração de dióxido de carbono, também em câmara climatizada, ambas com fornecimento de dióxido de carbono em cilindros puros. Estes resultados sugerem que para a obtenção de graus de carbonatação maiores, com a utilização de dióxido de carbono obtido através da queima de gás natural, pode ser necessário tempos maiores de exposição ao processo de carbonatação acelerada.

A solução de fenolftaleína 2% foi aplicada sobre as telhas de fibrocimento para verificar visualmente a redução da alcalinidade provocada pela reação da carbonatação acelerada. Através da coloração roxa (meio básico) e incolor (meio ácido), é possível identificar os locais alcalinos (FIGURA 21).

A coloração roxa por toda superfície da telha referência não carbonatada (0h), indica um meio alcalino proveniente dos produtos de hidratação do cimento como o hidróxido de cálcio. À medida que as telhas eram carbonatadas e o hidróxido de cálcio era consumido, havia a diminuição do pH do meio, diminuindo a coloração roxa nas telhas carbonatadas (CHOI et

al., 2017). Através dessa técnica é possível deduzir que houve uma diminuição do ambiente alcalino após o processo de carbonatação acelerada. Segundo Soroushian, Won e Hassan (2012), essa diminuição da alcalinidade é benéfica para as fibras vegetais, pois elas sofrem degradação em ambientes alcalinos. Nota-se uma coloração roxa (meio básico) no centro das telhas de fibrocimento mesmo após 48h de carbonatação, evidenciando a dificuldade no avanço da carbonatação para o interior das telhas. É importante salientar que a aplicação de solução de fenolftaleína é uma técnica qualitativa simples e que suas análises precisam ser complementadas.

Figura 21 – Indicador de fenolftaleína sobre telhas de fibrocimento para avaliação das reações de carbonatação



Fonte: Do autor (2021).

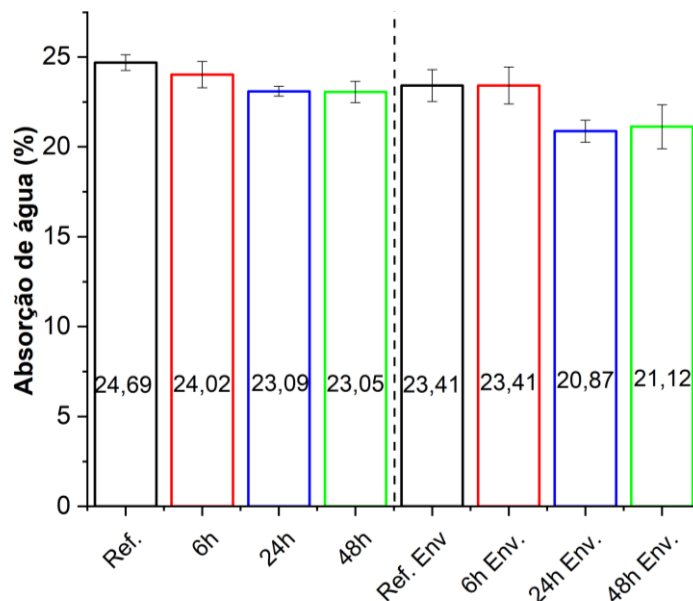
Os valores médios obtidos nos ensaios físicos das telhas de fibrocimento carbonatadas e sua referência não carbonatada, antes e após o envelhecimento acelerado, para a avaliação da evolução da carbonatação, de acordo com o tempo do processo (6, 24 e 48h), estão apresentados nas Figuras 22, 23 e 24.

Na Tabela 11 e Tabela 12 são apresentados os resultados dos valores médios, obtidos nos ensaios físicos, para absorção de água (AA), porosidade aparente (PA) e densidade aparente (DA) com suas análises estatísticas realizadas pelo teste de Tukey. Nos resultados obtidos para

AA, nota-se uma redução de 1,64% nas telhas carbonatadas por 48h em comparação a telhas referência não carbonatadas. Em relação à porosidade aparente, os compósitos carbonatados por 48h tiveram uma redução de 0,7 % em relação às não carbonatadas (0h). Essa redução na PA e AA após o processo de carbonatação, também foi observada por Tonoli et al., (2019) e Pizzol et al., (2014b).

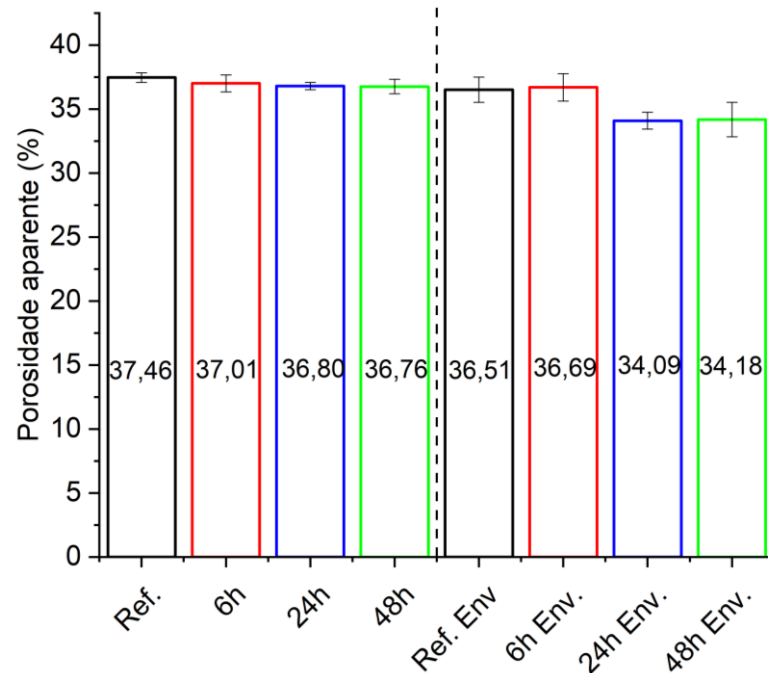
O aumento da densidade aparente é esperado em compósitos carbonatados, devido às reações entre a portlandita e o dióxido de carbono (LESTI; TIEMEYER; PLANK, 2013). As telhas carbonatadas por 48h obtiveram um aumento em 5,26 % em relação às telhas controle (0h). Este aumento na densidade após a carbonatação acelerada também é relatado em Almeida et al. (2013), Pizzol et al., (2014), Santos et al. (2015), e Urrea-Ceferino et al. (2017). Essa tendência também é vista após os ciclos de envelhecimento acelerado, demonstrando possíveis reações químicas de hidratação do cimento (TONOLI et al., 2010b)

Figura 22 – Valores de absorção de água para telhas de fibrocimento carbonatadas por 6, 24 e 48h antes e após ensaios de envelhecimento acelerado (Env.).



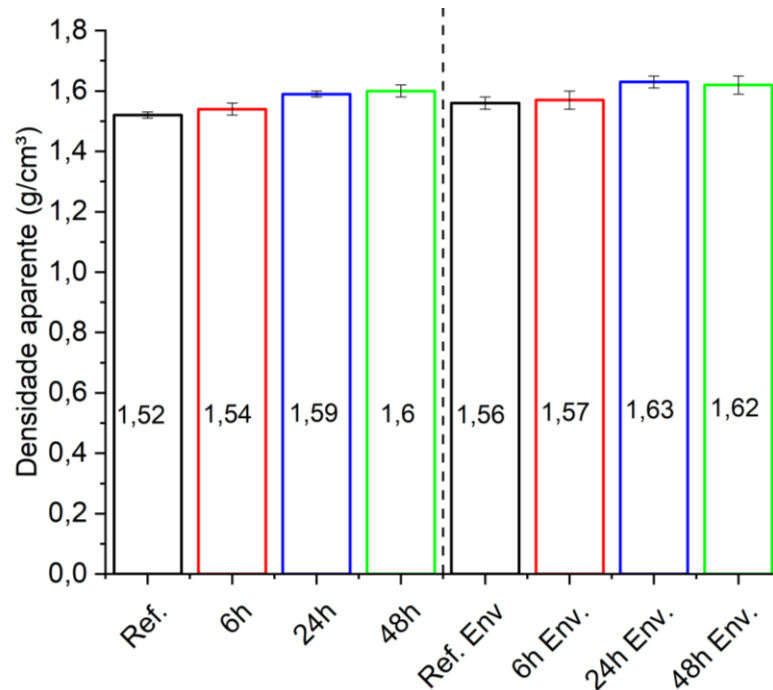
Legenda: REF – Telha referência não carbonatada, ENV – Envelhecimento acelerado
 Fonte: Do autor (2021).

Figura 23 – Valores de porosidade aparente para telhas de fibrocimento carbonatadas por 6, 24 e 48h antes e após ensaios de envelhecimento acelerado (Env.).



Legenda: REF – Telha referência não carbonatada, ENV – Envelhecimento acelerado
 Fonte: Do autor (2021).

Figura 24 – Valores de densidade aparente para telhas de fibrocimento carbonatadas por 6, 24 e 48h antes e após ensaios de envelhecimento acelerado (Env.).



Legenda: REF – Telha referência não carbonatada, ENV – Envelhecimento acelerado
 Fonte: Do autor (2021).

Tabela 11 – Valores de ensaios físicos (AA, DA e PA) para diferentes tempos de carbonatação (0h, 6h, 24h e 48h).

Experimento	AA (%)	DA (g/cm³)	PA (%)
Referência	24,69 ± 0,43 a	1,52 ± 0,01 c	37,46 ± 0,38 a
6h	24,02 ± 0,73 a	1,54 ± 0,02 b	37,01 ± 0,66 ab
24h	23,09 ± 0,27 b	1,59 ± 0,01 a	36,80 ± 0,28 b
48h	23,05 ± 0,59 b	1,60 ± 0,02 a	36,76 ± 0,57 b

Legenda: Letras diferentes em uma mesma coluna representam diferença significativa no teste de Tukey.
Fonte: Do autor (2021).

Tabela 12 – Valores de ensaios físicos (AA, DA e PA) para diferentes tempos de carbonatação (0h, 6h, 24h e 48h) após o ensaio de envelhecimento acelerado (Env.).

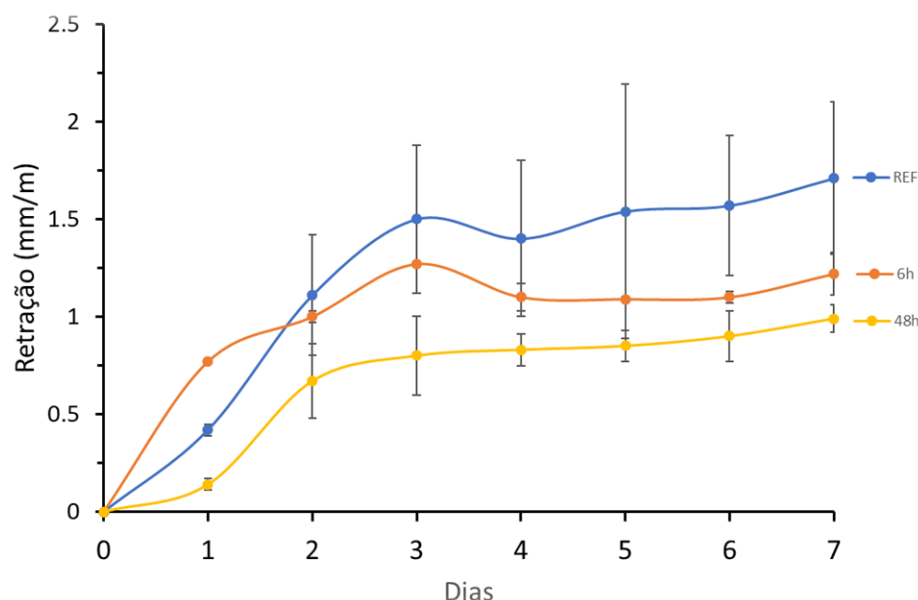
Experimento	AA (%)	DA (g/cm³)	PA (%)
Ref. Env.	23,41 ± 0,89 a	1,56 ± 0,02 c	36,51 ± 0,99 a
6h Env.	23,41 ± 1,03 a	1,57 ± 0,03 b	36,69 ± 1,07 ab
24h Env.	20,87 ± 0,62 b	1,63 ± 0,02 a	34,09 ± 0,66 b
48h Env.	21,12 ± 1,22 b	1,62 ± 0,03 a	34,18 ± 1,35 b

Legenda: Letras diferentes em uma mesma coluna representam diferença significativa no teste de Tukey.
Fonte: Do autor (2021).

A Figura 25 apresenta as curvas de retração por secagem dos corpos de prova retirados do flanco das telhas de referência e das telhas carbonatadas ao longo de 6 e 48 h. Nota-se que a taxa de retração por secagem (mm/m) diminui à medida que aumenta o tempo de carbonatação das telhas. As telhas carbonatadas por 48h obtiveram uma redução de aproximadamente 50% na taxa de retração ao final do 7º dia em comparação às telhas que não passaram pelo processo de carbonatação. Assim, observa-se que a evolução do grau de carbonatação das telhas está relacionada à estabilidade dimensional das telhas, o que pode ser observado desde o início do

ensaio para as amostras carbonatadas por 48h. Essa redução na taxa de retração, também foi relatada por Fioroni (2019).

Figura 25 – Retração por secagem em telhas de fibrocimento carbonatadas por 6 e 48 h e sua referência (não carbonatada) durante 7 dias.

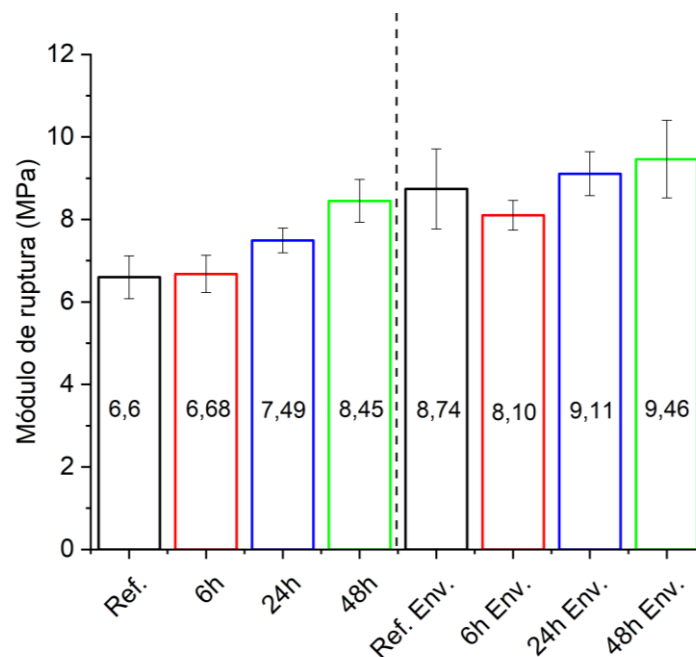


Legenda: REF – Telha referência não carbonatada
 Fonte: Do autor (2021).

Os valores médios obtidos pelos ensaios mecânicos nas Figuras 26, 27, 28 e 29 e nas Tabelas 13 e 14. O módulo de ruptura (FIGURA 26) mostra os resultados obtidos em ensaio de resistência mecânica, antes e após os ensaios de envelhecimento acelerado. Comparando-se com telhas referência, nota-se um ganho de resistência e rigidez à medida que os tempos de carbonatação aumentam. Dentre os diferentes tempos de exposição ao dióxido de carbono, percebe-se que quanto maior o tempo de carbonatação maior também é o módulo de ruptura do material. Antes dos ensaios de envelhecimento acelerado, foi possível obter um aumento no MOR para as telhas de fibrocimento carbonatadas por 48h de 28% em comparação a telhas não carbonatadas (0h). Entretanto, após o envelhecimento acelerado, os resultados obtidos para o MOR, não apresentaram diferenças significativas no teste de Tukey, apresentado na Tabela 14, porém mantiveram a tendência de maior MOR nas telhas carbonatadas. Estes resultados sugerem que a carbonatação acelerada pode ser benéfica nas primeiras idades das telhas de fibrocimento, onde o transporte e manuseio podem exigir esforços do material.

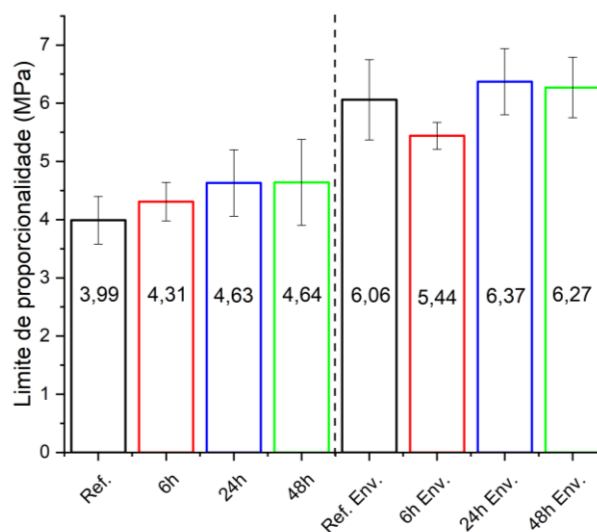
Na Figura 27 temos os valores de limite de proporcionalidade onde podemos ver a delimitação dos limites elásticos e plásticos, nesta propriedade o tempo de carbonatação não influenciou de forma significativa os resultados obtidos.

Figura 26 – Valores médios para o módulo de ruptura (MOR) na avaliação do efeito do tempo de carbonatação, antes e após o processo de envelhecimento acelerado (Env.).



Legenda: REF – Telha referência não carbonatada, ENV – Envelhecimento acelerado
Fonte: Do autor (2021).

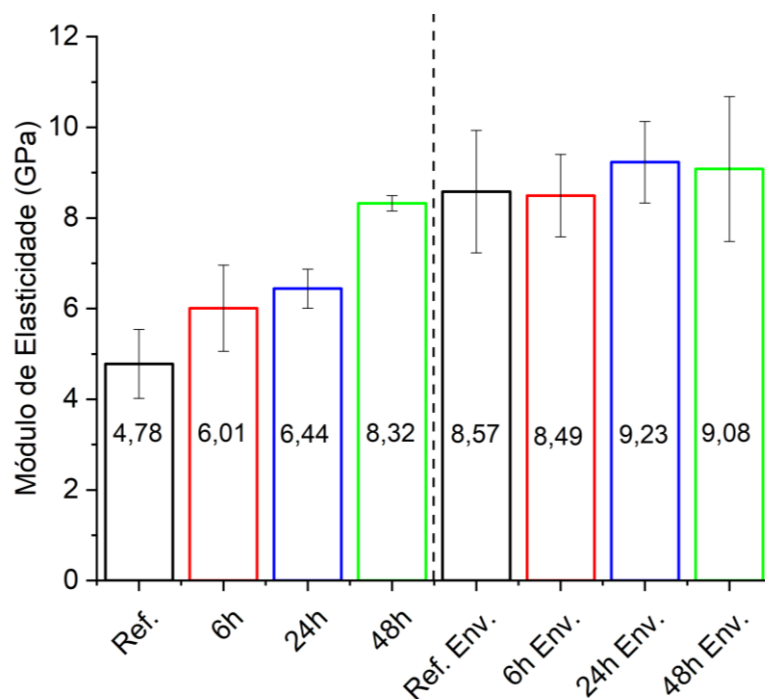
Figura 27 – Valores médios para o limite de proporcionalidade na avaliação do efeito de tempo de carbonatação, antes e após o processo de envelhecimento acelerado.



Legenda: REF – Telha referência não carbonatada, ENV – Envelhecimento acelerado
Fonte: Do autor (2021).

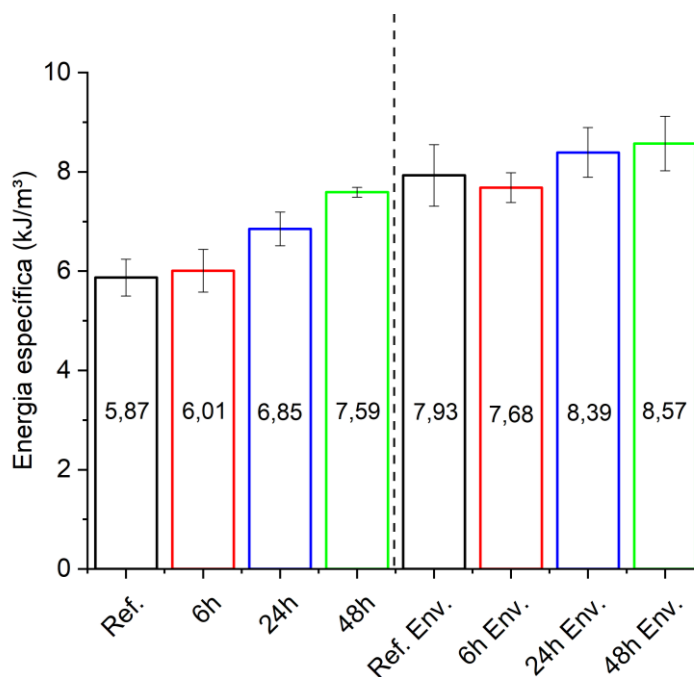
Em relação ao módulo de elasticidade (FIGURA 28) e a energia específica (FIGURA 29) podemos perceber que o tempo de carbonatação teve influência no aumento do módulo de elasticidade em 74%, e no aumento de 29,30% na energia específica do material, antes da realização do ensaio de envelhecimento acelerado, considerando as amostras carbonatadas por 48 h em relação à referência. Entretanto, após o envelhecimento o mesmo comportamento não foi observado. A carbonatação ao ajudar na produção de carbonatos de cálcio, densifica a matriz tornando mais resistente, tanto em regimes plásticos quanto elásticos, além de diminuir a alcalinidade prejudicial às fibras celulósicas muitas vezes utilizadas como reforço em fibrocimentos. Filomeno (2018) e Fioroni (2019) obtiveram resultados semelhantes, porém o fornecimento de CO₂ nos referidos trabalhos foi realizado através de uma fonte de CO₂ puro, ou seja, em concentrações maiores (15-25 %), neste trabalho optamos pela utilização de uma fonte alternativa através da combustão de gás natural com o intuito de testar novas formas para a utilização de CO₂ podendo contribuir para a diminuição da emissão deste gás. Desta forma, os resultados obtidos são promissores, pois apresentam comportamento similar aos relatados na literatura utilizando o gás concentrado.

Figura 28 - Valores médios para o módulo de elasticidade na avaliação do efeito de tempo de carbonatação, antes e após o processo de envelhecimento acelerado (Env.).



Legenda: REF – Telha referência não carbonatada, ENV – Envelhecimento acelerado
Fonte: Do autor (2021).

Figura 29 – Valores médios para energia específica na avaliação do efeito tempo de carbonatação, antes e após o processo de envelhecimento acelerado (Env.).



Legenda: REF – Telha referência não carbonatada, ENV – Envelhecimento acelerado
 Fonte: Do autor (2021).

Na Tabela 13 e Tabela 14, são apresentados os valores médios, obtidos no ensaio mecânico, antes e após o processo de envelhecimento acelerado, para avaliar o efeito do tempo de exposição das telhas de fibrocimento ao dióxido de carbono, proveniente da combustão do gás natural em comparação a telhas referências não carbonatadas.

Tabela 13 - Valores médios e seus respectivos desvios padrão para os resultados mecânicos na avaliação do tempo de carbonatação.

Experimento	MOR (MPa)	LOP (MPa)	MOE (GPa)	EE (kJ/m ²)
Ref.	6,6 ± 0,52 c	3,99 ± 0,41 a	4,78 ± 0,76 c	5,87 ± 0,37 c
6h	8,68 ± 0,45 c	4,31 ± 0,33 a	6,01 ± 0,95 b	6,01 ± 0,43 c
24h	7,49 ± 0,30 b	4,63 ± 0,57 a	6,44 ± 0,43 b	6,85 ± 0,34 b
48h	8,45 ± 0,52 a	4,64 ± 0,74 a	8,32 ± 0,17 a	7,59 ± 0,1 a

Legenda: Letras diferentes em uma mesma coluna representam diferença significativa no teste de Tukey.
 Fonte: Do autor (2021).

Tabela 14 – Valores médios e seus respectivos desvios padrão para os resultados mecânicos na avaliação do tempo de carbonatação após os ensaios de envelhecimento acelerado.

Experimento	MOR (MPa)	LOP (MPa)	MOE (GPa)	EE (kJ/m²)
Ref. Env.	8,74 ± 0,97 ab	6,06 ± 0,69 ab	8,57 ± 1,35 a	7,93 ± 0,62 ab
6h Env.	8,10 ± 0,36 b	5,44 ± 0,23 b	8,49 ± 9,13 a	7,68 ± 0,30 b
24h Env.	9,11 ± 0,53 ab	6,37 ± 0,57 a	9,23 ± 9,00 a	8,39 ± 0,50 ab
48h Env.	9,46 ± 0,94 a	6,27 ± 0,52 a	9,08 ± 1,60 a	8,57 ± 0,55 a

Legenda: Letras diferentes em uma mesma coluna representam diferença significativa no teste de Tukey.
Fonte: Do autor (2021).

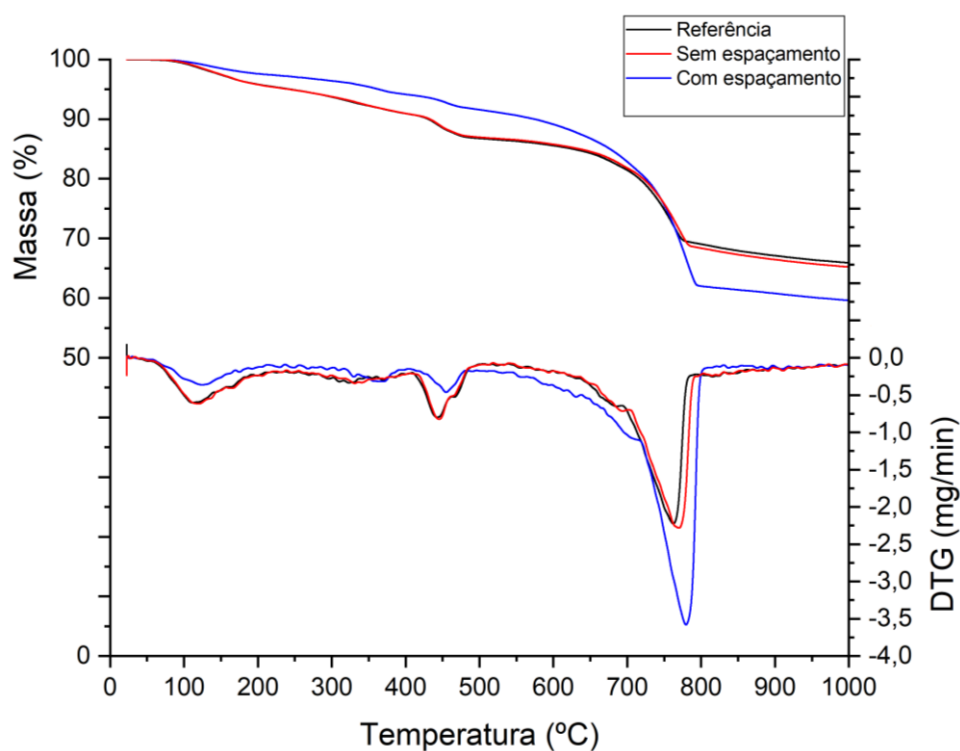
3.3 Efeito do espaçamento das telhas

Os resultados do ensaio de termogravimetria são apresentados pelas curvas TG/DTG na Figura 30, onde são mostrados os picos referentes aos componentes do fibrocimento em decomposição, para telhas espaçadas e não espaçadas, durante a carbonatação.

Nota-se a perda de massa em temperaturas inferiores à 500 °C correspondendo aos produtos de hidratação do cimento como C-S-H e C-H (YLMÉN; JAGLID, 2013). O gráfico mostra um pico maior na faixa de 400-500 °C nas telhas sem espaçamento, relacionado com o hidróxido de cálcio, sugerindo uma carbonatação menor nestas telhas. Os carbonatos de cálcio presentes no fibrocimento são representados em faixas entre 550 e 1.000 °C, conforme Tonoli et al., (2019), nessa faixa podemos observar que as telhas espaçadas tiveram maior formação de carbonatos de cálcio, corroborando para o entendimento do consumo de hidróxido de cálcio.

Na Tabela 15 são mostrados os graus de carbonatação das amostras. A maior formação de carbonatos nas telhas espaçadas justifica o maior grau de carbonatação (24,3%) se comparadas às telhas empilhadas sem espaçamento (2,2%). O espaçamento entre as telhas no momento da carbonatação facilitou o fluxo de vapor enriquecido com dióxido de carbono e consequentemente ajudou na carbonatação acelerada. Foi possível obter um aumento no GC através do espaçamento entre as telhas, além da diminuição da umidade.

Figura 30- Curvas TG/DTG para as telhas de fibrocimento com e sem espaçamento.



Fonte: Do autor (2021).

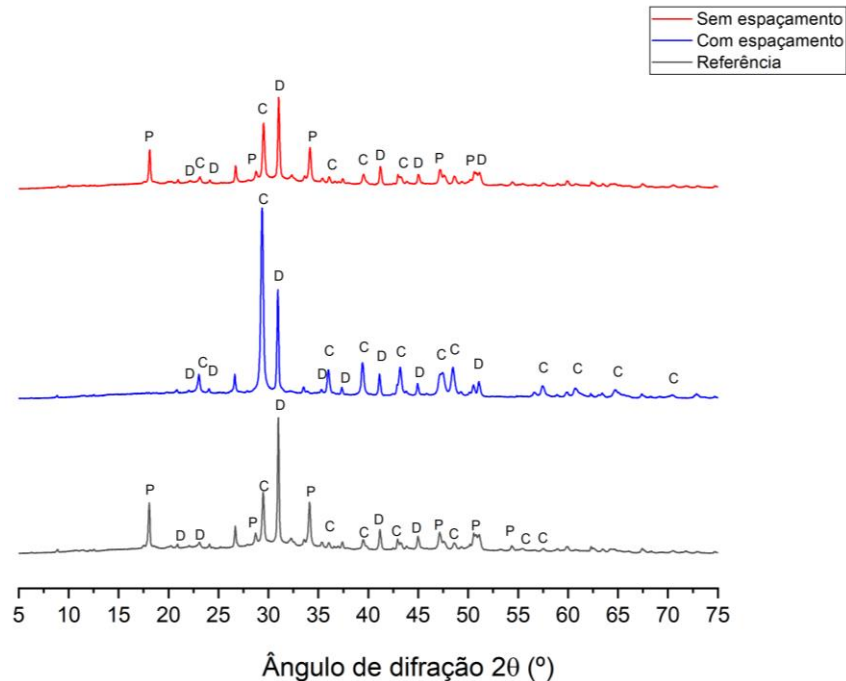
Tabela 15 – Grau de carbonatação e umidade de telhas de fibrocimento com e sem espaçamento.

Experimento	GC (%)	Umidade (%)
Referência	0	17,3 ± 1,6
Sem espaçamento	2,2	18,5 ± 0,7
Com espaçamento	24,3	7,2 ± 0,3

Fonte: Do autor (2021).

A difração de raios X (DRX), Figura 31, foi utilizada de forma auxiliar, na avaliação do espaçamento entre as telhas, durante o processo de carbonatação, identificando as principais fases cristalinas presentes nas telhas de fibrocimento como a portlandita (hidróxido de cálcio) (P) e a calcita (carbonato de cálcio) (C).

Figura 31 – Difratoograma de raios X sobre o efeito do espaçamento durante a reação de carbonatação em telhas de fibrocimento.



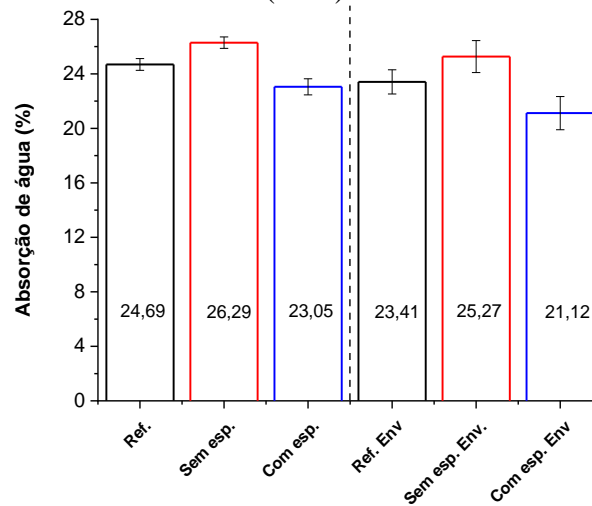
Portlandita (hidróxido de cálcio) - P, calcita (carbonato de cálcio) – C, e a dolomita – D
 Fonte: Do autor (2021).

O desaparecimento dos picos de portlandita e o crescimento de picos de calcita evidenciam a efetividade das reações de carbonatação e a influência ou não do espaçamento no processo da reação. Analisando os difratogramas, podemos notar que o espaçamento foi benéfico para a formação de carbonatos de cálcio e o consumo de hidróxidos de cálcio. O hidróxido de cálcio é um componente que torna o meio do fibrocimento em um meio alcalino e prejudicial às fibras celulósicas. Dessa forma, observamos que o espaçamento ao melhorar às reações de carbonatação, também tem potencial para diminuir a degradação das fibras vegetais no fibrocimento, através desse consumo de hidróxido de cálcio.

Os valores médios obtidos nos ensaios físicos das telhas de fibrocimento, antes e após o envelhecimento acelerado para a avaliação do efeito do espaçamento estão apresentados nas Figuras 32, 33 e 34, e os resultados com seus respectivos desvios padrão estão representados na Tabela 16 e Tabela 17. A Figura 32 apresenta os valores médios de absorção de água (AA), antes e após o envelhecimento acelerado. Segundo Pizzol et al., (2014b), a carbonatação acelerada pode diminuir a absorção de água, através da densificação do carbonato de cálcio nos poros da matriz cimentícia, dificultando essa absorção. Através do espaçamento durante a carbonatação, foi possível obter uma diminuição de 1,64% na AA antes do ensaio de envelhecimento acelerado, e uma diminuição de 2,29% após o ensaio de envelhecimento, em

relação a telhas não carbonatadas (Ref.). Na Figura 33, estão apresentados os valores para densidade aparente (DA), onde através do espaçamento, foi possível obter um aumento na densidade em 5,26 % antes dos ensaios de envelhecimento acelerado e um aumento de 3,84% após o processo de envelhecimento.

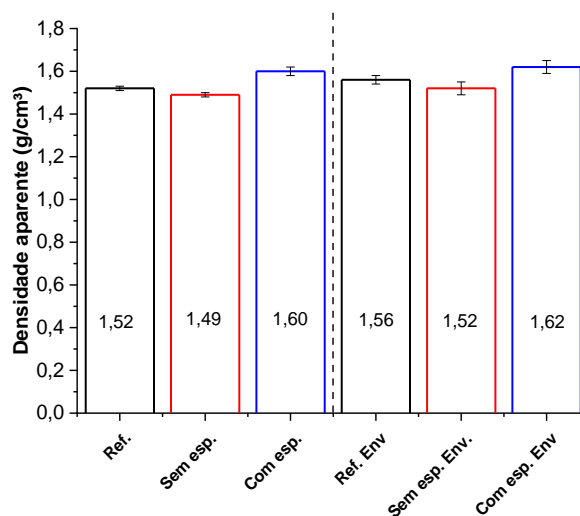
Figura 32 – Valores médios para absorção de água (AA) avaliando o efeito do espaçamento em telhas de fibrocimento carbonatadas antes e após o processo de envelhecimento acelerado (Env.).



Legenda: REF – Telha referência não carbonatada, ENV – Envelhecimento acelerado, ESP – espaçamento.

Fonte: Do autor (2021).

Figura 33 – Valores médios para densidade aparente (DA) avaliando o efeito do espaçamento em telhas de fibrocimento carbonatadas antes e após o processo de envelhecimento acelerado (Env.).



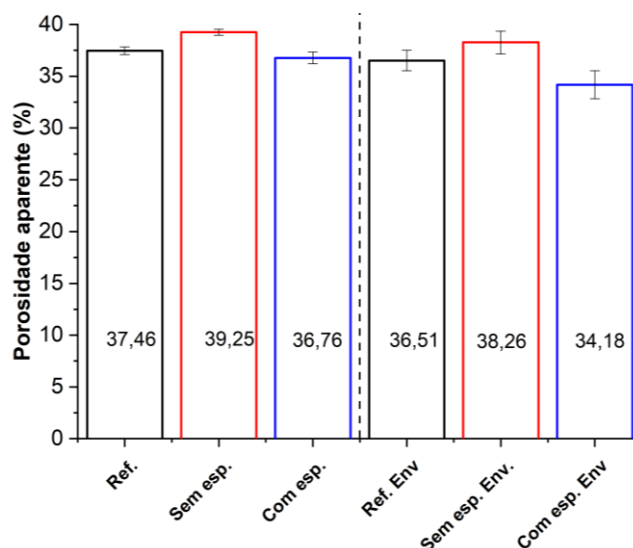
Legenda: REF – Telha referência não carbonatada, ENV – Envelhecimento acelerado, ESP – espaçamento.

Fonte: Do autor (2021).

A Figura 34 apresenta os valores médios obtidos para a porosidade aparente (PA), devido à densificação do carbonato de cálcio nos poros da matriz cimentícia, é esperado que em compósitos cimentícios carbonatados ocorra uma diminuição na porosidade aparente. Com a adoção do espaçamento durante a carbonatação acelerada, foi possível ter uma redução de 0,7 % na porosidade aparente do material antes dos ensaios de envelhecimento.

Na Tabela 16 e na Tabela 17 são demonstrados os valores médios para os ensaios físicos na avaliação do espaçamento. A análise estatística realizada pelo teste Tukey, onde letras diferentes em uma mesma coluna representam diferenças significantes entre os tratamentos também são mostrados.

Figura 34 – Valores médios para porosidade aparente (PA) avaliando o efeito do espaçamento em telhas de fibrocimento carbonatadas antes e após o processo de envelhecimento acelerado (Env.).



Legenda: REF – Telha referência não carbonatada, ENV – Envelhecimento acelerado, ESP – espaçamento.

Fonte: Do autor (2021).

Tabela 16 – Valores de ensaios físicos antes do ensaio de envelhecimento acelerado para avaliação do efeito do espaçamento.

Experimento	AA (%)	DA (g/cm ³)	PA (%)
Referência	24,69 ± 0,43 b	1,52 ± 0,01 b	37,46 ± 0,38 b
Sem espaçamento	26,29 ± 0,42 a	1,49 ± 0,01 c	39,25 ± 0,30 a
Com espaçamento	23,05 ± 0,59 c	1,60 ± 0,02 a	36,76 ± 0,57 c

Legenda: Letras diferentes em uma mesma coluna, representa diferença significativa no teste de Tukey.
Fonte: Do autor (2021).

Tabela 17 – Valores de ensaios físicos após o ensaio de envelhecimento acelerado, para avaliar o efeito do espaçamento.

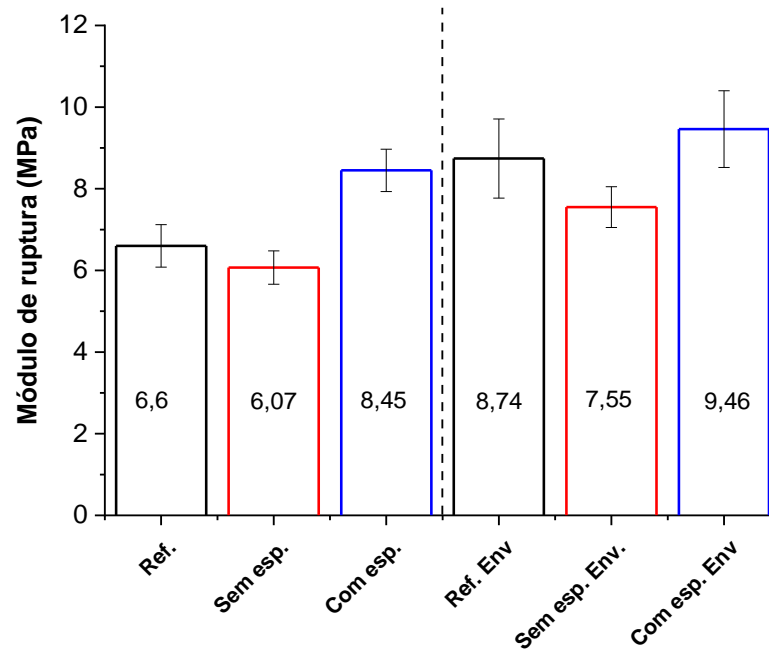
Experimento	AA (%)	DA (g/cm³)	PA (%)
Referência Env.	23,41 ± 0,89 b	1,56 ± 0,02 b	36,51 ± 0,99 b
Sem espaçamento Env.	25,27 ± 1,17 a	1,52 ± 0,03 c	38,26 ± 1,10 a
Com espaçamento Env.	21,12 ± 1,22 c	1,62 ± 0,03 a	34,18 ± 1,35 c

Legenda: Letras diferentes em uma mesma coluna, representa diferença significativa no teste de Tukey.
Fonte: Do autor (2021).

Os valores de módulo de ruptura (FIGURA 35), limite de proporcionalidade (FIGURA 36), módulo de elasticidade (FIGURA 37), energia específica (FIGURA 38), e densidade aparente versus módulo de ruptura (FIGURA 39) auxiliam no entendimento do efeito do espaçamento das telhas de fibrocimento durante o processo de carbonatação, nas propriedades mecânicas. Os resultados mecânicos corroboram para com os resultados de TG (FIGURA 30), DRX (FIGURA 31) e ensaios físicos (TABELA 16 e TABELA 17) onde é possível notar que o espaçamento contribui para maior formação de carbonatos de cálcio e o consumo de hidróxido de cálcio, diminuindo o meio alcalino prejudicial às fibras celulósicas, diminuindo a porosidade aparente do material e aumentando a densificação da matriz.

O módulo de ruptura (MOR) apresentado na Figura 35 mostra um aumento de aproximadamente 28% nas telhas com espaçamento em comparação às telhas referência (não carbonatadas). Em relação às telhas sem espaçamento, este aumento foi de 39%. Este aumento em relação às telhas sem espaçamento, também é visto após os ensaios de envelhecimento acelerados. Os resultados mecânicos sugerem que as telhas carbonatadas com espaçamento, resistirão a maiores tensões de tração ao serem expostas em telhados, serão capazes de absorverem mais energia antes de sua ruptura (FIGURA 38), além de terem uma rigidez maior (FIGURA 37). Com a obtenção de resultados positivos, entende-se que o espaçamento contribuiu ao facilitar a circulação de dióxido de carbono pelo sistema e melhorar as propriedades físicas e mecânicas do material.

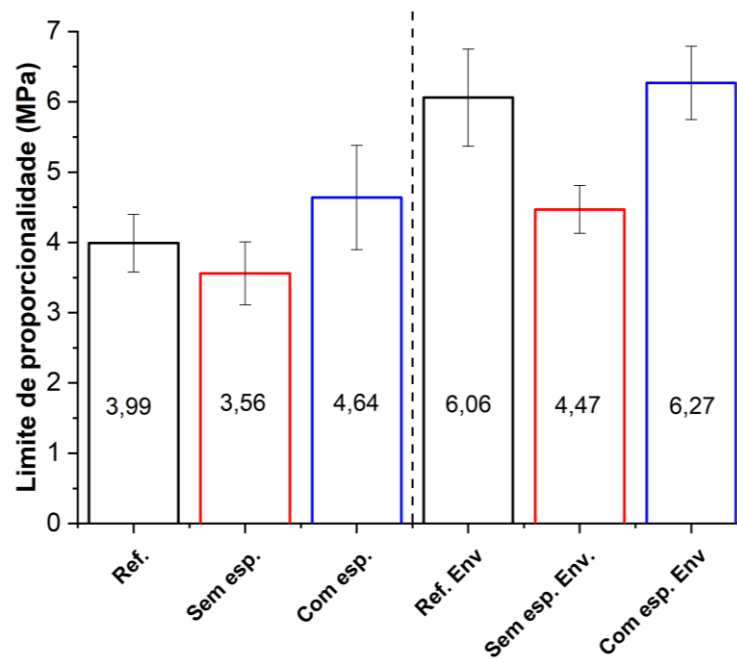
Figura 35– Valores médios para módulo de ruptura (MOR) avaliando o efeito do espaçamento em telhas de fibrocimento carbonatadas.



Legenda: REF – Telha referência não carbonatada, ESP – Espaçamento, ENV – Envelhecimento acelerado.

Fonte: Do autor (2021).

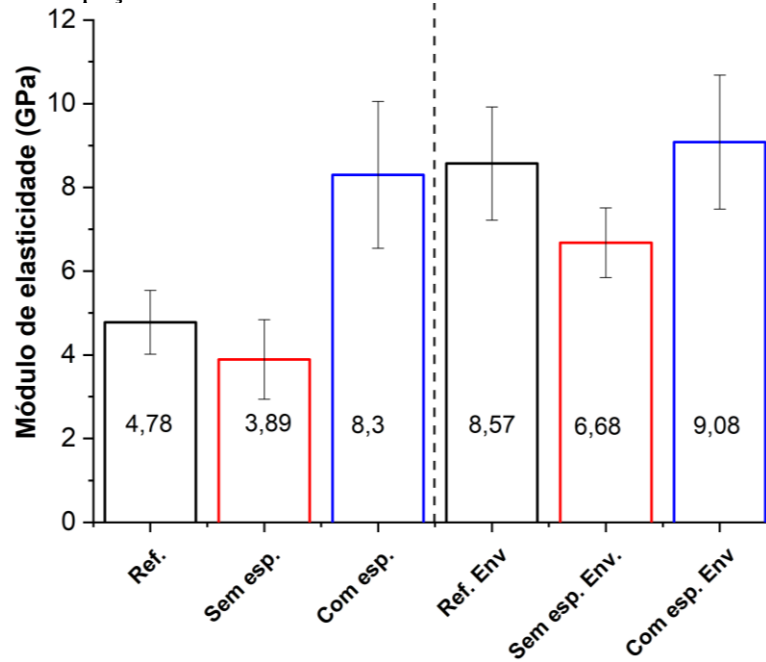
Figura 36 – Valores médios para limite de proporcionalidade (LOP) avaliando o efeito do espaçamento em telhas de fibrocimento carbonatadas.



Legenda: REF – Telha referência não carbonatada, ESP – Espaçamento, ENV – Envelhecimento acelerado.

Fonte: Do autor (2021).

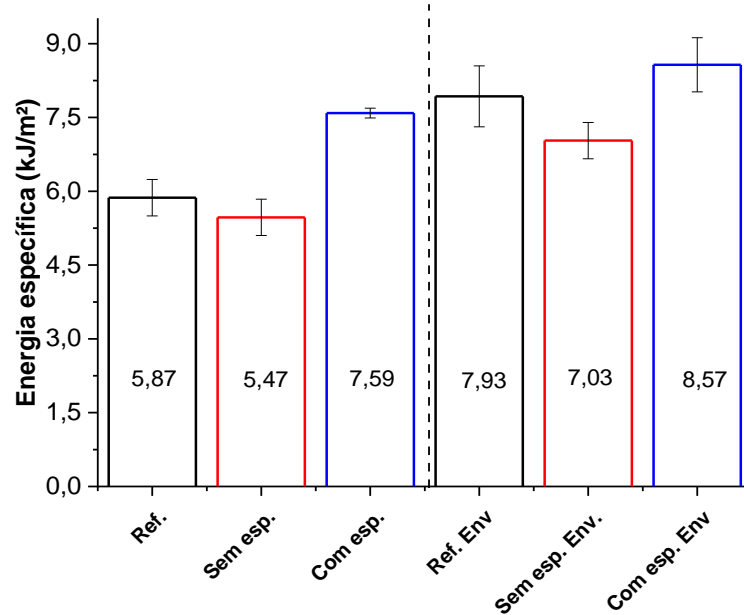
Figura 37 – Valores médios para módulo de elasticidade (MOE) avaliando o efeito do espaçamento em telhas de fibrocimento carbonatadas.



Legenda: REF – Telha referência não carbonatada, ESP – Espaçamento, ENV – Envelhecimento acelerado.

Fonte: Do autor (2021)

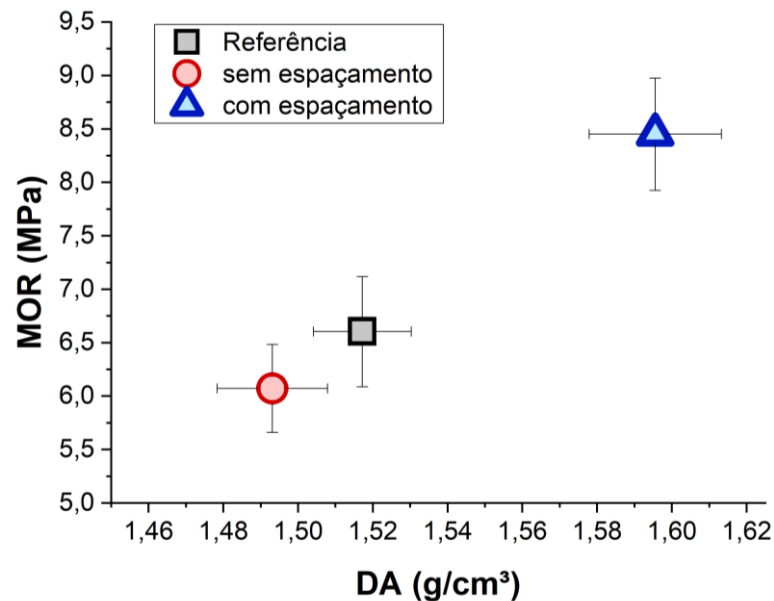
Figura 38 – Valores médios para energia específica (EE) avaliando o efeito do espaçamento em telhas de fibrocimento carbonatadas.



Legenda: REF – Telha referência não carbonatada, ESP – Espaçamento, ENV – Envelhecimento acelerado.

Fonte: Do autor (2021).

Figura 39 – Valores médios para módulo de ruptura (MOR) avaliando o efeito do espaçamento em telhas de fibrocimento carbonatadas.



Fonte: Do autor (2021).

O espaçamento entre as telhas de fibrocimento pode ser um parâmetro a ser adotados em procedimentos de carbonatação acelerada em materiais de fibrocimento. Conforme os resultados obtidos, podemos perceber que espaçar as telhas pode aumentar a efetividade da carbonatação. O espaçamento pode ser um facilitador para o fluxo de dióxido de carbono presente no sistema e contribuir para a difusão a profundidades maiores. Nas Tabelas 18 e 19 são apresentados os valores dos ensaios mecânicos, antes e após o envelhecimento acelerado e suas análises estatísticas para o teste de Tukey.

Tabela 18 – Valores de ensaios mecânicos para avaliar o efeito do espaçamento.

Experimento	MOR (MPa)	LOP (MPa)	MOE (GPa)	EE (kJ/m ²)
Referência	6,60 ± 0,52 b	3,99 ± 0,41 ab	4,78 ± 0,76 b	5,87 ± 0,37 b
Sem espaçamento	6,07 ± 0,41 b	3,56 ± 0,45 b	3,89 ± 0,95 b	5,47 ± 0,37 b
Com espaçamento	8,45 ± 0,52 a	4,64 ± 0,74 a	8,32 ± 0,17 a	7,59 ± 0,1 a

Legenda: Letras diferentes em uma mesma coluna, representa diferença significativa no teste de Tukey.

Fonte: Do autor (2021).

Tabela 19 – Valores de ensaios mecânicos após o ensaio de envelhecimento acelerado, para avaliar o efeito do espaçamento.

Experimento	MOR (MPa)	LOP (MPa)	MOE (MPa)	EE (kJ/m²)
Ref. Env.	8,74 ± 0,97 ab	6,06 ± 0,69 a	8,57 ± 1,35 a	7,93 ± 0,62 a
Sem espaçamento Env.	7,55 ± 0,50 b	4,47 ± 0,34 b	6,68 ± 0,83 b	7,03 ± 0,37 b
Com espaçamento Env.	9,46 ± 0,94 a	6,27 ± 0,52 a	9,08 ± 1,60 a	8,57 ± 0,55 a

Legenda: Letras diferentes em uma mesma coluna representam diferença significativa no teste de Tukey.
Fonte: Do autor (2021).

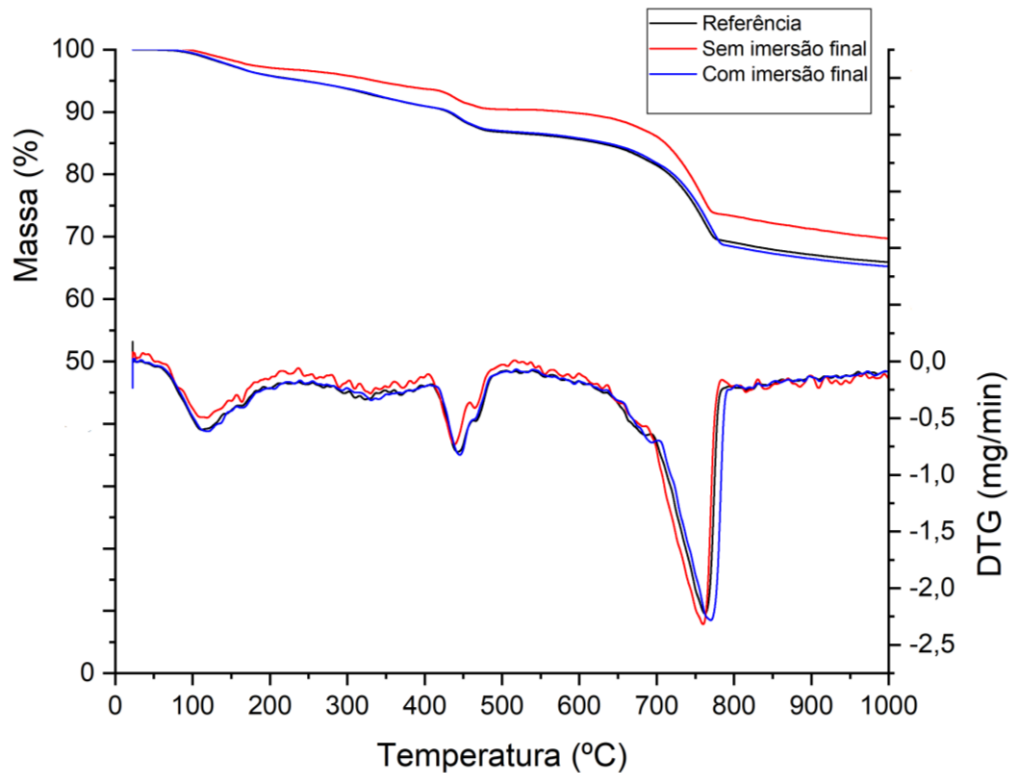
3.4 Efeito da hidratação por imersão final

Nas curvas TG/DTG da Figura 40, são mostrados os picos referentes ao processo de decomposição dos componentes do fibrocimento para telhas imersas e não imersas após o processo de carbonatação acelerada.

Na análise por termogravimetria sobre o efeito da imersão final após 48h de carbonatação, podemos observar que não houve diferenças significativas entre a imersão e não imersão na formação de carbonatos de cálcio e consumo de hidróxido de cálcio. Como já mencionado, observou-se também a perda de massa em temperaturas inferiores a 500 °C corresponde aos produtos de hidratação do cimento como C-S-H e C-H (YLMÉN; JAGLID, 2013). E os carbonatos adicionados como matéria prima e os formados pelo processo de carbonatação estão representados em faixas entre 510 e 1.000 °C, conforme descrito por Tonoli et al., (2019).

Os valores referentes ao cálculo de grau de carbonatação são apresentados na Tabela 20. Para as telhas que foram hidratadas após o processo de carbonatação foi possível obter um grau de carbonatação de 2,2%, próximo aos valores obtidos pelas telhas que não passaram por este processo (4,9%).

Figura 40- Curvas TG/DTG para as telhas de fibrocimento carbonatadas por 48 h com e sem imersão final.



Fonte: Do autor (2021).

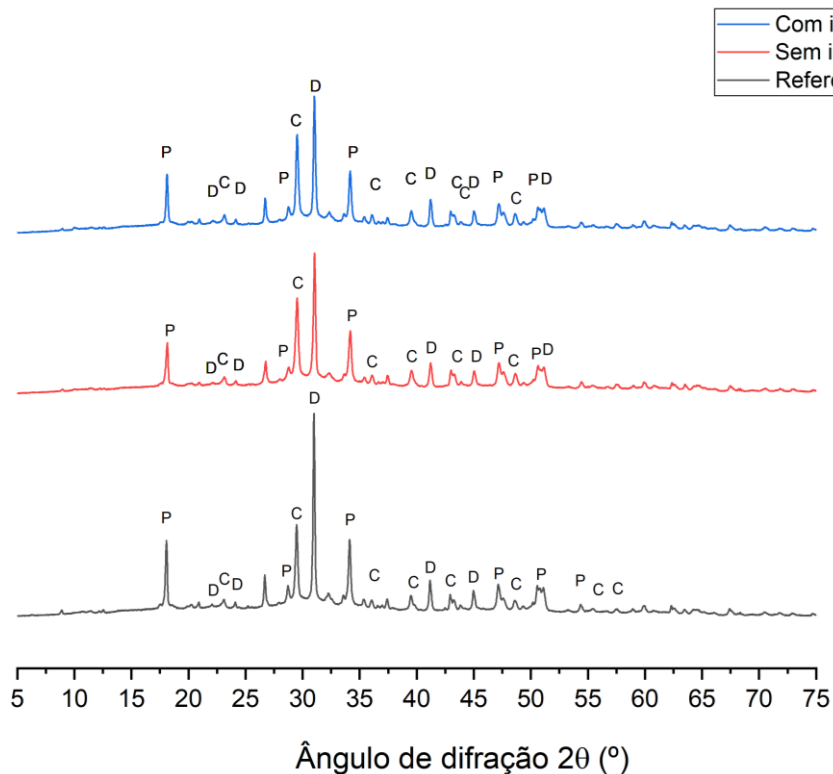
Tabela 20 - Grau de carbonatação (GC) calculados a partir do conteúdo de carbonatos formados nas telhas de fibrocimento.

Experimento	GC (%)
Referência	0
Sem Imersão Final	4,9
Com Imersão Final	2,2

Fonte: Do autor (2021).

Na Figura 41 é apresentado o DRX das telhas de fibrocimento para o entendimento da hidratação por imersão final. Estes difratogramas em conjunto com os valores obtidos de grau de carbonatação e a análise termogravimétrica, demonstram que a imersão final após 48h de carbonatação acelerada, não trouxe diferenças significativas em comparação com as telhas que não passaram por este processo. Tal comportamento pode ser explicado, devido à possível falta de produtos de hidratação já carbonatados após 48h.

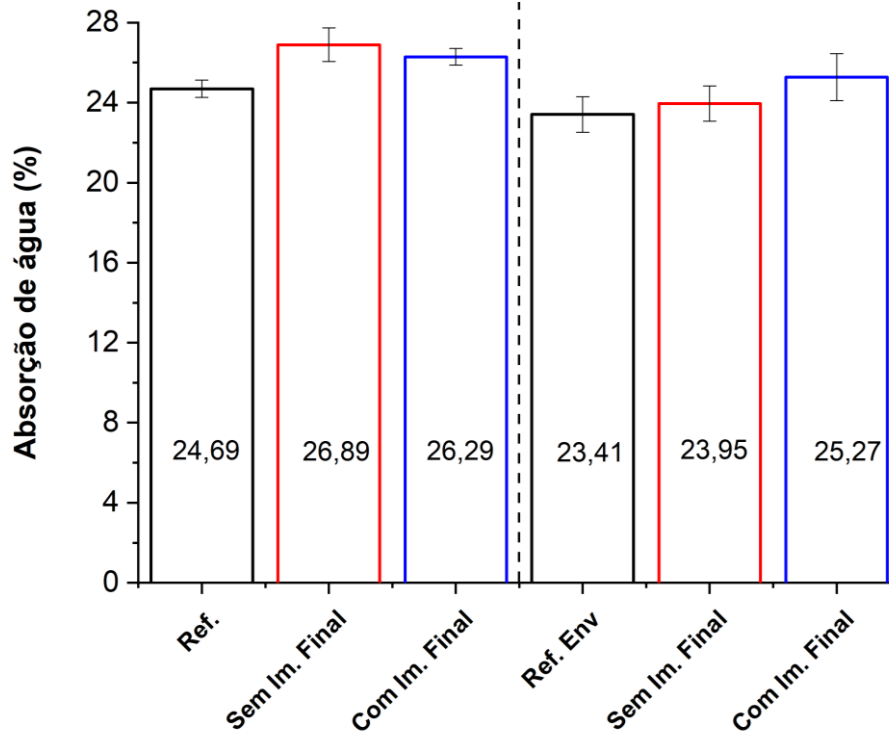
Figura 41– Difratoograma de raios X (DRX) das telhas de fibrocimento em função da hidratação por imersão final



Legenda: Portlandita (hidróxido de cálcio) - P, calcita (carbonato de cálcio) – C, e a dolomita – D
 Fonte: Do autor (2021).

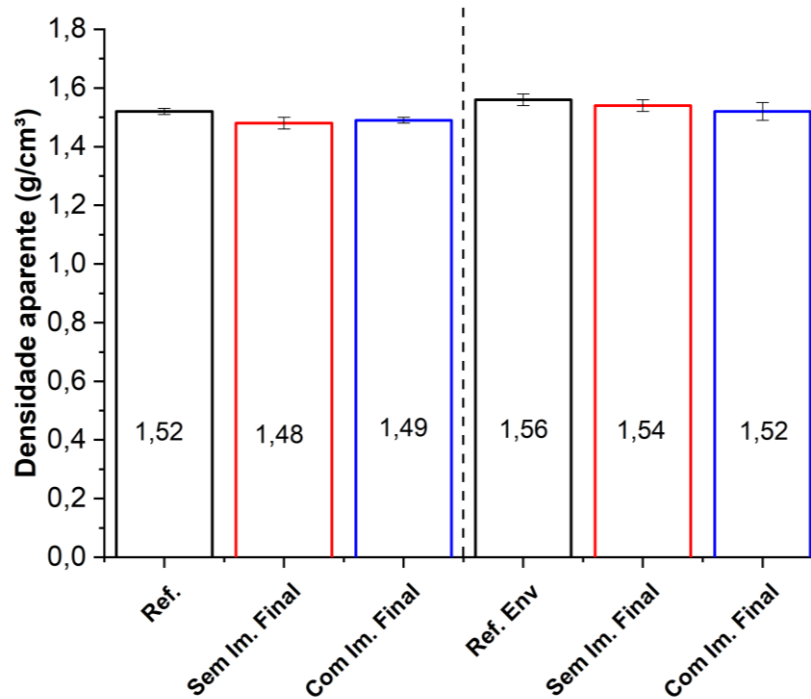
Os valores médios obtidos nos ensaios físicos das telhas de fibrocimento avaliando a imersão final para AA, DA e PA, são apresentados na Figura 42, Figura 43 e Figura 44. Para melhor compreensão dos resultados, a Tabela 21 e Tabela 22 trazem os valores médios obtidos e a análise estatística de Tukey, para avaliar a diferença significativa entre os tratamentos. Segundo Filomeno (2018), são esperados valores menores de porosidade aparente (PA) e absorção de água (AA) nos compósitos carbonatados. Como já mencionado, a formação de carbonatos de cálcio (CaCO_3) preenche os poros da matriz cimentícia, diminuindo a capacidade do compósito em absorver água. Essa formação de carbonatos de cálcio densifica a matriz, aumentando a densidade nos compósitos carbonatados. Essa tendência também é vista após os ciclos de envelhecimento acelerado, demonstrando possíveis reações químicas de hidratação do cimento (TONOLI et al., 2010b). Os valores dos ensaios físicos (TABELA 21) para a análise da imersão após o processo de carbonatação sugerem que a imersão final não foi eficaz para a obtenção de melhores propriedades físicas, pois não existem diferenças significativas entre eles (imersão e não imersão) antes do ensaio de envelhecimento acelerado.

Figura 42 – Valores de absorção de água para imersão final das telhas de fibrocimento.



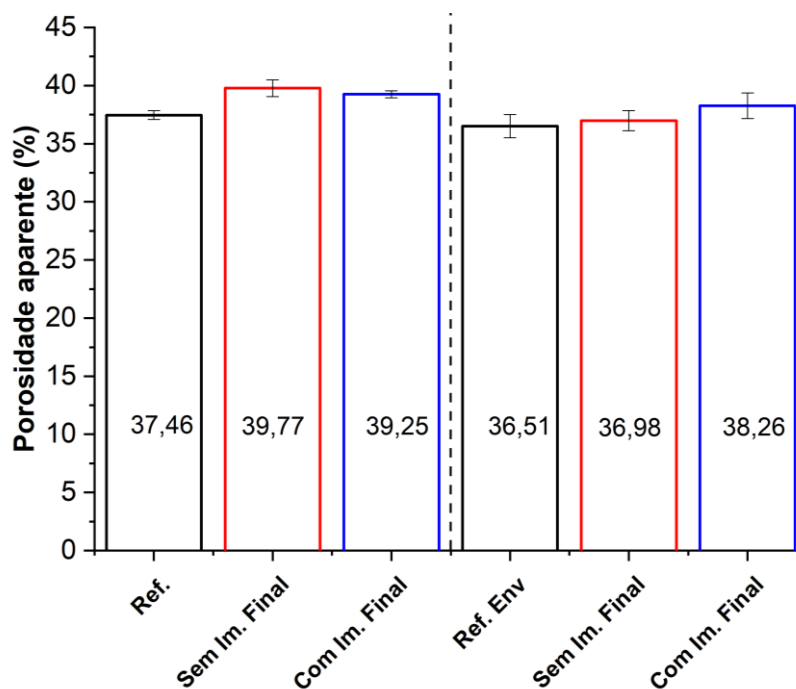
Legenda: REF – Telha referência não carbonatada, Im.- Imersão, ENV – Envelhecimento acelerado
 Fonte: Do autor (2021).

Figura 43– Valores de densidade aparente para imersão final das telhas de fibrocimento.



Legenda: REF – Telha referência não carbonatada, IM - Imersão, ENV – Envelhecimento acelerado
 Fonte: Do autor (2021).

Figura 44 – Valores de porosidade aparente para imersão final das telhas de fibrocimento.



Legenda: REF – Telha referência não carbonatada, IM. - Imersão, ENV. – Envelhecimento acelerado
 Fonte: Do autor (2021).

Tabela 21 – Valores de AA, DA e PA para avaliação da imersão final das telhas de fibrocimento.

Experimento	AA (%)	DA (g/cm ³)	PA (%)
Referência	24,69 ± 0,43 b	1,52 ± 0,01 a	37,46 ± 0,38 b
Sem imersão final	26,89 ± 0,84 a	1,48 ± 0,02 b	39,77 ± 0,72 a
Com imersão final	26,29 ± 0,42 a	1,49 ± 0,01 b	39,25 ± 0,30 a

Legenda: Letras diferentes em uma mesma coluna, representa diferença significativa no teste de Tukey.
 Fonte: Do autor (2021).

Tabela 22 – Valores de AA, DA e PA para avaliação da imersão final das telhas de fibrocimento após o ensaio de envelhecimento acelerado (Env.).

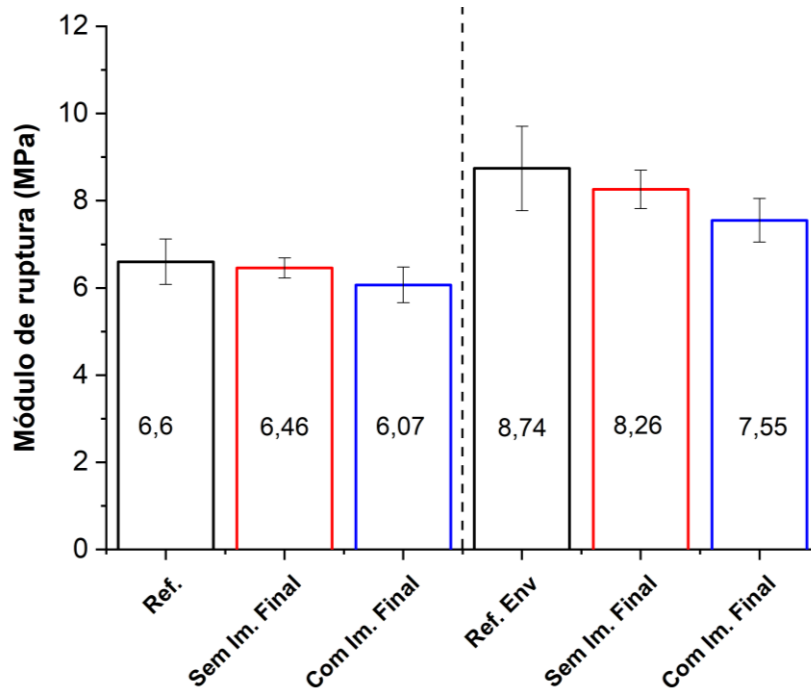
Experimento	AA (%)	DA (g/cm ³)	PA (%)
Referência Env.	23,41 ± 0,89 b	1,56 ± 0,02 a	36,51 ± 0,99 b
Sem imersão final Env.	23,95 ± 0,88 b	1,54 ± 0,02 a	36,98 ± 0,87 b
Com imersão final Env.	25,27 ± 1,17 a	1,52 ± 0,03 b	38,26 ± 1,10 a

Legenda: Letras diferentes em uma mesma coluna, representa diferença significativa no teste de Tukey.
 Fonte: Do autor (2021).

A imersão final pode contribuir de maneira a complementar as reações de carbonatação, porém é importante ressaltar que para a continuação da carbonatação, é necessário que aja concentrações de hidróxido de cálcio. Após 48h de carbonatação sugere-se que a concentração deste hidróxido já esteja consumida. Em carbonatações com tempos menores onde aja resquícios de hidróxido de cálcio a ser carbonatado, essa pós-imersão pode ser importante para que as reações continuem. Os resultados obtidos após o processo de envelhecimento acelerado demonstraram que apesar do término da carbonatação acelerada, há indícios da continuidade de possíveis reações de hidratação do cimento, comportamento parecido obtido em estudo realizado por Tonoli et al. (2010). Logo, os ciclos de imersão e secagem do processo de envelhecimento acelerado possibilitou uma nova precipitação dos produtos de hidratação do cimento, responsáveis por preenchimento dos poros, densificação do material e diminuição da absorção de água (FILOMENO, 2018).

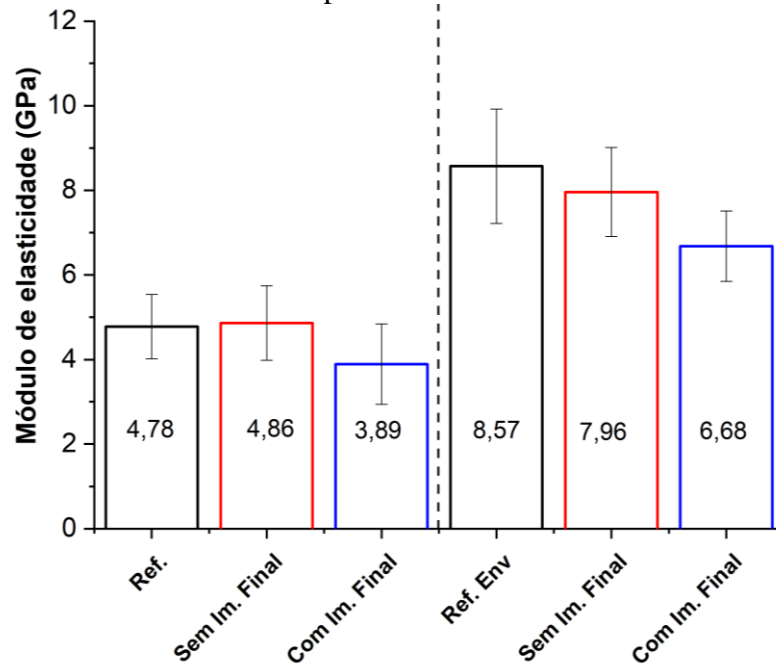
As Figuras 45, 46, 47 e 48 mostram os valores de módulo de ruptura (MOR), energia específica (EE), módulo de elasticidade (MOE), limite de proporcionalidade (LOP) e densidade aparente (DA) para o entendimento do efeito da imersão final nas propriedades mecânicas e seus resultados para ensaios de envelhecimento acelerado. Os resultados mecânicos corroboram com os resultados físicos (TABELA 21 e TABELA 22), DRX (FIGURA 41) e TG (FIGURA 40) onde foi possível notar que a imersão por 30 min em água alcalina ao final do processo de carbonatação não contribui de forma significativa para a obtenção de resultados melhores nas propriedades mecânicas. Como ressaltado neste trabalho, a imersão ao final do processo após 48 horas de carbonatação pode não ter influenciado devido à baixa concentração de hidróxido de cálcio já disponível no sistema. Entende-se que o processo de hidratação auxilia na carbonatação ao entrar em contato com o cimento anidro e formar produtos de hidratação que reagirão e formarão carbonato de cálcio, dessa forma, é possível admitir que o processo de pós hidratação seria benéfico em tempos menores onde haveria ainda concentrações de hidróxido de cálcio ou cimento anidro a ser hidratado. Na Tabela 23 e na Tabela 24 são apresentados os resultados dos ensaios mecânicos de módulo de ruptura, módulo de elasticidade, limite de proporcionalidade e energia específica, antes e após o processo de envelhecimento acelerado com análise estatística de variância (ANOVA) seguida do teste de Tukey para a verificação da diferença significativa entre os tratamentos proposto.

Figura 45– Valores de módulo de ruptura (MOR) para avaliação da imersão final das telhas de fibrocimento antes e após o ensaio de envelhecimento acelerado.



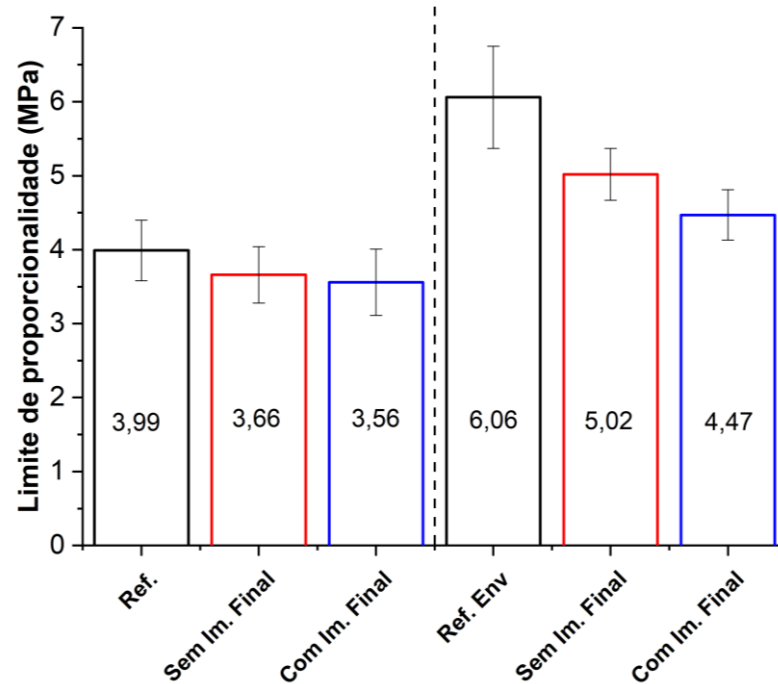
Legenda: REF – Telha referência não carbonatada, IM. - Imersão, ENV. – Envelhecimento acelerado
Fonte: Do autor (2021).

Figura 46 – Valores de módulo de elasticidade (MOE) para avaliação da imersão final das telhas de fibrocimento antes e após o ensaio de envelhecimento acelerado.



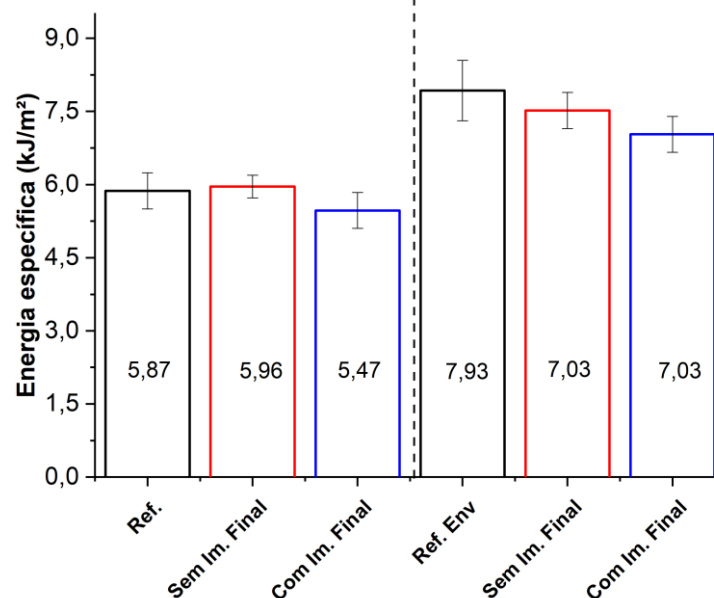
Legenda: REF – Telha referência não carbonatada, IM. - Imersão, ENV. – Envelhecimento acelerado
Fonte: Do autor (2021).

Figura 47– Valores de limite de proporcionalidade para avaliação da imersão final das telhas de fibrocimento antes e após o ensaio de envelhecimento acelerado.



Legenda: REF – Telha referência não carbonatada, IM. - Imersão, ENV. – Envelhecimento acelerado
 Fonte: Do autor (2021).

Figura 48– Valores de energia específica para avaliação da imersão final das telhas de fibrocimento antes e após o ensaio de envelhecimento acelerado.



Legenda: REF – Telha referência não carbonatada, IM. - Imersão, ENV. – Envelhecimento acelerado
 Fonte: Do autor (2021).

Tabela 23 – Valores de MOR, LOP, MOE e EE para avaliação da imersão final das telhas de fibrocimento.

Experimento	MOR (MPa)	LOP (MPa)	MOE (GPa)	EE (kJ/m²)
Referência	6,6 ± 0,52 a	3,99 ± 0,41 a	4,78 ± 0,76 a	5,87 ± 0,37 ab
Sem Imersão final	6,46 ± 0,23 ab	3,66 ± 0,38 a	4,86 ± 0,88 a	5,96 ± 0,23 a
Com imersão final	6,07 ± 0,41 b	3,56 ± 0,45 a	3,89 ± 0,95 a	5,47 ± 0,37 b

Legenda: Letras diferentes em uma mesma coluna representam diferença significativa no teste de Tukey.

Fonte: Do autor (2021).

Tabela 24 – Valores de MOR, LOP, MOE e EE para avaliação da imersão final das telhas de fibrocimento após o ensaio de envelhecimento acelerado.

Experimento	MOR (MPa)	LOP (MPa)	MOE (MPa)	EE (kJ/m²)
Ref. Env.	8,74 ± 0,97 a	6,06 ± 0,69 a	8,57 ± 1,35 a	7,93 ± 0,62 a
Sem imersão final Env.	8,26 ± 0,44 ab	5,02 ± 0,35 b	7,96 ± 1,05 ab	7,52 ± 0,37 ab
Com imersão final Env.	7,55 ± 0,50 b	4,47 ± 0,34 b	6,68 ± 0,83 b	7,03 ± 0,37 a

Legenda: Letras diferentes em uma mesma coluna representam diferença significativa no teste de Tukey.

Fonte: Do autor (2021).

4 CONCLUSÃO

A partir das avaliações realizadas com as telhas de fibrocimento no processo de carbonatação acelerada foi possível uma melhor compreensão deste processo e a obtenção de parâmetros para melhorar o desempenho final das telhas.

A duração do processo de carbonatação foi importante para a efetividade das reações de carbonatação. No ensaio de difração de raios X e termogravimetria, foi possível perceber que nos maiores tempos de exposição ao dióxido de carbono (24 e 48 h) havia picos menores de hidróxido de cálcio, sugerindo a diminuição do meio alcalino da matriz. Através deste maior tempo de exposição, foi possível obter um aumento no módulo de ruptura de 6,60 MPa para 8,45 MPa nas telhas carbonatadas por 48 h, um aumento de 28 %, além da diminuição da retração.

O espaçamento foi um parâmetro importante para a melhoria do processo de carbonatação, pois facilitou a circulação do dióxido de carbono pelo sistema. Com a efetividade da carbonatação, foi possível obter melhores resultados para os módulos de ruptura (aumento de 28%), energia específica e módulo de elasticidade, além de melhoria nas propriedades físicas, como preenchimento dos poros, diminuição da absorção de água e aumento da densidade.

A hidratação por imersão das telhas em água alcalina por 1,5 min antes do processo de carbonatação pode ter obstruído os poros vazios e atrapalhado a difusão de dióxido de carbono para o interior das telhas de fibrocimento, este fato pode ter explicado os melhores resultados nas telhas sem imersão inicial. A hidratação por imersão final avaliada neste trabalho após 48 h de carbonatação não demonstrou diferenças significativas no processo, sendo necessária a avaliação em tempos menores de carbonatação como 24 e 6 h onde atuaria de forma a complementar a carbonatação.

Através deste trabalho, foi possível concluir que a utilização de dióxido de carbono proveniente da combustão do gás natural pode ser uma maneira promissora de reduzir o custo do processo de carbonatação e dar uma nova aplicação para este gás, porém são necessários estudos para otimizar o processo. Os resultados obtidos nos ensaios de envelhecimento acelerado sugerem que a carbonatação acelerada pode melhorar a resistência dos fibrocimentos em idades iniciais, onde há esforço solicitante no manuseio e transporte.

5 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foram avaliados parâmetros para melhorar o processo de carbonatação acelerada, processo este demonstrado em trabalhos como de Almeida et al. (2013), Filomeno (2018), Fioroni et al. (2020), Tonoli et al. (2019), benéficos à utilização de fibras vegetais no fibrocimento, trazendo melhoria nas propriedades físicas e mecânicas. O trabalho contribui para o tema e abre espaço para maiores investigações como:

- Avaliar o efeito da imersão final em tempos menores de carbonatação.
- Avaliar a utilização de outras fontes e concentrações de dióxido de carbono para a utilização na carbonatação e compará-los com o sistema convencional onde são obtidos através de cilindros puros.

REFERÊNCIAS

- AGOPYAN, V. et al. Developments on vegetable fibre-cement based materials in São Paulo, Brazil: an overview. **Cement and Concrete Composites**, v. 27, n.5, p. 527-536, 2005.
- ALMEIDA, A. et al. Improved durability of vegetable fiber reinforced cement composite subject to accelerated carbonation at early age. **Cement and Concrete Composites**, v. 42, p.49-58, 2013.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 948-81**: test method for dry and wet bulk density, water absorption, and apparent porosity of thin sections of glass-fiber reinforced concrete. West Conshohocken, PA, USA, 1981
- CHEN, T.; BAI, M.; GAO, X. Carbonation curing of cement mortars incorporating carbonated fly ash for performance improvement and CO₂ sequestration. **Journal of CO₂ Utilization**, v.51, n., p., 2021.
- CHOI, J. -I. et al. Image-processing technique to detect carbonation regions of concrete sprayed with phenolphthalein solution. **Construction and Building Materials**, v.154, p. 451-461, 2017.
- DE SOUZA, R., H. **Estudo da retração em fibrocimento reforçado com fibra polimérica**. 244p. Tese (Doutor em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Paulo - SP, 2014
- EBRAHIMI, A. et al., Sustainable transformation of fly ash industrial waste into a construction cement blend via CO₂ carbonation. **Journal of Cleaner Production**, v. 156, n., p. 660-669, 2017.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, EN 494. Fibre-cement profiled sheets and fittings for roofing-Products specification and test methods. 1994.
- FARUK, O. et al. Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000-2010. **Progress in Polymer Science**, v. 37, n. 11, p. 1552–1596, 2012.
- FILOMENO, R. H. **Avaliação da influência da umidade relativa da atmosfera de cura na carbonatação de materiais de fibrocimento**. 100p. Dissertação (Mestre em Ciências) – Universidade de São Paulo, Pirassununga-SP, 2018.
- FIORONI, C. A. **Avaliação da influência de diferentes métodos de cura na permeabilidade e no desempenho físico-mecânico de telhas de fibrocimento reforçadas com fibras poliméricas**. 111p. Dissertação (Mestre em Ciências) – Universidade de São Paulo, Pirassununga-SP, 2019.
- FIORONI, C. A. et al. Cement-based corrugated sheets reinforced with polypropylene fibres subjected to a high-performance curing method. **Construction and Building Materials**, v. 262, p. 120791, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120791>>.
- HUNTZINGER, D. N. et al. Carbon dioxide sequestration in cement kiln dust through mineral carbonation, **Environmental Science Technology**, v.43, p.1986-1992, 2009.

HYVERT et al. Dependency of C-S-H carbonation rate on CO₂ pressure to explain transition from accelerated tests to natural carbonation. **Cement and Concrete Research**, v. 40, p. 1582 - 1589, 2010.

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, 2010.

INNOCENTINI, M. D. M. et al. Air permeability assessment of corrugated fiber-cement roofing sheets. **Cement and Concrete Composites**, v.97, p.259-267, 2019.

LESTI, M.; TIEMEYER, C.; PLANK, J. CO₂ stability of Portland cement based well cementing systems for use on carbon capture & storage (CCS) wells. **Cement and Concrete Research**, v.45, p. 45-54, 2013.

LI, N.; FARZADNIA, N.; SHI, C. Microstructural changes in alkali-activated slag mortars induced by accelerated carbonation. **Cement and Concrete Research**, v.100, p. 214-226, 2017.

LIU, Z; MENG, W. Fundamental understanding of carbonation curing and durability of carbonation-cured cement-based composites: A review. **Journal of CO₂ Utilization**, v.44, n., p., 2021. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2020.101428>>.

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

MORANDEAU; THIERRY, 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, 2014.

PAN, X. et al. Effects of CO₂ surface treatment on strength and permeability of one-day-aged cement mortar. **Construction and Building Materials**, v. 154, p. 1087-1095, 2017.

PIZZOL, V. D. **Carbonatação acelerada: Nova tecnologia de cura para fibrocimento sem amianto**. 60p. Dissertação (Mestre em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras-MG, 2013.

PIZZOL, V. D. et al. Effect of accelerated carbonation on the microstructure and physical properties of hybrid fiber-cement composites. **Minerals Engineering**, v. 54, p. 101-106, 2014a.

PIZZOL, V. D. et al. Mineralogical and microstructural changes promoted by accelerated carbonation and ageing cycles of hybrid fiber–cement composites. **Construction and Building Materials**, v. 68, p. 750-756, 2014b.

REUNION INTERNATIONALE DES LABORATOIRES D'ESSAIS ET DES RECHESCHES SUR LES MATERIAUX ET LES CONSTRUCTIONS (RILEM). RILEM 49trf: Testing methods for fibre reinforced cement-based composites. **Matériaux et Construction**, Paris, v.17, n.102, p.441-456. 1984.

ROSTAMI, V. et al. Microstructure of cement past subject to early carbonation curing. *Cement and Concrete Research*, v. 42, p. 186-193, 2012.

ROSTAMI, V.; SHAO, Y.; BOYD, A. J. Durability of concrete pipes subjected to combined steam and carbonation curing. *Construction and Building Materials*, v. 25, n. 8, p. 3345-3355, 2011.

SANTOS, S. F. et al. Supercritical carbonation treatment on extruded fibre-cement reinforced with vegetable fibres. *Cement and Concrete Composites*, v. 56, p. 84–94, 2015.

SCHIAVI, L. S de O. **Produção e avaliação de desempenho físico-mecânico de fibrocimento produzido com fibras de celulose tratadas a plasma**. 130p. Dissertação (Mestre em Engenharia de Biomateriais) – Universidade Federal de Lavras, Lavras-MG, 2019.

SNELLINGS, R. et al. RILEM TC-238 SCM recommendation on hydration stoppage by solvent exchange for the study of hydrate assemblages. *Materials and Structures*, v.51, n. 172, p. 1-4, 2018

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

TA, V. –L. et al. A new meta-model to calculate carbonation front depth within concrete structures. *Construction and Building Materials*, v. 129, p. 172-181, 2016.

THIERRY, M. et al. Investigation of the carbonation front shape on cementitious materials: effects of the chemical kinetics. *Cement and Concrete Research*, v.37, p. 1047-1058, 2007.

TONOLI, G. H. D. et al. Effects of natural weathering on microstructure and mineral composition of cementitious roofing tiles reinforced with fique fibre. *Cement and Concrete Composites*, v. 33, n. 2, p. 225–232, 2010.

TONOLI, G. H. D. et al. Effect of eucalyptus pulp refining on the performance and durability of fibre-cement composites. *Journal of Tropical Forest Science*, v. 25, n.1, p. 400-409, 2013.

TONOLI, G. H. D. et al. Rationalizing the impact of aging on fiber–matrix interface and stability of cement-based composites submitted to carbonation at early ages. *Journal of Materials Science*, v. 51, n. 17, p. 7929–7943, 2016.

TONOLI, G. H. D. et al. Influence of the initial moisture content on the carbonation degree and performance of fiber-cement composites. *Construction and Building Materials*, v. 215, n. Special Issue, p. 22–29, 2019.

URREA-CEFERRINO, G. E. et al. Definition of optimal parameters for supercritical carbonation treatment of vegetable fiber-cement composites at a very Early age. *Construction and Building Materials*, v. 152, p. 424-433, 2017.

WANG, D.; NOGUCHI, T.; NOZAKI, T. Increasing efficiency of carbon dioxide sequestration through high temperature carbonation of cement-based materials. **Journal of Cleaner Production**, v. 238, n., p.117980, 2021.

ZHAN, B. et al., Experimental study on CO₂ curing for enhancement of recycled aggregate properties. **Construction and Building Materials**, v. 67, p. 3-7, 2014.

ZHOU, X.; LI, Z. Light-weight wood-magnesium oxychloride cement composite building products made by extrusion. **Construction and Building Materials**, v. 27, n. 1, p. 382–389, 2012.

YLMÉN, R.; JÄGLID, U. Carbonation of Portland cement studied by diffuse reflection Fourier transform infrared spectroscopy. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v. 7, n. 2, p. 119–125, 2013.