

## EFEITO DA CARBONATAÇÃO ACELERADA EM PROPRIEDADES DE FIBROCIMENTOS SUSTENTÁVEIS

RUDICLER PEREIRA RAMOS<sup>1</sup>; RAFAEL DE AVILA DELUCIS<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Pelotas – [rudi.pereira@gmail.com](mailto:rudi.pereira@gmail.com)

<sup>2</sup>Universidade Federal de Pelotas – [rafael.delucis@ufpel.edu.br](mailto:rafael.delucis@ufpel.edu.br)

### 1. INTRODUÇÃO

Os compósitos de fibrocimento têm ampla aplicação na construção civil, especialmente em regiões em desenvolvimento, devido ao baixo custo (CORREIA et al., 2014). A incorporação de resíduos, como a lama de cal — subproduto rico em óxido de cálcio da indústria de papel e celulose —, contribui para reduzir custos e ampliar o apelo ambiental desses materiais. O reforço com fibras de polpa celulósica de madeira, embora promissor, apresenta limitações de durabilidade em função da degradação em meio alcalino (DA SILVEIRA, 2023), problema que tem sido abordado com o uso de pozolanas na matriz e/ou tratamentos químicos nas fibras (ARAMBURU et al., 2023). A carbonatação acelerada desponta como alternativa diferenciada, pois promove a reação do  $\text{CO}_2$  com o  $\text{Ca(OH)}_2$  da matriz cimentícia, formando  $\text{CaCO}_3$ , reduzindo a alcalinidade da matriz e protegendo as fibras vegetais. Nesse contexto, este estudo avalia a influência da carbonatação acelerada na durabilidade de fibrocimentos reforçados com fibras de polpa kraft de eucalipto não branqueada.

### 2. METODOLOGIA

O cimento utilizado neste estudo foi o Votoran Obras Especiais CPV ARI RS, cujas propriedades estão em conformidade com as normas brasileiras vigentes. A fibra celulósica utilizada correspondeu à polpa kraft de eucalipto não branqueada, gentilmente fornecida pela empresa CMPC Celulose Riograndense (Guaíba, Brasil). De acordo com as especificações do fabricante, essa polpa apresenta teor residual de lignina entre 1,5% e 3% em massa. A lama de cal também foi disponibilizada pela empresa CMPC. Esse subproduto industrial é proveniente da etapa de caustificação do processo de produção de celulose, na qual a cal é utilizada para facilitar a precipitação da lignina.

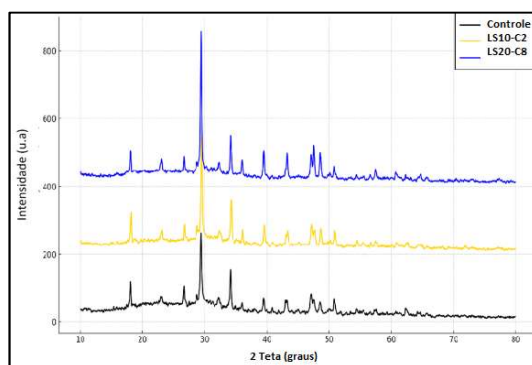
Inicialmente, as fibras de celulose foram imersas em água por cerca de 5 min para garantir a saturação completa. Paralelamente, o cimento e a lama de cal (quando presente) foram misturados manualmente para obter uma distribuição uniforme. As fibras hidratadas foram então combinadas com a mistura seca usando um misturador de argamassa planetário (eixo vertical), operando a 140 rpm por 3 minutos. Em seguida, foi realizada uma etapa adicional de mistura a 220 rpm por 2 minutos para garantir a homogeneidade da pasta. Conforme recomendado pela norma ASTM C305, a pasta composta fresca foi moldada em moldes prismáticos (40 mm × 40 mm × 160 mm) em duas camadas, com cada camada compactada em uma mesa vibratória para eliminar bolhas de ar. Os corpos de prova controle foram deixados em cura ao ar por 5 dias antes da desmoldagem. Após a desmoldagem, essas amostras foram submetidas à cura em autoclave sob pressão de 0,15 MPa por 8 horas.

A carbonatação acelerada seguiu um processo de múltiplas etapas projetado para melhorar o desempenho do material. Inicialmente, os compósitos foram

submetidos à cura inicial por 48 h em uma câmara úmida, para promover a hidratação precoce e o desenvolvimento de resistência, evitando a secagem prematura. Isso foi seguido pela cura térmica por 24 h em estufa mantida a 70 °C para acelerar a hidratação e promover a rápida formação de hidrato de silicato de cálcio (CSH) e hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ). Posteriormente, os compósitos foram submetidos à cura convencional por 7 dias. Uma etapa de secagem controlada foi então aplicada por 48 h para otimizar as condições para a carbonatação. A carbonatação acelerada foi realizada durante um período de 2 ou 8 horas, durante o qual os espécimes foram expostos a um ambiente rico em  $\text{CO}_2$  (3–20%  $\text{CO}_2$ ) a 20–60 °C com umidade controlada para promover a formação de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), melhorando o desempenho mecânico, seguindo adaptações do método proposto por (Tonoli et al., 2010). Finalmente, os compósitos passaram por um estágio de cura suplementar de 7 dias para suportar hidratação contínua, atividade pozolânica e potencial reidratação de fases parcialmente carbonatadas.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os padrões de DRX (Figura 1) evidenciam transformações mineralógicas relevantes decorrentes da carbonatação e da incorporação de lodo de cal. Não foram identificadas fases anômalas, o que confirma a natureza controlada das reações e a consistência dos resultados. Nas amostras de controle (0% de lodo de cal, não carbonatadas), destacaram-se picos de portlandita ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) a  $2\theta = 18,0^\circ$ , além de fases de cimento não reagidas. Com o aumento do tempo de carbonatação e a introdução do lodo de cal, observou-se redução progressiva da intensidade desses picos, acompanhada do surgimento e intensificação de picos de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), notadamente calcita a  $2\theta = 29,4^\circ$ . Esse efeito foi mais pronunciado no grupo LS20-C8 (20% de lodo de cal, 8 horas de carbonatação), em que a portlandita foi significativamente reduzida e a calcita apresentou maior intensidade e grau de cristalização. A análise quantitativa (Tabela 1) confirmou essa tendência, registrando aumento no teor de  $\text{CaCO}_3$  de 66,8% no controle para 74,0% no LS20-C8, evidenciando maior eficiência da carbonatação com maior teor de lodo de cal e maior tempo de exposição ao  $\text{CO}_2$ .



**Figura 1.** Padrões de DRX de fibrocimentos sujeito à carbonatação acelerada.

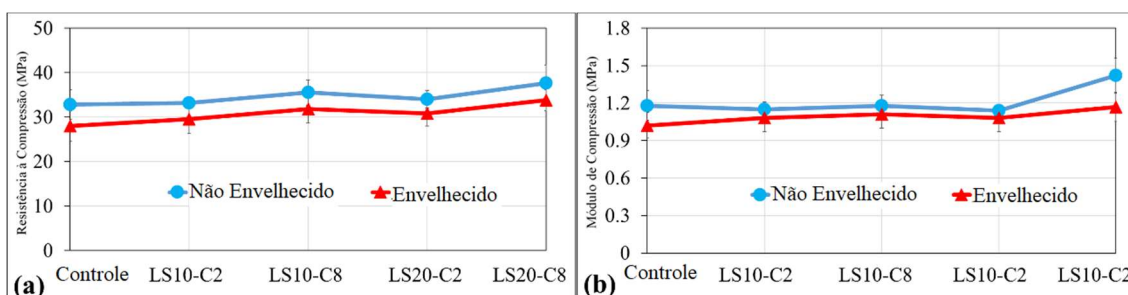
**Tabela 1.** Análise quantitativa das áreas dos picos de DRX para portlandita e calcita e eficiência de carbonatação correspondente (%  $\text{CaCO}_3$ ).

Amostra	Área de $\text{Ca(OH)}_2$	Área de $\text{CaCO}_3$	% $\text{CaCO}_3$
Controle	61,73	124,02	66,8%
LS10-C2	56,57	134,75	70,4%
LS20-C8	55,02	156,78	74,0%

A carbonatação corresponde à reação entre o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e o hidróxido de cálcio da matriz cimentícia, originando carbonato de cálcio e água ( $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ ). No processo acelerado, essa reação é intensificada, e a presença de lodo de cal, rico em cálcio, fornece íons adicionais que favorecem a formação de  $\text{CaCO}_3$ . Esse mecanismo consome a portlandita, reduz o pH da matriz, diminui a agressividade às fibras celulósicas e contribui para o preenchimento dos poros, aumentando a densidade e reduzindo a porosidade. A maior cristalinidade da calcita, observada em teores mais elevados de lodo de cal e tempos prolongados de carbonatação, indica uma reação mais eficiente, resultando em microestrutura estável e resistente. Esses resultados de XRD estão em consonância com a literatura, que aponta a transformação da portlandita em calcita e aragonita, acompanhada do refinamento da porosidade e da melhoria das propriedades mecânicas (LEÓN-MARTÍNEZ et al., 2021). Assim, a maior disponibilidade de cálcio favorece uma carbonatação mais extensa, em acordo com os princípios de equilíbrio químico e disponibilidade de reagentes.

Na Figura 2a, nota-se que a resistência à compressão aumentou com a incorporação de lama de cal e carbonatação. O controle apresentou 32,8 MPa, enquanto a formulação LS20-C8 atingiu 37,6 MPa (+14,6%), evidenciando o efeito positivo da maior taxa de carbonatação. Mesmo com 10% de lama de cal, observaram-se ganhos de até 8,23%. Após o envelhecimento, todos os grupos sofreram redução, porém o LS20-C8 manteve a maior resistência (33,8 MPa) e a menor perda relativa (10,1%), indicando maior estabilidade e durabilidade da matriz carbonatada.

Na Figura 2b, o módulo de compressão apresentou comportamento semelhante à resistência. O controle registrou 1,18 MPa, enquanto o grupo LS20-C8 obteve 1,42 MPa (+20,34%). Os grupos LS10-C2 e LS10-C8 também tiveram ganhos de 5,88% e 8,82%, respectivamente. Após o envelhecimento, todos os grupos reduziram valores, com o controle caindo 13,56%. Já o LS20-C8 envelhecido manteve o melhor desempenho (1,27 MPa) e menor perda (10,56%), evidenciando maior estabilidade frente aos ciclos de umedecimento e secagem.



**Figura 2.** Resistência à compressão (a) e módulo (b) de compósitos de fibrocimento com e sem envelhecimento.

#### 4. CONCLUSÕES

Este estudo avaliou o impacto da incorporação de lodo de cal e da aplicação de carbonatação acelerada em compósitos de fibrocimento, com o objetivo de aprimorar o desempenho mecânico, a durabilidade e a integridade microestrutural, ao mesmo tempo em que promove a valorização de subprodutos industriais. Os resultados indicaram que a combinação entre lodo de cal e carbonatação favoreceu a conversão da portlandita em carbonato de cálcio cristalizado, alcançando até

74,0% de  $\text{CaCO}_3$  no grupo LS20-C8. Essa transformação mineralógica esteve diretamente associada a melhorias mecânicas significativas, com destaque para o aumento de 14,6% na resistência à compressão (37,6 MPa no LS20-C8 em comparação a 32,8 MPa no controle) e de 20,3% no módulo de compressão (1,42 GPa frente a 1,18 GPa).

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAMBURU, A. B. *et al.* Cement matrix reinforced with microfibrillated cellulose treated with furfuryl alcohol. **Cellulose**, [s. l.], 2023. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/s10570-023-05511-2>.
- CORREIA, V. D. C. *et al.* Potential of bamboo organosolv pulp as a reinforcing element in fiber-cement materials. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 72, p. 65–71, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.005>.
- DA SILVEIRA, T. A. **Fibrocimentos híbridos reforçados com sisal quimicamente tratado e nanoargila**. 2023. 95 f. - Universidade Federal de Pelotas, [s. l.], 2023.
- León-Martínez, FM; Cano-Barrita, PF d. J.; Castellanos, F.; Luna-Vicente, KB; Ramírez-Arellanes, S.; Gómez-Yáñez, C. Carbonatação de argamassas de cal com alto teor de cálcio contendo mucilagem de cacto como aditivo: uma abordagem espectroscópica. **J. Mater. Ciência**. **2021**, 56, 3778–3789, doi:10.1007/s10853-020-05514-5.
- Tonoli, G.H.D.; Santos, S.F.; Joaquim, A.P.; Savastano, H. Effect of Accelerated Carbonation on Cementitious Roofing Tiles Reinforced with Lignocellulosic Fibre. **Constr. Build. Mater.** **2010**, 24, 193–201, doi:10.1016/j.conbuildmat.2007.11.018.