

INFLUÊNCIA DO MÉTODO DE CURA SOBRE PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS FIBROCIMENTOS

FRANCIELLE MÜLLER LIMA¹; MIRIAN DOSOLINA FUSINATO²; RAFAELA DOS PASSOS NORNBORG³ CAMILA OTTONELLI CALGARO⁴ RAFAEL DE ÁVILA DELUCIS⁵

¹Universidade Federal de Pelotas – franciellemullerlima@gmail.com

²Universidade Federal de Pelotas – mirfusinato@gmail.com

³Universidade Federal de Pelotas – rafa.pn2003@hotmail.com

⁴Instituto Federal Sul Rio-Grandense - camilacalgaro@ifsul.edu.br

⁵Universidade Federal de Pelotas – rafael.delucis@ufpel.edu.br

1. INTRODUÇÃO

O processo de cura em fibrocimentos é crucial para melhorar as características da interface fibra-matriz, além do desempenho físico-mecânico e durabilidade do material (KUNCHARIYAKUN; SINYOUNG; KAJITVICHYANUKUL, 2022). Essa etapa da produção de materiais cimentícios afeta diretamente a hidratação do cimento, a formação da matriz e a ligação entre os componentes (FILOMENO et al., 2023).

Dentre os métodos de cura de fibrocimentos, a cura úmida consiste em manter os corpos de prova sob aquecimento em ambiente úmido. A elevada disponibilidade de água minimiza a retração plástica e a fissuração precoce, garantindo maior densificação da matriz e melhor aderência entre a fase cimentícia e as fibras (GAMAGE et al., 2024). Já a cura ao ar, a mais simples, ocorre em ambiente natural, sem controle de temperatura ou umidade. Essa limitação pode provocar evaporação prematura da água, o que compromete a continuidade das reações de hidratação do cimento (ZHANG et al., 2020). Como consequência, parte do clínquer pode permanecer não reagido, e a matriz tende a apresentar maior porosidade e microfissuração. Por último, é possível submeter os fibrocimentos a atmosferas pressurizadas mediante aquecimento, o que reduz o processo de cura de dias para apenas algumas horas. Nessas condições, o hidróxido de cálcio formado inicialmente reage com sílica amorfa presente nos aditivos ou nas fibras minerais, favorecendo a formação de fases cristalinas estáveis como a tobermorita e, em alguns casos, a xonotlita (WEI et al., 2022). Este trabalho tem como objetivo comparar propriedades mecânicas de fibrocimentos curados de acordo com diferentes condições.

2. METODOLOGIA

Para a produção dos fibrocimentos, foi utilizado o cimento CPV-ARI da marca Votorantin e um aditivo superplastificante Liga Flow 46, adicionado na proporção de 0,2% em relação à massa de cimento. Em relação à massa total de matriz, foi adicionado um percentual de 2% de fibras de celulose de eucalipto branqueadas, doadas pela Celulose Riograndense (CMPC) de Guaíba/RS. Também, em relação à massa de cimento, foi adicionado um percentual de 10% de sílica derivada da queima da casca de arroz, a qual foi fornecida pela Pilecco Nobre de Alegrete/RS. Mais informações sobre esses materiais podem ser consultadas em um trabalho recente do grupo (INSAURRIAGA et al., 2024a).

Os fibrocimentos foram confeccionados conforme procedimento descrito por Insaurriaga et al. (2024). Foi realizada a mistura prévia manual dos materiais e, em

seguida, uma homogeneização em uma argamassadeira de eixo vertical e movimento planetário com a rotação de 140 rpm por 40 s e mais 220 rpm por mais 60 s. Com a pasta em estado fresco, foi realizado o ensaio de consistência, conforme norma NBR 13276 (ABNT, 2016). Após 30 golpes da mesa ao longo de 30 segundos, foram tomadas três medidas de diâmetro do espalhamento da pasta usando um paquímetro e então foi determinada uma relação de água/cimento de 0,31. Para determinar as propriedades mecânicas da pasta endurecida, foram moldados corpos de prova prismáticos com dimensões de $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$, que foram desmoldados após cura ao ar por 24 h. Foram preparados seis corpos de prova para cada condição de cura. Uma cura úmida por 28 dias foi realizada em uma sala, cujas paredes internas eram revestidas por cerâmica esmaltada impermeável. O sistema de umidificação era realizado por gêisers artificiais, que mantinham o ar saturado de vapor. Sensores higrotérmicos controlavam os ciclos de acionamento dos gêisers, garantindo umidade relativa $\geq 95\%$ e temperatura em torno de $23 \pm 2^\circ\text{C}$. A cura ao ar por 28 dias foi realizada sob condições atmosféricas convencionais, em local seco e fechado. Por último, o procedimento de cura sob pressurização foi realizado sob duas diferentes condições: $1,2 \text{ kgf/cm}^2$ por 8 h (menor pressão e maior tempo) e $1,5 \text{ kgf/cm}^2$ por 4h (maior pressão e menor tempo). Após os processos de cura, o desempenho mecânico dos fibrocimentos foi avaliado através de ensaios de compressão e flexão em três pontos usando uma máquina universal de ensaios mecânicos modelo Emic DL30000, conforme a norma ASTM C348. Os resultados obtidos foram analisados estatisticamente por análise de variância ANOVA fator único e por teste de comparação múltiplas de Tukey.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos em flexão podem ser observados na Figura 1. A análise estatística apontou que a cura ao ar é 33,8 % superior à câmara úmida, enquanto as duas condições de cura pressurizada tiveram uma diferença de 4,8%, consideradas pelo teste Tukey iguais entre si, além de superiores às demais condições. Este resultado indica que a variação de pressão e tempo não gera ganhos adicionais relevantes, neste sentido trabalhar com pressões mais altas se torna mais vantajoso, pois o tempo de processo é reduzido pela metade.

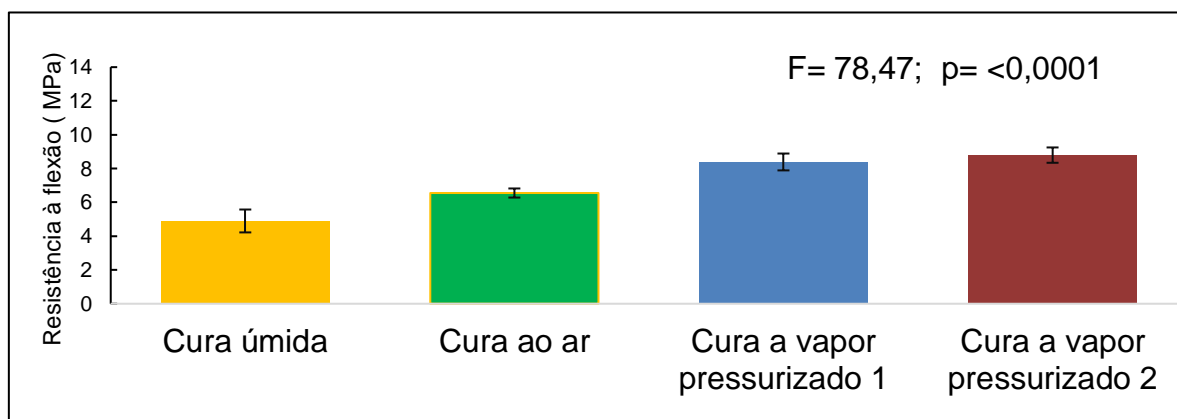


Figura 1 – Resistência à flexão dos fibrocimentos sujeitos a diferentes condições de cura.

Esse comportamento pode ser explicado pelo efeito da pressão e do vapor saturado no processo de hidratação do cimento. Enquanto na câmara úmida a hidratação se limita à difusão de água em ambiente de elevada umidade, na autoclave ocorre a formação acelerada de fases cristalinas como a tobermorita, que conferem maior rigidez e estabilidade microestrutural à matriz. A superioridade da cura pressurizada frente às demais condições corrobora resultados de outros estudos sobre fibrocimento autoclavado, nos quais se verificou aumento expressivo da resistência mecânica devido à cristalização de silicatos de cálcio estáveis (INSAURRIAGA et al., 2024a). A ligeira superioridade da cura ao ar sobre a câmara úmida também já foi observada em pesquisas que apontam que a perda parcial de água, em certos casos, pode favorecer um melhor empacotamento microestrutural e reduzir a formação de poros capilares excessivos (ZHAO et al., 2019).

Em relação a resistência à compressão (Figura 2), não houve diferenças estatísticas entre as condições de cura. Esse comportamento está em consonância com trabalhos prévios que relataram ganhos mais expressivos em flexão do que em compressão quando se utilizam condições de cura pressurizada em compósitos cimentícios reforçados com fibras (HUANG et al., 2019; SILVA et al., 2020). Como as condições de cura influenciam fortemente a formação de fases cristalinas e o controle da porosidade fina, mas não alteram substancialmente o volume total da matriz endurecida, o efeito se reflete, portanto, mais nas propriedades de flexão do que na resistência à compressão (LIN et al., 2024).

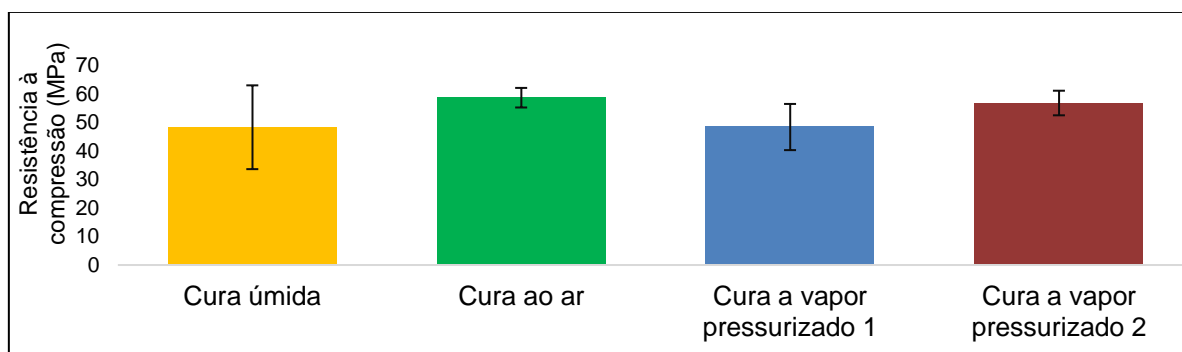


Figura 2 – Resistência à compressão dos fibrocimentos sujeitos a diferentes condições de cura.

4. CONCLUSÕES

O estudo avaliou o efeito de diferentes métodos de cura na resistência de fibrocimentos. A resistência à flexão foi fortemente influenciada: a cura ao ar superou a cura úmida em cerca de 33,8%, enquanto as curas pressurizadas apresentaram ganhos de 28,0 – 34,2% em relação à cura ao ar, sem diferenças entre si. Já a resistência à compressão não variou significativamente entre os grupos. Conclui-se que a cura pressurizada é a estratégia mais eficiente, proporcionando maiores propriedades mecânicas em menor tempo de processo. Como continuidade deste trabalho, recomenda-se investigar o efeito de diferentes ciclos de pressão e temperatura em autoclave, explorando variações intermediárias que possam otimizar ainda mais o tempo de cura.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- FILOMENO, R. H.; FIORONI, C. A.; AZEVEDO, A. G. S.; SAVASTANO, H. Influence of different curing regimes and accelerated carbonation on the physical, mechanical, and aging performances of fiber cement. **Journal of Building Engineering**, [S. l.], v. 78, 2023. DOI: 10.1016/j.job.2023.107791.
- GAMAGE, Nayanatara; PATRISIA, Yulin; GUNASEKARA, Chamila; LAW, David W.; HOUSHYAR, Shadi; SETUNGE, Sujeewa. Shrinkage induced crack control of concrete integrating synthetic textile and natural cellulosic fibres: Comparative review analysis. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 427, p. 136275, 2024. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.136275.
- INSAURRIAGA, Gabriel L.; GOMES, Cristian C.; RIBEIRO, Felipe V.; CALEGARO, Gustavo L.; SILVEIRA, Thamires A.; CRUZ, Lóren F.; CRUZ, Joziel A.; AMICO, Sandro C.; DELUCIS, Rafael A. Effect of Hybridization of Carbon Fibers on Mechanical Properties of Cellulose Fiber–Cement Composites: A Response Surface Methodology Study. **C**, [S. l.], v. 10, n. 2, p. 41, 2024. a. DOI: 10.3390/c10020041.
- INSAURRIAGA, Gabriel L.; GOMES, Cristian C.; RIBEIRO, Felipe V.; CALEGARO, Gustavo L.; SILVEIRA, Thamires A.; CRUZ, Lóren F.; CRUZ, Joziel A.; AMICO, Sandro C.; DELUCIS, Rafael A. Effect of Hybridization of Carbon Fibers on Mechanical Properties of Cellulose Fiber–Cement Composites: A Response Surface Methodology Study. **C-Journal of Carbon Research**, [S. l.], v. 10, n. 2, 2024. b. DOI: 10.3390/c10020041.
- KUNCHARIYAKUN, Kittipong; SINYOUNG, Suthatip; KAJITVICHYANUKUL, Puangrat. Comparative microstructures and mechanical properties of mortar incorporating wood fiber waste from various curing conditions. **Case Studies in Construction Materials**, [S. l.], v. 16, 2022. DOI: 10.1016/j.cscm.2021.e00855.
- LIN, Zhiwei; ZHANG, Liwen; ZHENG, Wenzhi; HUANG, Xiangyun; ZHANG, Junping. Study on the Compressive and Flexural Properties of Coconut Fiber Magnesium Phosphate Cement Curing at Different Low Temperatures. **Materials**, [S. l.], v. 17, n. 2, p. 444, 2024. DOI: 10.3390/ma17020444.
- WEI, Tingcong; WEI, Fengqi; ZHOU, Jinghong; WU, Zhiqiang; ZHANG, Chunmei; ZHUANG, Jia; CHENG, Xiaowei. Formation and strengthening mechanisms of xonotlite in C3S-silica and C2S-silica powder systems under high temperature and pressure. **Cement and Concrete Research**, [S. l.], v. 157, p. 106812, 2022. DOI: 10.1016/j.cemconres.2022.106812.
- ZHANG, Ai; YANG, Wencui; GE, Yong; LIU, Penghuan. Effect of nanomaterials on the mechanical properties and microstructure of cement mortar under low air pressure curing. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 249, p. 118787, 2020. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118787.
- ZHAO, Haitao; DING, Jian; HUANG, Yuyu; TANG, Yimin; XU, Wen; HUANG, Donghui. Experimental analysis on the relationship between pore structure and capillary water absorption characteristics of cement-based materials. **Structural Concrete**, [S. l.], v. 20, n. 5, p. 1750–1762, 2019. DOI: 10.1002/suco.201900184.