

## PROPRIEDADES MECÂNICAS E DURABILIDADE DE FIBROCIMENTOS HÍBRIDOS REFORÇADOS COM SISAL QUIMICAMENTE TRATADO E NANOARGILA

THAMIRES ALVES DA SILVEIRA<sup>1</sup>; ARTHUR BEHENCK ARAMBURU<sup>2</sup>; FELIPE VAHL RIBEIRO<sup>3</sup>, RAFAEL AVILA DELUCIS<sup>4</sup>

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

<sup>2</sup>Universidade Federal do Rio Grande do sul – [arthuraramburu@gmail.com](mailto:arthuraramburu@gmail.com)

<sup>3</sup>Universidade Federal de Pelotas – [felipe.vs.ribeiro@gmail.com](mailto:felipe.vs.ribeiro@gmail.com)

<sup>4</sup>Universidade Federal de Pelotas – [rafael.delucis@ufpel.edu.br](mailto:rafael.delucis@ufpel.edu.br)

### 1. INTRODUÇÃO

As fibras vegetais têm se destacado como um material economicamente e ambientalmente atraente para o reforço de compósitos, como os fibrocimentos. A literatura destaca melhorias em várias propriedades mecânicas de fibrocimentos devido à adição de fibras vegetais, como resistência à flexão e compressão, ductilidade e tenacidade (ARDANUY; CLARAMUNT; TOLEDO FILHO, 2015). No entanto, desafios como retardamento do tempo de pega, perda de trabalhabilidade e degradação das fibras devido à alta alcalinidade ( $\text{pH} > 12$ ) da matriz cimentícia limitam a qualidade desses compósitos (CLARAMUNT et al., 2011). Para evitar essa degradação das fibras, materiais pozolânicos têm sido utilizados para reduzir a alcalinidade do meio cimentício (AKHAVAN; CATCHMARK; RAJABIPOUR, 2017). Existem ainda tratamentos químicos, que podem ser adotados para selar parcialmente a fibra, protegendo-as de reações com íons alcalinos do cimento, como o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (ARAMBURU et al., 2023), embora a maioria dos casos observados na literatura envolvam substâncias tóxicas e não renováveis. Contudo, utilizar um tratamento químico das fibras de maneira sinérgica à adição de uma pozolana é algo pouco explorado na literatura. Outra lacuna recentemente relatava na literatura é o desempenho desses materiais a longo prazo. Neste estudo, busca-se apresentar um comparativo da durabilidade de fibrocimentos reforçados com fibras de sisal quimicamente tratadas por furfuração e usando nanoargila como pozolana.

### 2. METODOLOGIA

Os corpos de prova foram moldados com cimento CPV-ARI (marca Cauê), fibras de sisal (*Agave sisalana*) com 2 cm de comprimento, calcário agrícola (marca Fida) e nanoargila (bentonita hidrofílica da marca Sigma Aldrich). Os fibrocimentos foram dosados com 77,2 m% de cimento e 12,8 m% de calcário agrícola, seguindo a formulação de Tonoli *et al.*, (2009). O teor de fibras utilizado foi de 2 m%, seguindo (ARDANUY; CLARAMUNT; TOLEDO FILHO, 2015). Percentuais de nanorgila de 1% e 5% em relação à massa de cimento foram testados. O álcool furfúrico (AF), utilizado como tratamento das fibras, foi adicionado a 50% em relação à massa de fibras. O anidrido maleico (AM) foi usado para promover a polimerização do AF sendo adicionada uma quantidade de 5% em relação à massa de AF. Uma relação água/cimento de 0,4 foi mantida constante para todos fibrocimentos, a qual foi determinada através do ensaio de água de consistência de pasta padrão, descrito na norma ASTM C187-16 (2016) e no trabalho de (ARAMBURU et al., 2023).

No processo de moldagem dos corpos de prova, foi feita uma mistura manual prévia dos materiais. Nos traços com utilização de AF, os materiais foram misturados com a água e as fibras e, posteriormente, com a pasta de cimento. Todos os materiais passaram por homogeneização em uma argamassadeira de eixo vertical e movimento planetário com a rotação de 140 rpm por 3 min e mais 220 rpm por mais 1 min. Os espécimes foram moldados usando moldes prismáticos de 40 x 40 x 160 mm. O material foi dividido em duas camadas e compactados sobre uma mesa vibratória. Após a moldagem, os espécimes foram deixados em processo de secagem ao ar, em temperatura ambiente, por 5 dias. Tais amostras foram pós-curadas em a 1,5 kgf/cm<sup>2</sup> por 8 h (autoclave AV-18 Phoenix AV), conforme procedimento descrito por (KUNCHARIYAKUN; SINYOUNG; KAJITVICHYANUKUL, 2022).

Para simular o processo de envelhecimento natural dos compósitos, foram realizados ciclos de molhagem e secagem. Cada ciclo teve duração de 48 horas, incluindo uma secagem em estufa a 65 °C por 24 horas, seguida de imersão em água a temperatura ambiente por 24 horas. Os ciclos de umedecimento e secagem começaram aos 28 dias de idade das pastas, totalizando 118 dias de idade após 45 ciclos. O desempenho mecânico dos fibrocimentos foi avaliado através de ensaios de compressão e flexão, conforme a norma ASTM C348-21 (2021). Os ensaios foram realizados em uma máquina de ensaio universal (EMIC DL 30000).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados apresentados nas curvas tensão vs. deformação dos ensaios de flexão, apresentados nas Figuras 1a e 1b, demonstram que, após o tratamento, os compósitos exibem um pico de resistência seguido por uma ruptura, caracterizando uma redução das zonas plásticas e uma ruptura de caráter frágil. O gráfico de flexão também revela uma diminuição nos valores de deformação ao longo do eixo x, que representa a deformação dos espécimes, indicando que eles sofreram menores deformações. Em relação as curvas obtidas no ensaio de compressão (Figuras 1c e 1d), antes e após os ciclos, são análogas às encontradas na literatura (ARAMBURU et al., 2023), mostrando um comportamento esperado, que incluiu uma região elástica inicial, um ponto de pico de tensão, uma região de estricção e, finalmente, uma ruptura.

Quanto à resistência à flexão, a adição de 5% de nanoargila no grupo NC5FA50 promoveu um aumento significativo, com uma média 15,70% superior à do grupo controle. Esse aumento na resistência é atribuído, segundo a literatura, à redução da porosidade capilar devido ao preenchimento mais eficiente dos poros do cimento pelos produtos de hidratação (KALPOKAITĖ-DIČKUVIENĖ et al., 2021). Além disso, os grupos com 1% de nanoargila, NC1 e NC1AF50, também apresentaram resistência à flexão média superior em 19,24% e 10,34%, respectivamente, em comparação ao grupo controle. Isso sugere que o efeito combinado do tratamento químico das fibras vegetais e da adição de nanoargila foi determinante. Nesse caso, parece que as fibras tratadas se mostraram mais compatíveis quimicamente com a matriz cimentícia, facilitando a adesão à matriz melhorada pela nanoargila, que aumentou a coesão ao preencher os poros capilares.

Após os ciclos de molhagem e secagem, observou-se um aumento (e eventualmente estabilização) nas resistências a flexão e compressão dos compósitos (Figuras 1e e 1f), inclusive no controle, o que pode ser atribuído ao seguimento do processo de cura do cimento. Esses ganhos foram maiores em

compressão do que em flexão, como era de se esperar, pois o cimento atua principalmente em esforços compressivos atuantes nesses compósitos. Esses resultados indicam que os compósitos moldados para o presente estudo são altamente duráveis, uma vez que um número de ciclos tido como suficiente para a deterioração de fibrocimentos em outros estudos, não ocasionou danos aos compósitos aqui estudados. Ainda quanto a esses resultados referentes à durabilidade, não houve qualquer influência perceptível que possa ser atribuída ao procedimento combinado de adição de AF e nanoargila. Estudos anteriores, como o de Filho *et al.* (2003), também identificaram melhorias significativas nos compósitos após esses ciclos.

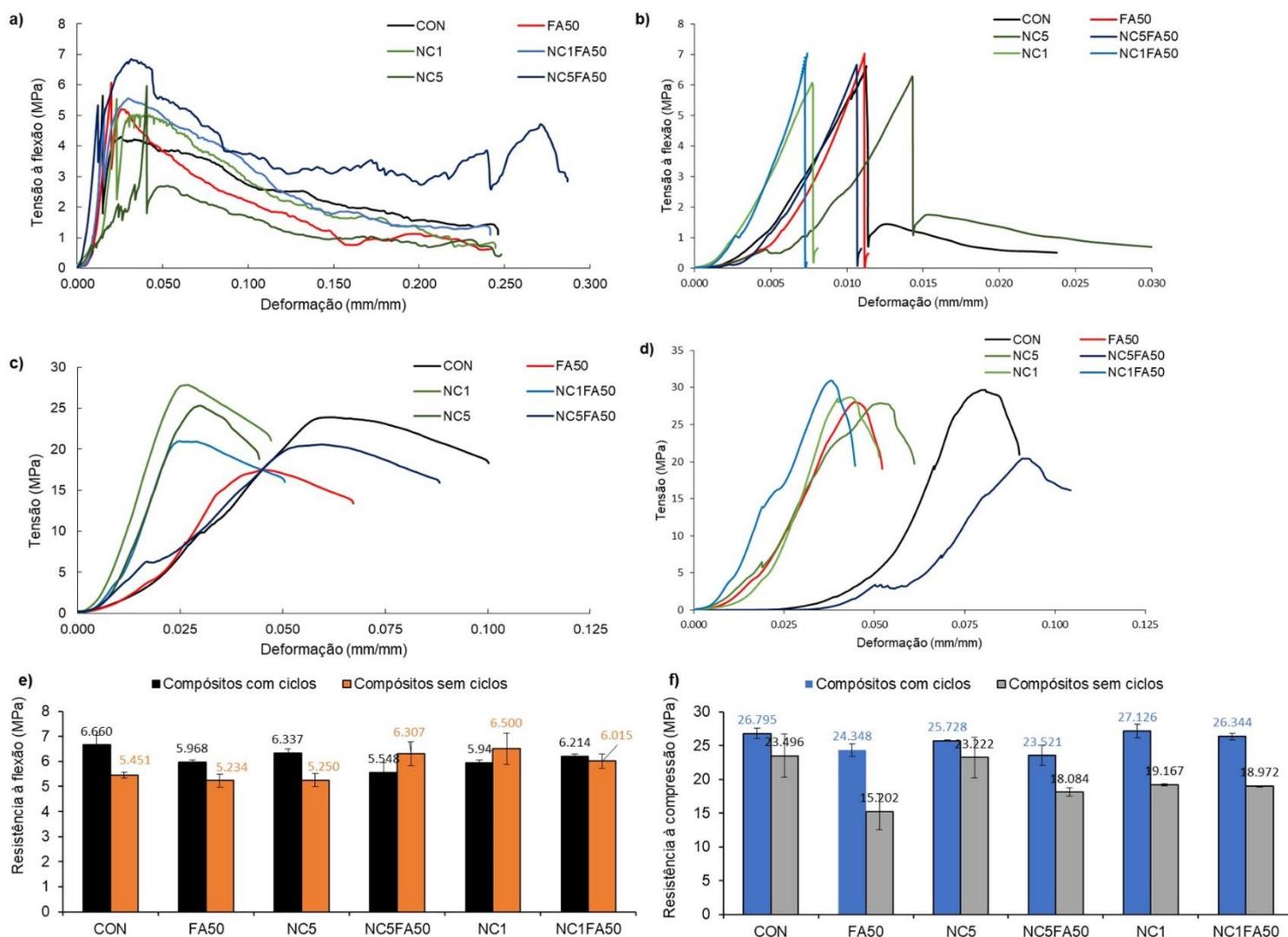


Figura 1 - Gráficos de tensão vs. deformação e resistência à flexão e compressão.

#### 4. CONCLUSÕES

Os resultados deste estudo demonstram que a adição de nanoargila e o tratamento químico das fibras vegetais melhoraram significativamente as propriedades mecânicas dos compósitos, tanto em flexão quanto em compressão, com destaque para o aumento médio de 15,70% e 19,24%, na resistência à flexão, dos grupos NC5FA50 e NC1, respectivamente, em relação ao grupo controle. Além disso, os ganhos de resistência observados após os ciclos de molhagem e

secagem indicam que os compósitos possuem alta durabilidade, uma vez que o número de ciclos aplicado, considerado suficiente para deteriorar fibrocimentos em outros estudos, não causou danos aos materiais analisados. Para estudos futuros, sugere-se a implementação de um maior número de ciclos de molhagem e secagem, a fim de avaliar de forma mais aprofundada a durabilidade dos compósitos a longo prazo, de modo a comparar os compósitos, discernindo o efeito da condição combinada de furfuração da fibra e adição de nanoargila.

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKHAVAN, A.; CATCHMARK, J.; RAJABIPOUR, F. Ductility enhancement of autoclaved cellulose fiber reinforced cement boards manufactured using a laboratory method simulating the Hatschek process. **Construction and Building Materials**, v. 135, p. 251–259, 2017.
- ARAMBURU, A. B. et al. Cement matrix reinforced with microfibrillated cellulose treated with furfuryl alcohol. **Cellulose**, 2023.
- 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.
- 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. 586–595, 2011.
- FILHO, R. D. T. et al. Development of vegetable fibre-mortar composites of improved durability. **Cement and Concrete Composites**, v. 25, n. 2, p. 185–196, 2003.
- KALPOKAITĖ-DIČKUVIENĖ, R. et al. Structural observation of cement paste modified with hydrophobic organoclay. **Construction and Building Materials**, v. 272, p. 121–931, 2021.
- KUNCHARIYAKUN, K.; SINYOUNG, S.; KAJITVICHYANUKUL, P. Comparative microstructures and mechanical properties of mortar incorporating wood fiber waste from various curing conditions. **Case Studies in Construction Materials**, v. 16, n. October 2021, p. e00855, 2022.