

## EXPANSÃO CONFINADA EM ESPUMAS RÍGIDAS DE POLIURETANO REFORÇADAS COM NANOCRISTAIOS DE CELULOSE

MARCELO JORGE BACH<sup>1</sup>; RAFAEL AVILA DELUCIS<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Pelotas – marcelojbach84@gmail.com

<sup>2</sup>Universidade Federal de Pelotas – rafael.delucis@ufpel.edu.br

### 1. INTRODUÇÃO

As espumas rígidas de poliuretano (RPUFs) são amplamente aplicadas em painéis sanduíche devido à sua baixa densidade e boa capacidade de isolamento, mas podem apresentar limitações em aplicações sujeitas a maiores esforços estruturais, como pisos e paredes de vedação (DELUCIS et al., 2021). A adição de nanocristais de celulose (CNCs) tem se mostrado uma alternativa promissora, atuando como agente nucleante e melhorando a uniformidade da estrutura celular, o que resulta em ganhos de resistência mecânica e estabilidade dimensional (ZHOU; SAIN; OKSMAN, 2016). Entretanto, teores elevados podem levar à aglomeração e comprometer o desempenho (SEPTEVANI et al., 2017). Além disso, o confinamento durante a expansão tem sido apontado como estratégia eficaz para aumentar a densidade aparente e reforçar a adesão entre núcleo e lâminas externas, elevando significativamente as propriedades de flexão e cisalhamento (NAR; WEBBER; ANNE D'SOUZA, 2015). Assim, este estudo avalia o efeito combinado da adição de CNCs e do confinamento na produção de RPUFs aplicados como núcleos de painéis sanduíche.

### 2. METODOLOGIA

Os nanocristais de celulose (CNC) utilizados foram fornecidos pela CelluForce (Montreal, Canadá) na forma de pó. Um poliol de base biológica foi sintetizado a partir de óleo de mamona e glicerol (3:1 em massa), enquanto o MDI polimérico (Isotane DM) foi utilizado, tendo o PEG-400 como extensor de cadeia, o óleo de silicone como surfactante e a dimetilbenzilamina como catalisador. As RPUFs de acordo com formulação e procedimentos similares aos descritos por (KERCHE et al., 2021). Com base em resultados prévios, um nível de confinamento de 50% e o teor de 3% de CNC foram selecionados para a fabricação dos painéis sanduíche com e sem confinamento, pois demonstrou melhores níveis de resistência mecânica e estrutura celular uniforme. Lâminas de *Pinus elliottii* foram coladas ao núcleo usando um adesivo epóxi. Foi feita uma determinação de densidade aparente por balança analítica (0,001 g) e paquímetro digital (0,01 mm). Foram realizados ensaios de flexão em amostras prismáticas ( $200 \times 75 \text{ mm}^2$ ) a 1 mm/min em máquina Instron 3382, seguindo ASTM C393, com sete corpos por grupo. Todos os dados foram analisados estatisticamente por ANOVA de fator único, com posterior aplicação do teste de Tukey, adotando-se nível de significância de 0,05.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 compara a densidade aparente dos painéis sanduíche confinados e não confinados. Os painéis confinados apresentaram maior densidade (23%) devido à expansão restrita durante o processo de fabricação, o que comprimiu a

estrutura da espuma e aumentou a densidade de empacotamento do material. Esse resultado é consistente com as conclusões de (KERCHE et al., 2021), em que espumas de poliuretano confinadas mostraram propriedades mecânicas superiores devido ao aumento da densidade. Em termos práticos, a maior densidade dos painéis confinados se traduz em melhores capacidades de suporte de carga, tornando esses painéis mais adequados para aplicações estruturais, como pisos ou coberturas, onde são necessários tanto resistência quanto leveza.

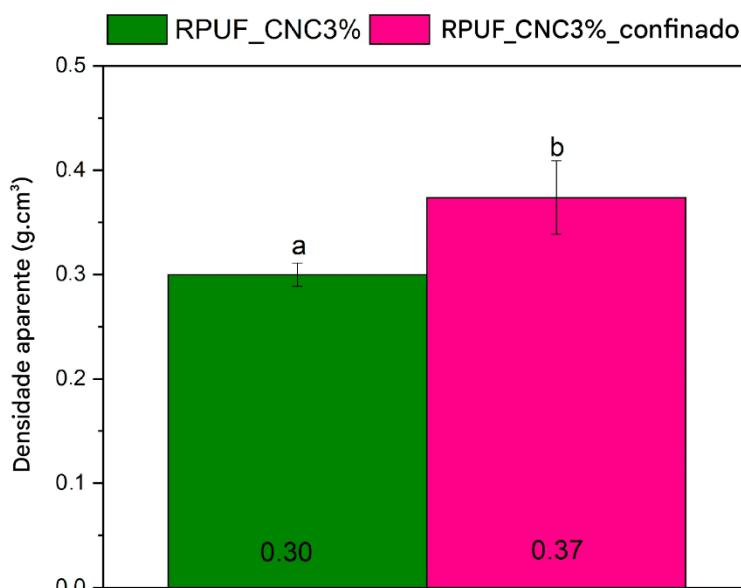


Figura 1 - Densidade aparente dos painéis sanduíche confinados e não confinados.

A resposta à flexão dos painéis sanduíche é apresentada na Figura 2. Nos painéis avaliados neste estudo, observou-se um comportamento não linear na região elástica da curva tensão-deformação, o que é típico em espumas rígidas. Essa não linearidade surge devido à estrutura celular da espuma, na qual os mecanismos de deformação são mais complexos em comparação com materiais sólidos, conforme descrito na literatura (DELUCIS et al., 2021). Assim, à medida que a tensão é aplicada, as paredes das células da espuma começam a se dobrar e encurvar, alterando gradualmente a rigidez. Diferentemente dos materiais sólidos, que apresentam uma resposta elástica linear, a flexão e o colapso das células da espuma causam um aumento progressivo da rigidez, levando a uma relação tensão-deformação não linear mesmo antes do início da deformação plástica. Esse comportamento característico é governado pelo colapso estrutural interno da espuma e não apenas pelo alongamento elástico simples. Os painéis confinados demonstraram maiores valores de força-deslocamento, indicando desempenho superior sob carregamento de flexão. Isso provavelmente se deve ao núcleo mais denso e à melhor adesão entre as lâminas externas e o material do núcleo, conforme mostrado em estudos anteriores de (NAR; WEBBER; ANNE D'SOUZA, 2015), nos quais espumas rígidas de poliuretano (RPUFs) confinadas apresentaram melhores propriedades à flexão. A maior resistência à flexão nos painéis confinados sugere que eles são mais adequados para aplicações que exigem resistência à flexão, como painéis de parede e suportes estruturais em edificações leves.

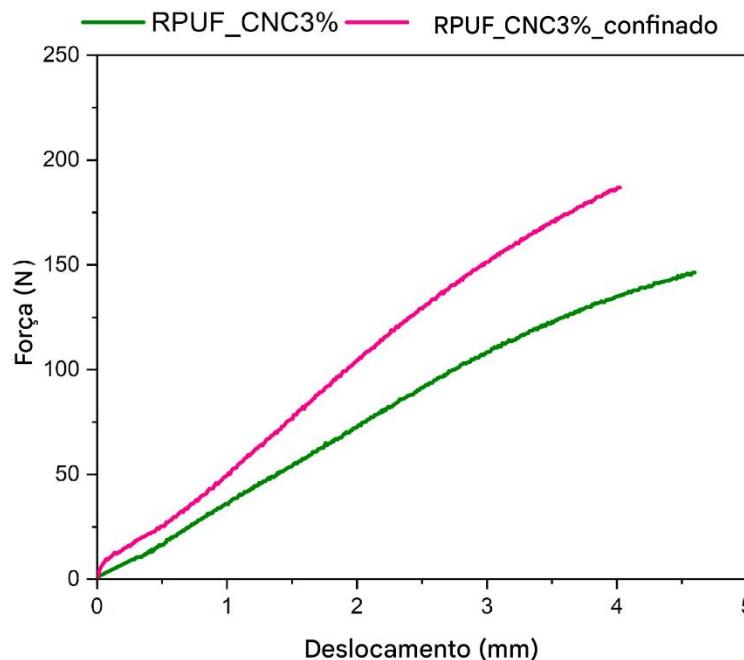


Figura 2 - Curvas de força versus deslocamento em ensaios de flexão de painéis sanduíche.

A Figura 3a ilustra a tensão última de cisalhamento do núcleo em ambos os tipos de painéis, confinados e não confinados. Os painéis confinados apresentaram valores de tensão significativamente maiores (cerca de 90%), provavelmente devido ao aumento da densidade e à interface mais resistente entre o núcleo e as lâminas externas. Por outro lado, a Figura 3b apresenta a resistência última ao cisalhamento do material do núcleo em ambas as configurações. Os painéis confinados exibiram maior resistência (cerca de 55%), o que pode ser atribuído à menor porosidade e ao aumento da interação entre o núcleo e as lâminas externas. Resultados análogos foram obtidos por (SEPTEVANI et al., 2017) e (ZHOU; SAIN; OKSMAN, 2016) em espumas rígidas de poliuretano reforçadas com CNC, nas quais o aumento do teor de nanopartículas melhorou a resistência à compressão do material. Esses achados indicam que os painéis confinados podem ser usados em ambientes onde são esperadas altas cargas de cisalhamento, como em painéis de parede estruturais ou tabuleiros de pontes, onde a resistência à falha por cisalhamento do núcleo é crítica.

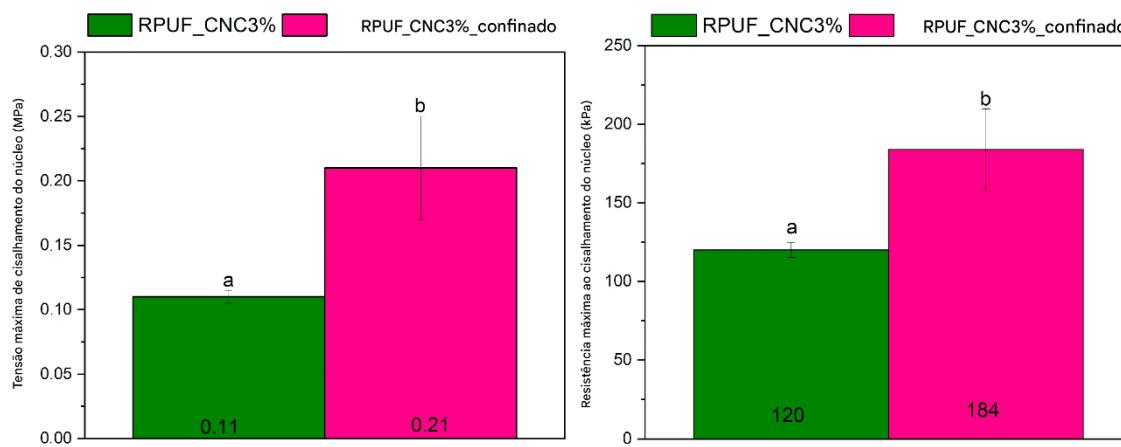


Figura 3 - Tensão última de cisalhamento do núcleo (a) e resistência última ao cisalhamento (b) dos painéis sanduíche.

## 4. CONCLUSÕES

O confinamento aumentou a densidade aparente dos painéis sanduíche em cerca de 23%, refletindo em maior resistência à flexão e ganhos expressivos no cisalhamento, com acréscimos de aproximadamente 90% na tensão última e 55% na resistência do núcleo. Esses resultados confirmam que a combinação de CNC e confinamento é uma estratégia eficiente para a produção de painéis sanduíche leves e resistentes, adequados para aplicações estruturais. Esses resultados sugerem que a combinação do reforço com CNC e o confinamento da espuma pode melhorar significativamente a capacidade de suporte de carga dos painéis sanduíche, tornando-os adequados para aplicações estruturais exigentes, como pisos, coberturas e paredes em sistemas construtivos leves. Estudos futuros podem abordar parâmetros adicionais, em especial o teor de células fechadas e a condutividade térmica, que são críticos para aplicações de isolamento.

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DELUCIS, R. DE A. et al. In situ L-RTM manufacturing of sandwich panels with PET foam core reinforced by polymeric pins. **Journal of Sandwich Structures and Materials**, v. 23, n. 1, p. 241–254, 2021.

KERCHE, E. F. et al. Rigid bio-based wood/polyurethane foam composites expanded under confinement. **Journal of Cellular Plastics**, v. 57, n. 5, p. 757–768, 12 set. 2021.

NAR, M.; WEBBER, C.; ANNE D'SOUZA, N. Rigid polyurethane and kenaf core composite foams. **Polymer Engineering & Science**, v. 55, n. 1, p. 132–144, jan. 2015.

SETEVANI, A. A. et al. The use of cellulose nanocrystals to enhance the thermal insulation properties and sustainability of rigid polyurethane foam. **Industrial Crops and Products**, v. 107, n. December 2016, p. 114–121, 2017.

ZHOU, X.; SAIN, M. M.; OKSMAN, K. Semi-rigid biopolyurethane foams based on palm-oil polyol and reinforced with cellulose nanocrystals. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 83, p. 56–62, 2016.