

CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA DAS REGIÕES DO NÚCLEO E COROA EM ESPUMAS RÍGIDAS DE POLIURETANO

MATHEUS DE PAULA GOULARTE¹; ÁVILA FERREIRA DE SOUSA¹; WESLEY FURTADO PIRES¹; RAFAEL DE AVILA DELUCIS¹; DARCI ALBERTO GATTO¹;

¹Universidade Federal de Pelotas – almatheusgoularte@gmail.com; avilaferreira128@gmail.com; wfp1312.wp@gmail.com; rafael.delucis@ufpel.edu.br; gattodarci@gmail.com

1. INTRODUÇÃO

As espumas de poliuretano (PU) desempenham um papel crucial em diversas indústrias, ocupando uma parcela significativa do mercado devido à sua versatilidade. Elas podem ser flexíveis, com estrutura de célula aberta, amplamente usadas em produtos como filtros e estofados (KISS et al., 2021; PEYRTON; AVÉROUS, 2021), ou rígidas, com células fechadas, aplicadas como isolamento térmico em eletrodomésticos e construções (ANDERSONS et al., 2020). A personalização de suas propriedades, como resistência mecânica e condutividade térmica, é possível através da manipulação controlada de monômeros, catalisadores e agentes de expansão (IVDRE et al., 2023; MAIUOLO et al., 2021).

No entanto, o método predominante de produção, conhecido como vazamento de elevação livre, gera resíduos consideráveis, como "coroas" e "bordas laterais" (BHAGAVATHULA et al., 2022). A coroa forma-se em cortes triangulares ou trapezoidais, enquanto a borda lateral resulta em tiras finas removidas durante a moldagem. Essas regiões estão sujeitas a anomalias morfológicas, decorrentes de restrições geométricas durante o fluxo do precursor líquido, causando expansão e orientação irregular das células (DELUCIS et al., 2018). Esses resíduos trazem desafios para os fabricantes, aumentando a perda de material e o uso de aterros, e exigindo otimização dos padrões de corte e esforços de reciclagem para mitigar impactos ambientais e econômicos (ACOSTA et al., 2022).

Este estudo visa analisar as propriedades morfológicas de diferentes regiões das espumas de PU, com foco em otimizar a amostragem para obter uma representação precisa das características estruturais e suas implicações no desempenho do material.

2. METODOLOGIA

As espumas rígidas de poliuretano foram produzidas pelo método de vazamento de elevação livre, usando moldes de madeira revestidos com papel pardo. O polioli foi sintetizado com óleo de rícino e glicerol (3:1), e o Isotano DM (p-MDI) serviu como fonte de NCO. Polietilenoglicol, óleo de silicone e dimetilbenzilamina atuaram como aditivos. A mistura foi agitada a 1000 rpm por 120 s, seguida da adição de p-MDI e amina, com mais 60 s de agitação.

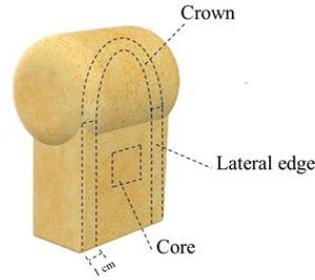


Figura 1: Ilustração dos componentes analisados nas espumas rígidas de poliuretano.

A espuma de poliuretano foi analisada com um microscópio eletrônico de varredura (SEM) JEOL JSM-6060, utilizando uma amostra de 2 cm x 2 cm x 2 cm. Com voltagem de 15 kV e distância de trabalho entre 8 e 10 mm, foram capturadas 30 imagens em diferentes ampliações. A análise de 200 células no software ImageJ mediu comprimento, largura e forma celular, calculando densidade linear de células (LCD), índice de anisotropia (AI) e índice de forma (SI), com base em medições elípticas.

$$LCD = \left(\frac{nM^2}{A} \right)^{3/2} \quad (1)$$

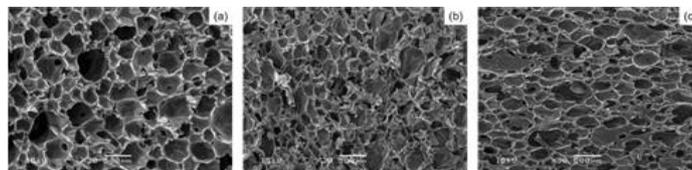
$$AI = \frac{\text{Cell length} - \text{Cell width}}{\text{Cell length}} \quad (2)$$

$$SI = \frac{4A}{\pi d^2} \quad (3)$$

Onde: n é o número de células na imagem; M é o fator de ampliação; A é a área da micrografia; A é a área da célula e d é o diâmetro equivalente.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Fig. 2 mostra imagens SEM das espumas estudadas, destacando suas estruturas celulares. As células da coroa apresentaram formas elípticas ou poligonais, sem orientação definida. As células laterais exibiram um padrão achatado, alinhado à expansão da espuma. Já as células do núcleo eram mais arredondadas, devido à ausência de restrições durante a polimerização.



A Tabela 1 apresenta estatísticas descritivas detalhadas de 200 pontos de dados, oferecendo insights importantes sobre as propriedades morfológicas. Desde as dimensões celulares até os índices de forma e anisotropia, cada medida contribui para uma compreensão abrangente das características da espuma.

Tabela 1. Estatística descritiva dos resultados obtidos para o tamanho da amostra original ($n=200$).

| Coração | | | | | |
|--------------------|---------------------------|-----------------------|------------------------------|--------------------------------|------------------------|
| | Célula comprimento | Célula largura | Índice de anisotropia | Célula linear densidade | Índice de forma |
| Máximo (µm) | 1494.700 | 1357.100 | 0,511 | 0,122 | 0,000400 |
| Média (µm) | 763.174 | 531.412 | 0,186 | 0,062 | 0,000381 |
| desvio padrão (µm) | 222.348 | 186.420 | 0,116 | 0,028 | 0,000020 |
| CoV (µm) | 29.135 | 35.080 | 62.059 | 44.997 | 5.377521 |
| Mínimo (µm) | 281.600 | 153.000 | 0,000 | 0,017 | 0,000296 |
| Coroa | | | | | |
| | Célula comprimento | Célula largura | Índice de anisotropia | Célula linear densidade | Índice de forma |
| Máximo (µm) | 1740.300 | 1050.200 | 0,576 | 0,004 | 0,000400 |
| Média (µm) | 720.806 | 415.217 | 0,262 | 0,001 | 0,000365 |
| desvio padrão (µm) | 262.398 | 151.042 | 0,137 | 0,001 | 0,000031 |
| CoV (µm) | 36.403 | 36.377 | 52.516 | 67.440 | 8.509745 |
| Mínimo (µm) | 254.600 | 148.700 | 0,037 | 0,000 | 0,000267 |

As células no núcleo mostraram uma forma mais arredondada, resultando em baixo índice de anisotropia e densidade celular linear elevada, contribuindo para uma integridade estrutural superior (EL HATKA; HAFIDI; ITTOBANE, 2023; KURAŃSKA et al., 2020). O padrão quase isotrópico do núcleo, com menor CoV nas dimensões das células, reflete maior homogeneidade, alinhando-se com a previsibilidade das propriedades mecânicas e térmicas (KERCHE et al., 2021). Em contraste, as células das regiões da coroa e laterais apresentaram formato mais plano e maior anisotropia, embora com volumes semelhantes, indicados pelos índices de forma intermediários.

4. CONCLUSÕES

Este estudo evidenciou a importância da caracterização morfológica das espumas de poliuretano, focando nas regiões do núcleo e da coroa. As diferenças observadas entre essas regiões reforçam a necessidade de otimizar tanto os processos de produção quanto as estratégias de amostragem para assegurar a qualidade e consistência das espumas. A compreensão detalhada das variações morfológicas nas diferentes áreas da espuma é fundamental para aprimorar suas propriedades mecânicas e térmicas, além de contribuir para a redução de desperdícios e impactos ambientais.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACOSTA, A. P.; OTONI, C. G.; MISSIO, A. L. et al. Bio-based rigid polyurethane foams filled with chemically compatible fruit peels. **Polymers (Basel)**, v. 14, p. 4526, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym14214526>.

ANDERSONS, J.; KIRPLUKS, M.; CABULIS, P. et al. High-density bio-based rigid polyurethane foams as a structural thermal break material. **Construction and Building Materials**, v. 260, p. 120471, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120471>.

BHAGAVATHULA, K. B.; MEREDITH, C. S.; OUELLET, S. et al. Density, strain rate and strain effects on mechanical property evolution in polymeric foams. **International Journal of Impact Engineering**, v. 161, p. 104100, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2021.104100>.

DELUCIS, R. de A.; MAGALHÃES, W. L. E.; PETZHOLD, C. L.; AMICO, S. C. Rigid bio-based polyurethane foams for sandwich panels. **Encyclopedia of Polymer Applications**, p. 1–15, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781351019422-140000307>.

EL HATKA, H.; HAFIDI, Y.; ITTOBANE, N. Exploring the morphology of the urea hard segment and phase separation behavior in flexible polyurethane foam formulations: structural effects of water, lithium chloride, and isocyanate. **Polymers and Polymer Composites**, v. 31, p. 1–10, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1177/09673911231196380>.

IVDRE, A.; ABOLINS, A.; VOLKOV, N. et al. Rigid polyurethane foams as thermal insulation material from novel suberic acid-based polyols. **Polymers (Basel)**, v. 15, p. 3124, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym15143124>.

KISS, G.; RUSU, G.; BANDUR, G. et al. Advances in low-density flexible polyurethane foams through optimized incorporation of high amounts of recycled polyol. **Polymers (Basel)**, v. 13, p. 1–15, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym13111736>.

MAIUOLO, L.; OLIVITO, F.; ALGIERI, V. et al. Synthesis, characterization, and mechanical properties of novel bio-based polyurethane foams using cellulose-derived polyol for chain extension and cellulose citrate as a thickening additive. **Polymers (Basel)**, v. 13, p. 2802, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym13162802>.

PEYRTON, J.; AVÉROUS, L. Structure-property relationships of bio-based polyurethane foam cellular materials. **Mater Sci Eng R Reports**, v. 145, p. 100608, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mser.2021.100608>.