



EFEITOS DO ÁCIDO CÍTRICO COMO AGENTE HIDROLISANTE NAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE AEROGÉIS À BASE DE ÁGAR

Gian L. Pretto¹, Wendel P. Silvestre¹, Camila Baldasso¹

¹Programa de pós-graduação em Engenharia de Processos e Tecnologias (PGEPROTEC), Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, Brasil. CEP 95070-560
glpretto@ucs.br

Palavras-Chave: biopolímeros, liofilização, sustentabilidade.

Introdução

Aerogéis são materiais sólidos microporosos, nos quais a fase dispersa se encontra em estado gasoso (Alemán et al., 2007; Ziegler et al., 2017). Esses materiais caracterizam-se por apresentar elevada área superficial específica e baixa massa específica aparente (Aegerter et al., 2023). Aerogéis podem ser fabricados a partir de matérias-primas de diversas classificações, permitindo a obtenção de aerogéis cerâmicos, como aqueles fabricados em sílica (Chen, Li, Zhang, 2025), metálicos, como os produzidos com nióbio (Maurer, Ko, 1992) ou ainda poliméricos como aquele produzidos a partir de poliuretano (Cantero et al., 2023).

O uso de aerogéis está atrelado à capacidade de reunir características de materiais de alto desempenho tecnológico em uma única estrutura, o que possibilita obter um material com baixa condutividade térmica, alta capacidade de adsorção e alta refletância a ondas sonoras, alavancando as aplicações comerciais desse tipo de material (Aegerter et al., 2023; Chemere et al., 2025). Assim, os aerogéis têm sido empregados como adsorventes (Qian et al., 2021) e isolantes térmicos (Rudaz et al., 2014) com aplicações industriais e na área da saúde.

Alguns métodos têm sido estudados para a produção de aerogéis. Tratando-se de biopolímeros, o método de liofilização tem produzido materiais com as características anteriormente citadas (Aegerter et al., 2023). Neste processo, um gel do biopolímero com solvente em estado líquido é formado e submetido a congelamento, passando, em seguida, para exposição ao vácuo, o que possibilita a sublimação do solvente. Este procedimento visa à substituição do solvente líquido por um solvente gasoso (ar), aliado à manutenção da estrutura tridimensional do sólido formado pelo gel do biopolímero (Ziegler et al., 2017).

Biopolímeros são materiais poliméricos obtidos a partir de fontes renováveis, ou polímeros biodegradáveis de fonte biológica ou sintética (Niaounakis, 2015). Essas substâncias fazem parte do escopo de matérias-primas passíveis de serem utilizadas na fabricação de aerogéis. Dentre elas, destacam-se os polissacarídeos, biopolímeros que apresentam como diferenciais a biodegradabilidade, alta disponibilidade, baixo custo e menor impacto ambiental



em comparação às matérias-primas sintéticas (Demina, Minaev, Akopova, 2024; El-Naggar et al., 2020; Mtibe et al., 2021). Entre os mais utilizados para a formulação de aerogéis estão os alginatos, a quitosana, o amido, a celulose e a pectina (Demina, Minaev, Akopova, 2024).

Por apresentar alta capacidade de gelificação e alta força de gel entre os polissacarídeos, o ágar é uma substância que tem sido investigada como fonte para produção de aerogéis (Armisen, Galatas, 2009). Este ficocoloide, extraído de algas marinhas vermelhas da classe Rhodophyceae (McHugh, 2003) é constituído da mistura de agarose e agarpectina. Enquanto a agarose é formada por repetições de β -D-galactose e 3,6-anidro- α -L-galactose, a agarpectina apresenta estrutura química semelhante, mas contendo grupos sulfato, ésteres metílicos e ácido pirúvico (Araki, 1956; Armisen, Galatas, 2009; Jimenez-Barbero et al., 1989).

O Ágar quando aplicado na matriz de aerogéis pode ser aditivado e modificado quimicamente, com o objetivo de melhorar suas propriedades. Exemplo dessa prática é a formação de aerogéis compósitos de ágar, que apresentaram ganhos em propriedades mecânicas adequação da condutividade térmica à patamares de materiais isolantes com a adição de sílica (Yang et al., 2022). Outra estratégia relatada na literatura é a ocorrência de reações de reticulação com glutaraldeído em aerogéis formados por blends de ágar/PVA, o que proporcionou aumento na hidrofobicidade do material (Duman et al., 2022).

Tendo em vista essa capacidade de formação de aerogéis com características melhoradas a partir de reações químicas, este trabalho visa estudar as propriedades de aerogéis a base de ágar quando aditivados com ácido cítrico. Este reagente tem mostrado resultados promissores em filmes à base de ágar (Awadhiya, Kumar, Verma, 2016), mas carece de estudos quanto à sua aplicação como aditivo em aerogéis.

Material e Métodos

Soluções de 80 g foram produzidas contendo 4 % de ágar (m/m) e concentrações de zero, 0,25 %, 0,50 % e 1,00 % m/m (de ácido cítrico em relação à massa de ágar), denominados, respectivamente, AAC0, AAC0,25, AAC0,5 e ACC1. O ágar (Agargel, Brasil, grau alimentício) e o ácido cítrico PA (Dinâmica, Brasil) foram adicionados a um béquer, com água deionizada e, então, o béquer foi aquecido, coberto com plástico filme, em banho maria sobre chapa de aquecimento (Velp, ARE, Itália) e agitação magnética, com temperatura mantida entre 88–92 °C por 1 h. A solução foi imediatamente transferida para molde de silicone com diâmetro de 38 mm e altura de 44 mm e mantida em 23 ± 2 °C para gelificação por 1 h, produzindo monolitos que foram desmoldados após esse período (Duman et al., 2022; Zanini, 2016). Os monolitos produzidos foram submetidos a congelamento à -45 °C por 24 h e, subsequentemente, à liofilização à -45 °C, com vácuo manométrico de -200 mbar por 48 h em liofilizador (JJ Científica, Brasil). A pressão foi, então, estabilizada à pressão ambiente e as amostras foram recolhidas e armazenadas em dessecador até a realização dos ensaios (Guastaferrero et al., 2021; Zanini, 2016).



A contração volumétrica foi determinada pela Equação 1 (Dogenski, 2019), com diâmetros “D” e “d” e alturas “H” e “h” dos cilindros antes e após a liofilização, respectivamente, com medições realizadas com paquímetro (Mitutoyo, CD-8”C, Japão). Ensaio realizado com sete replicatas de cada formulação.

$$\text{Contração (\%)} = \frac{d^2 \cdot h - D^2 \cdot H}{D^2 \cdot H} \cdot 100 \quad (1)$$

A densidade aparente do aerogel foi determinada por adaptação da norma ASTM D3575-20 (ASTM International, 2020), calculada pela Equação 2, sendo “m”, “d” e “h”, a massa, medida em balança (BEL Engineering, M500, Brasil), diâmetro e altura medidos com paquímetro (Mitutoyo, CD-8”C, Japão), respectivamente. Ensaio realizado com cinco replicatas de cada formulação.

$$\rho = \frac{m}{\pi \cdot \frac{d^2}{4} \cdot h} \quad (2)$$

As propriedades mecânicas à compressão foram determinadas por adaptação da norma ASTM D1621-16 (ASTM International, 2023). Após o acondicionamento a 23 ± 2 °C e umidade relativa de 50 ± 10 % por 96 h, os corpos de prova de aprox. 35 mm diâmetro e altura de 10–15 mm (seção transversal do cilindro de aerogel) medidos com paquímetro (Mitutoyo, CD-8”C, Japão) foram comprimidos em máquina universal de ensaios (Instron, EMIC 25-100, Brasil) equipada com célula de carga (Instron, CCE2KN, Brasil) com velocidade de $2,5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ até a deformação de 50 %. Determinou-se a resistência à compressão em 10 % e 50 % de deformação, calculada pela equação 3. O módulo de elasticidade foi determinado por regressão linear da região de deformação proporcional da curva tensão-deformação. O ensaio foi realizado com cinco replicatas de cada formulação.

$$\sigma = \frac{F}{\pi \cdot \frac{D^2}{4}} \quad (3)$$

Análise estatística foi realizada com teste de Grubbs para identificação de *outliers* e, então, com ANOVA, seguida do teste de Tukey para comparação de médias, com nível de significância de 5 %, utilizando o software OriginPro 8.5.

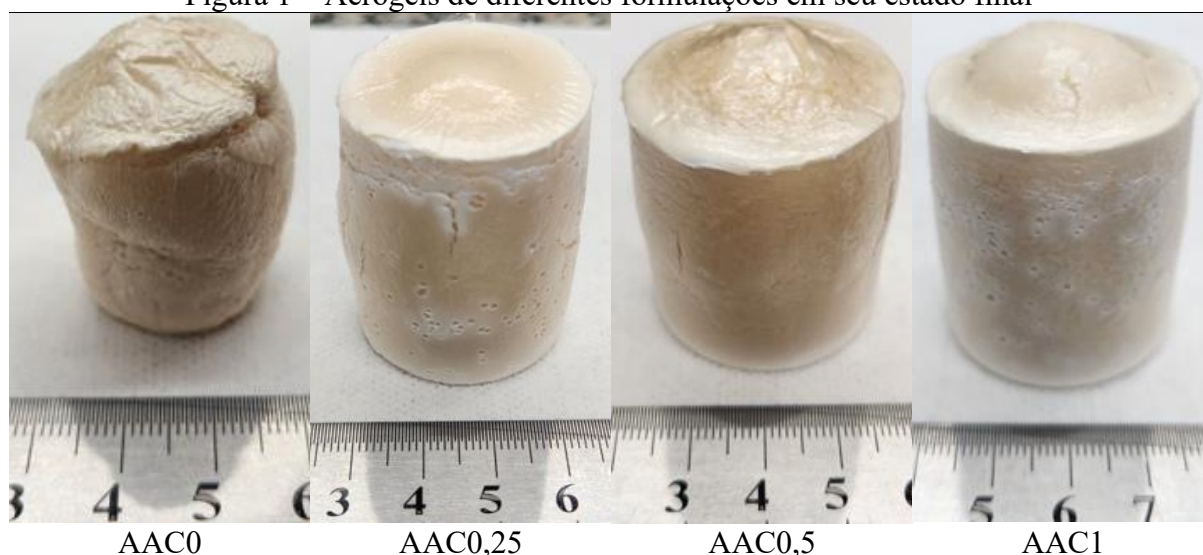
Resultados e Discussão

A adição de ácido cítrico promoveu notável redução da viscosidade da solução, um indicativo visual da hidrólise parcial das moléculas de ágar, o que tornou a agitação mais eficiente e facilitou o processo de moldagem.

Após a finalização do processo de produção, percebeu-se que todas as formulações formaram aerogéis que, de modo geral, preservaram o aspecto cilíndrico inicial, exceto por

efeitos de contração. Os aerogéis produzidos apresentavam coloração branco-amarelada com certa porosidade na superfície proveniente da presença de bolhas de ar aderidas ao molde durante o processo de moldagem e gelificação. Notou-se a presença de pequenas trincas na superfície de alguns aerogéis, especialmente naqueles de formulação AAC1, que apresentou fendas mais profundas que as demais, o que pode estar associado ao limite do grau de hidrólise, ou seja, à uma concentração de ácido cítrico que causou excessiva quebra de ligações intramoleculares, enfraquecendo a estrutura do hidrogel a ponto de não suportar as tensões da liofilização sem fissurar (Awadhiya, Kumar, Verma, 2016). A Figura 1 apresenta imagens dos aerogéis produzidos.

Figura 1 – Aerogéis de diferentes formulações em seu estado final



Escala em centímetros. Fonte: Autores

Os resultados dos ensaios de contração volumétrica e densidade aparente são apresentados na Tabela 1. Nota-se que, para ambas as propriedades, há diferença estatística entre os materiais que tiveram a adição de ácido cítrico em sua formulação (AAC0,25, AAC0,5 e AAC1) e o controle (AAC0). Observa-se, também, que a formulação AAC0,5 apresentou maior repetibilidade nos resultados, o que é evidenciado pelo menor desvio padrão de ambas as propriedades.

Tabela 1 – Contração volumétrica e densidade aparente dos aerogéis

Formulação	Contração (%)	Densidade ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
AAC0	$41,9 \pm 18,1^a$	$101,3 \pm 32,5^a$
AAC0,25	$14,8 \pm 4,3^b$	$65,2 \pm 3,7^b$
AAC0,5	$11,3 \pm 2,4^b$	$65,2 \pm 2,8^b$
AAC1	$14,9 \pm 8,0^b$	$66,8 \pm 5,8^b$

Valores apresentados como média $\pm$ desvio padrão. Letras diferentes em uma mesma coluna indicam médias estatisticamente diferentes entre si pelo teste de Tukey ao nível de probabilidade de 5 % (p-valor < 0,05).

Fonte: Autores



A adição de ácido cítrico causa hidrólise parcial das moléculas de ágar, ou seja, proporciona a quebra de ligações intramoleculares, o que, por consequência, reduz as forças de atração que dão estrutura ao hidrogel. A diminuição da contração dos aerogéis contendo ácido cítrico pode ser explicada por esse efeito, visto que, com a eliminação do solvente por sublimação, a estrutura dos aerogéis aditivados possui menor força, o que gera menor contração em relação ao aerogel sem a adição de ácido cítrico (Chen et al., 2004; Chirapart et al., 1997; Fuse, Goto, 1969).

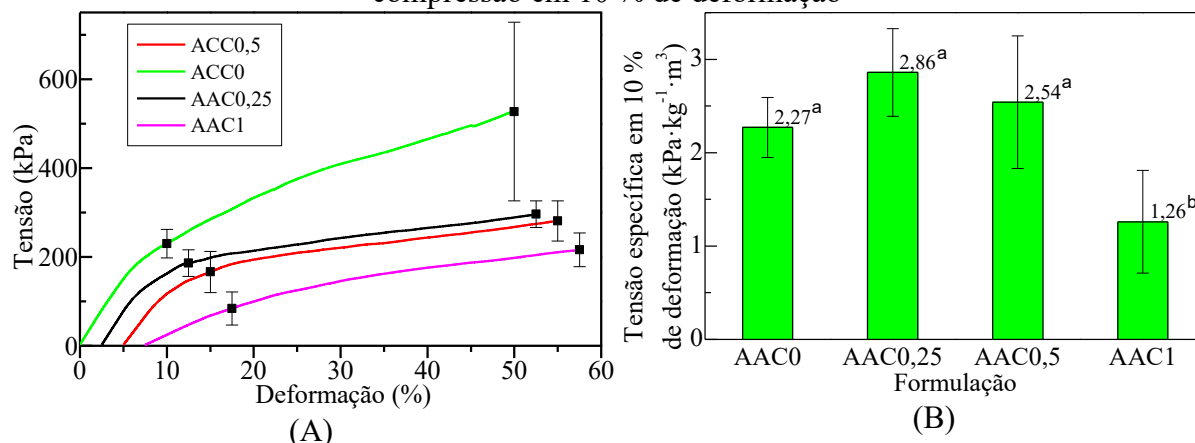
Devido ao fato de os aerogéis com adição de ácido cítrico apresentarem menor contração, a sua densidade aparente é diretamente influenciada, tornando-se menor em comparação àquela apresentada pela amostra controle. Isso ocorre, pois, a massa dos aerogéis é aproximadamente a mesma, independentemente da formulação, visto que a concentração de ágar é a mesma, porém a menor contração proporciona uma distribuição dessa massa em um maior volume, levando a formação de aerogéis menos densos, com uma relação inversamente proporcional à contração (Chirapart et al., 1997; Guastaferrero et al., 2021).

Da perspectiva de aplicação de aerogéis, uma menor densidade aparente traz vantagens ao material, visto que, uma das propostas dos materiais porosos é que produtos fabricados com eles sejam mais leves em relação à materiais compactos (Aegerter et al., 2023).

Nas Tabelas 1 e 2, nota-se que a formulação controle (AAC0) apresenta desvios padrões bastante elevados, em propriedades como contração volumétrica e módulo de elasticidade. Assim, percebe-se que a adição de 0,5% de ácido cítrico (AAC0,5) aumentou a repetibilidade (diminuindo o desvio padrão) das características analisadas, sugerindo maior homogeneidade da matriz estrutural do gel.

Em relação às propriedades mecânicas à compressão dos aerogéis produzidos, a Figura 2-A apresenta as curvas médias de tensão-deformação do ensaio. A partir destas, destacou-se as propriedades apresentadas na Tabela 2.

Figura 2 – (A) Curvas tensão deformação do ensaio de compressão; (B) Tensão específica à compressão em 10 % de deformação



Fonte: Autores

Os aerogéis de ambas as formulações apresentaram comportamento dúctil, semelhante ao demonstrado por Hozjan et al. (2026), sendo que o perfil segue o modelo característico de aerogéis à base de biopolímeros, que é a curva de três fases: região elástica, região de compactação e, por fim, região de densificação (omitida no gráfico para melhor visualização) (Lu, Luo, Leventis, 2011).

Tabela 2 – Propriedades mecânicas dos aerogéis desenvolvidos

Formulação	Módulo de elasticidade (kPa)	Tensão à compressão em 10 % de deformação (kPa)	Tensão à compressão em 50 % de deformação (kPa)
AAC0	3337 ± 1243 ^a	230 ± 32 ^a	227 ± 201 ^a
AAC0,25	3048 ± 1109 ^a	186 ± 30 ^a	296 ± 30 ^b
AAC0,5	2561 ± 1135 ^{ab}	166 ± 46 ^a	281 ± 45 ^b
AAC1	914 ± 434 ^b	84 ± 37 ^b	216 ± 38 ^b

Valores apresentados como média ± desvio padrão. Letras diferentes em uma mesma coluna indicam médias estatisticamente diferentes entre si pelo teste de Tukey ao nível de probabilidade de 5 % (p-valor < 0,05).

Fonte: Autores.

Em relação ao módulo de elasticidade, a adição de ácido cítrico levou à redução na rigidez do material, mostrada pela redução do módulo com o aumento da concentração de ácido cítrico, efeito que também pode ser observado pela variação na inclinação da região elástica das curvas da Figura 2-A. Tal fenômeno também pode ser explicado pela hipótese de hidrólise causada pela adição de ácido cítrico, o que faz com que as forças de ligação intermoleculares que promovem a manutenção da estrutura ao material sejam reduzidas (Awadhiya, Kumar, Verma, 2016).



Um efeito semelhante pode ser observado na propriedade de tensão em 10 % de deformação que também sofreu diminuição com o aumento da concentração de ácido cítrico, quando analisada isoladamente. No entanto, a resistência à compressão específica, que é a razão entre a propriedade e a densidade aparente do material, mostrada na Figura 2-B, revela que não há diferença estatisticamente significativa entre as formulações produzidas, sugerindo que o resultado de maior resistência demonstrado pela formulação AAC0 pode ser devido apenas à compactação prévia do material ocorrida durante o processo de liofilização e corroborada pela maior contração deste material. Ainda, há uma tendência mostrada pelo gráfico de aumento de resistência específica com adição de pequena quantidade de ácido cítrico (AAC0,25), que pode estar relacionada a efeitos de hidrólise brandos o suficiente para não interferir na formação de ligações de dupla hélice responsáveis pela estrutura tridimensional do gel (Chirapart et al., 1997). Dessa forma, o uso de ácido cítrico mostrou-se efetivo na produção de aerogéis com menor densidade aparente, sem penalizar a integridade estrutural do material.

A resistência em 50 % de deformação dos materiais desenvolvidas nesse trabalho mostraram-se superior àquelas encontradas em aerogéis de ágar aditivados com grafeno e 1H,1H,2H,2H-perfluorodeciltrimetoxisilano, que foram de 2,4 – 68,1 kPa (Wang, Zhang, Zhang, 2019). As propriedades mecânicas são ainda compatíveis com aquelas encontradas em blendas de ágar e PVA (ambos em 3 % m/m), que apresentaram tensão a compressão em 50 % de deformação em ~190 kPa e em valores de 250 – 500 kPa em compósitos dos polímeros com reforço de magnesita e alginato de sódio (Guo et al., 2023).

Conclusões

Os métodos empregados na execução deste trabalho possibilitaram a obtenção de aerogéis íntegros e que, de modo geral mantiveram as características geométricas do hidrogel, indicando preservação da estrutura tridimensional do gel após a liofilização do solvente.

O ácido cítrico adicionado em quantidades controladas atuou como agente hidrolisante, facilitando o processo produtivo pela redução na viscosidade. Essa reação viabilizou a obtenção de materiais com menor contração volumétrica e, por consequência, menor densidade aparente, o que representou uma redução de 35,6 % da densidade em relação ao material sem ácido cítrico. A hidrólise parcial proporcionou ainda, a conservando da resistência mecânica específica do material, que não apresentou diferença estatística significativa. Houve ainda melhora na homogeneidade estrutural do aerogel, demonstrada pela redução no desvio padrão nas propriedades físicas e mecânicas, indicando maior repetibilidade nos resultados.

Por fim, observa-se que a proposta de beneficiamento do material foi capaz de produzir um aerogel compatível com a literatura e com potencial para aplicações práticas.



Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Agradecemos à Fapergs, UCS, PGEPROTEC e CNPQ.

Referências

- AEGERTER, M. A.; LEVENTIS, N.; KOEBEL, M.; STEINER III, S. A. (EDS.). **Springer Handbook of Aerogels**. Cham: Springer International Publishing, 2023.
- ALEMÁN, J. V.; CHADWICK, A. V.; HE, J.; HESS, M.; HORIE, K.; JONES, R. G.; KRATOCHVÍL, P.; MEISEL, I.; MITA, I.; MOAD, G.; PENCZEK, S.; STEPTO, R. F. T. Definitions of terms relating to the structure and processing of sols, gels, networks, and inorganic-organic hybrid materials (IUPAC Recommendations 2007). **Pure and Applied Chemistry**, 79(10), 1801–1829, 1 jan. 2007.
- ARAKI, C. Structure of the Agarose Constituent of Agar-agar. **Bulletin of the Chemical Society of Japan**, 29(4), 543–544, 1 abr. 1956.
- ARMISÉN, R.; GALATAS, F. Agar. Em: **Handbook of Hydrocolloids**. Cambridge: Elsevier, 2009. p. 82–107.
- ASTM International. **ASTM D3575**: Standard Test Methods for Flexible Cellular Materials Made from Olefin Polymers. 2020.
- ASTM International. **ASTM D1621-23**: Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Cellular Plastics. 2023.
- AWADHIYA, A.; KUMAR, D.; VERMA, V. Crosslinking of agarose bioplastic using citric acid. **Carbohydrate Polymers**, 151, 60–67, out. 2016.
- CANTERO, D.; PINILLA-PENÁLVER, E.; ROMERO, A.; SÁNCHEZ-SILVA, L. Synthesis of waterborne polyurethane aerogels-like materials via freeze-drying: an innovative approach. **Journal of Materials Science**, 58(21), 9087–9102, jun. 2023.
- CHEMERE, E. B.; MHLABENI, T. L.; MHIKE, W.; MAVHUNGU, M. L.; SHONGWE, M. B. A comprehensive review of types, synthesis strategies, advanced designing and applications of aerogels. **Royal Society Open Science**, 12(5), 241975, maio 2025.
- CHEN, H.-M.; ZHENG, L.; LIN, W.; YAN, X.-J. Product monitoring and quantitation of oligosaccharides composition in agar hydrolysates by precolumn labeling HPLC. **Talanta**, 64(3), 773–777, out. 2004.
- CHEN, L.; LI, L.; ZHANG, X. Solvent-regulable interfacial groups enable on-demand superhydrophobic/superhydrophilic silica aerogels. **Nature Communications**, 16(1), 2228, 5 mar. 2025.
- CHIRAPART, A.; OHNO, M.; UKEDA, H.; SAWAMURA, M.; KUSUNOSE, H. Effects of partial acid hydrolysis on physical and chemical properties of agar from a newly reported Japanese agarophyte (*Gracilariopsis lemaneiformis*). **Journal of Applied Phycology**, 9(1), 73–76, fev. 1997.
- DEMINA, T. S.; MINAEV, N. V.; AKOPOVA, T. A. Polysaccharide-based aerogels fabricated via supercritical fluid drying: a systematic review. **Polymer Bulletin**, 81(15), 13331–13356, out. 2024.
- DOGENSKI, M. **Aerogéis à base de amido: síntese, caracterização e potenciais aplicações**. Tese—Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2019.
- DUMAN, O.; DIKER, C. Ö.; UĞURLU, H.; TUNÇ, S. Highly hydrophobic and superoleophilic agar/PVA aerogels for selective removal of oily substances from water. **Carbohydrate Polymers**, 286, 119275, jun. 2022.
- EL-NAGGAR, M. E.; OTHMAN, S. I.; ALLAM, A. A.; MORSY, O. M. Synthesis, drying process and medical application of polysaccharide-based aerogels. **International Journal of Biological Macromolecules**, 145, 1115–1128, fev. 2020.
- FUSE T.; GOTO F. Studies on Utilization of Agar Part VII. **Journal of the agricultural chemical society of Japan**, 43(9), 621–624, 1969.



GUASTAFERRO, M.; BALDINO, L.; REVERCHON, E.; CARDEA, S. Production of Porous Agarose-Based Structures: Freeze-Drying vs. Supercritical CO₂ Drying. **Gels**, 7(4), 198, 5 nov. 2021.

GUO, X.; ZHAO, H.; QIANG, X.; OUYANG, C.; WANG, Z.; HUANG, D. Facile construction of agar-based fire-resistant aerogels: A synergistic strategy via in situ generations of magnesium hydroxide and cross-linked Ca-alginate. **International Journal of Biological Macromolecules**, 227, 297–306, fev. 2023.

HOZJAN, N. A.; HORVAT, G.; GIBOWSKY, L.; GURIKOV, P.; KNEZ, Ž.; NOVAK, Z. Properties of agar aerogels: Effect of concentration and ageing time. **Carbohydrate Polymers**, 381, 125198, jun. 2026.

JIMENEZ-BARBERO, J.; BOUFFAR-ROUPE, C.; ROCHAS, C.; PÉREZ, S. Modelling studies of solvent effects on the conformational stability of agarobiose and neoagarobiose and their relationship to agarose. **International Journal of Biological Macromolecules**, 11(5), 265–272, out. 1989.

LU, H.; LUO, H.; LEVENTIS, N. Mechanical Characterization of Aerogels. Em: AEGERTER, M. A.; LEVENTIS, N.; KOEBEL, M. M. (Eds.). **Aerogels Handbook**. New York, NY: Springer New York, 2011. p. 499–535.

MAURER, S. M.; KO, E. I. Structural and acidic characterization of niobia aerogels. **Journal of Catalysis**, 135(1), 125–134, 1 maio 1992.

MCHUGH, D. J. **A guide to the seaweed industry**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2003.

MTIBE, A.; MOTLOUNG, M. P.; BANDYOPADHYAY, J.; RAY, S. S. Synthetic Biopolymers and Their Composites: Advantages and Limitations—An Overview. **Macromolecular Rapid Communications**, 42(15), 2100130, ago. 2021.

NIAOUNAKIS, M. Definitions of Terms and Types of Biopolymers. Em: **Biopolymers: Applications and Trends**. Waltham: Elsevier, 2015. p. 1–90.

QIAN, H.; FANG, Y.; WU, K.; WANG, H.; LI, B.; JIANG, F. Air filtration improvement of konjac glucomannan-based aerogel air filters through physical structure design. **International Journal of Low-Carbon Technologies**, 16(3), 867–872, 29 set. 2021.

RUDAZ, C.; COURSON, R.; BONNET, L.; CALAS-ETIENNE, S.; SALLÉE, H.; BUDTOVA, T. Aeropectin: Fully Biomass-Based Mechanically Strong and Thermal Superinsulating Aerogel. **Biomacromolecules**, 15(6), 2188–2195, 9 jun. 2014.

WANG, J.; ZHANG, W.; ZHANG, C. Versatile fabrication of anisotropic and superhydrophobic aerogels for highly selective oil absorption. **Carbon**, 155, 16–24, dez. 2019.

YANG, X.; JIANG, P.; XIAO, R.; FU, R.; LIU, Y.; JI, C.; SONG, Q.; MIAO, C.; YU, H.; GU, J.; WANG, Y.; SAI, H. Robust Silica–Agarose Composite Aerogels with Interpenetrating Network Structure by In Situ Sol–Gel Process. **Gels**, 8(5), 303, 16 maio 2022.

ZANINI, M. **Aerogéis hidrofóbicos de nanofibras de celulose**. Dissertação de mestrado—Caxias do Sul: Universidade de Caxias do Sul, 2016.

ZIEGLER, C.; WOLF, A.; LIU, W.; HERRMANN, A.; GAPONIK, N.; EYCHMÜLLER, A. Modern Inorganic Aerogels. **Angewandte Chemie International Edition**, 56(43), 13200–13221, 16 out. 2017.