

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS  
BACHARELADO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**VITOR POLI NAKAHARA**

**AEROGÉIS DE CELULOSE: UMA REVISÃO COM ENFOQUE NAS  
OPORTUNIDADES TECNOLÓGICAS DE PRODUÇÃO E APLICAÇÃO**

**LONDRINA**

**2023**

**VITOR POLI NAKAHARA**

**AEROGÉIS DE CELULOSE: UMA REVISÃO COM ENFOQUE NAS  
OPORTUNIDADES TECNOLÓGICAS DE PRODUÇÃO E APLICAÇÃO**

**Cellulose aerogels: a review focusing on technological opportunities for  
production and application**

Trabalho de conclusão de curso apresentada como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador(a): Prof. Dr. Fabio Cezar Ferreira

Coorientador(a): Prof. Dr. Fabiano Moreno Peres

**LONDRINA**

**2023**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**VITOR POLI NAKAHARA**

**AEROGÉIS DE CELULOSE: UMA REVISÃO COM ENFOQUE NAS  
OPORTUNIDADES TECNOLÓGICAS DE PRODUÇÃO E APLICAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
como requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia de Materiais da  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
(UTFPR).

Data de aprovação: 22/junho/2023

---

Prof. Dr. Francisco Rosário  
Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR

---

Prof. Dr. Marcos Antônio Piza  
Doutor em ciências e engenharia de materiais  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR

---

Prof. Dr. Fábio Cezar Ferreira  
Doutor em Química (Físico-Química)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR

**LONDRINA**

**2023**

## **AGRADECIMENTOS**

Apresento esta seção inicialmente à minha família, pelos que me ajudaram durante esta graduação e que auxiliaram para que eu chegasse até aqui. Aos meus pais e irmãos sou grato por todo apoio.

Ao professor doutor que me orientou durante estes anos, mesmo durante a pandemia. Agradeço ao Fábio Cezar Ferraz pela paciência, conhecimento e suporte fornecido durante os últimos anos de minha graduação.

Agradeço a Universidade Tecnológica Federal do Paraná de Londrina por me fornecer a oportunidade para receber tanto conhecimento nesta graduação, me oferecer tantas oportunidades no mercado de trabalho, e por me apresentar diversas pessoas e amigos que levarei para vida.

Para todos os colegas de graduação que passaram por diversas dificuldades juntos comigo e que sem eles eu não chegaria até onde estou hoje, agradeço ao Felipe Galindo Soares, Ana Paula T. P. Andrello, Lucas Tabosa Machado, e principalmente ao Alan Franco do Couto por todo o companheirismo, apoio, e boas recordações que me proporcionaram.

A todos os meus amigos mais próximos do grupo Frutas que diariamente me ouviram, me aconselharam, me animaram e me ajudaram em todas as adversidades. Mesmo que não necessariamente envolvesse os estudos, sempre estiveram presentes como uma família que pude contar.

Por fim, agradeço ao Valdir Bento da Costa Júnior que esteve ao meu lado e me apoiou quando mais precisava. Foi um ombro em que pude escorar, um amigo, e muito mais do que eu podia esperar.

## RESUMO

Celulose é um material renovável e amplamente disponível na natureza. Ao se utilizar da celulose para produzir aerogéis, é possível explorar recursos renováveis e diminuir a dependência de materiais não renováveis, contribuindo para a sustentabilidade ambiental. Em maior parte, a produção destes aerogéis são advindas de uma solução coloidal com celulose que passa por liofilização, entretanto, diferentes métodos existem como utilizar a estrutura de tecidos vegetais para formar o aerogel após diversos tratamentos químicos, ou o crescimento de celulose bacteriana em um substrato específico. Este material é um foco de estudo muito recente. Em meados de 2010 diferentes estudos sobre aplicações e métodos de fabricação começaram a surgir abruptamente. As únicas e desejáveis características destes aerogéis são a motivação para pesquisas de diferentes aplicabilidades, com baixa densidade, alta porosidade, grande área superficial e excelente capacidade de isolamento térmico, eles se destacam. O maior enfoque de aplicações pesquisadas atualmente sobre aerogéis de celulose são para adsorção seletiva, seguido por filtros e supercapacitores. O grande potencial para modificação química e física das paredes do aerogel são um ponto chave para as diferentes aplicações mencionadas. Outras aplicações que podem ser citadas são como transportadores de fármacos, isolantes térmicos e acústicos e diferentes utilizações na área da saúde. Ainda existe muito espaço para ser pesquisado neste ramo. Novos métodos de síntese, diversas aplicações, e produções em alta escala são os maiores desafios futuros.

**Palavras-chave:** celulose; aerogel; adsorvente; isolante.

## ABSTRACT

Cellulose is a renewable and widely available material in nature. By using cellulose to produce aerogels, it is possible to explore renewable resources and reduce the dependence on non-renewable materials, thus contributing to environmental sustainability. In most cases, the production of these aerogels is derived from a colloidal solution with cellulose that undergoes lyophilization. However, different methods exist, such as using the structure of plant tissues to form the aerogel after various chemical treatments, or the growth of bacterial cellulose on a specific substrate. This material is a focus of very recent study. In the mid-2010s, various studies on applications and manufacturing methods began to emerge abruptly. The unique and desirable characteristics of these aerogels serve as motivation for research into different applications. With low density, high porosity, large surface area, and excellent thermal insulation capacity, they stand out. The main focus of current research on cellulose aerogels is selective adsorption, followed by filters and supercapacitors. The significant potential for chemical and physical modification of the aerogel walls is a key point for the mentioned applications. Other applications that can be mentioned include drug carriers, thermal and acoustic insulators, and various uses in the healthcare field. There is still much space to be explored in this field. New synthesis methods, diverse applications, and large-scale production are the major future challenges.

**Keywords:** cellulose; aerogel; adsorbant; insulator.

## SUMÁRIO

|  |    |
|--|----|
| <b>1 INTRODUÇÃO</b> .....                            | 7  |
| <b>1.1 Objetivos</b> .....                           | 8  |
| 1.1.1 Objetivo Geral .....                           | 8  |
| 1.1.2 Objetivos Específicos.....                     | 8  |
| <b>1.2 Justificativa</b> .....                       | 8  |
| <b>2 REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....                   | 9  |
| <b>2.1 Aerogel</b> .....                             | 9  |
| <b>2.2 Celulose</b> .....                            | 10 |
| <b>2.3 Estado da arte: aerogel de celulose</b> ..... | 12 |
| <b>3 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO</b> .....             | 15 |
| <b>4 RESULTADOS</b> .....                            | 16 |
| <b>4.1 Adsorção seletiva</b> .....                   | 16 |
| <b>4.2 Filtros</b> .....                             | 18 |
| <b>4.3 Supercapacitor</b> .....                      | 19 |
| <b>4.4 Isolante termico</b> .....                    | 21 |
| <b>4.5 Farmacocinética</b> .....                     | 22 |
| <b>4.6 Implante para substituição óssea</b> .....    | 24 |
| <b>4.7 Isolante acustico</b> .....                   | 25 |
| <b>4.8 Visão geral</b> .....                         | 26 |
| <b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....                  | 27 |
| <b>REFERENCIAIS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....             | 28 |

## 1 INTRODUÇÃO

Celulose é um material de fonte renovável, e o polímero mais abundante na face da terra. Suas características versáteis atraem a atenção para muito estudos envolvendo tratamentos superficiais e biocompatibilidade. Sendo um polímero com ótimas propriedades mecânicas e que possui superfície de fácil alteração química, a celulose abriu caminho para diversas utilizações como matrizes de compósitos e materiais híbridos incluindo aerogéis e hidrogéis. (KLEMM et al., 2011).

A fabricação de matrizes porosas com base em uma matriz já existente na natureza já vem sendo estudada com várias aplicações como catalizadores, fotônicos e em aparelhos eletrônicos (PARIS; BURGERT; FRATZL, 2010). Outra vertente destes estudos é a utilização da própria matriz retirada da natureza como a teia de aranha (HUANG, L. et al., 2003) e madeira (DONG et al., 2002; GUAN; CHENG; WANG, 2018). A vantagem da utilização direta do material natural é que estes podem obter as características necessárias em um projeto vindo de um recurso renovável, ou seja, sua utilização não levaria a uma escassez no futuro.

Qualquer madeira é feita basicamente de celulose, hemicelulose e lignina. As características principais da madeira virão da composição presente dos três elementos. (SEVERO; CALONEGO; SANSÍGOLO, 2006). A estrutura da celulose presente na matriz da madeira a qualifica como um ótimo pretendente para a construção de um adsorvente de óleo. Além da madeira, diversas fontes para obtenção de celulose são encontradas hoje em dia, dentre elas é possível citar, a juta, linho, algodão, entre outros. O Algodão é destaque por possuir maior teor de celulose na composição, atingindo até 96% de sua composição em peso (ANSELL; MWAIKAMBO, 2009).

O presente trabalho apresentará como os estudos sobre aerogéis de celulose vem se desenvolvendo e as possíveis aplicabilidades do material como filtro, implante para substituição óssea, isolante térmico, isolante acústico, entregador de fármacos entre outros.



## **1.1 Objetivos**

O presente trabalho possui os seguintes objetivos:

### **1.1.1 Objetivo Geral**

Reunir e resumir alta carga de conhecimento e estudos sobre aerogel de celulose. Apresentar a aplicabilidade do material em variadas áreas a partir de um material de fonte renovável.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

- Pesquisar estudos a partir das palavras chave “Celulose” e “Aerogel”;
- Recolher e levantar dados sobre as diferentes aplicações de aerogéis de celulose;
- Apresentar as aplicações mais relevantes da atualidade;
- Apresentar futuras possibilidades de aplicações nesta área.

## **1.2 Justificativa**

Originados de fontes renováveis, os aerogéis de celulose oferecem uma alternativa sustentável aos materiais derivados do petróleo. Além disso, apresentam propriedades como biocompatibilidade, biodegradabilidade e capacidade de carga de agentes bioativos, tornando-os adequados para aplicações biomédicas. Com potencial para melhorar o desempenho e a eficiência em setores como energia, construção, eletrônica e meio ambiente, a pesquisa nessa área impulsiona o avanço tecnológico e a busca por soluções mais sustentáveis e eficazes.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Aerogel

Os aerogéis são uma classe de materiais altamente porosos com propriedades únicas, caracterizados por sua densidade extremamente baixa, alta área de superfície e excelentes capacidades de isolamento térmico. Eles são frequentemente chamados de "fumaça congelada" ou "ar sólido" devido à sua natureza translúcida e leve (MAZROUEI-SEBDANI et al., 2021). A Figura 1 apresenta um aerogel em cima de um ramo de trigo sem deformar o ramo de trigo devido a leveza.

Figura 1 - Aerogel exibindo sua baixa densidade em cima de um ramo de trigo.



Fonte: JIANG et al. (2022)

Através da substituição do líquido em um gel por um gás, o primeiro aerogel foi desenvolvido por Kistler. Em sua pesquisa de 1932, Kistler sintetizou um aerogel a partir de um gel de sílica junto a secagem supercrítica, Kistler obteve a estrutura porosa similar ao que tinha na estrutura gel do material. As propriedades do aerogel obtidos na pesquisa apresentaram o potencial para a aplicação de aerogéis espessantes, materiais isolantes, catalisadores, entre outros. O material sintetizado possui alta área superficial, baixa condutividade acústica e térmica, e um grande teor de porosidade. Kistler também obteve as características de ductilidade, flexibilidade mecânica e compactabilidade devido as propriedades deste novo material.(AEGERTER; LEVENTIS; KOEBEL, 2011; KISTLER, 1932)

A formação de aerogéis envolve um processo de duas etapas: síntese sol-gel seguida de secagem supercrítica. A síntese sol-gel começa com a criação de uma suspensão coloidal (sol) por hidrólise e condensação de materiais precursores. Esta etapa é crítica para controlar a composição,

estrutura e porosidade do aerogel. A secagem supercrítica é então realizada para remover o solvente do gel sem colapsar a delicada estrutura porosa. DERVIN e PILLAI, (2017) fornecem uma visão abrangente do processo sol-gel e das técnicas de secagem supercrítica.

Uma das características mais notáveis dos aerogéis é sua densidade excepcionalmente baixa, normalmente variando de 0,001 a 0,5 g/cm<sup>3</sup>. Essa baixa densidade é obtida substituindo o componente líquido do gel por gás, resultando em um material sólido composto principalmente de ar. A alta porosidade e a estrutura de células abertas dos aerogéis contribuem para sua baixa densidade (MAZROUEI-SEBDANI *et al.*, 2021)

Os aerogéis também exibem uma área de superfície excepcionalmente alta, muitas vezes ultrapassando 500 m<sup>2</sup>/g. A alta área superficial é atribuída à estrutura em nanoescala dos aerogéis, consistindo de partículas e poros interconectados. Esta característica única torna os aerogéis altamente desejáveis para várias aplicações, como suportes de catalisadores, adsorventes e dispositivos de armazenamento de energia (WU, Z. Y. *et al.*, 2013)

Outra propriedade notável dos aerogéis é sua excepcional capacidade de isolamento térmico. A baixa condutividade térmica dos aerogéis decorre da combinação de sua alta porosidade e estrutura em nanoescala, o que limita significativamente a transferência de calor por condução. Essa característica torna os aerogéis adequados para isolamento em diversas áreas, incluindo materiais de construção, aeroespacial e janelas com eficiência energética (HUANG, J. *et al.*, 2022)

Como a celulose consegue formar estruturas fibrosas, finas e resistentes ela é ótima para a formação de aerogéis. Os aerogéis de celulose podem ser feitos de diferentes maneiras como por desintegração da celulose, biossíntese de nanofibras de celulose bacteriana, ou por decomposição da madeira (GUAN; CHENG; WANG, 2018; SEHAQUI; ZHOU; BERGLUND, 2011).

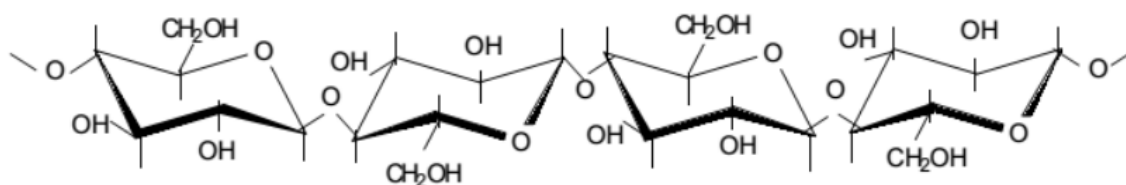
## 2.2 Celulose

A celulose é um carboidrato complexo e o composto orgânico mais abundante encontrado na natureza. É um polissacarídeo linear que consiste em unidades repetidas de glicose unidas por ligações  $\beta$ -1,4-glicosídicas. A celulose é um componente estrutural primário das paredes celulares vegetais e fornece rigidez e resistência aos tecidos vegetais (HEINZE; SEOUD; KOSCHELLA, 2018)

As moléculas de celulose são tipicamente cadeias longas, e o número de unidades de glicose em uma cadeia de celulose pode variar de várias centenas a mais de dez mil. O arranjo dessas cadeias dá origem à natureza cristalina da celulose, o que contribui para sua alta resistência à tração. No entanto, a celulose não é totalmente cristalina e também contém regiões amorfas, que fornecem flexibilidade à estrutura geral (HEINZE; SEOUD; KOSCHELLA, 2018)

Por causa da sua composição e disposição a celulose possui alta resistência, formando ligações de hidrogênio intracelular e intercelular. A cadeia é formada de moléculas de  $\beta$ -D-glucopiranosose assim como mostrado na Figura 2. As hidroxilas e o grupo  $\text{CH}_2\text{OH}$  em cada molécula estão em posição equatorial, isto deixa os átomos de hidrogênio em posições favoráveis para interagir com outras cadeias. Com a soma destas interações o polímero num todo se torna muito resistente mecanicamente. A cristalinidade da celulose é o que favorece a resistência a degradação e ao ataque químico. Os três grupos hidroxilas presentes em cada mero são responsáveis pela semi-cristalinidade final da celulose (LAZZARI, 2017; MACHADO, 2016; OLIVEIRA, 2017).

Figura 2-Estrutura parcialmente linear da celulose.



Fonte: (MACHADO, 2016).

As propriedades únicas da celulose, como sua alta resistência à tração, biodegradabilidade e hidrofiliçidade, a tornam um material valioso com uma ampla gama de aplicações. É comumente usados em indústrias como papel e celulose, têxteis, produtos farmacêuticos e alimentos. Na indústria de papel e celulose, as fibras de celulose são extraídas de fontes vegetais e processadas em vários produtos de papel (HUBBE; HASAN; DUCOSTE, 2011).

A celulose também é utilizada na produção de têxteis, principalmente na forma de fibras de celulose regeneradas, como raiom e liocel. Essas fibras são derivadas da celulose por meio de um processo químico que dissolve a celulose e depois a regenera em fibras. As fibras resultantes exibem propriedades como maciez, absorção e respirabilidade (FELGUEIRAS *et al.*, 2021)

No campo farmacêutico, a celulose é usada como excipiente em formulações de medicamentos, onde atua como aglutinante, desintegrante ou agente de liberação controlada. Sua biocompatibilidade, baixa toxicidade e capacidade de absorver água o tornam um ingrediente adequado para aplicações farmacêuticas (ROWE *et al.*, 2009).

A celulose ganhou atenção significativa como um material renovável e sustentável para embalagens de alimentos devido às suas propriedades excepcionais. Sua biodegradabilidade e notáveis propriedades de barreira contra gases e umidade o tornam uma alternativa atraente e ecológica aos materiais convencionais de embalagem à base de petróleo. (QIAN; CHEN, 2021) fornece uma exploração aprofundada do potencial de materiais à base de celulose em várias aplicações de embalagens de alimentos, destacando sua biodegradabilidade, resistência mecânica e desempenho de barreira.

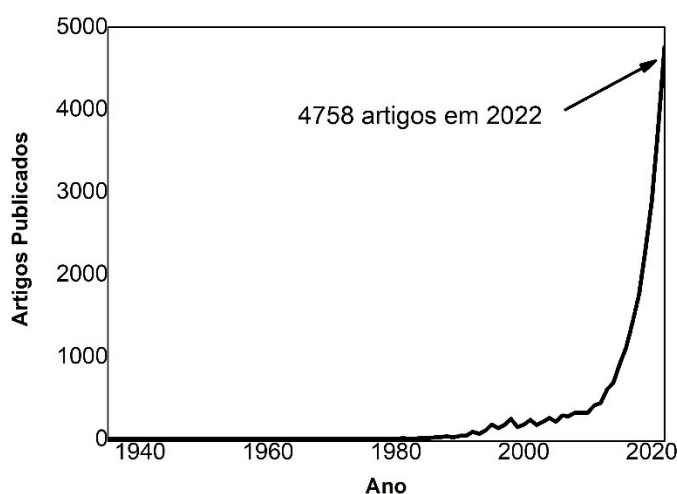
Em resumo, a celulose é um carboidrato complexo que serve como um componente estrutural crucial nas paredes celulares das plantas. Suas propriedades únicas e natureza versátil levaram à sua aplicação em vários

setores, incluindo papel e celulose, têxteis, farmacêuticos e embalagens de alimentos.

### 2.3 Estado da arte: aerogel de celulose

As pesquisas que envolvem aerogel já são realizadas a mais de 90 anos atrás. O documento mais antigo no banco de dados bibliográfica ScienceDirect (2023) data de 1930, e se manteve com baixo número de pesquisas por mais 60 anos. A partir do banco de dados foram gerados os gráficos das Figuras 3, 4 e 5 para melhor visualização. Em 1990 um aumento relativo no número de pesquisas ocorreu, o número chegou a atingir 4758 documentos publicados no ano de 2022 assim como mostra a figura 3. De acordo com os dados do ScienceDirect, até junho de 2023 a base de dados possui 35.062 documentos publicados envolvendo aerogel. Entre os países que lideram as pesquisas sobre aerogel na base de dados, encontramos a China em primeiro lugar (mais de seis mil publicações), Estados Unidos da América, e França respectivamente. O Brasil possui pouco mais que 2% de documentos publicados comparado com a China (ScienceDirect, 2023).

Figura 3 – Artigos publicados por ano sobre aerogel

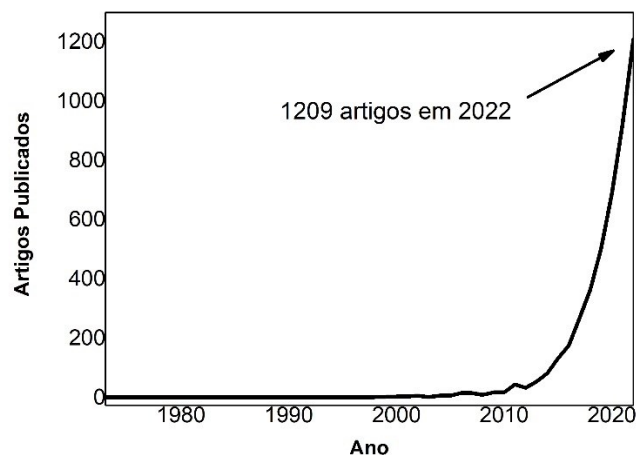


Fonte: Dados atribuídos pela base de dados ScienceDirect (2023). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com>.

Dentro dos estudos de aerogel, estão incluídos os aerogéis de celulose. Com base no ScienceDirect, as pesquisas que envolvem aerogel e celulose começaram a crescer em quantidade perto de 2010 assim como apresentado na Figura 4. De forma relativa aos estudos de apenas aerogel, as pesquisas a respeito de aerogéis de celulose são bem mais recentes, os mesmos apresentam futuro promissor se o aumento de pesquisas continuar aumentando no mesmo ritmo dos últimos anos (ScienceDirect, 2023).

A base de dados da ScienceDirect é a que apresentou o maior número de artigos entre as opções pesquisadas conforme a tabela 1 a seguir.

Figura 4 – Artigos publicados por ano sobre aerogel de celulose.



Fonte: Dados atribuídos pela base de dados ScienceDirect (2023). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com>.

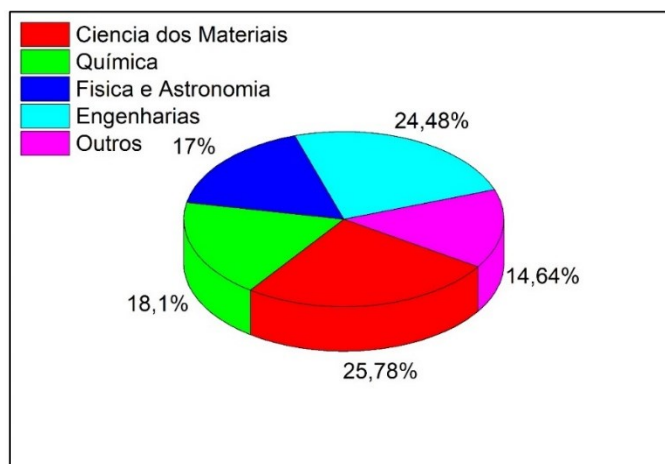
Tabela 1 - Número de artigos publicados em diferentes bases de dados.

| <b>Base de dados</b>       | <b>Número de artigos</b> | <b>Referência:</b>  |
|----------------------------|--------------------------|---|
| ScienceDirect              | 8.003                    | <a href="https://www.elsevier.com/pt-br/solutions/sciencedirect">https://www.elsevier.com/pt-br/solutions/sciencedirect</a>   |
| Berkeley Library           | 4.436                    | <a href="https://www.lib.berkeley.edu">https://www.lib.berkeley.edu</a>   |
| Periódico Capes            | 3.814                    | <a href="https://www-periodicos-capes-gov-br.ez48.periodicos.capes.gov.br/index.php/buscaor-primo.html">https://www-periodicos-capes-gov-br.ez48.periodicos.capes.gov.br/index.php/buscaor-primo.html</a> |
| Royal Society of Chemistry | 1.122                    | <a href="https://pubs.rsc.org">https://pubs.rsc.org</a>   |
| ScienceResearch.com        | 1.317                    | <a href="https://www.scienceresearch.com/scienceresearch/desktop/en/search.html">https://www.scienceresearch.com/scienceresearch/desktop/en/search.html</a>   |
| ACS Publications           | 509                      | <a href="https://pubs.acs.org">https://pubs.acs.org</a>   |
| science.gov                | 262                      | <a href="https://www.science.gov/scigov/desktop/en/results.html">https://www.science.gov/scigov/desktop/en/results.html</a>   |

Fonte:(ACS Publications ,2023); (Berkeley Library ,2023); (Periódico Capes ,2023); (ScienceDirect, 2023); (science.gov, 2023); (ScienceResearch.com ,2023); (Royal Society of chemistry, 2023).

Por fim, de acordo com o banco de dados bibliográfica ScienceDirect (2023), a maior parte das pesquisas já realizadas a respeito de aerogéis de celulose foram feitas na área de ciência de materiais. A distribuição de áreas está apresentada na Figura 5. Por ser um estudo relativamente novo, é de se esperar que a maior quantidade de estudos esteja na área de ciência dos materiais, uma área de desenvolvimento. Em seguida, a área de engenharias segue como a área para o estudo da aplicação do material.

Figura 5 – Áreas de pesquisa de aerogéis de celulose.



Fonte: Dados atribuídos pela base de dados ScienceDirect (2023). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com>.

### **3 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO**

A partir de pesquisas em diferentes bases como ScienceDirect, ACS Publications, Berkeley Library, e ScienceResearch.com, e utilizando as palavras chaves aerogel e celulose, foram pesquisados e recolhidos dados de diferentes pesquisas selecionadas por sua relevância. Os dados recolhidos foram organizados de forma a apresentar as pesquisas no tema até os dias de hoje e os trabalhos mais atuais com suas potenciais aplicabilidades da forma mais variada possível.



## 4 RESULTADOS

A grande diversidade de aplicações possíveis dos aerogéis de celulose é o fator que corrobora com as diferentes áreas em que o material é estudado conforme os dados apresentados até o momento (Figura 5). Dentre as aplicações dos estudos que envolvem o tema, podemos citar a utilização como filtros, isolantes térmicos, isolantes acústicos, adsorção seletiva, implantes, material condutor, entre outros. A Tabela 2 apresenta o número de artigos existentes na base de dados da ScienceDirect em cada aplicação mencionada.

Tabela 2 - Número de artigos com relação a aplicação focada na pesquisa

| <b>Aplicação</b>  | <b>Termos de pesquisa junto com “Aerogel Cellulose”</b> | <b>Número de artigos relacionados</b> |
|-------------------|---|---------------------------------------|
| Adsorção seletiva | Adsorbant; Adsorption                                   | 5.791                                 |
| Filtro            | Filter  | 3.593                                 |
| Super capacitor   | Supercapacitor  | 1,773                                 |
| Isolante térmico  | Thermal Insulation                                      | 1.570                                 |
| Farmacocinética   | Drug delivery   | 1.491                                 |
| Implante          | Implant   | 817                                   |
| Isolante acústico | Acoustic Insulation                                     | 293                                   |

Fonte: Dados atribuídos pela base de dados ScienceDirect (2023). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com>.

Assim como os dados apresentados na Tabela 2, o maior foco de pesquisas para aplicação de aerogéis de celulose são como adsorventes. Das sete aplicações apresentadas, a adsorção seletiva é a aplicação com maior número de pesquisas.

Visto como as aplicações como adsorvente, filtro, super capacitor, isolante térmico, farmacocinética, implante e isolante acústico são os focos de maiores número de estudo, é válido que cada aplicação seja melhor detalhada e descrita no contexto dos aerogéis de celulose. Os diferentes estudos pesquisados e analisados demonstram funcionalidades ou métodos de obtenção da celulose diferentes.

### 4.1 Adsorção seletiva

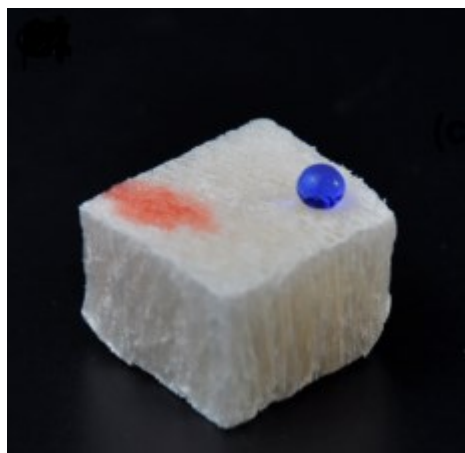
Devido à sua estrutura porosa de alta superfície específica e propriedades de adsorção, os aerogéis de celulose são capazes de reter eficientemente substâncias indesejadas, como poluentes químicos, toxinas e metais pesados, do meio ambiente. Esses aerogéis podem ser funcionalizados e modificados para aumentar sua capacidade de adsorção seletiva, permitindo a remoção de contaminantes específicos. Além disso, sua biocompatibilidade, renovabilidade e baixa toxicidade os tornam uma opção atrativa para aplicações de purificação de água, tratamento de efluentes industriais, remediação ambiental e filtragem de ar. A capacidade dos aerogéis de celulose

como adsorventes eficientes e seletivos abre caminho para o desenvolvimento de soluções sustentáveis e ecologicamente corretas para problemas de poluição e contaminação (SYEDA; YAP, 2022).

Materiais adsorventes de óleo são de grande utilidade para a separação do óleo com a água. Utilizando de matrizes hidrofóbicas com poros grandes e abertos como aerogéis o serviço pode ser realizado, entretanto, dependendo do material utilizado, sua reutilização pode ser comprometida, assim como suas características de adsorção, resistência necessária, e seu processamento. Esponjas de silicone e polímeros sintéticos já foram produzidos visando a adsorção do óleo, porém não possuíam grande resistência ou uma forma de processamento viável (WU, L. et al., 2015; ZHANG, A. et al., 2013)

No trabalho de (GUAN; CHENG; WANG, 2018) o autor aproveita da estrutura natural da madeira para criar um aerogel de celulose, o mesmo realiza tratamentos superficiais para que o aerogel funcione como separador de óleo e água, adsorvendo apenas o óleo em sua superfície. O experimento é iniciando retirando a lignina e hemicelulose de cubos de madeira a partir de banhos em clorito de sódio e hidróxido de sódio respectivamente. Para manter a estrutura do material intacta, o bloco passa pelo processo de liofilização. Com o aerogel de celulose já em mãos, é realizado o tratamento superficial de esterificação utilizando lauroíla, tolueno e piridina. O aerogel finalizado apresentou estrutura lamelar feita com as folhas de celulose e aparência de material altamente poroso, isto indica possível maior área superficial para interação com óleo. A resistência de compressão a 50% de deformação do material foi de 15kPa, e apresentou alta reversibilidade. Por fim, o aerogel também possui grande reusabilidade, mesmo após vários ciclos, o tratamento se demonstrou eficaz para manter adsorvendo óleo, até mesmo para adsorções contínuas. A Figura 6 demonstra o material sintetizado atuando de forma hidrofóbica com a gota azul e adsorvendo o óleo vermelho em sua estrutura.

Figura 6 – Apresentação de aerogel de celulose hidrofóbico com uma gota de água azul e uma gota de óleo vermelha sobre o material.



Fonte: GUAN; CHENG; WANG (2018).

A relevância deste estudo apresentado envolve o crescimento dos possíveis riscos de vazamentos ou derramamentos de óleo no mar são necessárias maneiras para a retirada do óleo de forma mais eficaz e menos invasivas. Com a implementação de um material que interaja apenas com o óleo, o petróleo derramado poderia ser recolhido de forma rápida, sem afetar o ecossistema marinho e ainda poder reutilizar o petróleo. Assim como o exemplo apresentado, esta é uma grande vertente com potencial para desenvolvimento na área ambiental.

## 4.2 Filtros

Vários estudos apresentam a grande potencialidade para a purificação de água principalmente de metais pesados. Como um grande fator para a medição da pureza de água de esgoto é a concentração de metais pesados presentes, diferentes métodos já foram desenvolvidos para este procedimento como eletrocoagulação, co-precipitação, adsorção, entre outros. Dentre os métodos mencionados, poucos se tornam viáveis para concentrações baixas destes metais e para grandes volumes de água, sendo necessário alta quantidade de produtos químicos para o feito. Visando maior economia energética e ambiental, a adsorção se destaca entre estes métodos. Como aerogéis possuem alta porosidade e grande área específica este se torna um grande candidato para a produção de filtros. (LIN; YANG, 2004; ZHOU et al., 2022)

Essa estrutura porosa dos aerogéis de celulose permite a passagem de fluidos e gases, enquanto retém partículas sólidas indesejadas, como poeira, poluentes e microrganismos. Os aerogéis de celulose apresentam alta eficiência de filtração devido à sua grande área superficial e tamanho de poro controlável. Essas características permitem a remoção seletiva de partículas indesejadas, retendo-as nas cavidades dos aerogéis.

(HONG et al., 2021) realizou em uma síntese de um aerogel de polietilenoimina com nanofibrilas de celulose com o propósito de filtrar cobre da água de esgoto. De forma simples, misturando as nanofibrilas com o polímero em meio aquoso em um recipiente cilíndrico, seguido de liofilização, o autor já obtém aerogel. Para maior estabilidade, o aerogel é mergulhado em uma solução com glutaraldeído que atuará como agente ligante. Por fim o material é lavado em água deionizada.

A partir de um MEV o filtro de celulose foi analisado e apresentou morfologia porosa com macroporos próximos de cem micrometros. A quantidade do polietilenoimina adicionado influenciou na área superficial específica do produto final. Com uma quantidade de 0,25 gramas do polímero para 50 gramas da celulose se obteve a maior área superficial quando comparada as outras proporções de polietilenoimina. Acima da 0,25 gramas, o polímero sintético passa a preencher os macroporos presentes na estrutura celulósica. O filtro sintetizado também apresentou excelente recuperação de forma após ser deformado em 70% do comprimento original por compressão. Os testes de

adsorção de  $\text{Cu}^{2+}$  atingiram a adsorção de 135,1 mg/g. Foi constatado que o aumento do teor do polímero sintético resultava em maior adsorção do íon de cobre até 1 grama de polietilenoimina, acima disto a falta de área superficial resultou em perda de capacidade adsorviva (HONG et al., 2021). A Figura 7 apresenta a mudança estética do aerogel sintetizado com diferentes teores do polímero.

O estudo de Hong apresenta aplicabilidade do aerogel de celulose no tratamento de efluentes de indústrias que liberam fluidos ricos em cobre. Com o enfoque ambiental, o material criado pode ser reutilizado e cumprir seu papel como elemento filtrante, sendo sintetizado de forma simples e já no formato necessário.

Esta aplicação pode ser ampliada quando discutimos diferentes tratamentos do aerogel, diversidade de tratamentos abrem o caminho para diferentes tipos de filtro, outro exemplo que pode ser citado são filtros de matéria particulada para limpeza do ar (SEPAHVAND et al., 2022; SUN et al., 2023).

Figura 7 – Filtros produzidos por Hong com diferentes gramas de Polietilenoimina.



Fonte: HONG et al. (2021)

### 4.3 Supercapacitor

Os aerogéis de celulose têm sido estudados e utilizados como materiais promissores para aplicações em supercapacitores. Os supercapacitores são dispositivos de armazenamento de energia que têm a capacidade de armazenar e liberar energia de forma rápida e eficiente. Os aerogéis de celulose possuem uma estrutura porosa tridimensional que proporciona uma grande área superficial e uma excelente condutividade iônica, características importantes para a eficiência dos supercapacitores (NARGATTI et al., 2022).

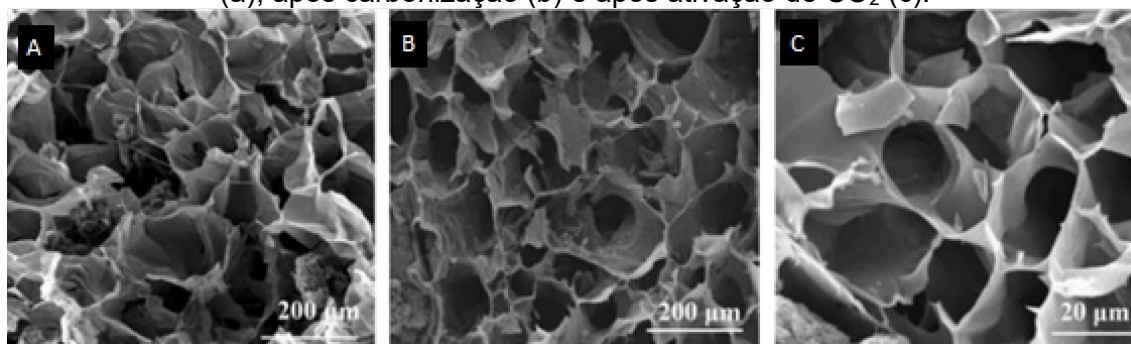
Apesar das ótimas características da celulose, na maior parte dos estudos encontrados, o aerogel de celulose é usado apenas como uma base para criação do supercapacitor. A estrutura com paredes muito finas de celulose podem ser carbonizadas e deixando uma estrutura de carbono para ser utilizada como supercapacitor (ZHANG, C. et al., 2022).

(LEI et al., 2021) realiza em sua pesquisa a produção de supercapacitores a partir de um aerogel de celulose que foi liofilizado junto com polipirrol. Após a carbonização em uma atmosfera de  $\text{N}_2$  do material, restou

uma estrutura de carbono com átomos de nitrogênio ligados na estrutura. O motivo da incorporação do nitrogênio é que a introdução de heteroátomos em materiais de carbono aumenta o desempenho da capacitância do material (MENG et al., 2017). A inclusão de átomos de nitrogênio dopados em carbonos  $sp^2$  hibridizados tem o potencial de modificar as características químicas desses materiais. Isso resulta em uma interface mais molhável entre os eletrólitos e os eletrodos, o que por sua vez facilita a transferência de elétrons e permite a contribuição faradaica. Esses efeitos combinados contribuem para a melhoria do desempenho dos supercapacitores (INAGAKI et al., 2018; SONG et al., 2014).

A Figura 8 (a) apresenta a microscopia de varredura eletrônica do aerogel de celulose feito por LEI et al. (2021). A morfologia dos poros em formato de colmeia se dá por conta dos cristais hexagonais que são formados quando a água é congelada para o processo de freeze-dry, e assim como apresentado em (c) a morfologia se mantém após a carbonização e após ativação com  $CO_2$ . Os poros formados possuem o diâmetro médio entre 15 e 30 micrometros.

Figura 8 - Microscopia eletrônica de varredura para amostras de aerogel de celulose (a), após carbonização (b) e após ativação de  $CO_2$  (c).



Fonte: Adaptado de LEI et al. (2021)

Por fim, LEI et al. (2021) apresenta que o apenas o material carbonizado atingiu a capacitância de  $87,6 \text{ F.g}^{-1}$  enquanto o material com Nitrogênio e ativado por  $CO_2$  apresentou maior capacitância, atingindo  $144 \text{ F.g}^{-1}$ . A maior capacitância apresentada foi de  $160 \text{ F.g}^{-1}$ . As curvas de voltametria cíclica do material apresentaram formatos quase retangulares (comportamentos de capacitores de camada elétrica dupla), e as linhas são consistentes, e simétricas, indicando que não possui queda de voltagem. O autor explica esta boa performance por conta do material possuir camadas muito finas sem muito excesso de material preso nas paredes do aerogel (possível ser visto ao comparar (b) e (d) na Figura 8), isto contribui para menor resistência interna do material.

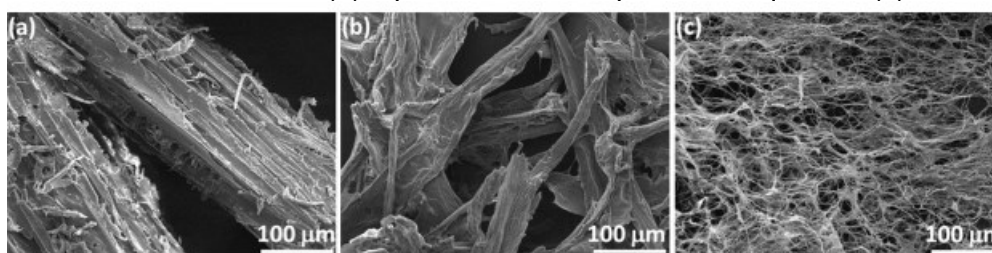
Em resumo, os aerogéis de celulose são materiais promissores para serem utilizados como supercapacitores devido às suas propriedades estruturais, e possibilidade de carbonização. A contínua pesquisa e desenvolvimento nessa área podem levar a avanços significativos no armazenamento de energia e na eficiência dos dispositivos eletroquímicos.

#### 4.4 Isolante termico

Os aerogéis surgiram como materiais promissores para o isolamento térmico devido às suas estruturas sólidas nano porosas obtidas a partir de materiais em gel (PÄÄKKÖ et al., 2008). Nos últimos 90 anos, muitos grupos de pesquisa têm se dedicado principalmente aos aerogéis à base de sílica para várias aplicações. Após a invenção dos aerogéis de sílica, o Kennedy Space Center e o Glenn Research Center da NASA têm desenvolvido diversos aerogéis específicos, incluindo para radiadores de Cherenkov, isolamento térmico em condições criogênicas e de alta temperatura para lançamentos espaciais, equipamentos de suporte à vida e trajes espaciais (FESMIRE, 2006). No entanto, os aerogéis de SiO<sub>2</sub> têm limitações devido à sua fragilidade e ao processo complexo de fabricação. Portanto, é necessário desenvolver aerogéis com alta resistência mecânica e baixa condutividade térmica para atender às demandas práticas. O isolamento térmico é uma das principais utilidades dos aerogéis, sendo essencial a síntese de um aerogel com baixa densidade e alta resistência. O aerogel, com sua baixa massa específica, deve ser flexível e forte o bastante para suportar cargas elevadas.

No estudo de GUPTA et al. (2018), aerogéis de celulose são produzidos com diferentes teores de celulose/ar em sua estrutura para avaliar a condutividade térmica. A princípio, nanofibras de celulose são extraídas da madeira de pinheiro após um processo de moer a madeira e purificar o material em uma solução com álcool, seguida por um banho em uma solução acidificada de cloreto de sódio, por fim o material é realizado a liofilização de uma solução coloidal com as partículas de celulose. O processo de moer e purificar resulta em fibras com diâmetros entre 25 e 35nm mostradas na Figura 9.

Figura 9 - Imagens de MEV obtidas para a amostra de pinheiro (a), para a amostra lavada em álcool (b) e para a amostra após banho químico (c).



Fonte: GUPTA et al. (2018)

GUPTA et al. (2018) apresenta que atingiu a condutividade térmica de 25,5 mW/mK e densidade de 11,9 kg/m<sup>3</sup> em um ponto de concentração de celulose de 100% o peso da água utilizada na solução coloidal. Comparando com as outras amostras, o aumento da concentração de celulose resulta no aumento da condutividade térmica, pois, a densidade e o tamanho dos poros aumentam junto na amostra. Para amostras com menor concentração o tamanho dos poros teve uma drástica redução em seu tamanho, e apesar da amostra como um todo ter menor densidade, ela conduziu mais calor. A explicação é de que os poros se tornam tão pequenos que o diâmetro do poro

é menor que o valor de caminho livre das moléculas que compõe o ar, e isto resulta em uma condutividade térmica maior. Por fim, a condutividade térmica obtida é menor que muitos produtos disponíveis comercialmente como espumas de poliuretano, cortiça e lã de vidro(AL-HOMOUD, 2005).

Diferentes tipos de fabricação dos aerogéis resultam em diferentes condutividades térmicas por conta das variadas morfologias, distribuições de tamanho e densidades dos poros que se obtém através de cada processo. Outras pesquisas como as de CHEN, W. et al. (2011) e KOBAYASHI; SAITO; ISOGAI (2014) Chegam a atingir valores menores de condutividade térmica, entretanto, através de processos mais custosos e trabalhosos.

Os aerogéis de celulose são compostos por uma rede tridimensional de nanofibrilas de celulose interconectadas, que fornecem uma estrutura de baixa densidade com uma alta proporção de ar. Isso resulta em um material com altíssima capacidade de reter o ar e inibir a transferência de calor por condução. Sua versatilidade permite sua aplicação em diferentes setores, como construção civil, indústria automotiva, eletrônica e até mesmo em trajes espaciais. Com a crescente demanda por soluções de eficiência energética e sustentabilidade, os aerogéis de celulose surgem como uma opção promissora para o isolamento térmico, contribuindo para a redução do consumo de energia e a mitigação das mudanças climáticas.

#### **4.5 Farmacocinética**

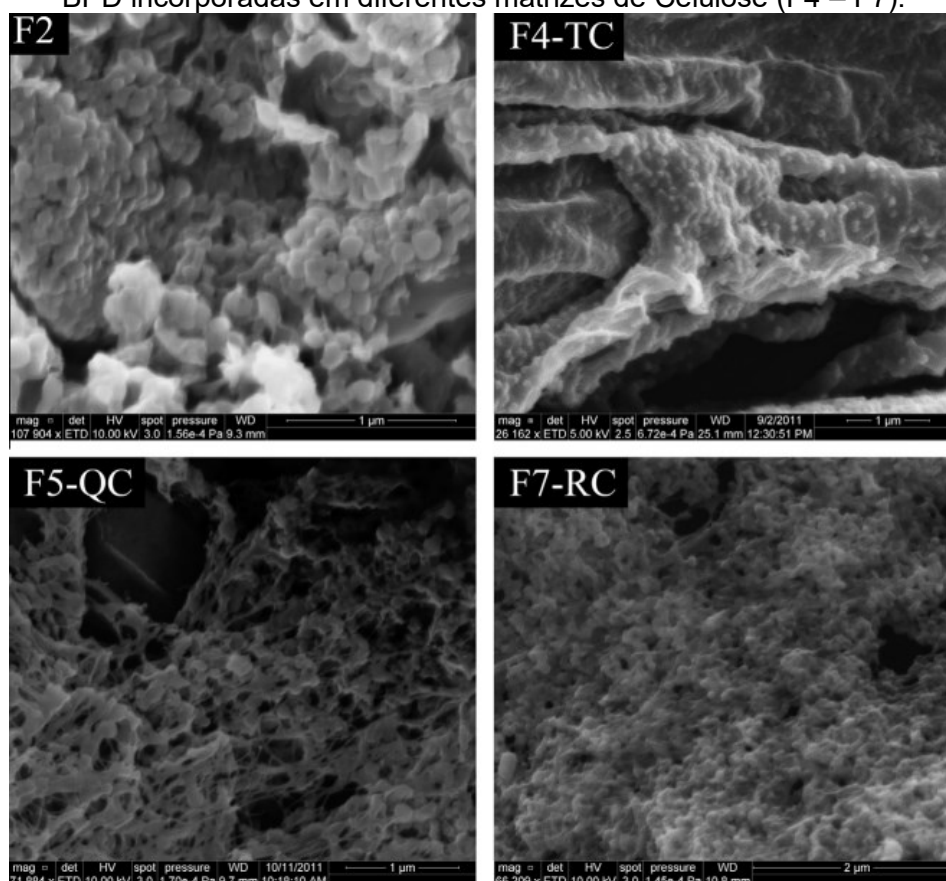
A indústria farmacêutica está constantemente enfrentando desafios tecnológicos e oportunidades de produtos inovadores devido à rápida mudança do cenário de mercado. Atualmente, os excipientes estão sendo utilizados de forma diferente na indústria farmacêutica, deixando de desempenhar apenas uma função auxiliar tradicional nas formulações para assumir um papel ativo na melhoria do desempenho dos medicamentos em termos de estabilidade, liberação e biodisponibilidade. Essa evolução dos excipientes reflete a busca por soluções que possam melhorar a eficácia e a qualidade dos medicamentos disponíveis.(BENEKE; VILJOEN; HAMMAN, 2009)

Os aerogéis de celulose, que são materiais ultraleves e altamente porosos, têm sido utilizados em aplicações biomédicas como de liberação de medicamentos, engenharia de tecidos e cicatrização de feridas devido à sua biocompatibilidade e biodegradabilidade. No entanto, estes aerogéis frequentemente enfrentam desafios relacionados às suas propriedades mecânicas e métodos de processamento de fibras subdesenvolvidos, restringindo sua forma a monólitos, cilindros e micropartículas.(ROSTAMITABAR et al., 2021)

No estudo de (VALO et al., 2013a) amostras de aerogel de celulose são produzidas de diferentes maneiras e incorporadas com partículas de Dipropionato de Beclometasona (BDP). Na pesquisa, os aerogéis são produzidos a partir de um banho em pH básico do tecido da pimenta vermelha e da semente do marmelo, seguido por lavagens do material e por fim a

liofilização do material. Os resultados do estudo revelam que, apesar da similaridade química entre os materiais de celulose, a utilização deles como matrizes para nanopartículas de medicamentos resultou em perfis de liberação distintos. A origem das nanofibrilas de celulose, provenientes de diferentes fontes, pode influenciar na liberação imediata ou sustentada do medicamento, o que deve ser considerado nas pesquisas de formulação. No procedimento, os dois fatores determinantes para o comportamento de dissolução dos aérogéis/partícula eram a força de ligação entre o aerogel com as partículas do fármaco e a facilidade de a água penetrar o material. Os aerogéis produzidos a partir de pimenta vermelha tiveram fraca interação com as partículas enquanto as amostras produzidas a partir das sementes de marmelo tiveram maior interação devido suas morfologias, isto resultou que a liberação do fármaco nas amostras vindo do marmelo é mais lenta que as outras amostras. A Figura 10 apresenta as imagens obtidas por microscopia de varredura eletrônica das amostras compostas apenas por partículas de BDP (F2) e por partículas de BDP no aerogel de celulose, vindos da pimenta vermelha (F7), marmelo (F5) e celulose nanofibrilar de bétula oxidada com TEMPO (2,2,6,6-Tetrametilpiperidinil-1-oxilo) (F4).

Figura 10 – MEV das nanopartículas de BPD sem Celulose (F2), e das partículas de BPD incorporadas em diferentes matrizes de Celulose (F4 – F7).



Fonte: SYEDA; YAP (2022)

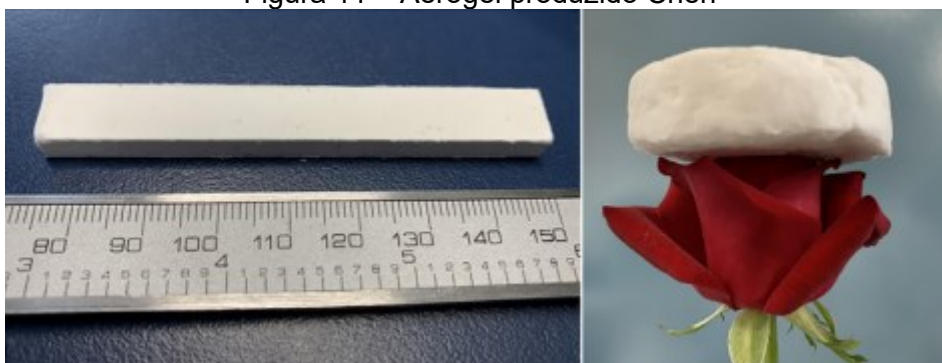
Esses biomateriais versáteis têm demonstrado grande utilidade em uma ampla gama de aplicações farmacêuticas relacionadas a nanopartículas, bem como na entrega controlada de medicamentos.



## 4.6 Implante

Compósitos com matrizes de aerogel biopoliméricos e carga inorgânica tem recebido maior atenção no estudo da engenharia de ossos, e um grande limitante para aerogéis de biomaterial são sua fragilidade e falta de resistência quando aplicados como implantes (SALEEM; RASHEED; YOUNG, 2020; XU et al., 2019).

Figura 11 – Aerogel produzido Chen



Fonte: CHEN, Z. J. et al. (2021)

Uma solução para a otimização destes materiais no âmbito de utilizá-los como prótese é a confecção de compósitos. No trabalho de (CHEN, Z. J. et al., 2021) é desenvolvido um compósito de fibras de celulose de algodão, fibroína e nano-hidroxiapatita (n-HA). O processo constituiu de desgomar a fibroína em solução de NaOH com ureia e adicionar n-HA precipitada com celulose de algodão (já higienizada) e epícloridrina, a mistura é homogeneizada e lavada água deionizada várias vezes e depois utilizando álcool. Até este ponto o material está em estado de hidrogel, por fim é realizado o processo de liofilização restando o Aerogel final. A partir de um microscópio eletrônico de varredura (MEV), o produto final apresentou estrutura fibrosa e irregular. A estrutura da celulose apresentada por meio de MEV é favorável para receber a carga polimérica devido sua estrutura fibrosa, porosa e irregular. Quanto ao compósito final, a análise demonstrou que o n-HA se aderiu tanto a celulose quanto a completa superfície do compósito, gerando uma grossa camada polimérica que estabiliza a estrutura em um todo. Com a proporção adequada, o compósito chegou a apresentar 7,73 e 25,91 Mpa de resistência a tração e resistência a flexão respectivamente. O autor afirma que estes resultados estão dentro dos parâmetros de comportamento de ossos esponjosos naturais. Tanto Chen no presente trabalho quanto Birnbaum em seu trabalho de 2002 (BIRNBAUM et al., 2002) informam como é importante que a resistência do implante seja similar ao do osso natural para que não ocorra desgaste das juntas e também não ocorra rompimento do próprio componente artificial. O estudo finaliza apresentando resultados de absorvância para avaliar o crescimento e a viabilidade (manter as células vivas) do compósito. O componente apresenta compatibilidade extremamente similar quando comparada uma amostra de controle. Através de testes de absorvância se verificou que o crescimento celular no compósito foi igual ou pouco maior que o

controle. O compósito também não apresentou motivos para morte celular, o qualificando como apto para implantes. A Figura 11 apresenta o aerogel produzido por CHEN et al. em 2021 para este estudo.

A importância deste tipo de estudo é demonstrar a aplicabilidade e relevância de estudos relacionados aos aerogéis de celulose na área da saúde. Um material biocompatível que apresenta resistência similar do osso esponjoso e ainda possui baixa densidade garante grandes possibilidades para desenvolvimento para atingir maior conforto e acessibilidade para a utilização de implantes.

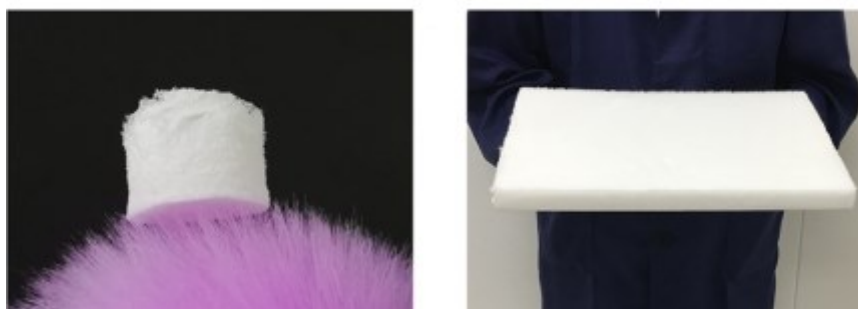
#### 4.7 Isolante acústico

Um tipo de poluição presente nos dias atuais é a poluição sonora, suas origens podem vir de variadas fontes tanto na esfera doméstica quanto no ambiente de trabalho. A exposição por longos períodos de tempo a este tipo de poluição podem levar a doenças físicas e distúrbios psiquiátricos (JØRGENSEN et al., 2019).

Apesar de abafadores e isolantes de som já existirem e a maioria deles serem de materiais fibrosos, grande parte deles absorvem apenas ondas sonoras de alta frequência, isto ocorre por conta do grande diâmetro da fibra que estes materiais possuem, a falta de área superficial e tortuosidade diminuem a absorção térmica e viscosa da energia sonora. No fim a utilidade destes isolantes se limita a absorção de ondas com maiores frequências, enquanto no dia a dia a exposição a poluição sonora é maior para ondas de baixa e média frequência. (DUNNE; DESAI; SADIKU, 2017)

No estudo de (CAO et al., 2021) é produzido um aerogel compósito com nanocristais de celulose entrelaçado com nanofibras de poliácridonitrila (PAN). Através de simples processos de homogeneização dos componentes mencionados e um agente ligante em meio aquoso seguido de liofilização foi possível obter o aerogel. Para o melhor proveito do agente ligante o aerogel ainda passou por um curto tratamento térmico. Para a absorção das diferentes frequências de onda sonora, lamelas destes aerogel foram produzidas com diferentes teores em peso dos nanocristais de celulose e dispostos sequencialmente. O aumento do teor de celulose na estrutura apresentou maior absorção de ondas de menor frequência devido a grande complexidade do caminho que a onda sonora precisa atravessar para ultrapassar o compósito. O aerogel produzido também possui baixa densidade, atingindo seu máximo de  $11,05 \text{ mg.cm}^{-3}$  com o maior teor de celulose. Por fim o material apresentou módulos elásticos que variam entre 2,8 a 8,59 kPa dependendo da carga de celulose utilizada, e resiliência para até 100 ciclos com compressão de 60% de seu comprimento. As características mecânicas robustas do compósito possibilitam que o mesmo seja adaptado para diferentes formatos e em larga escala, o que salienta sua alta aplicabilidade para diferentes situações (CAO et al., 2021). A Figura 12 apresenta o aerogel produzido no estudo.

Figura 12 - Aerogel isolante acústico produzido por Cao



Fonte: CAO et al. (2021)

O estudo mencionado salienta a aplicabilidade de aerogéis de celulose para conforto, bem estar, segurança e até mesmo mais um ponto para ser adicionado na área da saúde. O aerogel feito por Cao não apenas apresentou vedação sonora como apresentou resistência para ser moldado e manter a forma como necessário, assim como baixa densidade diminuindo as chances de comprometer um projeto por excesso de peso.

#### 4.8 Visão geral

A seguir foi elaborado um resumo em formato de tabela com mais aplicações e diferentes modos de preparo de aerogéis de celulose. O ponto deste levantamento é demonstrar que mesmo com as aplicações já mencionadas neste trabalho, ainda existe uma vasta gama de aplicações e meios de obtenção deste aerogéis junto com diferentes maneiras para síntese do material.

Tabela 3 - Lista de aplicações e propriedades de diferentes aerogéis contendo celulose.

| Material   | Reagente para tratamento superficial | Modo de preparo          | Modulo       | Densidade (g/cm <sup>3</sup> ) | Porosidade de % | Area superficial específica m <sup>2</sup> /g | Aplicação                   | Referência                        |
|--|--------------------------------------|--------------------------|--------------|--------------------------------|-----------------|---|-----------------------------|-----------------------------------|
| Nanocristal de celulose                              | Ácido Carboxílico                    | Acid - Gelation          | 40 - 900 kPa | 0,004 - 0,04                   | 98,1 - 99,7     | 500-600                                       | Isolante termico            | (KOBAYASHI; SAITO; ISOGAI, 2014a) |
| Nanocristal de celulose                              | Acetila                              | Liofização               |              | 0,0034                         |                 |   | Absorvente de Óleo          | (ABRAHAM et al., 2017)            |
| Nanofibrila de Celulose                              | Hidroxila ou ácido carboxílico       | Liofização               |              |                                |                 |   | Distribuição de medicamento | (VALO et al., 2013b)              |
| Nanofibrila de Celulose                              | Não especificado                     | Substituição de Solvente | 6 Gpa        | 0,6                            |                 | 208   | Filtro de gás               | (TOIVONEN et al., 2015)           |
| Nanofibrila de Celulose                              | Hidroxila                            | Liofização               |              |                                |                 | 103 - 1873                                    | Super capacitor             | (ZU et al., 2016)                 |
| Polipirrol e Nanofibrila de Celulose                 | Ácido Carboxílico                    | Liofização               | 0,51 Gpa     | 1,47                           | 30 - 98         | 1 - 246                                       | Material condutor           | (CARLSSON et al., 2012)           |
| Polymethylsilise squioxane e Nanofibrila de celulose | Hidroxila                            | Curado com calor         |              | 0,02 - 0,186                   |                 | 525 - 732                                     | Isolante termico            | (HAYASE et al., 2014)             |

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os estudos aqui apresentados demonstraram como é vasta a aplicação de aerogeis a base de celulose.

As bases utilizadas para pesquisa dos trabalhos aqui apresentados demonstraram preferência para ramos que envolvem saúde, bem estar e meio ambiente para aplicação dos aérogeis, visto que todos estudos aqui descritos se encaixam nestas categorias. A escolha das aplicações foi feita por base de sua relevância e maior número de documentos existentes. A relevância dos estudos neste ramo não exclui a grande aplicabilidade deste tipo de material em outros setores, assim como é mostrado na Tabela 3. A pesquisa apresentou que o maior enfoque de aplicação atualmente para aerogéis de celulose são como adsorventes seletivos, seguido de filtros e super capacitores.

Um ponto em comum encontrado ao realizar o levantamento, é que a grande parte destes estudos estão em estágio inicial, ainda sendo estudado características intrínsecas do material. Mesmo que este seja sim o ponto inicial para o desenvolvimento de qualquer projeto, poucas foram as pesquisas que já incluíam o aerogel de celulose na aplicação final, ou então que melhorava o a eficácia da fabricação do mesmo. Uma razão para a falta de estudos da utilização dos aérogeis no estágio final estaria relacionada ao quão relativamente novo o assunto é, e também relacionada a falta de estudos que otimizem a produção do material em escala comercial. Outro ponto de extrema importância são os desafios relacionados às suas propriedades mecânicas e métodos de processamento de fibras subdesenvolvidos, restringindo sua forma dos aerogéis a monólitos, cilindros e micropartículas.

Por fim, quando se leva em consideração escassez de matéria prima, materiais como a celulose que é de fonte renovável se apresenta como ótimo substituto em todas áreas apresentadas, com o aumento de estudos e pesquisas desta categoria de materiais outros recursos podem se tornar mais viáveis e disponíveis à população, principalmente levando em conta as áreas que tiveram maior enfoque (Saúde, bem-estar e meio ambiente).

## REFERENCIAIS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAHAM, E. et al. Multifunctional cellulosic scaffolds from modified cellulose nanocrystals. **ACS Applied Materials and Interfaces**, v. 9, n. 3, p. 2010–2015, 2017.

**ACS Publications**. Disponível em: <<https://pubs.acs.org>>. Acesso em: 11 jun. 2023.

AEGERTER, M. A.; LEVENTIS, N.; KOEBEL, M. M. **Aerogels handbook**. [S.l.]: Springer, 2011.

AL-HOMOUD, M. S. Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials. **Building and Environment**, v. 40, n. 3, p. 353–366, mar. 2005.

ANSELL, M. P.; MWAIKAMBO, L. Y. The structure of cotton and other plant fibres. [S.l.]: **Woodhead Publishing Limited**, 2009. v. 2.

BENEKE, C. E.; VILJOEN, A. M.; HAMMAN, J. H. Polymeric plant-derived excipients in drug delivery. **Molecules**. [S.l.: s.n.], jul. 2009

**Berkeley Library**. Disponível em: <<https://www.lib.berkeley.edu>>. Acesso em: 11 jun. 2023.

BIRNBAUM, K. et al. Material properties of trabecular bone structures. **Surgical and Radiologic Anatomy**, v. 23, n. 6, p. 399–407, 2002.

CAO, L. et al. Hierarchically maze-like structured nanofiber aerogels for effective low-frequency sound absorption. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 597, p. 21–28, 2021.

CARLSSON, D. O. et al. Electroactive nanofibrillated cellulose aerogel composites with tunable structural and electrochemical properties. **Journal of Materials Chemistry**, v. 22, n. 36, p. 19014–19024, 2012.

CHEN, W. et al. Ultralight and highly flexible aerogels with long cellulose I nanofibers. **Soft Matter**, v. 7, n. 21, p. 10360, 18 out. 2011. Disponível em: <<http://xlink.rsc.org/?DOI=c1sm06179h>>. Acesso em: 13 jun. 2023.

CHEN, Z. J. et al. A new cancellous bone material of silk fibroin/cellulose dual network composite aerogel reinforced by nano-hydroxyapatite filler. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 182, p. 286–297, 2021.

DERVIN, S.; PILLAI, S. C. An Introduction to Sol-Gel Processing for Aerogels. **Materials and Technologies**. 2017. p. 1–22.

DONG, A. et al. Zeolitic Tissue Through Wood Cell Templating. **Advanced Materials**, v. 14, n. 12, p. 926, 18 jun. 2002.

DUNNE, R.; DESAI, D.; SADIKU, R. A Review of the Factors that Influence Sound Absorption and the Available Empirical Models for Fibrous Materials. **Acoustics Australia**, v. 45, n. 2, p. 453–469, 2017.

FELGUEIRAS, C. et al. Trends on the Cellulose-Based Textiles: Raw Materials and Technologies. **Frontiers in Bioengineering and Biotechnology**, v. 9, p. 202, 29 mar. 2021. Disponível em: <<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fbioe.2021.608826/full>>. Acesso em: 1 jun. 2023.

FESMIRE, J. E. Aerogel insulation systems for space launch applications. **Cryogenics**. 2006, fev. 2006. p. 111–117.

GUAN, H.; CHENG, Z.; WANG, X. Highly Compressible Wood Sponges with a Spring-like Lamellar Structure as Effective and Reusable Oil Absorbents. **ACS Applied Materials and Interfaces**, v. 12, n. 10, p. 10365–10373, 2018.

GUPTA, P. et al. Low density and high strength nanofibrillated cellulose aerogel for thermal insulation application. **Materials and Design**, v. 158, p. 224–236, 15 nov. 2018.

HAYASE, G. et al. Polymethylsilsesquioxane-cellulose nanofiber biocomposite aerogels with high thermal insulation, bendability, and superhydrophobicity. **ACS Applied Materials and Interfaces**, v. 6, n. 12, p. 9466–9471, 2014.

HEINZE, T.; SEOUD, O. A. EL; KOSCHELLA, A. **Cellulose Derivatives Synthesis, Structure, and Properties**. . [S.l: s.n.], [S.d.]. Disponível em: <<http://www.springer.com/series/13173>>.

HONG, H. J. et al. Fabrication of cylindrical 3D cellulose nanofibril(CNF) aerogel for continuous removal of copper(Cu<sup>2+</sup>) from wastewater. **Chemosphere**, v. 278, p. 130288, 2021.

HUANG, J. et al. Eco-friendly thermally insulating cellulose aerogels with exceptional flame retardancy, mechanical property and thermal stability. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, v. 131, 1 fev. 2022.

HUANG, L. et al. Single-strand spider silk templating for the formation of hierarchically ordered hollow mesoporous silica fibers. **Journal of Materials Chemistry**, v. 13, n. 4, p. 666–668, 19 mar. 2003.

HUBBE, M. A.; HASAN, S. H.; DUCOSTE, J. J. Cellulosic substrates for removal of pollutants from aqueous systems: A review. 1. **Metals. BioResources**. [S.l: s.n.], 2011.

INAGAKI, M. et al. Nitrogen-doped carbon materials. **Carbon**. [S.l.]: Elsevier Ltd. , 1 jun. 2018

JIANG, X. et al. Chitosan/clay aerogel: Microstructural evolution, flame resistance and sound absorption. **Applied Clay Science**, v. 228, 1 out. 2022.

- JØRGENSEN, J. T. et al. Long-term exposure to road traffic noise and incidence of diabetes in the danish nurse cohort. **Environmental Health Perspectives**, v. 127, n. 5, p. 1–9, 2019.
- KISTLER, S. S. Coherent expanded aerogels. **Journal of Physical Chemistry**, v. 36, n. 1, p. 52–64, 1932.
- KLEMM, D. et al. Nanocelluloses: A new family of nature-based materials. **Angewandte Chemie - International Edition**, v. 50, n. 24, p. 5438–5466, 2011.
- KOBAYASHI, Y.; SAITO, T.; ISOGAI, A. Aerogels with 3D ordered nanofiber skeletons of liquid-crystalline nanocellulose derivatives as tough and transparent insulators. **Angewandte Chemie (International ed. in English)**, v. 53, n. 39, p. 10394–10397, 2014a.
- KOBAYASHI, Y.; SAITO, T.; ISOGAI, A. Aerogels with 3D ordered nanofiber skeletons of liquid-crystalline nanocellulose derivatives as tough and transparent insulators. **Angewandte Chemie (International ed. in English)**, v. 53, n. 39, p. 10394–10397, 22 set. 2014b.
- LAZZARI, L. K. **Produção e caracterização de criogéis de celulose pinus elliottii para a adsorção de petróleo**. 2017. 105 f. Universidade de caxias do sul área do conhecimento de ciências exatas e engenharia programa de pós-graduação em engenharia de processos e tecnologias, Caxias do Sul, 2017.
- LEI, E. et al. N-doped cellulose-based carbon aerogels with a honeycomb-like structure for high-performance supercapacitors. **Journal of Energy Storage**, v. 38, 1 jun. 2021.
- LIN, S. H.; YANG, C. R. Chemical and physical treatments of chemical mechanical polishing wastewater from semiconductor fabrication. **Journal of Hazardous Materials**, v. 108, n. 1–2, p. 103–109, 2004.
- MACHADO, S. F. **Propriedades tecnológicas das madeiras de melia azedarach l., cordia americana (l) gottshling j. S. Mill. E parapiptadenia rigida benth submetidas à biodegradação**. 2016. 92 f. Universidade Federal de Santa Maria, 2016.
- MAZROUEI-SEBDANI, Z. et al. A review on silica aerogel-based materials for acoustic applications. **Journal of Non-Crystalline Solids**, v. 562, n. March, p. 120770, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2021.120770>>.
- MENG, Q. et al. Research progress on conducting polymer based supercapacitor electrode materials. **Nano Energy**. [S.l.]: Elsevier Ltd. , 1 jun. 2017
- NARGATTI, K. I. et al. Nanocellulose-based aerogel electrodes for supercapacitors: A review. **Carbohydrate Polymers**. [S.l.]: Elsevier Ltd. , 1 dez. 2022

OLIVEIRA, P. B. DE. **Produção de aerogel a partir de nanofibras de celulose obtidas de resíduos da indústria moveleira (pinus elliottii var. Elliottii) para sorção de óleos**. 2017. 102 f. Universidade de caxias do sul, 2017.

PÄÄKKÖ, M. et al. Long and entangled native cellulose I nanofibers allow flexible aerogels and hierarchically porous templates for functionalities. **Soft Matter**, v. 4, n. 12, p. 2492, 11 nov. 2008. Disponível em: <<http://xlink.rsc.org/?DOI=b810371b>>. Acesso em: 13 jun. 2023.

PARIS, O.; BURGERT, I.; FRATZL, P. Biomimetics and Biotemplating of Natural Materials. **MRS Bulletin**, v. 35, n. 3, p. 219–225, 31 mar. 2010.

**Periódico Capes**. Disponível em: <<https://www-periodicos-capes-gov-br.ez48.periodicos.capes.gov.br/index.php/buscaador-primo.html>>. Acesso em: 11 jun. 2023.

QIAN, L.; CHEN, G. Q. Sustainable and Renewable Food Packaging Materials from Cellulose: A Review. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 9, n. 2, p. 393–409, 2021.

ROSTAMITABAR, M. et al. Cellulose aerogel micro fibers for drug delivery applications. **Materials Science and Engineering C**, v. 127, 1 ago. 2021.

ROWE, R. C. et al. **Handbook of pharmaceutical excipients**. [S.l.]: APhA/Pharmaceutical Press, 2009. Disponível em: <<https://libgen.is/book/index.php?md5=5D28C6C11B708D7CCCD58BEE0F372236>>. Acesso em: 28 maio 2023.

**Royal Society of chemistry**. Disponível em: <<https://pubs.rsc.org>>. Acesso em: 12 jun. 2023.

SALEEM, M.; RASHEED, S.; YOUNG, C. Silk fibroin/hydroxyapatite scaffold: a highly compatible material for bone regeneration. **Science and Technology of Advanced Materials**, v. 21, n. 1, p. 242–266, 2020.

**ScienceDirect**. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com>>. Acesso em: 11 jun. 2023.

**science.gov**. Disponível em: <<https://www.science.gov/scigov/desktop/en/results.html>>. Acesso em: 11 jun. 2023.

**ScienceResearch.com**. Disponível em: <<https://www.scienceresearch.com/scienceresearch/desktop/en/search.html>>. Acesso em: 11 jun. 2023.

SEHAQUI, H.; ZHOU, Q.; BERGLUND, L. A. High-porosity aerogels of high specific surface area prepared from nanofibrillated cellulose (NFC). **Composites Science and Technology**, v. 71, p. 1593–1599, 2011.

SEPAHVAND, S. et al. Modified cellulose nanofibers aerogels as a novel air filters; Synthesis and performance evaluation. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 203, p. 601–609, 1 abr. 2022.



- SEVERO, E. T. D.; CALONEGO, F. W.; SANSÍGOLO, C. A. Composição Química da Madeira de Eucalyptus citriodora em Função das Direcções Estruturais. **Silva Lusitana**, v. 14, n. 1, p. 113–126, 2006.
- SONG, Y. et al. Nitrogen-doped ordered mesoporous carbon with a high surface area, synthesized through organic-inorganic coassembly, and its application in supercapacitors. **ChemPhysChem**, v. 15, n. 10, p. 2084–2093, 21 jul. 2014.
- SUN, B. et al. Highly efficient construction of sustainable bacterial cellulose aerogels with boosting PM filter efficiency by tuning functional group. **Carbohydrate Polymers**, v. 309, 1 jun. 2023.
- SYEDA, H. I.; YAP, P. S. A review on three-dimensional cellulose-based aerogels for the removal of heavy metals from water. **Science of the Total Environment**. [S.I.]: Elsevier B.V. , 10 fev. 2022
- TOIVONEN, M. S. et al. Ambient-Dried Cellulose Nanofibril Aerogel Membranes with High Tensile Strength and Their Use for Aerosol Collection and Templates for Transparent, Flexible Devices. **Advanced Functional Materials**, v. 25, n. 42, p. 6618–6626, 2015.
- VALO, H. et al. Drug release from nanoparticles embedded in four different nanofibrillar cellulose aerogels. **European Journal of Pharmaceutical Sciences**, v. 50, n. 1, p. 69–77, 2013a.
- Wu, L., Li, L., Li, B., Zhang, J., & Wang, A. Magnetic, Durable, and Superhydrophobic Polyurethane@Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@SiO<sub>2</sub>@Fluoropolymer Sponges for Selective Oil Absorption and Oil/Water Separation. **ACS Applied Materials & Interfaces**, 7(8), 4936–4946. doi:10.1021/am5091353
- WU, Z. Y. et al. Ultralight, flexible, and fire-resistant carbon nanofiber aerogels from bacterial cellulose. **Angewandte Chemie - International Edition**, v. 52, n. 10, p. 2925–2929, 4 mar. 2013.
- XU, Z. et al. Preparation and biomedical applications of silk fibroin-nanoparticles composites with enhanced properties - A review. **Materials Science and Engineering C**, v. 95, p. 302–311, 2019.
- Zhang, A., Chen, M., Du, C., Guo, H., Bai, H., & Li, L. Poly(dimethylsiloxane) Oil Absorbent with a Three-Dimensionally Interconnected Porous Structure and Swellable Skeleton. **ACS Applied Materials & Interfaces**, 2013 ,5(20), 10201–10206. doi:10.1021/am4029203
- ZHANG, C. et al. Cellulose-derived carbon aerogels: A novel porous platform for supercapacitor electrodes. **Materials and Design**. [S.I.]: Elsevier Ltd. , 1 jul. 2022
- ZHOU, W. et al. Heavy metal ions and particulate pollutants can be effectively removed by a gravity-driven ceramic foam filter optimized by carbon nanotube implantation. **Journal of Hazardous Materials**, v. 421, n. February 2021, p. 126721, 2022.

ZU, G. et al. Nanocellulose-derived highly porous carbon aerogels for supercapacitors. **Carbon**, v. 99, p. 203–211, 2016.