

UTILIZAÇÃO DO REJEITO DA INDÚSTRIA TÊXTIL PARA A PRODUÇÃO DE TECIDO DE FIBRA DE CARBONO PARA O DESENVOLVIMENTO DE ELETRODOS AUTOSSUSTENTÁVEIS PARA SUPERCAPACITOR

HEIDE HELOISE BERNARDI¹

¹Fatec de São José dos Campos – Professor Jessen Vidal
heide.bernardi@fatec.sp.gov.br

Use of Textile Industry Waste to Produce Carbon Fiber Fabric for the Development of Self-Sustaining Electrodes for Supercapacitors

Eixo Tecnológico: *Controle e Processos Industriais; Recursos Naturais*

Resumo

Dispositivos armazenadores de energia (DAEs) estão sendo cada vez mais necessários para tornar a energia elétrica portátil. Seja em uma pilha ou em um carro elétrico, a vida moderna necessita cada dia mais de energia portátil em dispositivos seguros e ambientalmente amigáveis. Menores, com maior densidade de energia e tempo curto de carga, os DAEs atuais, como os supercapacitores (SC) se diferem muito dos idealizados no século XVII, e têm chamado a atenção por sua leveza, potência elétrica e velocidade de carga. Entretanto, os SCs dependem de materiais avançados com altíssima área superficial, fazendo-os dependente da engenharia dos materiais para que possam evoluir. Nesta linha, o projeto proposto visa o desenvolvimento de materiais carbonosos filamentosos a partir de fibras naturais para serem empregados em SCs. O uso de fibras naturais, como o algodão, atende um apelo ambiental que busca alternativa aos compostos baseados em petróleo, além disso, oferece uma alternativa para o passivo ambiental deixado pela indústria têxtil. Para a produção dos eletrodos, tecidos de algodão foram carbonizados e ativados em diferentes temperaturas a fim de ser produzido um material de alto teor de carbono e área de superfície. Uma vez estabelecida a rota de produção, os eletrodos terão suas características físico-químicas e eletroquímicas determinadas, portanto fornecendo subsídios suficientes para a construção de um dispositivo discreto.

Palavras-chave: *Tecido de Algodão, Tecido de Fibra de Carbono, Ativação, Eletrodo Sustentável, Supercapacitor.*

Abstract

Energy storage devices (ESDs) are increasingly needed to make electrical energy portable. Whether in a battery or an electric car, modern life increasingly requires portable energy in safe and environmentally friendly devices. Smaller, with greater energy density and short charging time, current ESDs differ greatly from those idealized in the 17th century. Among current ESDs, supercapacitors (SC) have attracted attention due to their lightness, electrical power and charging speed. However, SCs depend on advanced materials with very high surface area, making them dependent on materials engineering so that they can evolve. In this line, the proposed project aims to develop filamentary carbonaceous materials from natural fibers to be used in SCs. The use of natural fibers, such as cotton, responds to an environmental appeal that seeks an alternative to petroleum-based compounds, in addition, it offers an alternative to the environmental liability left by the clothing industry. For the production of electrodes, cotton fabrics were be carbonized and activated at different temperatures in order to produce a material with a high carbon content and area of surface. Once the production route is established, the electrodes will have their physicochemical and electrochemical characteristics determined, therefore providing sufficient support for the construction of a discrete device.

Key-words: *Cotton Fabric, Carbon Fiber Fabric, Activation, Sustainable Electrode, Supercapacitor.*

1. Introdução

Nos dias atuais, muito se discute acerca das questões sustentáveis e dos impactos ambientais devido à poluição causada pelo ser humano, como por exemplo, o descarte irregular e/ou inadequado de resíduos sólidos. No que diz respeito à poluição por resíduos sólidos descartados oriundos da indústria têxtil, segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, a ABRELPE, em 2022 foram descartados 4 milhões de toneladas de resíduos têxteis no Brasil [1], o que representou 5% do total de resíduos sólidos produzidos no país. No final do ciclo de vida dos produtos, tais resíduos sólidos são, freqüentemente, direcionados para estações de resíduos, aterros sanitários ou mesmo submetidos à incineração, o que neste caso aumenta as emissões de CO₂ [2].

Uma alternativa seria a utilização desses resíduos têxteis, principalmente os de origem natural, para a produção de tecidos de fibras de carbono, que pode contribuir para uma economia circular e para a redução do impacto ambiental. As fibras de carbono podem ser obtidas a partir de qualquer material filamentar contendo uma elevada fração de carbono fixo, esses materiais são chamados de precursores. Entre os materiais mais comuns estão o Rayon, a poliácridonitrila (PAN) e o piche mesofásico de petróleo. Destes, mais de 90% da fibra de carbono produzida no mundo são provenientes da poliácridonitrila precursora [3].

A indústria de fibra de carbono tem crescido constantemente nos últimos anos para atender às necessidades de diversos setores, como aeronaves e sistemas espaciais, militares, pás de turbinas, construção de sistemas estruturais e não estruturais, bem como cilindros leves e embarcações de aço, cabos e prendedores de perfuração, produtos médicos, automotivos, esportivos e de filtração, entre outros [4].

As fibras de carbono desempenham um papel crucial devido à sua baixa densidade e as suas propriedades de alta resistência e rigidez, estabilidade dimensional, baixo coeficiente de expansão térmica, compatibilidade biológica, boa condutividade térmica e elétrica, resistência à fadiga e à fluência, no entanto, o fator custo de produção limita suas aplicações [5]. Portanto, alguns estudos têm sido feitos na tentativa de diminuir o custo de produção das fibras de carbono, utilizando, por exemplo, fibras de poliácridonitrila (PAN) de aplicação têxtil [6]. Uma opção seria o uso de fibras naturais (como o algodão), entretanto são precursores de fibras para baixa responsabilidade estrutural.

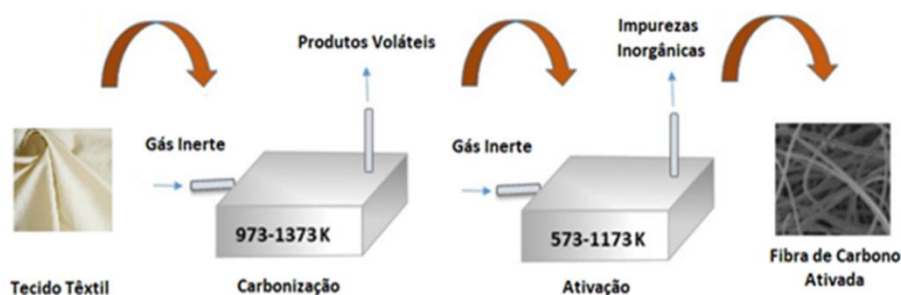
O processo de transformação do precursor PAN em fibra de carbono, por meio de tratamento térmico consome muita energia, resultando em um desenvolvimento complexo, dispendioso e quase contínuo com várias semanas de tempo de produção para um lote de fabricação [7], resultando em um processo de alto custo. Portanto, o uso de tecidos têxteis para a fabricação de tecidos de fibras de carbono seria um processo mais rápido, já que a produção e estabilização do precursor não seriam necessárias, pois a técnica já é dominada pela indústria têxtil. Entretanto não seria possível produzir fibras para aplicação estrutural, por outro lado, parecem uma ótima alternativa para produção de eletrodos para supercapacitores.

Após o processo de carbonização, as fibras de carbono podem ser ativadas a fim de conferir elevada área de superfície. Há muitos métodos diferentes de ativação, com diferentes reagentes em diferentes estados (como plasma, gás, líquido e sólido) e em diferentes temperaturas. Em geral, eles podem ser classificados em duas grandes categorias: (a) Ativação física: oxidação térmica, fluido supercrítico ou plasma e (b) Ativação química: incorporando reagentes na fibra [8]. A Fig. 1 mostra um desenho esquemático da sequência dos processos de carbonização e ativação dos tecidos têxteis para obtenção de fibra de carbono ativada.

O processo de ativação da fibra de carbono segue o mesmo princípio dos processos usados para a ativação de carvão, ou seja, uma combinação de ambiente oxidante e temperatura da

ordem de 900°C [6]. A variação na faixa de temperatura de trabalho, tempo de tratamento e tipo de ambiente oxidante implica no grau de ativação e estrutura de poros [9].

Fig. 1 - Processos de carbonização e ativação para obtenção de fibra de carbono ativada [8].



Fonte: Adaptado de Hassan et al. (2020).

As fibras de carbono ativadas possuem certas características que as tornam materiais com grande potencial de aplicação, pois a microporosidade e mesoporosidade ajustável permite aplicações em armazenamento de gás natural, adsorvente em metais pesados e fármacos, tratamento e purificação de água e ar, armazenamento de hidrogênio como combustível, além de aplicações eletroquímicas como supercapacitores [8, 10-13].

Materiais avançados de carbono são citados na literatura [14-16] como DAEs, por exemplo, os supercapacitores (SCs), pois a portabilidade de energia elétrica em dispositivos menores, com alta potência e ambientalmente corretos é uma demanda atual.

Os supercapacitores se distinguem por suas características únicas de armazenamento de energia, combinando alta capacidade, alta densidade de potência, processo rápido de carga/descarga e longa vida útil do ciclo. Além disso, os supercapacitores podem ser usados em sistemas que requerem alta densidade de potência, como fontes de energia em veículos elétricos ou em sistema de captação de energia como em turbinas eólicas e painéis solares, assim como, em dispositivos eletrônicos portáteis [17, 18].

Um supercapacitor consiste em dois eletrodos (simétricos ou assimétricos) em contato com um eletrólito aquoso ou não aquoso, bem como um separador permeável a íons que isola os dois eletrodos e evita um curto-circuito [19]. Como material de eletrodo, as fibras de carbono ativadas vem ganhando espaço em relação ao carvão ativado, pois tem boa condutividade elétrica, elevada área de superfície e alta fração de microporos, além disso, tem composição filamentar ao contrário do carvão ativado (pó ou granular) que necessitam ser suportados por meio de colagem ao coletor de corrente através do uso de aglutinantes [20, 21]. Ademais, a utilização de fibra de carbono ativada a partir de matéria prima têxtil, de baixo custo, tem viabilizado este material como eletrodo para supercapacitor [11, 17, 22-25].

Aliado a isso, tem-se a disponibilidade de usar como material de eletrodo, fibras naturais novas e/ou de descarte para servirem como material precursor, sendo o foco deste projeto, pois são materiais de baixo custo, são autossustentáveis e possui um potencial para aplicação em supercapacitor. Para tal, é necessário que as características dos tecidos de fibra de carbono usando como precursor o tecido de algodão sejam conhecidas, principalmente em relação à química de superfície, pois grupos funcionais químicos, como os grupos nitrogenados, contribuem para o aumento da capacidade de armazenamento desses dispositivos [17, 18].

Portanto, este projeto de RJJ visa estudar e caracterizar o eletrodo de tecido de fibra de carbono (Ano I) e desenvolver um supercapacitor autossustentável (Anos II e III), buscando assim uma inovação tecnológica na área de captação e armazenamento de energia. Assim, parte-

se inicialmente de um projeto em TRL 3 (Ano I), para TRL 4/5 (Ano II) e finalmente para um TRL 5/6 (Ano III).

2. Materiais e métodos

2.1. Materiais

Para início deste projeto, foram utilizados retalhos de tecido de algodão (provenientes de rejeitos) como precursor, os quais foram carbonizados e ativados.

2.2. Metodologia

Os tecidos de fibra de carbono carbonizados (TFC) e ativados (TFCA) foram produzidos em batelada num forno tubular do Laboratório de Ensaios de Materiais Carbonosos e Metálicos da FATEC SJC. Foram realizadas três rotas de processamento:

- (a) o tecido de algodão foi carbonizado a 1000°C, em atmosfera inerte (argônio), resultando na amostra denominada TFC;
- (b) o tecido de algodão foi carbonizado a 900°C, em atmosfera inerte (argônio) e, em seguida, submetido ao processo de ativação a 1000°C por 30 min, com atmosfera de CO₂. Esta amostra foi nomeada TFCA 30;
- (c) o tecido de algodão foi carbonizado a 900°C, em atmosfera inerte (argônio), e em seguida submetido ao processo de ativação a 1000°C por 1h, com atmosfera de CO₂. Esta amostra foi nomeada TFCA 1H.

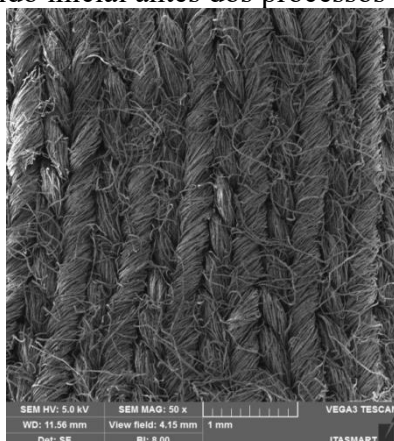
Após sua preparação, as amostras TFC e TFCAs foram pulverizadas mecanicamente com o auxílio de um almofariz e pistilo. Antes e após a moagem, as amostras foram caracterizadas microestruturalmente por microscopia eletrônica de varredura (MEV) utilizando o equipamento TESCAN VEGA3 da Shimadzu, instalado no Departamento de Materiais e Processos do Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA. A análise foi realizada no modo de elétrons secundários (SE) com filamento de tungstênio, para avaliar a morfologia das fibras de carbono e o tamanho das partículas geradas após o processo de moagem.

3. Resultados e Discussão

A Fig. 2 apresenta o tecido de algodão (material de partida) antes dos processos de carbonização e ativação. As Figs. 3 e 4 exibem as micrografias das fibras do tecido após a carbonização e ativação. Por fim, a Fig. 5 mostra as micrografias das fibras após o processo de moagem.

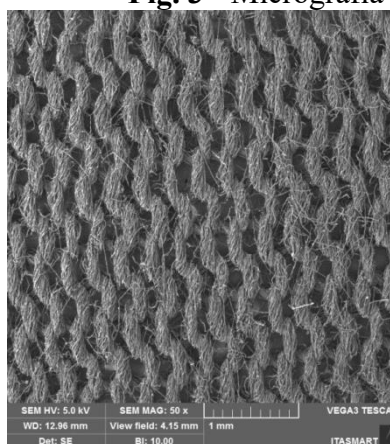
Comparando-se as micrografias das Figs. 2 e 3, observa-se que, após os processos de carbonização e ativação, as tramas dos tecidos tornaram-se mais abertas em relação ao tecido inicial. No entanto, ao se analisar a morfologia em uma magnificação maior (Fig. 4), não se observa uma mudança morfológica visível entre os processos de carbonização e ativação. Ainda assim, espera-se que o TFCA apresente uma maior porosidade em comparação ao TFC [9].

Fig. 2 - Micrografia do tecido inicial antes dos processos de carbonização e ativação.

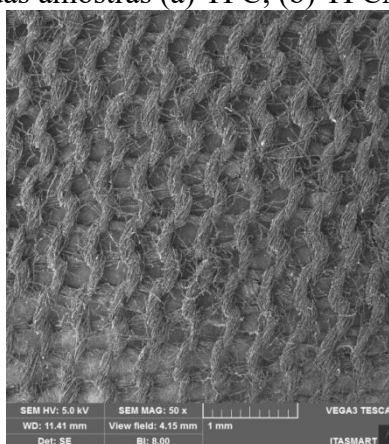


Fonte: (Autor, 2025).

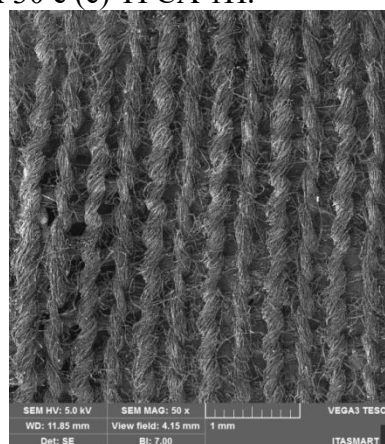
Fig. 3 - Micrografia das amostras (a) TFC, (b) TFCA 30 e (c) TFCA 1H.



(a)



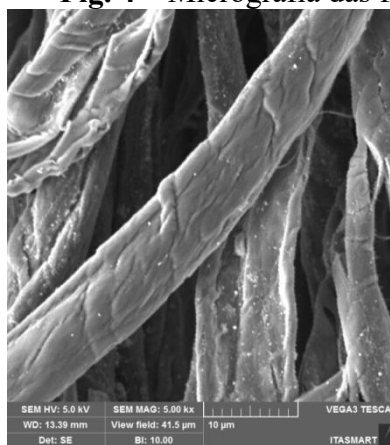
(b)



(c)

Fonte: (Autor, 2025).

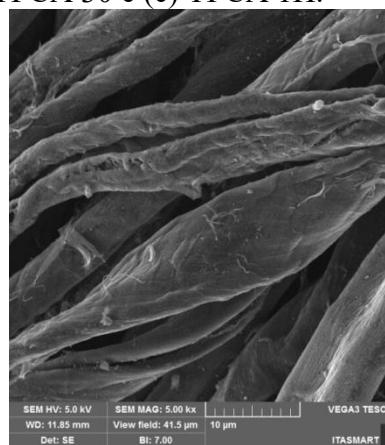
Fig. 4 - Micrografia das fibras das amostras (a) TFC, (b) TFCA 30 e (c) TFCA 1H.



(a)



(b)

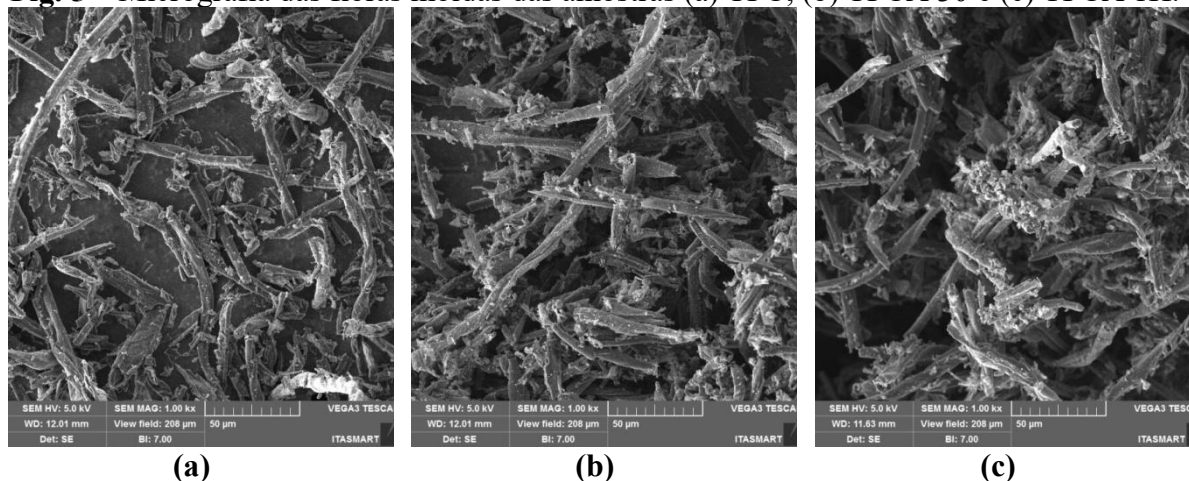


(c)

Fonte: (Autor, 2025).

Na Fig. 5, são ilustradas as fibras moídas, nas quais se observa que foram fragmentadas pelo processo mecânico. No entanto, o material resultante apresenta-se como pequenos filamentos, com variação de tamanho, e não como partículas propriamente ditas, tanto para o TFC quanto para o TFCA.

Fig. 5 – Micrografia das fibras moídas das amostras (a) TFC, (b) TFCA 30 e (c) TFCA 1H.



Fonte: (Autor, 2025).

4. Considerações finais

Com base nos resultados obtidos até o momento, conclui-se que é possível produzir tecidos de fibra de carbono a partir de um precursor natural, o algodão, utilizando diferentes rotas de processamento. A análise microestrutural não revelou mudanças significativas na superfície das fibras de carbono entre os diferentes processos. No entanto, análises futuras, focadas na química de superfície, indicarão qual procedimento é mais adequado para a utilização desses materiais em eletrodos de supercapacitores.

Agradecimentos

O autor agradece a empresa Carbon Ltda., que apoia o projeto fornecendo insumos e suporte técnico para a execução das etapas de carbonização e ativação ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA) pelo uso do equipamento MEV.

Referências

- [1] PUENTE, B. **Brasil descarta mais de 4 milhões de toneladas de resíduos têxteis por ano**. CNN Brasil, Rio de Janeiro, 03 de junho de 2022. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/economia/macroeconomia/brasil-descarta-mais-de-4-milhoes-de-toneladas-de-residuos-texteis-por-ano/>. Acesso em 23 jul. 2024.
- [2] ANDRADE, L. L. **Minimização dos impactos ambientais causados por peças do vestuário descartadas pós fabricação: uma proposta de modelo de negócio e plataforma web para o pólo confeccionista**. 2020. Tese de Doutorado (Doutorado em Tecnologia Ambiental). Universidade de Ribeirão Preto (UNAERP), Ribeirão Preto, 2020.
- [3] MORGAN, P. **Carbon fiber and their composites**. 1 ed. Boca Raton: CRC press, Taylor & Francis, 2005. <https://doi.org/10.1201/9781420028744>.

Anais da VIII Mostra de Docentes em RJ

- [4] ROBERTS, T. **The carbon fibre industry: Global strategic market evaluation 2006-2010**. 1 ed. Watford, UK: Materials Technology Publications, 2006.
- [5] HUANG, J.M. et al. Scanning Force Microscopy Studies of the Surface Structure of Activated Carbon Fabric. **Textile Research Journal**, v.72, n.2, p.140-146, 2002. <https://doi.org/10.1177/004051750207200209>.
- [6] MARCUZZO, J.S. **Produção ultrarrápida de fibras de carbono ativadas a partir de fibra PAN têxtil**. 2012. Tese de doutorado (Doutorado em Materiais e Processos de Fabricação) – Engenharia Aeronáutica e Mecânica, Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos, 2012.
- [7] LENGSELD, H. et al. **Carbon Fibers: Production, Applications, Processing**. 1 ed. Munich: Hanser Publishers, 2021.
- [8] HASSAN, M.F. et al. Recent trends in Activated Carbon Fibers production from various precursors and applications - A comparative review. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v.145, p.104715, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2019.104715>.
- [9] BOTTANI, E.J.; TASCÓN, J.M.D. (Ed.). **Adsorption by carbons**. 1 ed. Elsevier, 2008.
- [10] LEITE, B.M. **Adsorção de paracetamol e ácido acetilsalicílico em fibras de carbono ativadas e carvões ativados**. 2018. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Maringá, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Maringá, 2018.
- [11] MARCUZZO, J.S. et al. Microporous activated carbon fiber felt from Brazilian textile PAN fiber: preparation, characterization and application as super capacitor electrode. **Revista Brasileira de Aplicação de Vácuo**, v.35, n.2, p.58-63, Maio-Agosto, 2016. <https://doi.org/10.17563/rbav.v35i2.1022>.
- [12] MARCUZZO, J.S. et al. Uso de Fibra de Carbono Ativada na Remoção de Contaminantes Orgânicos Moleculares de Água de Abastecimento. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARBONO, 7, 2017, Campos de Jordão. **Anais [...]**. São Paulo: ABCarb, 24 a 27 de outubro de 2017, p. 323-326.
- [13] TORQUATO, L.C. et al. Feltro e Tecido de Fibra de Carbono Ativado: Caracterização e Ensaio Biológicos In Vitro -Estudo Piloto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARBONO, 9., 2021, Evento Virtual. **Anais [...]**. São Paulo: ABCarb, 10 a 12 de novembro de 2021, p. 39-42.
- [14] AMETA, R.K. et al. Chapter 1 - General introduction about electrochemistry and supercapacitors. **Smart Supercapacitors: Fundamentals, Structures, and Applications**. 1 ed. Elsevier, p.3-16, 2023. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90530-5.00020-4>.
- [15] MEHETRE, S.S. et al. Chapter 3 - Supercapacitors – New developments. **Smart Supercapacitors: Fundamentals, Structures, and Applications**. 1 ed. Elsevier, p.39-64, 2023. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90530-5.00021-6>.
- [16] ASHRITHA, M. G.; HAREESH, K. Chapter 9 - Electrode materials for EDLC and pseudocapacitors. **Smart Supercapacitors: Fundamentals, Structures, and Applications**. 1 ed. Elsevier, p.179-198, 2023. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90530-5.00033-2>.
- [17] SIQUELI, A.C.R. **Análise dos processos de oxidação térmica e carbonização de feltros de fibra de carbono de pan têxtil e sua influência na performance dos eletrodos de supercapacitor**. 2021. Tese de doutorado (Doutorado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2021.
- [18] QIAO, Z. et al. Recent progress of carbon-fiber-based electrode materials for energy storage. **Diamond & Related Materials**, v.138, p.110208, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2023.110208>.
- [19] WINTER, M.; BRODD, R.J. What are batteries, fuel cells, and supercapacitors? **Chemical Reviews**, v.104, n. 10, p.4245-4270, 2004. DOI: 10.1021/cr020730k

Anais da VIII Mostra de Docentes em RJ

- [20] CHEN, J.Y. (Ed.). **Activated carbon fiber and textiles**. 1 ed. Woodhead Publishing, 2016.
- [21] MISTRY, A. et al. Quantifying negative effects of carbon-binder networks from electrochemical performance of porous Li-ion electrodes. **Journal of The Electrochemical Society**, v.168, n.7, p.070536, 2021. DOI. 10.1149/1945-7111/ac1033.
- [22] BELINELI BARBOSA, I. A. et al. Binder-free textile PAN-based electrodes for aqueous and glycerol-based electrochemical supercapacitors. **Waste and Biomass Valorization**, v.15, n.2, p.1005-1018, 2023. <https://doi.org/10.1007/s12649-023-02208-2>.
- [23] MATSUSHIMA, J.T. et al. 3D-interconnected framework binary composite based on polypyrrole/textile polyacrylonitrile-derived activated carbon fiber felt as supercapacitor electrode. **Journal of Materials Science: Materials in Electronics**, v.31, n.13, p.10225-10233, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10854-020-03568-4>.
- [24] RODRIGUES, A.C. et al. Ag@ Activated carbon felt composite as electrode for supercapacitors and a study of three different aqueous electrolytes. **Materials Research**, v.22, n.1, p.e20180530, 2018. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2018-0530>.
- [25] RODRIGUES, A.C. et al. N-activated carbon fiber produced by oxidation process design and its application as supercapacitor electrode. **Journal of Porous Materials**, v.27, n.1, p.141-149, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10934-019-00799-7>.