

AVALIAÇÃO MECÂNICA DE FILAMENTOS DE NANOTUBOS DE CARBONO

MARCELLE DAVET DE BARROS¹; FRANTCHESCOLE BORGES CARDOSO²;
LEANDRO LEMOS SILVEIRA³; NICHOLAS FERNANDES DE SOUZA⁴; ALICE
GONÇALVES OSORIO⁵; FERNANDO MACHADO MACHADO⁶

¹Universidade Federal de Pelotas – marcelledavet.ufpel@gmail.com

²Universidade Federal de Pelotas – frantchescole.cardoso@gmail.com

³Universidade Federal de Pelotas – leandrolemos.silveira@gmail.com

⁴Universidade Federal de Pelotas – nicholasfs97@gmail.com

⁵Universidade Federal de Pelotas – alice.osorio@ufpel.edu.br

⁶Universidade Federal de Pelotas – fernando.machado@ufpel.edu.br

1. INTRODUÇÃO

O avanço tecnológico aliado à crescente demanda por soluções sustentáveis tem impulsionado a busca por alternativas inovadoras na geração de energia. Nesse contexto, a Organização das Nações Unidas, por meio dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável estabelecidos para o Brasil, destaca metas como Energia Limpa e Acessível, Consumo e Produção Responsáveis e Cidades e Comunidades Sustentáveis. Esses objetivos reforçam a urgência no desenvolvimento de novas formas de geração energética que conciliem eficiência e responsabilidade ambiental (ONU, 2022).

Dentre as alternativas e dispositivos possíveis para a transição de energias de baixo custo, destacam-se os dispositivos de colheita de energia (do inglês, *Energy Harvesting*).

Colheita de energia engloba processos que capturam energia útil a partir de fontes residuais, tais como ambientais ou mecânicas, convertendo as em energia elétrica utilizável (Pecunia et al., 2023; Wang et al., 2022). Os mecanismos podem ser apresentados em diversas formas de energia, permitindo a conversão dessa energia através de materiais fotovoltaicos, piezoelétricos, termoeletrônicos, entre outros. (Pecunia et al., 2023; Radousky; Liang, 2012)

A colheita mecânica de energia (do inglês, *Mechanical Energy Harvesting* – MEH) refere-se à captação de energia a partir do movimento e posição de um objeto (Radousky; Liang, 2012). Essa tecnologia apresenta diversas aplicações, incluindo sensores autoalimentados (Wang et al., 2024), fornecimento de energia em ambiente marinho (Zhang et al., 2019), monitoramento da saúde humana (Panda et al., 2022) e sistemas de rastreamento (Hong et al., 2023).

Os nanotubos de carbono (CNTs), devido a sua escala unidimensional, exibem propriedades quânticas distintas, não observadas em materiais convencionais (Divya, Oh e Bodaghi, 2023). Além disso, destacam-se para a produção de dispositivos MEH pela possibilidade de formação de filamentos de CNTs (*carbon nanotube yarns*).

Os *yarns* são estruturas formadas a partir de CNTs, enrolados e torcidos até formarem fios contínuos e resistentes. Esses fios são leves, elásticos e condutores de eletricidade, podendo atuar como dispositivos de colheita de energia mecânica por meio de estiramentos quando imersos em eletrólitos (Clain et al., 2023; Kim et al., 2017).

Dada a lacuna persistente entre a resistência teórica e a alcançada experimentalmente, o presente trabalho se dedica na produção de *yarns* a partir de florestas de CNTs e, por meio de ensaios de tração, busca-se compreender e aprimorar as propriedades mecânicas desse material contribuindo para suas diversas aplicações futuras, como na colheita de energia.

2. METODOLOGIA

O aparato utilizado neste trabalho foi confeccionado em *Medium Density Fiberboard* - MDF, com uma mesa de regulagem de altura em alumínio. Na parte superior das hastes há um suporte para acomodar um bastão de vidro. As hastes foram posicionadas perpendicularmente à base em uma extremidade, enquanto a mesa elevatória foi fixada na extremidade oposta, servindo de suporte para a floresta de nanotubos.

Outra parte do aparato também foi confeccionada em MDF, utilizando grampos para montagem. Os grampos permitiram a união das peças, resultando em um acessório em formato de “F”, que possibilita ajustar a distância entre as hastes menores e, conseqüentemente, controlar o tamanho dos filamentos de nanotubos de carbono produzidos. Além disso, foi empregado um dispositivo para realizar a torção dos filamentos, composto por uma haste com garra, um motor com potenciômetro e um contador de giros.

Para a realização dos ensaios de tração, foi necessário a confecção de corpos de prova que facilitaram o manuseio. Foram confeccionados em molduras de papel 180 g.m⁻² com comprimento útil de 60 mm, onde foram posicionados os *Yarns*.

A produção dos *yarns* foi realizada através da sobreposição de cinco camadas de filmes de CNTs, cada uma sendo esticada até 250 mm de comprimento e fixada nas extremidades com fita adesiva de carbono. Dois suportes em formato de ganchos foram colados na fita para facilitar a enrolar os *yarns* simultaneamente em ambas as extremidades. Posteriormente, os filamentos foram pendurados verticalmente com uma carga de 5 g e densificados com acetona P.A. Após a densificação, os *yarns* passaram por um processo de torção de 2000 torções por metro.

Os *yarns* foram avaliados por microscopia eletrônica de varredura (MEV), com objetivo de avaliar a morfologia, além de realizar medições de diâmetro e ângulo de torção para análises dimensionais. Além disso, ensaios mecânicos de tração foram realizados em 5 *yarns*, observando sua deformação máxima e carga máxima. Esses procedimentos possibilitaram verificar a similaridade estrutural, dimensional e o comportamento mecânico dos filamentos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 apresenta as curvas de tração dos *yarns*, nas quais é possível observar uma similaridade no comportamento para todos os filamentos ensaiados.

As curvas apresentam um padrão de deformação não linear, com uma taxa de deformação inicialmente grande, que cai ao longo do ensaio. Esse comportamento está relacionado ao mecanismo de deformação dos *yarns*, no qual há o deslizamento de CNTs, eliminando os vazios presentes na estrutura e gerando uma densificação mecânica nos filamentos.

Os resultados obtidos para carga e deformação máxima, apresentaram os valores médios de $1,66 \pm 0,24$ N e $12,97 \pm 1,09\%$, respectivamente. Tendo em vista

que a produção foi realizada de forma manual, o baixo desvio padrão observado indica uma boa reprodutibilidade na produção dos *yarns*.

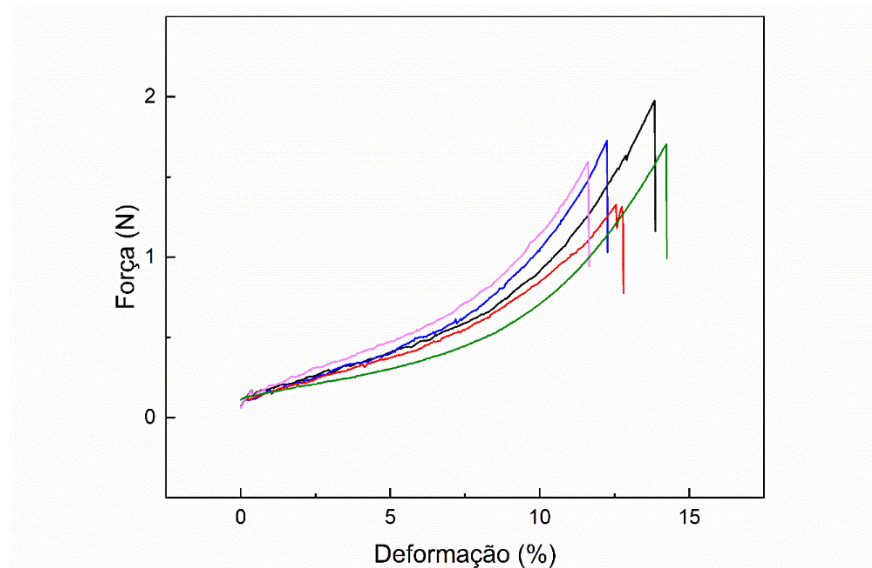


Figura 1 - Curvas de tração dos *yarns*.

A micrografia apresentada na Figura 2 fornece uma visão detalhada da estrutura dos *yarns*, permitindo medições como diâmetro e ângulo de torção além de possibilitar a análise de sua uniformidade.

Observa-se um fio compacto e uniforme por toda sua extensão. As medições indicaram que os *yarns* apresentam um diâmetro médio $78,07 \mu\text{m}$ e um ângulo de torção médio de $23,56^\circ$. Os baixos valores de desvios padrão, de $1,34 \mu\text{m}$ para o diâmetro e $1,48^\circ$ para o ângulo, confirmam a boa reprodutibilidade e a confiabilidade estrutural dos filamentos.

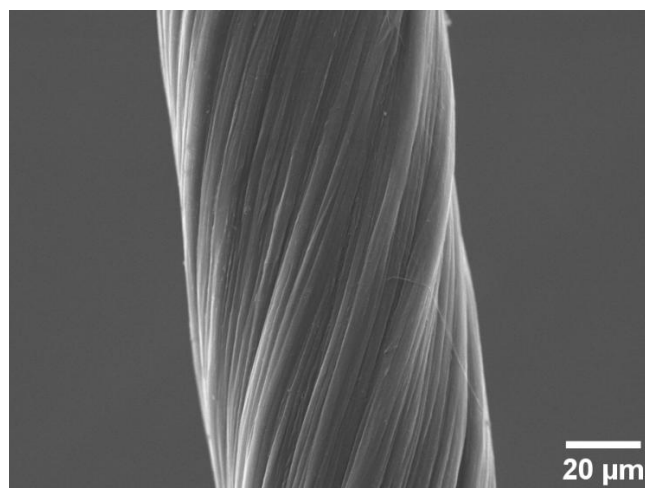


Figura 2 - Micrografia do *yarns*

4. CONCLUSÕES

Com base nos dados apresentados, conclui-se que as micrografias do MEV possibilitaram ter uma percepção detalhada da estrutura dos *yarns*, do seu

diâmetro e ângulo de torção, com um diâmetro médio de $78,07 \pm 1,34 \mu\text{m}$ e um ângulo de torção médio de $23,56 \pm 1,48^\circ$.

Os ensaios mecânicos de tração permitiram determinar a carga máxima e a deformação máxima dos yarns, com valores médios de $1,66 \pm 0,24 \text{ N}$ e $12,97 \pm 1,09\%$, respectivamente. Os resultados obtidos confirmam a excelência dos yarns como material confiável e reproduzível, abrindo caminho para seu uso em tecnologias de colheita de energia e outros dispositivos avançados.”

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CLAIN, Fernanda Mazuco *et al.* Creep and electrical properties of carbon nanotube yarns for long-term applications. **Carbon Trends**, v. 13, p. 100313, 1 dez. 2023.

DIVYA, S.; OH, T. H.; BODAGHI, M. 1D nanomaterial based piezoelectric nanogenerators for self-powered biocompatible energy harvesters. **European Polymer Journal**, v. 197, p. 112363, 10 out. 2023.

HONG, Li *et al.* Research on low-frequency FBG accelerometer based on double curved beam reed. **Optics Communications**, v. 543, p. 129615, 15 set. 2023.

KIM, Shi Hyeong *et al.* Harvesting electrical energy from carbon nanotube yarn twist. **Science**, v. 357, n. 6353, p. 773–778, 25 ago. 2017.

ONU. . [S.l.: S.n.]. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>>. Acesso em: 29 jan. 2024.

PANDA, Swati *et al.* Piezoelectric energy harvesting systems for biomedical applications. **Nano Energy**, v. 100, p. 107514, 1 set. 2022.

PECUNIA, Vincenzo *et al.* Roadmap on energy harvesting materials. **Journal of Physics: Materials**, v. 6, n. 4, p. 042501, 1 out. 2023.

RADOUSKY, H. B.; LIANG, H. Energy harvesting: an integrated view of materials, devices and applications. **Nanotechnology**, v. 23, n. 50, p. 502001, 21 dez. 2012.

WANG, Lu *et al.* Self-sustained and self-wakeup wireless vibration sensors by electromagnetic-piezoelectric-triboelectric hybrid energy harvesting. **Applied Energy**, v. 355, p. 122207, 1 fev. 2024.

WANG, Zhong *et al.* More powerful twistron carbon nanotube yarn mechanical energy harvesters. **Advanced Materials**, v. 34, e2201826, 2022.

ZHANG, Dahai *et al.* Multi-grating triboelectric nanogenerator for harvesting low-frequency ocean wave energy. **Nano Energy**, v. 61, p. 132–140, 1 jul. 2019.