

OTIMIZAÇÃO DE METODOLOGIA PARA A PRODUÇÃO DE CNTY

FRANTCHESCOLE BORGES CARDOSO¹; FELIPE RODRIGUES CASSONI²;
LEANDRO LEMOS SILVEIRA³; NICHOLAS FERNANDES DE SOUZA⁴; ALICE
GOLÇALVES OSÓRIO⁵

¹Universidade Federal de Pelotas – frantchescole.cardoso@gmail.com

²Universidade Federal de Pelotas – cassoni_felipe@yahoo.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

1. INTRODUÇÃO

A colheita de energia envolve processos que capturam energia útil a partir de fontes residuais, ambientais ou mecânicas, convertendo-a em formas utilizáveis (Pecunia *et al.*, 2023; Radousky e Liang, 2012). Com a variedade de tipos de energia disponíveis, diversos mecanismos estão sendo estudados para possibilitar essa conversão, utilizando materiais como fotovoltaicos, piezoelétricos, termoelétricos, entre outros (Pecunia *et al.*, 2023; Radousky e Liang, 2012).

Quando falamos sobre a captação de energia proveniente do movimento e da posição de um objeto, essa geração está relacionada à colheita mecânica de energia (em inglês, *Mechanical Energy Harvesting* – MEH) (Radousky e Liang, 2012). Esse tipo de colheita é amplamente desejado para várias aplicações, como sensores autoalimentados (Wang *et al.*, 2024), fornecimento de energia em ambientes marinhos (Zhang *et al.*, 2019), monitoramento da saúde humana (Panda *et al.*, 2022) e sistemas de rastreamento (Hong *et al.*, 2023).

Devido à sua escala nanométrica, os nanomateriais unidimensionais apresentam efeitos quânticos distintos, que não são observados em materiais convencionais. Esses efeitos conferem a esses materiais propriedades físicas e químicas superiores, como maior reatividade e aprimoramento das características elétricas, magnéticas e ópticas, tornando-os especialmente adequados para a produção de dispositivos avançados (Divya, Oh e Bodaghi, 2023).

Entre esses materiais estão os nanotubos de carbono (em inglês, *carbon nanotubes* – CNTs), que têm ganhado destaque na comunidade acadêmica nas últimas décadas. Os CNTs permitem a formação de filamentos de nanotubos de carbono (em inglês, *carbon nanotube yarns* – CNTY), que consistem em CNTs agrupados e alinhados em uma única direção, criando materiais longos, condutores, flexíveis e robustos (Clain *et al.*, 2023). Além disso, em 2017 foi introduzida a possibilidade de geração de energia por meio do alongamento mecânico de CNTY imerso em eletrólito (Kim *et al.*, 2017). Devido a essas características, os CNTY se mostram promissores como MEH.

Por se tratar de uma estrutura relativamente recente, ainda há necessidade de aprimoramento metodológico na produção de CNTY, de modo a garantir a uniformidade dos filamentos produzidos. Portanto, este estudo tem como objetivo desenvolver um aparato que facilite a produção dos CNTY, assegurando simultaneamente a confiabilidade e a semelhança entre os filamentos gerados.

2. METODOLOGIA

O aparato foi confeccionado em *Medium Density Fiberboard* - MDF com 1,5 cm de espessura, com uma mesa de regulação de altura em alumínio. A base e as hastes, cortadas em formato retangular, possuem medidas de 12 x 8,5 cm e 5 x 7 cm, respectivamente. Na parte superior das hastes, foram feitos cortes circulares para acomodar um bastão de vidro. As peças foram montadas com fita dupla face, posicionando as hastes perpendicularmente à base em uma das extremidades, enquanto a mesa elevatória foi fixada na outra extremidade, servindo de suporte para a floresta de nanotubos.

Outra parte do aparato também foi confeccionada em MDF, com espessura de 0,5 cm, utilizando grampos para montagem. As hastes foram cortadas em formato retangular, sendo uma maior, de 50 x 2,5 cm, e duas menores, com 15 x 2,5 cm. Os grampos permitiram a união das peças, resultando em um acessório em formato de "F", o que possibilita ajustar a distância entre as hastes menores e, conseqüentemente, o tamanho do CNTY produzido.

Além disso, foi desenvolvido um dispositivo para realizar a torção dos filamentos. Esse dispositivo consistiu em uma haste com garra, um motor com potenciômetro e um contador de giros.

Com o auxílio do aparato desenvolvido, foram produzidos 36 CNTY. A produção dos CNTY envolveu a sobreposição de cinco camadas de filmes, cada uma sendo esticada até 250 mm de comprimento e colada com fita adesiva de carbono dupla face nas extremidades. Dois pinos foram colados à fita para ajudar a enrolar os CNTY simultaneamente nas duas extremidades. Posteriormente, os filamentos foram pendurados verticalmente com uma carga de 5 g e densificados com acetona P.A. Após a densificação, os CNTY passaram por um processo de torção de 2000 torções por metro.

Na Figura 1 é apresentado o aparato desenvolvido para a produção dos CNTY.

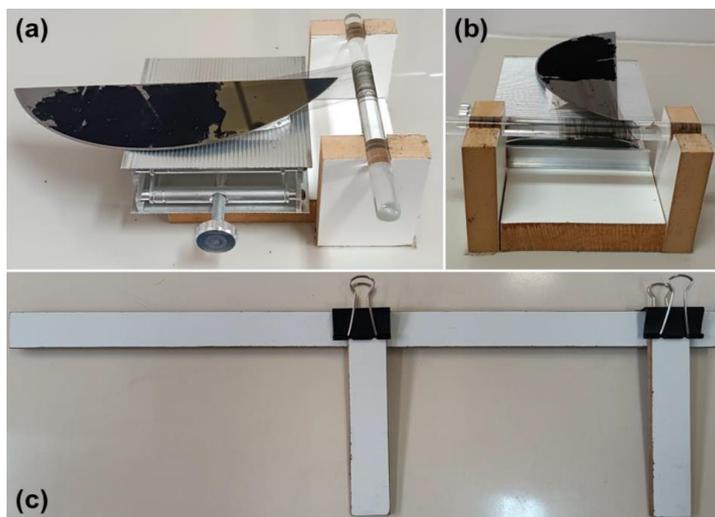


Figura 1 - (a) Vista lateral do aparato; (b) Vista frontal do aparato; (c) Acessório.

Os CNTY foram avaliados por microscopia óptica e eletrônica de varredura, com medições de diâmetro e ângulo de torção para análises dimensionais (conforme mostrado na Figura 2B). Além disso, ensaios mecânicos de tração foram realizados em 5 CNTY, observando sua deformação máxima e carga máxima. As análises foram realizadas com o objetivo de verificar a similaridade na estrutura, nas dimensões e no comportamento dos filamentos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As micrografias dos CNTY fornecem uma visão detalhada da estrutura do CNTY, permitindo medições de parâmetros estruturais cruciais, como o diâmetro e o ângulo de torção. Analisando a Figura 2A e 2B, nota-se que o CNTY produzido é denso e apresenta uniformidade ao longo de toda a sua extensão, sugerindo similaridade dos CNTY.

A similaridade dos filamentos é comprovada pelos resultados das medições realizadas. Os CNTY apresentaram um diâmetro médio de 91,57 μm e um ângulo de torção médio de 35,53°. O desvio padrão foi de 3,94 μm para o diâmetro e 1,52° para o ângulo, indicando uma baixa variação. Esses resultados demonstram que a produção foi uniforme e garantindo confiabilidade estrutural para todos os filamentos.

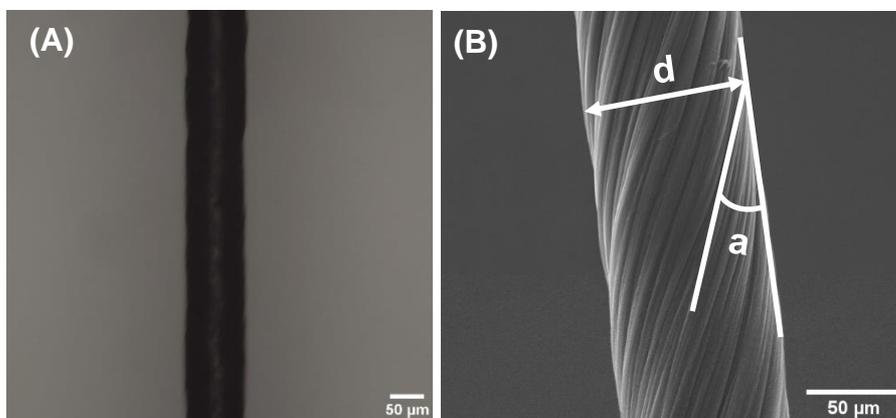


Figura 2 - (A) MO 100x; (B) MEV 1000x.

Na Figura 3 estão os resultados para os ensaios de tração. Os dados de carga e deformação máxima estão dispostos na Tabela 1, juntamente da média e desvio padrão.

Observa-se que os resultados não apresentam grandes variações tanto para a carga máxima, quanto para a deformação máxima, confirmando os resultados anteriores de similaridade entre os CNTY.

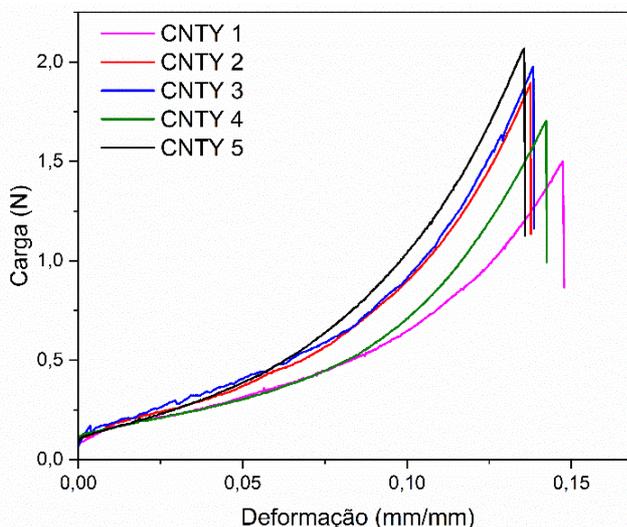


Figura 3 - Ensaios de tração.

Tabela 1 - Resultados ensaios de tração

| | Carga Máxima (N) | Deformação máxima (%) |
|----------------------|------------------|-----------------------|
| Amostra 1 | 1,5 | 14,7 |
| Amostra 2 | 1,9 | 13,8 |
| Amostra 3 | 2,0 | 13,8 |
| Amostra 4 | 1,7 | 14,2 |
| Amostra 5 | 2,1 | 13,6 |
| Média | 1,8 | 14,0 |
| Desvio Padrão | 0,2 | 0,5 |

4. CONCLUSÕES

Com base nos resultados apresentados, conclui-se que o desenvolvimento do aparato para a produção de CNTY foi bem-sucedido. As micrografias evidenciaram que os filamentos obtidos são densos e uniformes, com um diâmetro médio de $91,57 \pm 3,94 \mu\text{m}$ e um ângulo de torção médio de $35,53 \pm 1,52^\circ$.

Os ensaios de tração também mostraram baixa variação nos resultados, com uma carga máxima média de $1,8 \pm 0,2 \text{ N}$ e uma deformação máxima média de $14 \pm 0,5\%$. A consistência entre os CNTY produzidos demonstra a eficiência do aparato, assegurando boa reprodutibilidade no processo de fabricação.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CLAIN, F. M. *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, L. *et al.* Research on low-frequency FBG accelerometer based on double curved beam reed. **Optics Communications**, v. 543, p. 129615, 15 set. 2023.
- KIM, H. *et al.* Electrical energy harvesting from ferritin bisrolled carbon nanotube yarn. **Biosensors and Bioelectronics**, v. 164, 15 set. 2020.
- PANDA, S. *et al.* Piezoelectric energy harvesting systems for biomedical applications. **Nano Energy**, v. 100, p. 107514, 1 set. 2022.
- PECUNIA, V. *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, L. *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.
- ZHANG, D. *et al.* Multi-grating triboelectric nanogenerator for harvesting low frequency ocean wave energy. **Nano Energy**, v. 61, p. 132–140, 1 jul. 2019.