

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

COMPORTAMENTO TERMO-MECÂNICO DE FIOS DE NYLON ESPIRALADOS CON-2016-0205

Sarah Silveira Mendes, smende@id.uff.br¹

Luiz Carlos da Silva Nunes, luizcsn@id.uff.br¹

¹Universidade Federal Fluminense, pgmec@mec.uff.br

Resumo: O objetivo deste artigo é investigar o comportamento termo-mecânico de fios de nylon espiralados submetidos a uma pré-deformação de 50% e um ciclo de aquecimento, 30°C até 120°C, e resfriamento, 120°C até 40°C. Os corpos de provas, ou seja os fios espiralados, foram fabricados usando linhas monofilamento de nylon (poliamida) para pesca. No procedimento experimental, um fio espiralado, com uma pré-deformação mantida constante, foi submetido a uma variação de temperatura na faixa de 30°C a 120°C. Durante os testes, imagens do corpo de prova foram capturados a cada 5 segundos. Estas imagens foram processadas usando um software de Correlação de Imagens que gerou os campos de deslocamento dos corpos de prova. Com estes campos de deslocamento foi possível calcular os ângulos de rotação e a deformação dos corpos de prova. Foram realizados diferentes testes, considerando diferentes comprimentos dos fios espiralados. Pôde-se constatar que o comportamento dos corpos de prova na rotação é dependente do tamanho inicial dos corpos de prova e que a deformação é pouco afetada com esta variação.

Palavras-chave: Músculos artificiais, Fios de nylon, Comportamento Mecânico, Correlação de Imagens

1. INTRODUÇÃO

Materiais que sofrem uma mudança de volume ou de geometria quando estimulados externamente (através de voltagem, corrente, pressão ou temperatura) são denominados genericamente de atuadores (Chun, 2014; Mirvakili, 2014). Novas possibilidades estão sendo criadas devido as recentes descobertas no campo dos materiais inteligentes e atuadores por serem uma alternativa para motores elétricos convencionais e atuadores hidráulicos (Kianzad, 2015). Diversos tipos de materiais, como materiais magnetorestritivos, elastômeros dielétricos, nanotubos de carbono (Foroughi, 2011; Lima, 2012; Chun, 2014; Know, 2014), piezoelétricos e materiais com memória de forma, estão sendo aplicados a uma grande variedade de áreas, incluindo micro sistemas eletromecânicos, processos industriais, e geração de energia (Kim, 2015). Além de otimizar espaço e peso em aplicações automotivas e aeroespaciais, estes materiais são necessários em robôs humanoides, próteses, exoesqueletos e também na confecção de músculos artificiais (Haines, 2014). A tecnologia dos músculos artificiais pode trazer enormes benefícios para implantes médicos e dispositivos de assistência humana, como também para ferramentas de diagnóstico e minimizar cirurgias invasivas (Madden, 2004; Majidi, 2014).

Neste contexto, nas últimas décadas diversos materiais foram desenvolvidos e testados com o propósito de substituir tecido muscular esquelético quando este falha ou auxilia-lo quando fraco (Mirfakhrai, 2007). Porém, problemas com a eficiência e o alto custo restringem o seu desenvolvimento. Como exemplo temos os fios de metal com memória geométrica, ativados termo-eletricamente que contraem rapidamente, mas são caros e possuem um comportamento histerético o que os tornam difícil de controlar (Haines 2014) e também nanotubos de carbono (Lima, 2012) que são bastante custosos.

Recentemente, Haines *et al.* (2014) descobriram uma nova classe de atuadores termo-mecânicos provenientes de fibras poliméricas. Estes atuadores produzidos de nylon trabalham sem histerese, o que gera uma das maiores eficiências já apresentadas por outros tipos de músculos artificiais (Sharafi, 2015). Este novo tipo de Atuador de Fibra Polimétrica Espiralado (AFPE) apresenta uma performance bastante satisfatória com a densidade de energia atingindo 2,63 kJ/kg e densidade de potência superior a 5,3 kW/kg, com torque de 50% (Cherubini, 2015), que é bastante superior a densidade de energia produzida por músculos esqueléticos naturais, 39 J/kg (Madden, 2004; Aziz, 2015). Estas vantagens juntamente com o fato de que este tipo de atuador é economicamente viável, com um custo aproximado de \$5/kg (Haines, 2014), torna esta tecnologia extremamente promissora.

Possíveis futuras aplicações deste tipo de atuador incluem, atuador linear e atuador torsional (Aziz, 2015), atuador térmico ativado quimicamente, amortecedores de vibração, atuadores biomédicos, dispositivos de geração de energia (Kim 2015), dispositivos de recuperação de calor proveniente de resíduos (Cherubini, 2015). O princípio básico de funcionamento deste tipo de atuador já foi demonstrado em trabalhos recentes (Cherubini, 2015; Moretti, 2015; Aziz, 2015; Kianzad, 2015; Mirvakili, 2014; Haines, 2014; Kim, 2015; Wu, 2015) porém pesquisas adicionais são necessárias para habilitar a aplicação deste dispositivo na prática. Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo investigar o comportamento termo-mecânico de fios de nylon espiralados submetidos a uma pré-deformação de 50% e um ciclo de aquecimento, 30°C até 120°C, e resfriamento, 120°C até 40°C.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Fabricação dos corpos de prova

Os corpos de prova foram fabricados com fios de nylon da marca Ekilon Crystal de diâmetro igual a 0,80 mm. Uma das extremidades do fio foi acoplada a uma furadeira (motor) e a outra foi fixada a um suporte com uma massa igual a 530 gramas, gerando uma tensão nominal no fio de 10,35 Mpa, conforme esquema mostrado na Fig. 1. A extremidade ligada a massa foi impedida de girar ao se ligar a furadeira em sentido anti-horário. A Fig. 1 ilustra o procedimento de fabricação dos corpos de prova, na Fig. 1 a) temos o fio de nylon preso ao aparato antes do início e com seu tamanho reduzido no início da inserção de torção, na Fig. 1 b).

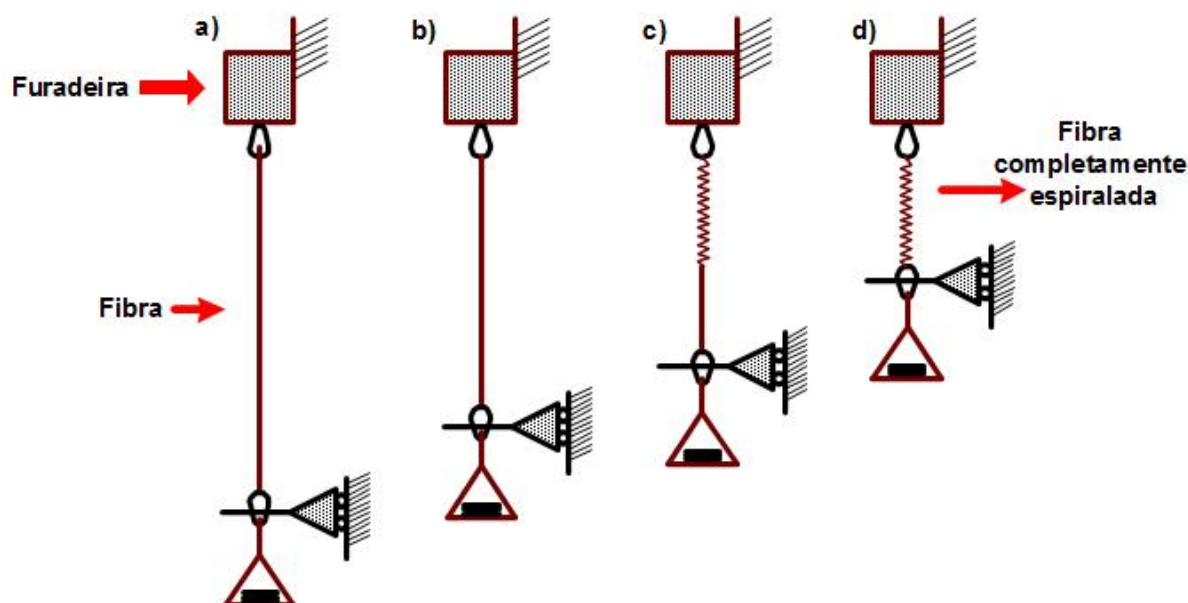


Figura 1. Esquema de produção do corpo de prova a) Fibra precursora fixada no aparato de produção; b) Início da inserção de torção, fio reduz o tamanho; c) Início da formação de espiras; d) Fio completamente espiralado.

Na medida em que se insere a torção no fio e o mesmo atinge o seu limite de torção formam-se pequenas espirais em todo seu comprimento conforme Fig. 1 c). Na Fig 1 d) pode-se observar o esquema do aparato de fabricação com a fibra espiralada completamente formada. O fio de nylon espiralado usado como corpo de prova se encontra ilustrado na Fig. 2. Logo após a fabricação, os corpos de prova (CPs) foram submetidos a um tratamento térmico para manter forma espiralada com a torção durante os testes. Neste tratamento, os CPs, fixados a um aparato para impedir que as espirais se desfizessem, foram submetidos a uma temperatura de 120°C em uma estufa durante 1 hora.

Ciclos de treinamento no fio espiralado foram realizados após 24h do tratamento térmico. Estes ciclos térmicos de treinamento consistiram no aquecimento do fio deformado a 50% até a temperatura de 120°C, logo após um resfriamento até a temperatura ambiente (~25°C) mantendo a deformação, seguido de um aquecimento até 120°C com o fio no seu comprimento não deformado, subsequente a um resfriamento até a temperatura ambiente. Este ciclo térmico foi realizado 6 vezes em cada corpo de prova. Os testes foram realizados após o término do treinamento do fio.

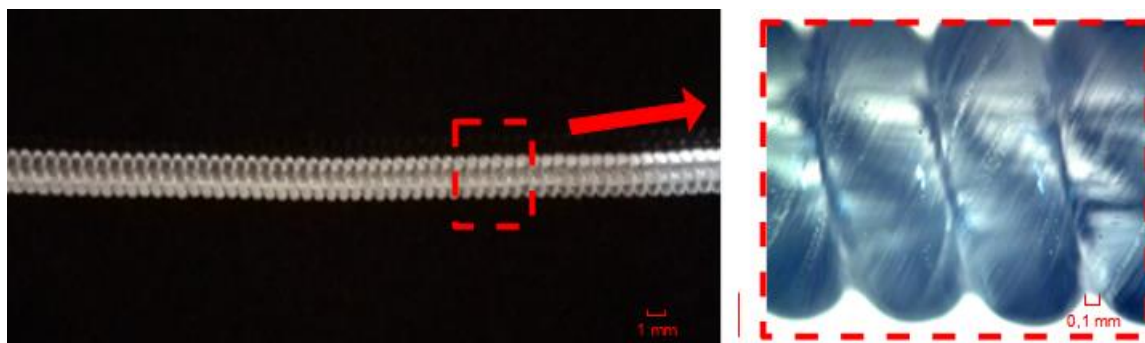


Figura2. Corpo de prova fabricado: fio de nylon espiralados.

2.2. Arranjo experimental

A disposição experimental se deu da seguinte forma, o corpo de prova foi acoplado a uma base fixa dentro de um câmara de temperatura controlada, fabricada de madeira balsa, e a um dinamômetro digital portátil da Instrutherm DD-500 com resolução de 0,1Kgf, sendo que seus dados foram armazenados em um computador. A parte frontal do aparato foi fabricada de vidro temperado transparente para a captura de imagens do corpo de prova usando uma câmera CCD (charged couple device) de alta resolução da Sony modelo XCD-SX900 (1280 x 960 pixels) e tamanho do pixel de $4,65\mu\text{m} \times 4,65\mu\text{m}$ com lentes C-Mount 10xZoom fixada a um distância constante do aparato. A temperatura durante os testes foi controlada com o auxílio de 2 termopares do tipo K ligados ao termômetro TD 880 da Icel Manaus e os dados foram armazenados no computador. O arranjo experimental pode ser observado na Fig. 3.

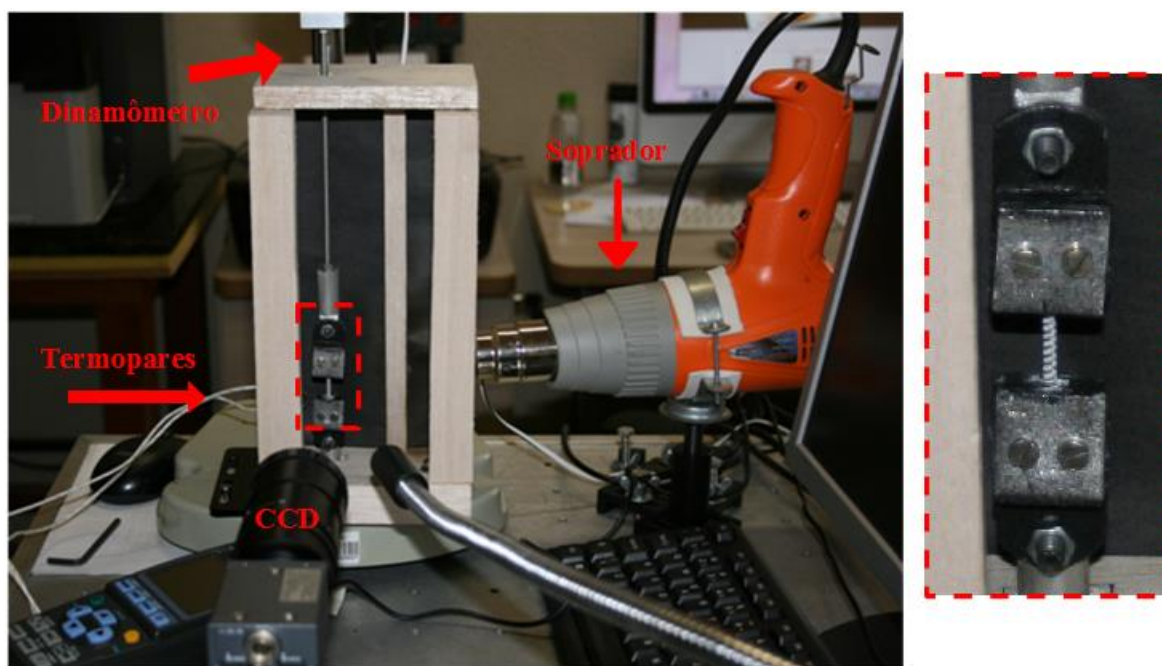


Figura 3. Aparato experimental utilizado.

Os testes foram realizados com três comprimentos iniciais diferentes do corpo de prova, conforme Tab. 1. Cada tipo de CP foi testado 5 vezes.

Tabela 1. Relação de medidas dos corpos de prova.

Tipo de corpo de prova	Tamanho inicial (mm)	Deformação aplicada (%)
Tipo 1	20	50
Tipo 2	15	50
Tipo 3	10	50

Inicialmente no procedimento experimental todos os corpos de prova foram deformados 50% a temperatura ambiente, de 25°C, no interior do aparato. Com o auxílio do Soprador Térmico DK-1160 da Dekel, a temperatura da câmara contendo o corpo de prova foi elevada da temperatura ambiente até 120 °C. Para obter um comportamento similar do soprador e uma taxa de aumento de temperatura para todos os testes, o intervalo entre os testes foi de 1 hora. Durante o ensaio, a câmara de alta resolução capturou imagens a cada 5 segundos do corpo de prova.

As imagens aquisitadas foram processadas usando um programa de Correlação de Imagens Digitais, objetivando a obtenção dos campos de deslocamento do CP durante o ciclo térmico. Com os campos de deslocamento gerados foram obtidos a deformação e rotação dos corpos de prova. Para tal, os corpos de prova foram submetidos a uma pintura branca em toda sua extensão seguido da aplicação de spray preto gerando assim, um padrão aleatório ilustrado na Fig.4. Este programa consiste na comparação de imagens antes e depois de uma deformação ser imposta a um corpo de prova. Mais informações sobre o método podem ser encontradas em Schreier *et al* (2009). Neste trabalho a sub-imagem de referência possuía 21 x 21 pixels nos Tipos de corpo de prova 1 e 2, e no Tipo 3, 31 x 31 pixels ;e a sub-imagem de busca, 51 x 51 pixels nos Tipos 1 e 2, e 61 x 61 pixels no Tipo 3.

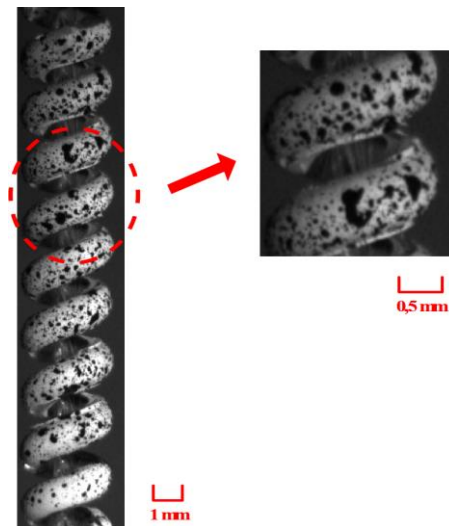


Figura 4. Corpo de prova com padrão aleatório monocromático para realização da Correlação de Imagens Digitais.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Fig. 5 ilustra a variação da temperatura com o tempo e na Fig. 6 a variação da taxa de aquecimento e resfriamento em relação ao tempo de todos os testes realizados. Pode-se observar que o aumento da temperatura e a taxa de aumento de temperatura são fortemente dependentes do comportamento do soprador em cada teste, sendo que este não apresentou velocidade de aquecimento e resfriamento similar nos testes em relação ao tempo.

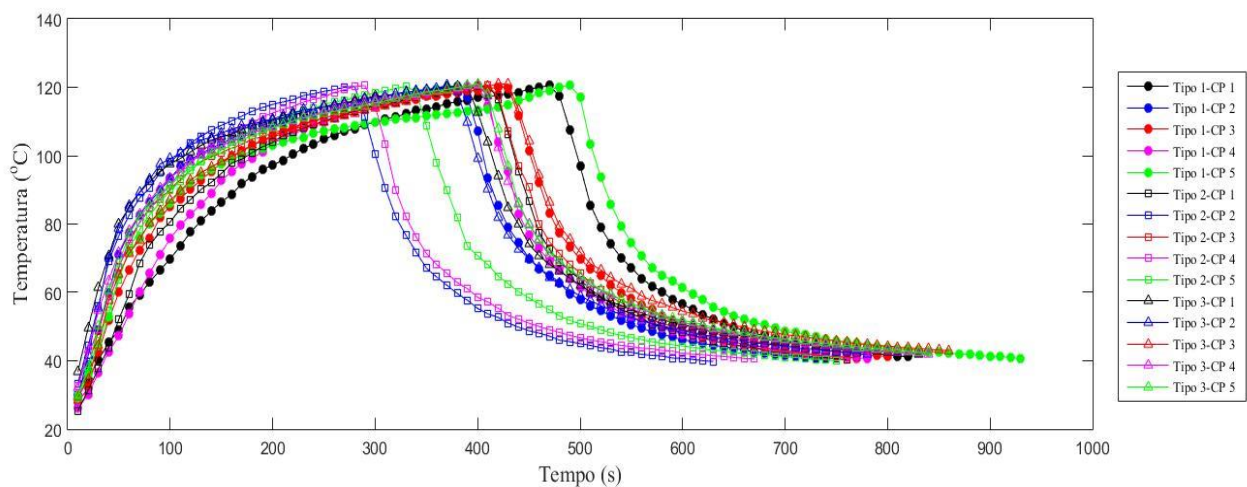


Figura 5. Variação da temperatura em relação ao tempo em cada teste realizado.

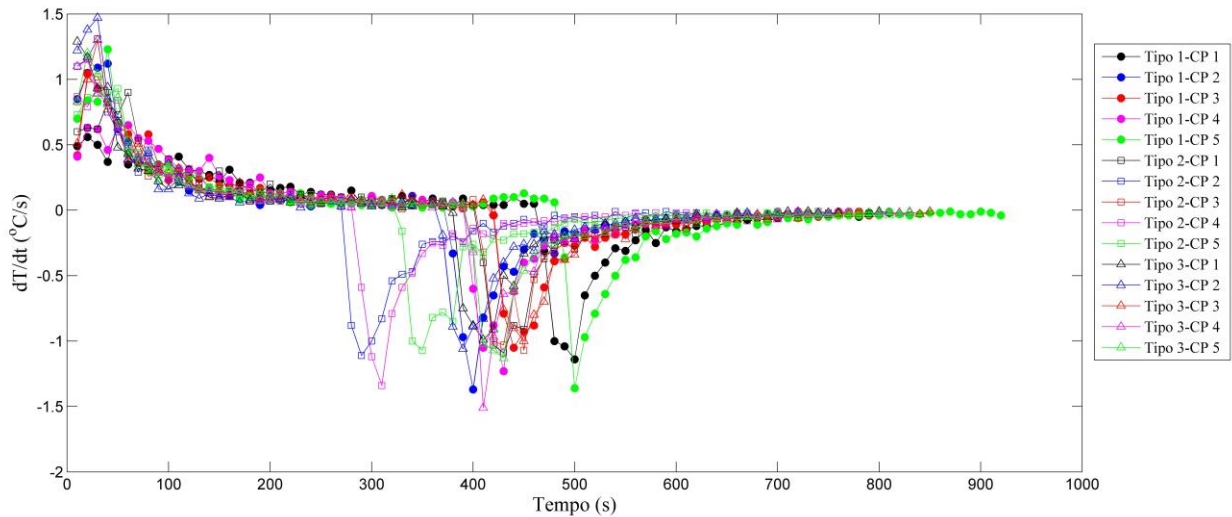


Figura 6. Variação da taxa de aquecimento em relação ao tempo em cada teste realizado.

Apesar da atuação do soprador ter variado, os picos de temperatura foram atingidos no intervalo de 300 a 500 (Fig. 5) segundos aproximadamente, as curvas do ciclo de aquecimento e de resfriamento possuem comportamento semelhante como é mostrado na Fig. 7. Nesta figura a evolução da temperatura durante todos os testes é mostrada em relação a um período normalizado calculado pela razão do tempo de teste total com o tempo equivalente a máxima temperatura.

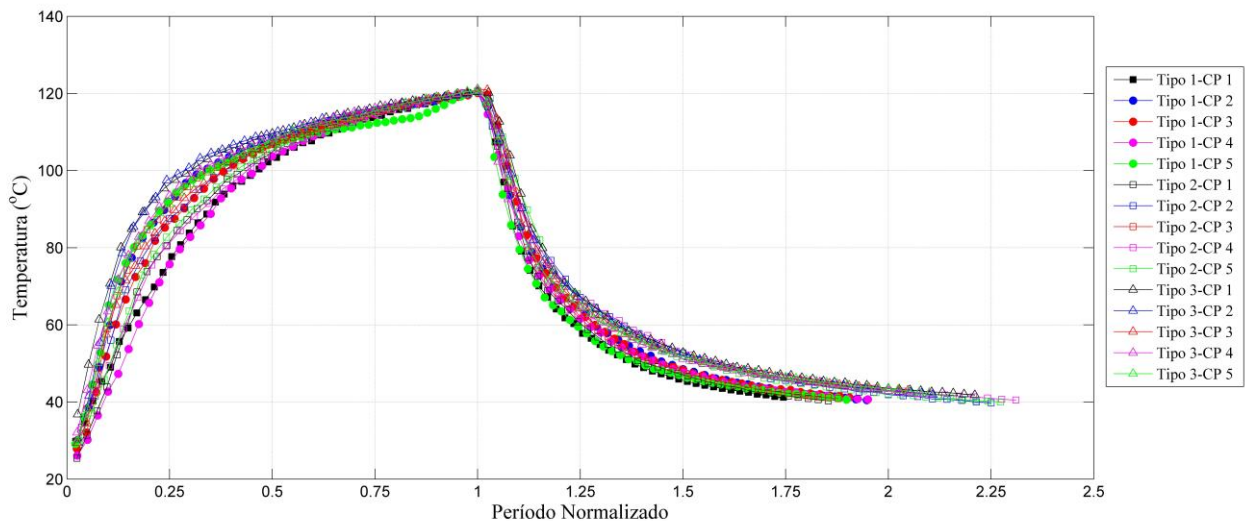


Figura 7. Curva da variação da temperatura em relação ao período normalizado em cada teste.

O comportamento similar entre os testes realizados apresentado na Fig. 7 pode também ser observado na Fig. 8, que representa a taxa de temperatura em relação ao período normalizado no ciclo de aquecimento e de resfriamento. Na Fig. 8 verifica-se grande mudança na taxa de variação da temperatura em relação ao tempo nos pontos de 0.25 e 1.25 de período normalizado, o primeiro representa a temperatura de aproximadamente 80°C no ciclo de aquecimento e o segundo, no ciclo de resfriamento, a temperatura aproximada de 80°C.

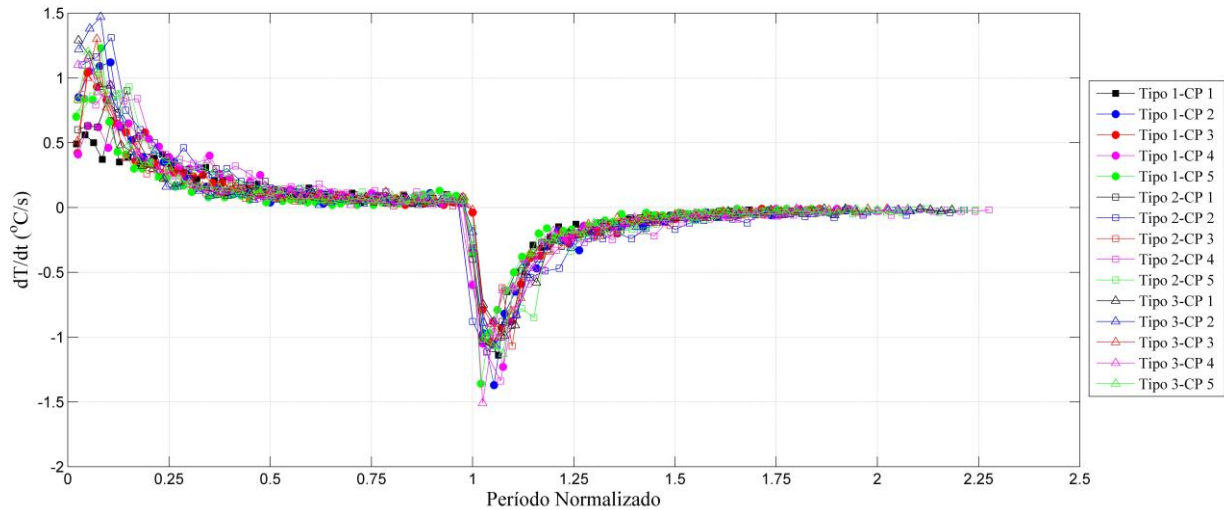


Figura 8. Curva da taxa aquecimento em relação ao período normalizado em cada teste.

Na Fig. 9 são mostrados os resultados da rotação média em função da temperatura, para os três tipos de CPs, associados aos ciclos apresentados na Fig. 6. A rotação do corpo de prova durante o aquecimento é ilustrada na Fig. 9 a). É possível constatar pouca variação na rotação até a faixa de temperatura entre 40°C e 50°C, neste intervalo se encontra a temperatura de transição vítrea do nylon (McIntyre, 2005). Um grande aumento na rotação ocorre a partir de 80°C que pode ser associado com taxa de aquecimento dos testes se tornar constante nesta faixa, conforme Fig 8. É possível observar que a rotação do corpo de prova aumenta na medida que o tamanho inicial do corpo de prova é reduzido. A Fig. 9 b) ilustra a rotação média em função da temperatura no ciclo de resfriamento. Verifica-se que a rotação se manteve aproximadamente constante entre 120°C até a faixa de temperatura de 80°C e 90°C, sendo seguida de uma queda acentuada no intervalo de 40°C a 50°C; esta conduta também pode ser associada à mudança na taxa de aquecimento observada na Fig. 8.

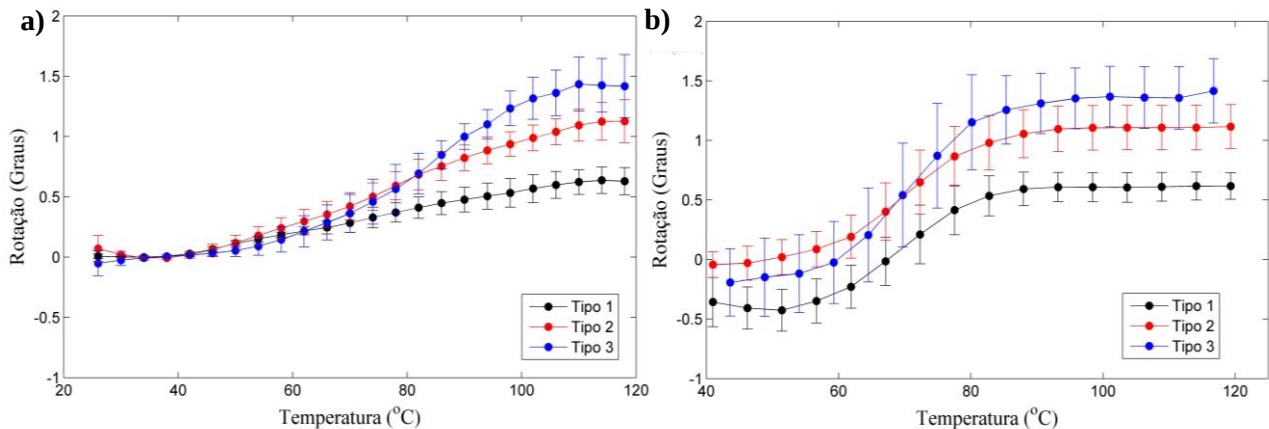


Figura 9. a) Curva de rotação média do CP em relação a temperatura no aquecimento, b) Curva de rotação média do CP em relação a temperatura no resfriamento.

A Fig. 10 mostra a evolução da deformação longitudinal média em y dos corpos de prova em relação a temperatura. Observar-se que a deformação é baixa no intervalo de 25°C a 50°C na Fig. 10 a) que representa o ciclo de aquecimento. O pico de deslocamento médio durante o aquecimento se encontra na faixa de 80°C a 90°C, seguido por uma queda; sendo que os corpos de prova do tipo 2 e 3 apresentam deformação média negativa a partir de 100°C. No ciclo de aquecimento foi constatado que o tipo de CP com maior deformação média foi o tipo 1 seguido pelo tipo 3 na faixa de 80°C a 120°C. O tipo 2 apresentou os menores valores de deformação na mesma faixa.

O ciclo de resfriamento pode ser verificado na Fig. 10 b). O deslocamento médio se manteve constante na faixa de 90°C a 120°C, a partir da temperatura de aproximadamente 90°C todos os corpos de prova apresentaram um aumento no deslocamento. A maior deformação no ciclo de resfriamento ocorreu no final do teste na temperatura de 40°C.

Os atuadores de nylon desenvolvidos por Haines et al (2014) se baseiam em dois fenômenos termo-mecânicos do nylon: uma grande expansão térmica anisotrópica, e o efeito da memória de forma do polímero (Kianzad, 2015). As espiras quando aquecidas tendem a desenrolar parcialmente, este fato é devido a um coeficiente termal de expansão radial

positivo e ao coeficiente termal de expansão axial negativo (Cherubini, 2015; Moretti, 2015; Aziz, 2015; Kianzad, 2015; Mirvakili, 2015; Haines, 2014).

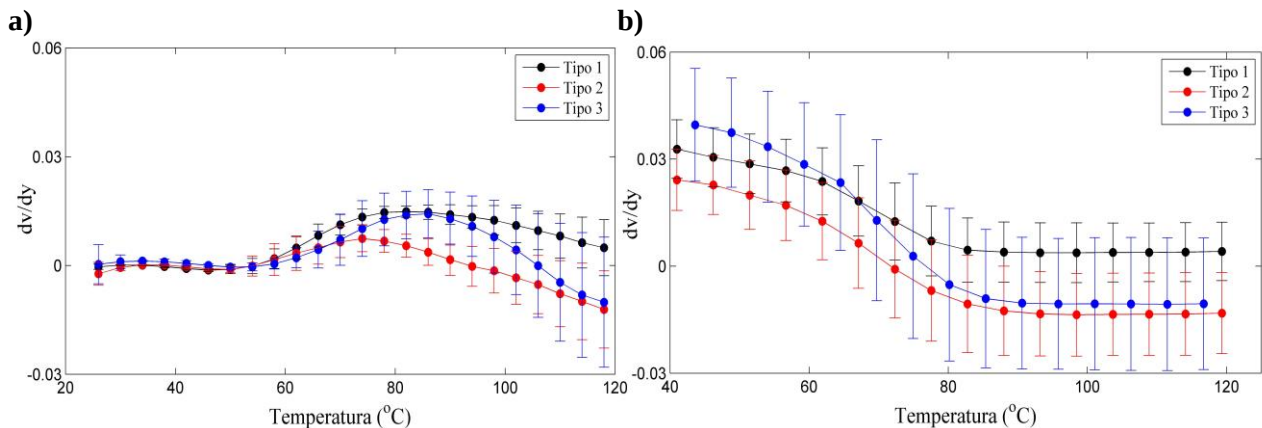


Figura 10. a) Curva de deformação média do CP em relação a temperatura no aquecimento, b) Curva de deformação média do CP em relação a temperatura no resfriamento.

4. CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo a investigação de uma nova categoria de atuadores termo-mecânicos fabricados de monofilamentos de nylon de pesca. Os corpos de prova, fabricados de fios de nylon 0,8 mm, foram testado com três diferentes comprimentos iniciais iguais a 20 mm, 15 mm e 10 mm. Os corpos de prova sofreram uma deformação inicial de 50% seguido de um ciclo de aquecimento (30° até 120°C) e resfriamento (120°C até 40°C). Imagens dos corpos de prova foram adquiridas durante o ensaio e através do pós-processamento destas imagens foram obtidos a rotação e deformação. A partir dos resultados pode-se observar que o aumento da rotação foi inversamente proporcional ao tamanho inicial do corpo de prova. O mesmo comportamento não foi observado em relação a deformação do corpo, dado que foi constatada pouca variação com a mudança do tamanho inicial dos CPs. Este trabalho tem caráter preliminar, mais testes serão realizados futuramente.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao apoio financeiro das agências de financiamento do governo brasileiro FAPERJ, Capes e CNPq.

6. REFERÊNCIAS

- Aziz, Shazed, et al. "Characterisation of torsional actuation in highly twisted yarns and fibres." *Polymer Testing* 46 (2015): 88-97.
- Cherubini, Antonello, et al. "Experimental characterization of thermally-activated artificial muscles based on coiled nylon fishing lines." *AIP Advances* 5.6 (2015): 067158.
- Chun, Kyoung-Yong, et al. "Hybrid carbon nanotube yarn artificial muscle inspired by spider dragline silk." *Nature communications* 5 (2014).
- Haines, Carter S., et al. "Artificial muscles from fishing line and sewing thread." *science* 343.6173 (2014): 868-872.
- Huber, J. E., N. A. Fleck, and M. F. Ashby. "The selection of mechanical actuators based on performance indices." *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. Vol. 453. No. 1965. The Royal Society, 1997.
- Kianzad, Soheil, et al. "Nylon coil actuator operating temperature range and stiffness." *SPIE Smart Structures and Materials+ Nondestructive Evaluation and Health Monitoring*. International Society for Optics and Photonics, 2015.
- Kim, Shi Hyeong, et al. "Harvesting temperature fluctuations as electrical energy using torsional and tensile polymer muscles." *Energy & Environmental Science* 8.11 (2015): 3336-3344.
- Kwon, Cheong Hoon, et al. "Torsional behaviors of polymer-infiltrated carbon nanotube yarn muscles studied with atomic force microscopy." *Nanoscale* 7.6 (2015): 2489-2496.
- Lima, Márcio D., et al. "Electrically, chemically, and photonicallly powered torsional and tensile actuation of hybrid carbon nanotube yarn muscles." *Science* 338.6109 (2012): 928-932.
- Madden, John DW, et al. "Artificial muscle technology: physical principles and naval prospects." *Oceanic Engineering, IEEE Journal of* 29.3 (2004): 706-728.
- Majidi, Carmel. "Soft robotics: a perspective—current trends and prospects for the future." *Soft Robotics* 1.1 (2014): 5-11.

- McIntyre, J. Eric, ed. Synthetic fibres: nylon, polyester, acrylic, polyolefin. Taylor & Francis US, 2005.
- Mirfakhrai, Tissaphern, John DW Madden, and Ray H. Baughman. "Polymer artificial muscles." *Materials today* 10.4 (2007): 30-38.
- Mirvakili, Seyed M., et al. "Simple and strong: Twisted silver painted nylon artificial muscle actuated by Joule heating." *SPIE Smart Structures and Materials+ Nondestructive Evaluation and Health Monitoring*. International Society for Optics and Photonics, 2014.
- Moretti, Giacomo, et al. "Experimental characterization of a new class of polymeric-wire coiled transducers." *SPIE Smart Structures and Materials+ Nondestructive Evaluation and Health Monitoring*. International Society for Optics and Photonics, 2015.
- Schreier, Hubert, Jean-José Orteu, and Michael A. Sutton. *Image correlation for shape, motion and deformation measurements*. Springer US, 2009.
- Sharafi, Soodabeh, and Guoqiang Li. "A multiscale approach for modeling actuation response of polymeric artificial muscles." *Soft matter* 11.19 (2015): 3833-3843.
- Wu, Lianjun, et al. "Nylon-muscle-actuated robotic finger." *SPIE Smart Structures and Materials+ Nondestructive Evaluation and Health Monitoring*. International Society for Optics and Photonics, 2015.
- Yip, Michael C., and Gunter Niemeyer. "High-performance robotic muscles from conductive nylon sewing thread." *Robotics and Automation (ICRA), 2015 IEEE International Conference on*. IEEE, 2015.
- Yuan, Jinkai, and Philippe Poulin. "Fibers Do the Twist." *science* 343.6173 (2014): 845-846.
- Zupan, Marc, Mike F. Ashby, and Norman A. Fleck. "Actuator Classification and Selection The Development of a Database*." *Advanced Engineering Materials* 4.12 (2002): 933.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

TERMO-MECHANICAL BEHAVIOR OF COILED NYLON FISHING LINES CON-2016-0205

Sarah Silveira Mendes, smende@id.uff.br¹
Luiz Carlos da Silva Nunes, luizcsn@id.uff.br¹

¹Universidade Federal Fluminense, pgmec@mec.uff.br

Abstract. *The aim of this paper is to investigate the thermo-mechanical behavior of coiled nylon fishing lines submitted to a pre-deformation of 50% and heating cycle, 30°C up to 120°C, followed by a cooling cycle, 120°C until 40°C. In the experimental procedure, a coiled line was pre-stretched holding the distance between its ends constant and was subjected to different temperatures (range from 30 to 120°C). During the tests, images of coiled line were captured every 5 seconds. A Digital Image Correlation software was used to attain/obtain the displacement fields. The rotation and the deformation of the specimens were estimated with displacement fields. Samples of coiled line were analyzed considering distinct initial lengths. The rotation of these coiled lines depends on the initial length, and the deformation was not affected by it.*

Keywords: Artificial Muscle, fishing line, Mechanical Behavior, DIC method