

MÓDULO DE CISALHAMENTO EFETIVO DE SILICONE REFORÇADO COM FIOS DE NYLON SUBMETIDO A CISALHAMENTO SIMPLES

Carolina Seixas Moreira, carolina_moreira@id.uff.br¹

Sarah Silveira Mendes, smendes@id.uff.br¹

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

¹Laboratório de Óptica-Mecânica (LOM), Departamento de Engenharia Mecânica (PGMEC - TEM), Universidade Federal Fluminense - UFF, Rua Passo da Pátria, 156, bloco E, sala 210

Resumo: Na teoria de elasticidade linear clássica, o cisalhamento puro pode ser considerado como um cisalhamento simples seguido de rotação. No entanto, quando um sólido elástico isotrópico homogêneo não linear é submetido a cisalhamento simples, não resulta apenas em um estado de tensões cisalhantes, mas uma componente de tensão normal também deve ser considerada. Apesar de existirem, na literatura, modelos bem estabelecidos para determinar o módulo de cisalhamento efetivo em compósitos submetidos a cisalhamento puro, poucos trabalhos o estudaram em cisalhamento simples. Por esse motivo, o objetivo do presente trabalho é investigar o módulo de cisalhamento efetivo de um compósito unidirecional submetido a cisalhamento simples. Para isso, foram realizados ensaios de cisalhamento simples em amostras de silicone com fios de nylon paralelos posicionados perpendicularmente e no mesmo plano que a força de cisalhamento aplicada. Variou-se a fração volumétrica do reforço dos corpos de prova, considerando 0,007; 0,014; 0,023 e 0,042, além da distância efetiva do aparato, 3,5 mm, 4,7 mm e 7 mm. Verificou-se que o módulo de cisalhamento efetivo aumenta com o diâmetro do reforço e diminui com a distância efetiva. Porém, para maiores valores de distância efetiva, a influência não é significativa para pequenas frações volumétricas.

Palavras-chave: cisalhamento simples, módulo de cisalhamento efetivo, compósito unidirecional

1. INTRODUÇÃO

Na teoria de elasticidade linear clássica, o cisalhamento puro pode ser representado por um cisalhamento simples seguido de rotação (Jones e Treolar, 1975). No entanto, quando um sólido isotrópico e homogêneo em regime elástico não linear é submetido a cisalhamento simples e grandes deformações, não resulta apenas em um estado de tensões cisalhantes (Destrade *et al.*, 2012). Nesse caso, uma componente de tensão normal deve ser considerada (Nunes e Moreira, 2013).

O módulo de cisalhamento efetivo é uma propriedade fundamental para descrever a relação tensão-deformação de um compósito unidirecional submetido a cisalhamento. Sua obtenção, juntamente com outras propriedades mecânicas efetivas do compósito, se dá pela regra das misturas. Os modelos de Reuss (1929) e Voigt (1889) descrevem os limites inferior e superior das propriedades mecânicas, respectivamente. No entanto, o modelo de Voigt para o módulo de cisalhamento efetivo pode não ser considerado realista, como mencionado por Sideridis (1988).

Apesar de existirem, na literatura, modelos bem estabelecidos para determinar o módulo de cisalhamento efetivo de compósitos submetidos a cisalhamento puro (Adams e Doner, 1967; Ogorkiewicz e Weidmann, 1974; Liu *et al.*, 2009; Xu, 2011), poucos trabalhos estudaram essa propriedade em cisalhamento simples. Por esse motivo, o objetivo desse trabalho é investigar o módulo de cisalhamento efetivo de um compósito unidirecional submetido a cisalhamento simples. Será estudado o caso em que as forças de cisalhamento atuam perpendicularmente às fibras do material. Diferentes frações volumétricas e distâncias efetivas serão consideradas.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os materiais utilizados na fabricação das amostras ensaiadas foram a cola de silicone Pesilox fixtudo extraforte transparente da Adespec e fios de nylon (poliamida 6) de diâmetros (d) 0,25 mm, 0,35 mm, 0,45 mm e 0,60 mm da Ekilon. Os corpos de prova foram fabricados segundo descrito por Moreira e Nunes (2017) com dimensões de 70 mm de comprimento, 55 mm de largura e 3,4 mm de espessura e distância entre fios de 2 mm mantida constante, como pode ser observado na Fig. 1. Dessa forma, os espécimes fabricados apresentaram frações volumétrica dos fios de 0,007; 0,014; 0,023 e 0,042.

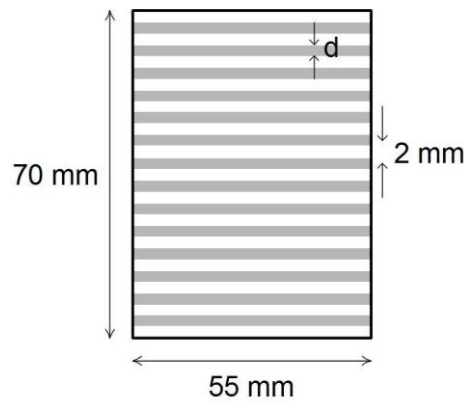


Figura 1. Esquema ilustrativo do corpo de prova.

Para a realização dos testes foram utilizados uma máquina de tração vertical elétrica com um dispositivo de cisalhamento simples acoplado e uma célula de carga de 100 kgf, como pode ser observado na Fig. 2. O método de correlação de imagens digitais foi utilizada para a obtenção dos campos de deslocamento resultantes dos testes. Esse método consiste basicamente na comparação de imagens do corpo de prova nos estados indeformado e deformado. Para a captura das imagens, uma câmera CCD (*charge-coupled device*) da Sony modelo XCD-SX900 de alta resolução (1280 x 960 pixels) e tamanho do pixel 4,65 μm x 4,65 μm foi utilizada (ver Fig. 2). Na correlação de imagens, é fundamental a presença de um padrão aleatório na superfície do material analisado. No caso deste trabalho, utilizou-se spray de tinta nas cores branca e preta para a produção do padrão. Além disso, foi utilizada uma fonte de luz (ver Fig. 2) para garantir iluminação homogênea na superfície do material, a fim de evitar interferências externas.



Figura 2. Arranjo experimental para ensaio de cisalhamento simples.

A Figura 3 mostra o dispositivo de cisalhamento em detalhe. Ele é composto de duas partes: do lado esquerdo, a parte que é acoplada a barra fixa da máquina de tração, e do lado direito, a parte acoplada a barra móvel. A distância entre essas duas partes é chamada de distância efetiva. Esse parâmetro foi mantido igual a 4,7 mm e, nos ensaios em amostras com fios de diâmetro 0,45 mm, foi também variado, assumindo os valores de 3,5 mm e 7 mm. Os ensaios foram realizados com uma velocidade de 8 mm/min em temperatura ambiente (25 °C). Imagens do corpo de prova foram capturadas a cada 0,3 segundos, aproximadamente, juntamente com as forças aplicadas aferidas pela célula de carga. As imagens obtidas foram processadas em um programa de correlação de imagens digitais.

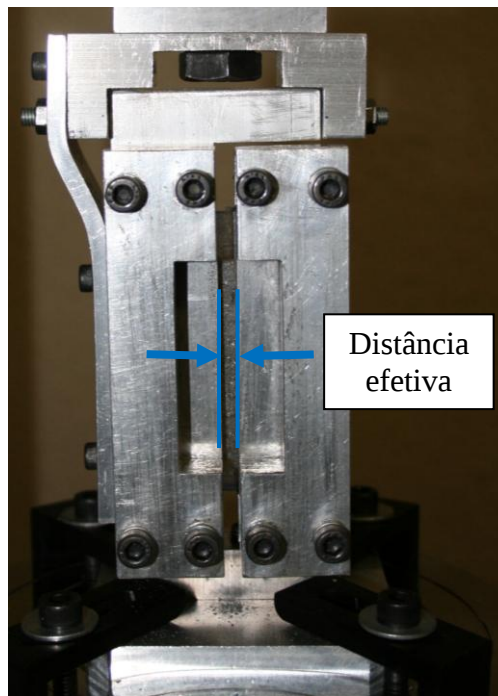


Figura 3. Dispositivo de cisalhamento.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 4 mostra as curvas de tensão cisalhante por distorção angular dos corpos de prova com fios de nylon de diâmetros 0,25 mm, 0,35 mm, 0,45 mm e 0,60 mm com distância efetiva 4,7 mm. É possível perceber que o aumento do diâmetro do reforço (fios de nylon) gerou um aumento na resistência do compósito. Como consequência do aumento da resistência, nas amostras com fios de nylon de diâmetros 0,45 mm e 0,60 mm, ocorreu escorregamento do espécime durante os testes. Desse modo, os resultados dessas amostras foram obtidos distorções angulares inferiores.

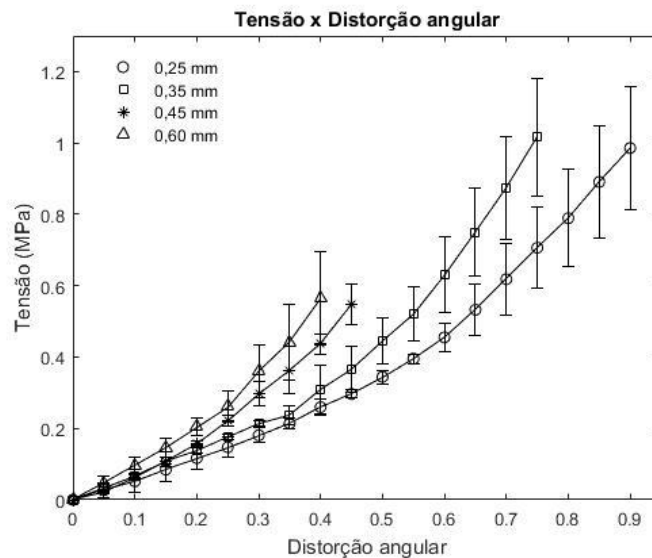


Figura 4. Resultados de tensão por distorção angular relativos a amostras com fios de nylon de diâmetros 0,25 mm, 0,35 mm, 0,45 mm e 0,60 mm submetidas a cisalhamento simples com distância efetiva 4,7 mm.

A Figura 5 apresenta a porção das curvas tensão por distorção angular em que a abscissa é menor do que 0,2, ou seja, a parcela dos resultados relativa ao trecho linear. Para esse caso, um polinômio de primeiro grau, no qual o coeficiente linear é zero e o coeficiente angular representa o módulo de cisalhamento efetivo, foi ajustada às curvas de cada uma das amostras. Os valores do módulo de cisalhamento efetivo foram plotados relativamente às frações volumétricas (ver Fig. 6). Pode-se perceber que o módulo obtido reflete o aumento da resistência do material com o diâmetro do reforço. Além disso, a relação do módulo de cisalhamento efetivo com a fração volumétrica não é linear.

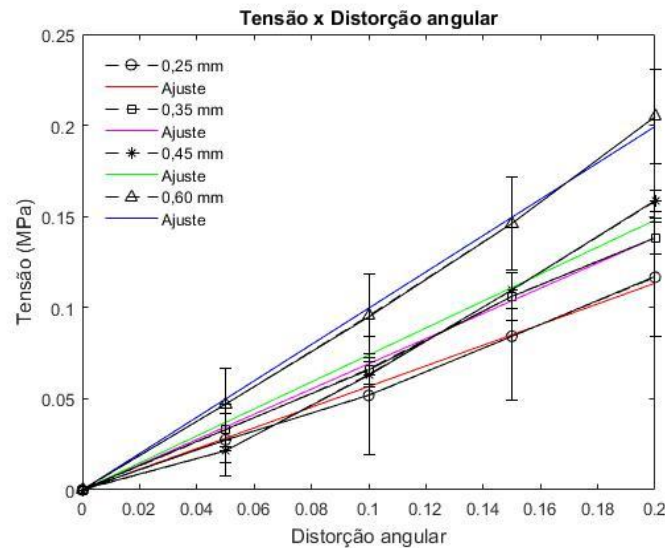


Figura 5. Porção das curvas de tensão por distorção angular das amostras com fios de diâmetros 0,25 mm, 0,35 mm, 0,45 mm e 0,60 mm, com distorção angular inferior a 0,2.

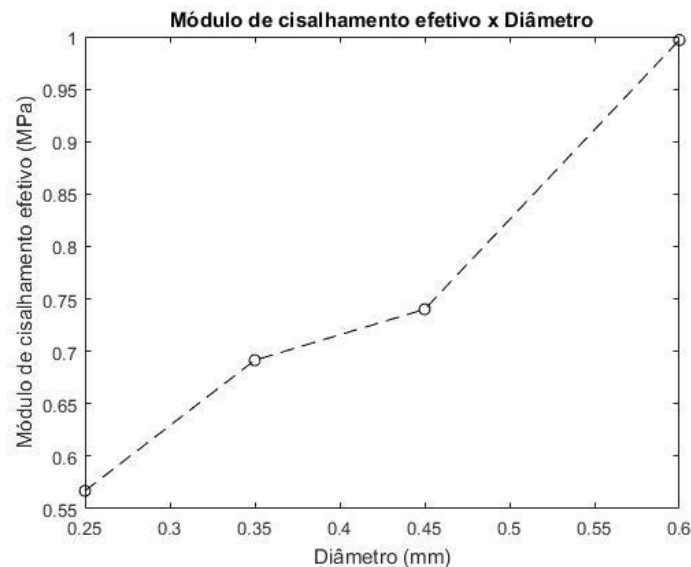


Figura 6. Curva que relaciona o módulo de cisalhamento efetivo com a fração volumétrica das amostras.

Na Figura 7 estão apresentadas as curvas tensão por distorção angular dos corpos de prova com nylon de diâmetro 0,45 mm e distâncias efetivas 3,5 mm, 4,7 mm e 7 mm. Um aumento da distância efetiva deveria reduzir a tensão necessária para alcançar uma mesma distorção angular, como ocorre das distâncias de 3,5 mm para 4,7 mm. No entanto, como a fração volumétrica considerada é relativamente muito baixa, a partir de uma dada distância efetiva, a influência do reforço já não é mais significativa, como ocorreu nos testes com as distâncias 4,7 mm e 7 mm. Da mesma maneira que os resultados apresentados na Fig. 4, ajustou-se uma reta, na qual o coeficiente linear é zero e o coeficiente angular representa o módulo de cisalhamento efetivo, aos dados experimentais ilustrados na Fig. 7. A curva do módulo em relação a distância efetiva correspondente é apresentada na Fig. 8 e ajuda a visualizar esse comportamento.

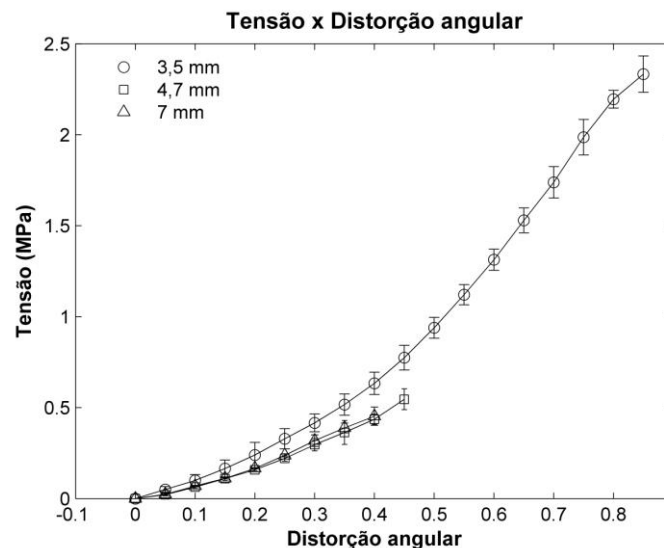


Figura 7. Curvas tensão por distorção angular dos corpos de prova com fios de diâmetro 0,45 mm e distâncias efetivas 3,5 mm, 4,7 mm e 7 mm.

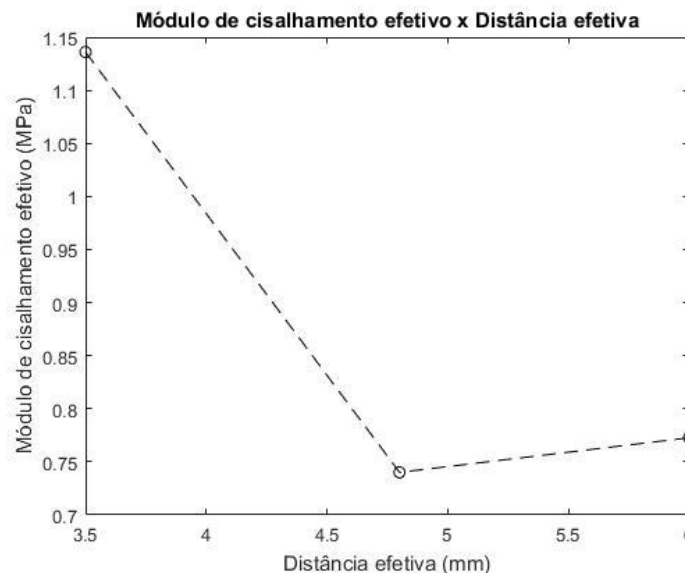


Figura 8. Curva do módulo de cisalhamento efetivo em relação a distância efetiva.

4. CONCLUSÕES

No presente trabalho foram realizados ensaios de cisalhamento simples em silicone reforçado com diferentes diâmetros de fios de nylon paralelos. Testou também amostras com fios de mesmo diâmetro em diferentes distâncias efetivas. Com base nesses ensaios, o módulo de cisalhamento para cada espécime foi obtido. É possível concluir que o módulo de cisalhamento efetivo para amostras com reforço perpendicular a força aplicada aumenta com o diâmetro do reforço e diminui com a distância efetiva. No caso da variável distância efetiva, a partir de um dado valor, a fração volumétrica precisa ser maior do que a que foi testada para que os efeitos do reforço tenham influência significativa nos resultados.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer o suporte financeiro provido pelas agências de financiamento CAPES, FAPERJ e CNPq.

6. REFERÊNCIAS

Adams, D. F. e Donner, D. R., "Longitudinal shear loading of a unidirectional composite", J. Compo Mater., vol. 1, pp. 4-17, 1967.

- Destrade, M., Murphy, J. G. e Saccomandi, G., "Simple shear is not so simple", *Int. J. Nonlinear Mech.*, vol. 47, pp. 210-214, 2012.
- Jones, D. F. e Treolar, L. R. G., "The properties of rubber in pure homogeneous strain", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 8, pp. 1285-1304, 1975.
- Liu, B., Feng, X. e Zhang, S. M., "The effective Young's modulus of composites beyond the Voigt estimation due to the Poisson effect", *Compos Sci Technol.*, vol. 69, pp. 2198-2204, 2009.
- Moreira, C. S. e Nunes, L. C. S., "Simple shearing of rubberlike materials filled with parallel fibers at large strain", *Journal of Composite Materials*, vol. 51, pp. 1643-1651, 2017.
- Nunes, L. C. S. e Moreira, D. C., "Simple shear under large deformation: experimental and theoretical analyses", *Euro. J. Mech. A/Solids*, vol. 42, pp. 315-322, 2013.
- Ogorkiewicz, R. M. e Weidmann, G. W., "Shear stiffness of epoxy-glass composites", *Composites*, vol. 5, pp. 242-246, 1974.
- Reuss, A., "Berchung der Fiessgrenze von Mischkristallen auf Grund der Plastizitätsbedingung für Einkristalle", *Z Angew Math Mech*, vol. 9, pp. 49-58, 1929.
- Sideridis, E., "The in-plane shear modulus of fiber reinforced composites as defined by the concept of interphase", *Compos Sci Technol.*, vol. 31, pp. 35-53, 1988.
- Voigt, W., "Über die Beziehung Zwischen Den Beiden Elastizitätskonstanten Isotroper Körper", *Wied Ann*, vol. 38, pp. 573-587, 1889.
- Xu, X. F., "On the third-order bounds of the effective shear modulus of two-phase composites", *Mech Mater.*, vol. 43, pp. 269-275, 2011.

7. RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

EFFECTIVE SHEAR MODULUS OF SILICONE REINFORCED WITH NYLON FIBERS UNDER SIMPLE SHEAR

Carolina Seixas Moreira, carolina_moreira@id.uff.br¹

Sarah Silveira Mendes, smendes@id.uff.br¹

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

¹Laboratório de Óptica-Mecânica (LOM), Departamento de Engenharia Mecânica (PGMEC - TEM), Universidade Federal Fluminense - UFF, Rua Passo da Pátria, 156, bloco E, sala 210

Abstract. In classical linear elastic theory, pure shear may be considered as simple shear followed by rigid rotation. However, when a homogeneous isotropic nonlinear elastic solid under simple shear is submitted to shear force, a normal stress component must also be considered. There are well-established models to estimate the effective shear modulus of composites under pure shear, whereas few works have attempted to the effective shear modulus under simple shear. In this context, the objective of this paper is to study the effective shear modulus of a unidirectional composite under simple shear. Specimens of silicone reinforced with parallel nylon fibers were tested under simple shear. The fibers of nylon were perpendicular to the applied shear force and were in the same plane of this force. The specimens were fabricated with different volume fractions, considering 0.007, 0.014, 0.023 and 0.042, and different values of effective distance, 3.5 mm, 4.7 mm and 7 mm. It could be seen that the effective shear modulus increases with volume fraction and decreases with effective distance. Nevertheless, the influence of the effective distance is not meaningful for small volume fractions.

Keywords: simple shear, effective shear modulus, unidirectional composite