

ESTUDO DO ESTADO DE DEFORMAÇÃO EM PTFE SUBMETIDO A CISALHAMENTO SIMPLES

J.C.A.D. Filho, joaocadf@id.uff.br¹

L.C.S. 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, Niterói, RJ CEP 24210-240, Brasil

Resumo: O objetivo do presente trabalho é investigar o estado de deformação em uma placa fina de politetrafluoretileno (PTFE), também conhecido como Teflon®, submetida a cisalhamento simples e grandes deformações. Os corpos de prova foram fabricados e testados em condições de cisalhamento simples, usando a metodologia conhecida como: *Modified slotted shear test*. Os campos de deslocamento foram obtidos das imagens dos corpos de provas, gravadas durante os testes, usando o método de Correlação de Imagem Digital 2D (CID-2D). Um estudo prévio acerca da melhor região a ser considerada na área de cisalhamento foi executado. A partir dos campos de deslocamentos, o tensor gradiente de deformação e a matriz de rotação foram determinados. Foram realizadas correções nos resultados usando a matriz de rotação. O número de vorticidade cinemática foi analisado para verificar o estado de cisalhamento. Além disso, foram estudadas algumas definições de deformações, tais como Hencky, Biot, Green e Nominal. Como resultado preliminar, foi possível verificar que a metodologia empregada pode ser útil para avaliar o estado de deformação no caso de cisalhamento simples. Além disso, os resultados indicam que o aparato experimental pode ser uma boa alternativa para impor uma condição de cisalhamento simples em polímeros.

Palavras-chave: cisalhamento simples, politetrafluoretileno, vorticidade cinemática

1. INTRODUÇÃO

Materiais poliméricos estão ganhando destaque nos diversos setores industriais, sobretudo na indústria aeroespacial e petroquímica. Desta forma, o conhecimento do comportamento mecânico destes materiais é importante em diversos estados de solicitação, como em grandes deformações cisalhantes. Tubulações de instalações *offshore* possuem uma camada interna em PTFE visando proteção contra fluidos corrosivos. Estas tubulações muitas vezes podem sofrer carregamentos cisalhantes. As excelentes propriedades do PTFE conferem a ele extensas aplicações principalmente na área médica. Fibras deste polímero foram utilizadas para a melhora do procedimento cirúrgico de descompressão microvascular, segundo Jiao *et al.* (2018). Além disso, ele é muito conhecido pelas suas propriedades antiaderentes e dielétricas, muito utilizado em aparatos domésticos e em componentes eletrônicos. De acordo com Nunes *et al.* (2011), o polímero PTFE apresenta um complexo comportamento não linear e elevada deformação plástica.

Procedimentos experimentais envolvendo polímeros já foram executados por G'Sell *et al.* (1983), tendo em vista ensaios de cisalhamento simples no estado plano. Nunes (2015) apresentou uma metodologia denominada de *Modified slotted shear test*, que reduziu significativamente a distorção da seção de cisalhamento sobre grandes deformações, demonstrando ser um procedimento alternativo para ensaiar materiais com comportamento hiperplástico. Esta metodologia também reduziu os efeitos de deslizamento provocados pelo baixo coeficiente de atrito do PTFE.

A determinação da deformação em materiais submetidos a grandes deformações gerou grandes discussões entre pesquisadores. A deformação de Hencky, de acordo com os trabalhos (Onaka, 2010 e Onaka, 2012), corresponde a uma descrição alternativa para avaliar a grande deformação plástica em cisalhamento simples. Porém Jonas *et al.* (2011) argumentou que esta formulação não é a melhor para descrever tal condição. É importante ressaltar que existem outras definições para a deformação, como a formulação de Biot, Green Lagrange e Nominal, conforme descrito por Ziólkoeski (2006).

O objetivo deste trabalho é determinar o estado de deformação do PTFE submetido a cisalhamento simples em um carregamento quase estático. Para obter este estado, os dados experimentais obtidos devem estar livres de movimentos de corpo rígido, sobretudo da rotação. Uma vez constatado que a condição de cisalhamento simples foi alcançada pelo número de vorticidade cinemática, as diferentes formulações de deformação são analisadas para se verificar a diferença entre elas neste estado de solicitação.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Cinco corpos de prova do polímero PTFE foram fabricados segundo a metodologia proposta por Nunes (2015). Foi considerada uma região para análise com área igual a 32 mm², localizada entre as fendas, que foram confeccionadas com uma angulação de 45°. Além disso, uma estrutura metálica foi colocada no corpo de prova para evitar a rotação e garantir o cisalhamento simples durante o ensaio. As dimensões dos corpos de provas foram 130 mm de comprimento, 40 mm de largura e 2 mm de espessura. A Fig. 1(a) ilustra o corpo de prova adotado e a Fig. 1(b), a estrutura metálica utilizada no ensaio. Os espécimes foram preparados com um padrão aleatório proveniente de um spray de tinta preta.

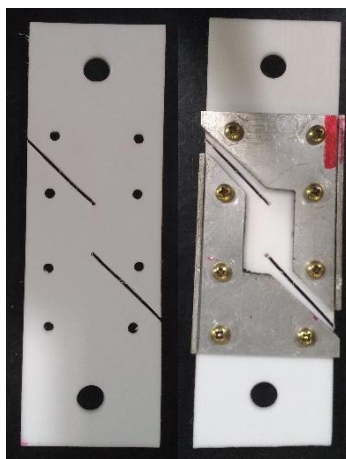


Figura 1. Espécime. (a) Corpo de prova; (b) Estrutura metálica montada no corpo de prova.

O ensaio foi executado com auxílio de uma máquina universal com carregamento quase estático em temperatura ambiente (25° C) e velocidade de 8mm/min. A célula de carga com capacidade de 100kgf foi posicionada entre a máquina e o corpo de prova para extrair dados da tensão aplicada. Além disso, uma câmera CCD de alta resolução (Sony XCD-SX910) foi utilizada no experimento junto com uma lente 10xZoom C-Mount. A imagem da superfície da região de cisalhamento do corpo de prova foi capturada antes e durante o carregamento, onde as 10 primeiras imagens foram obtidas com intervalo de tempo de 0,5s. As imagens restantes foram capturadas com intervalo de 1s até a ruptura do material. Isto proporcionou maiores informações da parte inicial do ensaio.

As imagens dos corpos de prova foram posteriormente inseridas num algoritmo de Correlação de Imagens Digitais 2D (CID-2D) para se obter o campo de deslocamento de um elemento, localizado na região de cisalhamento. Segundo Sutton *et al.* (2009), O CID-2D é um método óptico sem contato com excelente grau de precisão e confiabilidade. A câmera constitui um elemento de extrema importância para o experimento uma vez que quanto maior a sua resolução, maior será a precisão dos resultados encontrados. O algoritmo utilizado, por sua vez, consegue obter deformações superficiais com precisão de 0,1 pixels. A grande deformação esperada neste tipo de material torna os extensômetros inadequados, fazendo o CID-2D o melhor método para se adotar no experimento.

A Fig. 2 mostra o aparato experimental adotado. É possível observar o espécime montado na máquina universal com uma câmera direcionada para a região de cisalhamento. Duas fontes luminosas foram utilizadas para iluminar o espécime e auxiliar na qualidade das imagens capturadas.

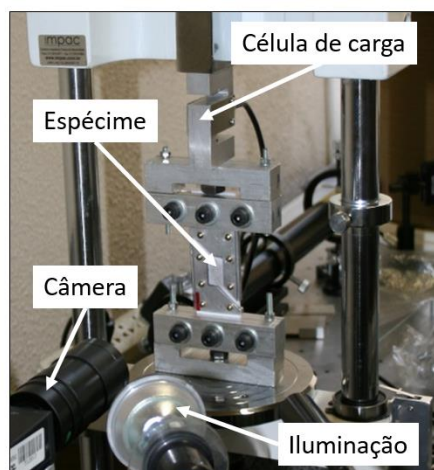


Figura 2. Arranjo experimental.

3. FUNDAMENTOS BÁSICOS DE CINEMÁTICA

A posição de uma partícula, segundo uma descrição lagrangeana, pode ser obtida de acordo com

$$x_i = X_i + u_i(X_i, t) \quad (1)$$

onde X_i representa a coordenada inicial da partícula, x_i a coordenada final desta partícula, u_i o deslocamento e t o instante de tempo.

O tensor gradiente de deformação $\mathbf{F}$ bidimensional é definido como

$$\mathbf{F} = \frac{\partial x_i}{\partial X_i} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial X} & \frac{\partial x}{\partial Y} \\ \frac{\partial y}{\partial X} & \frac{\partial y}{\partial Y} \end{bmatrix} = \mathbf{I} + \frac{\partial u_i}{\partial X_i} \quad (2)$$

onde $\mathbf{I}$ representa a matriz identidade e $\frac{\partial u_i}{\partial X_i}$ o tensor gradiente de deslocamento.

O tensor $\mathbf{F}$ pode ser decomposto através do teorema de decomposição polar,

$$\mathbf{F} = \mathbf{R}\mathbf{U} = \mathbf{V}\mathbf{R} \quad (3)$$

onde $\mathbf{U}$ representa o tensor de estiramento direito, $\mathbf{V}$ o tensor de estiramento esquerdo e $\mathbf{R}$ o tensor de rotação ortogonal.

O tensor $\mathbf{R}$ pode ser definido de acordo com

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (4)$$

onde o ângulo θ representa o ângulo entre as coordenadas final, definida em cada estado deformado, e inicial, definida no estado indeformado.

Finalmente, o tensor $\mathbf{U}$ é obtido de acordo com a equação abaixo.

$$\mathbf{U} = \frac{\mathbf{F}}{\mathbf{R}} \quad (5)$$

O tensor gradiente da velocidade bidimensional, definido por

$$\Delta \mathbf{v} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial X} \frac{\partial u}{\partial t} & \frac{\partial}{\partial Y} \frac{\partial u}{\partial t} \\ \frac{\partial}{\partial X} \frac{\partial v}{\partial t} & \frac{\partial}{\partial Y} \frac{\partial v}{\partial t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{xt} & u_{yt} \\ v_{xt} & v_{yt} \end{bmatrix} \quad (6)$$

pode ser decomposto através da soma do tensor taxa de deformação $\mathbf{S}$ e de vorticidade $\mathbf{\Omega}$.

O número de vorticidade cinemática adimensional,

$$W_k = \frac{||\mathbf{\Omega}||}{||\mathbf{S}||} = \frac{\sqrt{\zeta^2}}{\sqrt{D_h^2 + Def^2 + Def'^2}} \quad (7)$$

pode ser utilizado para determinar o quanto se está próximo do estado de cisalhamento simples. Segundo Schielicke *et al.* (2016), ζ é a componente vertical do tensor vorticidade, D_h representa a divergência horizontal, Def a deformação pelo alongamento e Def' a deformação pelo cisalhamento. Estes parâmetros são obtidos de acordo com

$$\zeta = v_{xt} - u_{yt} \quad (8)$$

$$D_h = u_{xt} + v_{yt} \quad (9)$$

$$Def = u_{xt} - v_{yt} \quad (10)$$

$$Def' = u_{yt} + v_{xt} \quad (11)$$

onde u_{it} e v_{it} são as componentes do tensor gradiente da velocidade bidimensional. Estes componentes são encontrados através do campo de deformação e intervalo de tempo adotado, porém observa-se a independência com o tempo após expandir a formulação da vorticidade cinemática. Desta forma, W_k é obtido apenas com o tensor gradiente de deformação $\mathbf{F}$.

É importante destacar que para verificar o cisalhamento simples, W_k deve ser equivalente a 1, de acordo com Truesdell (1953). Números abaixo deste valor demonstram casos onde a taxa de deformação prevalece sobre a taxa de rotação e os valores acima sugerem o oposto, ou seja, o efeito da rotação prevalece sobre a taxa de deformação. O cisalhamento puro é alcançado quando W_k for nulo. Além disso, um movimento de rotação de corpo rígido ocorre quando W_k for ∞ .

Existem diversas definições de deformação em cisalhamento simples, como as deformações de Hencky (logarítmica), Biot, Green Lagrange e Nominal, de acordo com Ziólkoeski (2006). Estas definições são respectivamente dadas por

$$e_{hencky} = \ln U \quad (12)$$

$$E_{biot} = (U - I) \quad (13)$$

$$E_{green\ lagrange} = 0,5(U^2 - I) \quad (14)$$

$$E_{nominal} = (F - I) \quad (15)$$

onde I representa a matriz identidade.

Somente a deformação Nominal utiliza o tensor gradiente de deformação F . As outras definições se baseiam no tensor de estiramento direito U , que é livre de efeitos de rotação, para descrever a deformação.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Um estudo qualitativo acerca da melhor região contida na área de cisalhamento foi executado levando em consideração apenas o primeiro corpo de prova ensaiado. Após inserir as imagens capturadas do espécime no algoritmo do CID-2D, 3 campos de deslocamento na direção x e y foram obtidos para os carregamentos de 295N, 356N e 394N. Estes campos se encontram ilustrados na Fig. 3(a), 3(b) e 3(c), respectivamente. O carregamento inicial não foi considerado nesta análise pois o espécime poderia sofrer um processo de acomodação na estrutura metálica utilizada no ensaio. Além disso, carregamentos superiores também foram desconsiderados para evitar influências de movimento de corpo rígido.

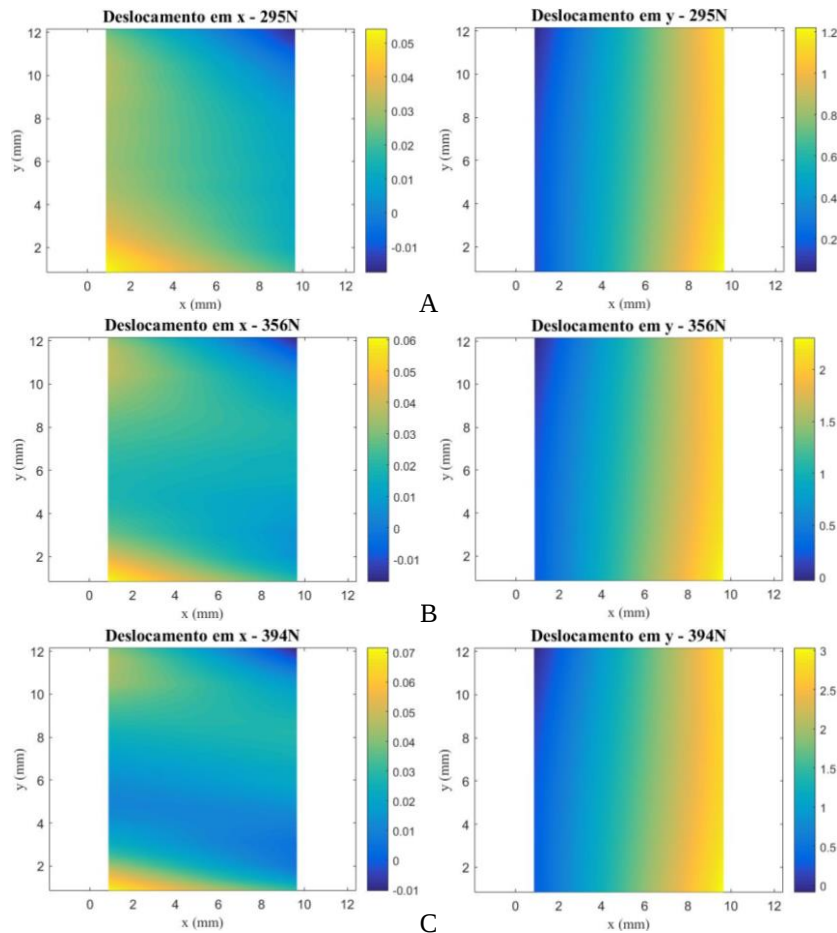


Figura 3. Deslocamentos na direção x e y para carregamentos equivalentes a: (a) 295N; (b) 356N; (c) 394N.

De acordo com a Fig. 3, a melhor região a ser considerada no estudo se encontra aproximadamente no centro da região de cisalhamento dos espécimes, como ilustrado na Fig. 4. Nesta região o deslocamento na direção x é praticamente nulo. Pode-se observar ainda que o processo de acomodação é evidente para o carregamento de 295N, porém pouco influencia na região considerada.

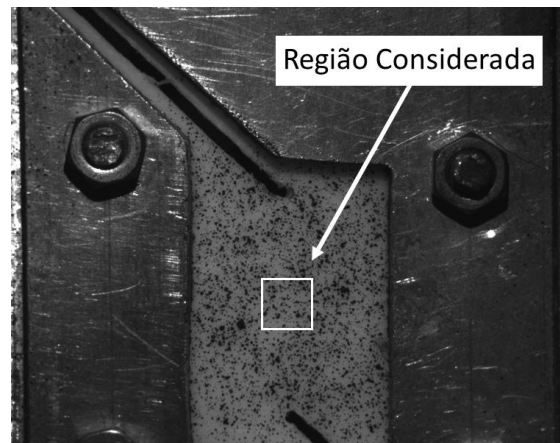


Figura 4. Região considerada.

Após a análise dos dados, foi constatado que na região de cisalhamento considerada surgiram movimentos de corpo rígido, ou seja, movimento de translação e rotação. Desta forma, através da obtenção do tensor gradiente de deformação $\mathbf{F}$, conseguiu-se retirar a translação do elemento infinitesimal. Além disso, através da decomposição polar foi possível remover a rotação dos dados experimentais.

A Fig. 5 ilustra o elemento infinitesimal indeformado e deformado em cada instante de tempo do ensaio. A Fig. 5(a) representa o deslocamento do elemento sem nenhuma correção, a Fig. 5(b) mostra a correção da translação e a Fig. 5(c) a correção da translação e rotação. É importante destacar que, de acordo com a Fig. 5, a metodologia proposta por Nunes (2015) consegue prevenir as rotações, mas pequenos valores no elemento podem ser observados.

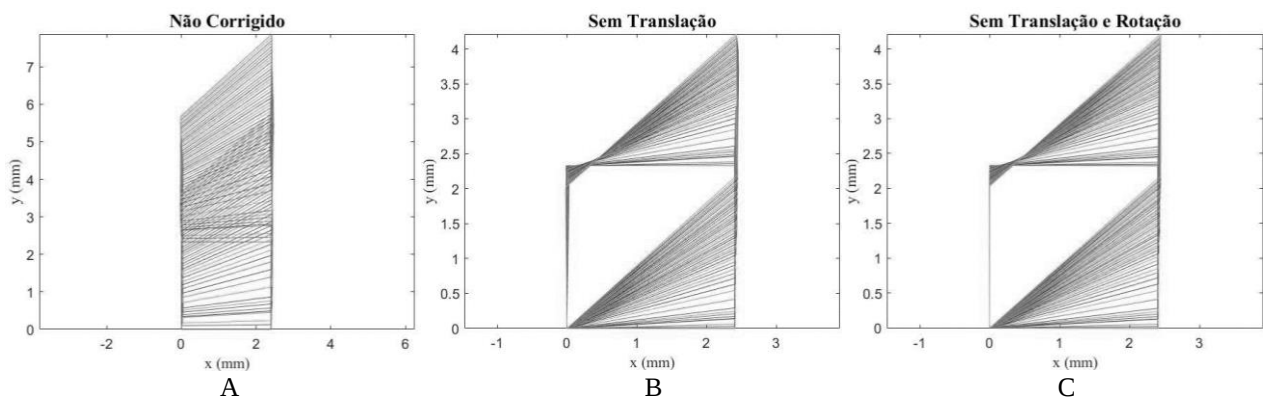


Figura 5. Correção dos deslocamentos. (a) Sem correção; (b) Correção da translação; (c) Correção da translação e rotação.

O número de vorticidade W_k foi determinado a fim de se verificar a condição de cisalhamento simples. Este número foi calculado através do campo de deformação dos cinco corpos de prova. Após as devidas correções dos dados experimentais (exclusão da translação e rotação), consegue-se observar, através da Fig. 6, que o valor de W_k corrigido se manteve próximo de 1. Isto demonstra que o cisalhamento simples foi alcançado através do procedimento experimental. Porém é importante destacar que os dados experimentais não corrigidos já conseguem representar o cisalhamento simples, garantindo a eficácia do procedimento experimental adotado.

Além disso, a curva representando os dados sem correção, na Fig. 6, demonstra casos onde a deformação prevalece sobre a rotação ($W_k < 1$) e outros onde a rotação acaba prevalecendo sobre a deformação ($W_k > 1$). A curva dos dados corrigidos se encontra abaixo de 1, mostrando que a deformação neste trecho prevalece sobre a rotação. A pequena divergência entre a curva corrigida e a referência ($W_k = 1$) ocorre, visto que o elemento infinitesimal da região de cisalhamento do espécime possui deformações normais. Vale ressaltar que o cisalhamento puro ocorre quando $W_k = 0$ e o movimento de rotação de corpo rígido quando $W_k = \infty$.

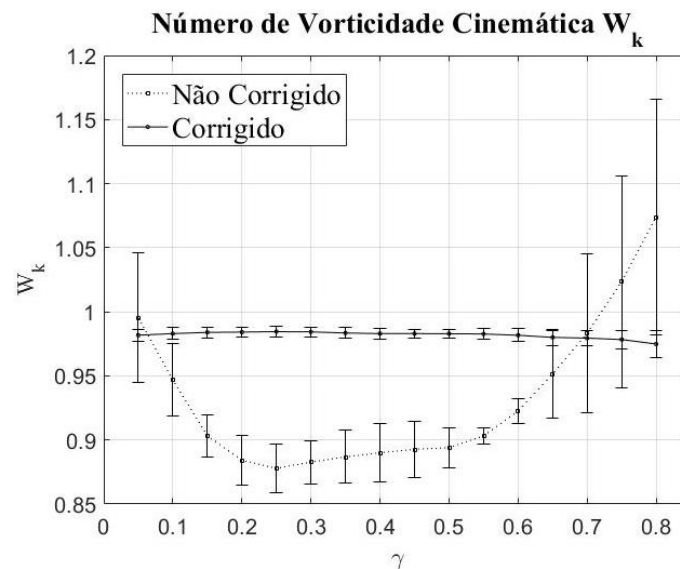


Figura 6. Número de vorticidade cinemática W_k .

As curvas usando formulações de deformação cisalhante se encontram ilustradas na Fig. 7. Os resultados indicam que não existe uma diferença significativa entre as definições analisadas no trabalho, considerando os valores médios obtidos através dos cinco corpos de prova. Além disso, pode-se observar que as definições de deformação de Biot e Nominal praticamente coincidem.

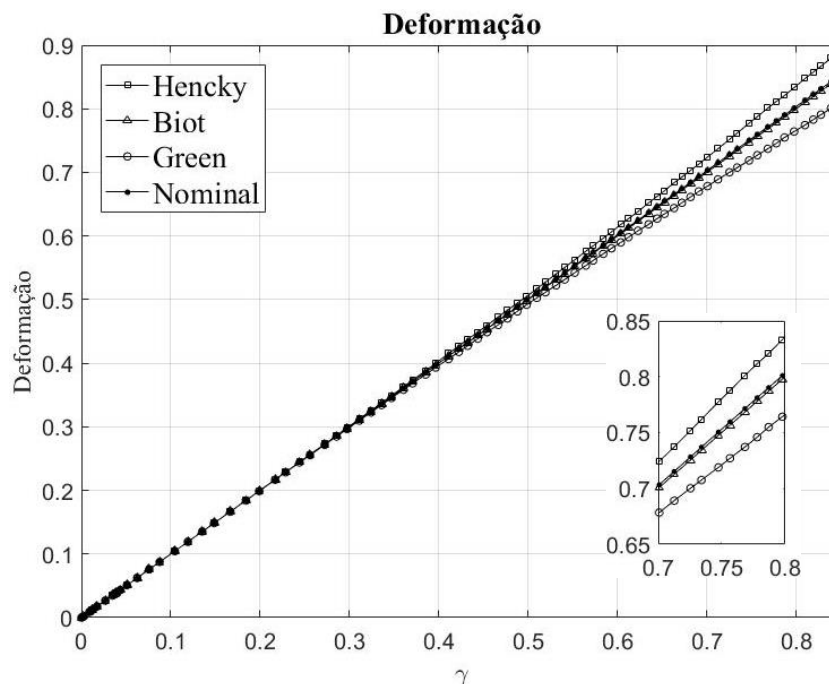


Figura 7. Definições de deformação pela deformação cisalhante γ .

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho, o estado de deformação em uma placa fina de PTFE sujeito a um cisalhamento simples foi estudado. Através do campo de deslocamento, obtido pelo CID-2D, foi possível encontrar a deformação e posteriormente extrair os movimentos de corpo rígido (translação e rotação) dos dados experimentais, com auxílio da decomposição polar. O cisalhamento simples foi alcançado tendo em vista o número de vorticidade cinemática encontrado, relativamente próximo de 1. Além disso, as definições de deformação mostraram ser semelhantes para grandes deformações. Porém, como continuação deste trabalho, a definição de deformação mais adequada para grandes deformações será estudada. Por fim, é importante ressaltar que o método descrito neste trabalho pode ser estendido para outros materiais com semelhante comportamento, ou seja, materiais que apresentam grandes deformações, como outros materiais poliméricos.

6. AGRADECIMENTOS

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

7. REFERÊNCIAS

- G'Sell, C., Boni, S. and Shrivastava, S., 1983, "Application of the plane simple shear test for determination of the plastic behavior of solid polymers at large strains", *Journal of Materials Science*, Vol. 18, pp. 903-918.
- Jiao, Y., Yan, Z., Che, S., Wang, C., Wang, J., Wang, X., Wang, H., Qi, W. and Feng, Y., 2018, "An improved microvascular decompression in treating trigeminal neuralgia: application of nest-shaped Teflon fibers", *World Neurosurgery*, Vol. 110, pp. e1-e5.
- Jonas, J.J., Ghosh, C. and Shrivastava, S., 2011, "Problems with Using the Hencky Equivalent Strain in Simple Shear", *Materials Transactions*, Vol. 52, No. 9, pp. 1748-1751.
- Nunes, L.C.S., Dias, F.W.R. and Mattos, H.S.C., 2011, "Mechanical behavior of polytetrafluoroethylene in tensile loading under different strain rates", *Polymer Testing*, Vol. 30, pp. 791-796.
- Nunes, L.C.S., 2015, "Modified slotted shear test for a thin sheet of solid polymer under large deformations", *Polymer Testing*, Vol. 45, pp. 20-30.
- Onaka, S., 2010, "Equivalent strain in simple shear deformation described by using the Hencky strain", *Philosophical Magazine Letters*, Vol. 90, No. 9, pp. 633-639.
- Onaka, S., 2012, "Appropriateness of the Hencky Equivalent Strain as the Quantity to Represent the Degree of Severe Plastic Deformation", *Materials Transactions*, Vol. 53, No. 8, pp. 1547-1548.
- Schielicke, L., Névir, P. and Ulbrich, U., 2016, "Kinematic vorticity number - a tool for estimating vortex sizes and circulations", *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, Vol. 68, No. 1, pp. 29464.
- Sutton, M.A., Ortu J.J. and Schreier, H.W., 2009, "Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements – Basic Concepts, Theory and Applications", Ed. Springer Science & Business Media, 322 p.
- Truesdell, C., 1953, "Two Measures of Vorticity", *Journal of Rational Mechanics and Analysis*, Vol. 2, pp. 173-217.
- Ziolkowski, A., 2006, "Simple shear test in identification of constitutive behavior of materials submitted to large deformations – Hyperelastic materials case", *Engineering transactions*, Vol. 54, No. 4, pp. 251-269.

8. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

STUDY OF THE DEFORMATION STATE IN PTFE SUBMITTED TO SIMPLE SHEAR

J.C.A.D. Filho, joaocadf@id.uff.br¹

L.C.S. Nunes, luizcsn@id.uff.br¹

¹Laboratory of Opto-Mechanics (LOM), Department of Mechanical Engineering (PGMEC-TEM), Universidade Federal Fluminense-UFF, Rua Passo da Pátria, 156, Bloco E, Sala 210, Niterói, RJ CEP 24210-240, Brazil

Abstract. *The aim of the present work is to investigate the state of deformation in a thin plate of polytetrafluoroethylene (PTFE), also known as Teflon®, subjected to simple shear and large deformations. The specimens were fabricated and tested under simple shear conditions, using the methodology known as: Modified slotted shear test. The displacement fields were obtained from the images of the specimens, recorded during the tests, using the Digital Image Correlation 2D (DIC-2D) method. A previous study about the best region to be considered in the shear area was performed. From the displacement fields, the strain gradient tensor and the rotation matrix were determined. Corrections were performed on the results using the rotation matrix. The number of kinematic vorticity was analyzed to verify the shear state. In addition, some definitions of deformations, such as Henchy, Biot, Green and Nominal, have been studied. As a preliminary result, it was possible to verify that the methodology used can be useful to evaluate the state of deformation in the case of simple shear. Also, the results indicate that the experimental setup represents a good alternative to impose a simple shear condition on polymers.*

Keywords: *simple shear, polytetrafluoroethylene, cinematic vorticity*