



Análise da relação entre deformações transversal e longitudinal, antes e após o escoamento, em ensaio de compressão simples no PTFE

Salvino C. M. Macêdo^{1*}, Vinicius F. Sciuti² e Rodrigo B. Canto^{1,2}

1 – Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais – PPGCEM

2 – Departamento de Engenharia de Materiais (DEMa), Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). Rodovia Washington Luís, km 235, São Carlos, CEP 13565-905, SP.

salvino@estudante.ufscar.br

RESUMO

Em um ensaio de carregamento uniaxial em um material isotrópico, a relação entre as deformações na direção transversal (DT) ao carregamento e a deformação na direção do carregamento (DC) é um parâmetro bastante importante para descrever o comportamento mecânico do material. No regime elástico, o valor absoluto da Relação DT/DC recebe o nome de Coeficiente de Poisson. Identificar o valor dessa relação além do escoamento, pode também trazer informações relevantes sobre os mecanismos de plastificação do material. Neste estudo, a identificação da Relação DT/DC foi realizada ao longo de um ensaio de compressão simples cíclico em um corpo de prova de politetrafluoretileno (PTFE), utilizando a técnica de correlação de imagens digitais (CID). A medição dos campos bidimensionais de deslocamentos (e de deformações) pela CID é tão precisa quanto maior for a qualidade do sistema óptico utilizado. No entanto, para a precisão adequada de medição das deformações necessária para este estudo, somente câmeras de alta resolução não foram suficientes, citando-se como principais características do sistema experimental utilizado: (i) controle de temperatura entre 24,5 e 25,0 °C, possível a partir de uso de uma câmara térmica com janelas para a aquisição das imagens; (ii) corpo de prova com dimensões maiores para formar o plano de medição dos campos – 48,93 mm de altura e 33,57 mm de largura – e espessura relativamente menor – 15,70 mm –, para diminuir o deslocamento horizontal do plano fotografado; (iii) distanciamento do sistema de captura de imagens a 3,5 metros de distância do corpo de prova, para tornar desprezível o efeito do deslocamento do plano fotografado na medição das deformações. Para inferir sobre a tensão de escoamento do PTFE nas condições de ensaio, carregamentos e descarregamentos foram aplicados em ciclos, variando-se a carga máxima de forma progressiva ao final de cada carregamento. Ao final de cada descarregamento, a deformação longitudinal de recuperação foi monitorada até sua estabilização. Quando esta estabilização indicou deformações residuais de magnitude maiores que as incertezas de medição, o limite de escoamento foi considerado atingido no carregamento máximo anterior. Os resultados indicaram que a tensão de escoamento do PTFE se encontra entre 3,6 e 4 MPa. O valor absoluto da Relação DT/DC para os carregamentos abaixo de 3,5 MPa variou nos diferentes ciclos entre 0,44 e 0,45, valores típicos aos encontrados na literatura para o coeficiente de Poisson do PTFE. Para carregamentos acima da tensão de escoamento identificada, os valores absolutos da Relação DT/DC encontrados variaram entre 0,48 e 0,49, próximos ao valor máximo de 0,5, indicando que a plasticidade do PTFE ocorre sem uma alteração considerável de volume. Como perspectivas futuras, a mesma metodologia pode ser aplicada em ensaios de tração uniaxial, o que poderá revelar mais características importantes para compreender o comportamento plástico macroscópico do PTFE.

Palavras-chave: PTFE, Ensaios mecânicos, Correlação de imagens digitais, Coeficiente de Poisson

INTRODUÇÃO

O coeficiente de Poisson é uma constante elástica importante no estudo do comportamento mecânico de polímeros⁽¹⁾. Esta relaciona as deformações na direção transversal (DT) ao carregamento com as deformações na direção do carregamento (DC) no regime elástico. A sua identificação e monitoramento podem fornecer informações importantes sobre o limite elástico do material. Sendo assim, a determinação da relação DT/DC antes e após o escoamento do material pode auxiliar no projeto e na simulação computacional de materiais submetidos a altos carregamentos. A técnica de Correlação de Imagens Digitais (CID) é uma ferramenta importante para a medição do campo bidimensional das deformações que um material apresenta em um ensaio mecânico. Por meio desta técnica, é possível determinar e monitorar a Relação DT/DC durante várias etapas de um ensaio mecânico, revelando assim, informações importantes para o modelamento de materiais poliméricos. No entanto, esta técnica possui algumas limitações, como uma sensibilidade à deformação fora do plano do corpo de prova, que pode influenciar de maneira significativa as medições⁽³⁾. O objetivo deste trabalho é demonstrar que o monitoramento da Relação DT/DC antes e depois do escoamento de um polímero, utilizando a técnica de CID, pode fornecer informações sobre o regime viscoelástico e sobre a plasticidade deste material.

MATERIAIS E MÉTODOS

Materiais

O material utilizado foi o PTFE obtido em pó, com granulometria média de 600 μm e uma porosidade aproximada de 60%, considerando os vazios presentes no interior dos grânulos e os vazios intersticiais entre os grânulos. Este material é fornecido pela empresa ChemoursTM sob o nome comercial de TeflonTM PTFE 807N X.

Produção dos corpos de prova

Os corpos de prova (CDPs) foram produzidos por meio da prensagem isostática do pó e sinterização, utilizando uma consolidada metodologia desenvolvida pelo grupo de pesquisa^(3,4). O material granulado foi acomodado em um molde elastomérico e prensado em três diferentes etapas; a 2 MPa, 10 MPa e 35 MPa em uma prensa isostática, utilizando um intervalo de 24 h entre cada etapa de prensagem, para liberação do ar aprisionado entre os grânulos. O material prensado é então sinterizado em um forno utilizando uma taxa específica de aquecimento e resfriamento até uma temperatura máxima de 375 °C. Finalmente, o CDP foi usinado até o seu formato paralelepípedo e dimensões finais de 48,93 x 33,57 x 15,70 mm³.

Ensaios mecânicos

Foram realizados ensaios de compressão com alguns ciclos de carregamento-descarregamento, com um aumento progressivo da tensão máxima aplicada em cada ciclo. Ao final de cada ciclo foi aplicado um patamar de recuperação sob carga nula, mantido por um período de 24 h para a recuperação total da deformação viscoelástica. A taxa de deformação utilizada durante o carregamento e descarregamento foi de $1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$. As tensões máximas aplicadas em cada ciclo foram: 1; 2; 3; 3,3; 3,6; 4; 5 e 10 MPa. O equipamento utilizado foi uma máquina de ensaios universal eletromecânica modelo MTS Exceed E44.

Medição das deformações e determinação da Relação DT/DC

A técnica de CID foi utilizada para a medição do campo de deformações exibido pelo CDP. Esta técnica consiste na aquisição de imagens de uma face do CDP ao longo de todo o ensaio e, por meio de um software, é feito um cálculo do campo de deslocamentos e deformações desta superfície pelo posicionamento dos tons de cinza dos pixels de cada imagem digital. Para a determinação da influência das deformações fora do plano, foram utilizadas duas câmeras posicionadas em distâncias diferentes (0,4 e 3,5 m) de duas faces opostas do corpo de prova. Câmeras de alta resolução, modelo Canon 5DS 50.6 megapixel e lentes objetivas modelo Canon Macro 180 mm foram utilizados nas análises. Para fotografar uma das faces, um extensor, modelo Canon 2x EF III, foi utilizado para a câmera na distância de 3,5 m do CDP.

A Relação DT/DC foi determinada por meio do coeficiente angular da curva das deformações transversais (DT) e longitudinais (DC), observadas durante o carregamento do CDP em cada ciclo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A observação de uma deformação residual significativa ocorreu durante o ciclo de 4 MPa. Portanto, é possível inferir que, segundo os ensaios cíclicos, a tensão de escoamento do PTFE nas condições do ensaio encontra-se entre 3,6 e 4 MPa. A câmera posicionada mais perto do corpo de prova (0,4 m) revelou valores acima de 0,5 para a Relação DT/DC, valores esses que não possuem sentido físico para um material isotrópico. Já a câmera posicionada a uma distância maior do corpo de prova (3,5 m) mostrou valores entre 0,4 e 0,5 para a Relação DT/DC, valores esses que corroboram com os dados observados na literatura para materiais poliméricos. Isto demonstra o efeito significativo das deformações fora do plano durante a aplicação da técnica de CID no PTFE. Este efeito se intensifica devido ao alto valor do seu coeficiente de Poisson, em relação aos metais e cerâmicas convencionais. Portanto, ao longo do ensaio, o polímero se desloca de maneira significativa na direção perpendicular ao plano de aquisição de imagens no sentido de se aproximar do aparelho óptico, gerando um efeito de ampliação da imagem obtida em relação ao tamanho real do CDP. Segundo Sutton⁽²⁾, as deformações fora do plano, geradas por este efeito óptico, podem ser aproximadas por $\delta z/z$, sendo δz o deslocamento fora do plano e z a distância entre o ponto focal da câmera e a face fotografada. Portanto, aumentando-se a distância da câmera em relação ao CDP, pode-se mitigar este efeito até o mesmo se tornar desprezível. Outras estratégias consistem em utilizar lentes chamadas de “telecêntricas” nas câmeras, as quais garantem que apenas raios de luz

paralelos entre si atinjam o sensor da câmara, ou aplicar a técnica de estereocorrelação de imagens digitais, que utiliza duas câmeras em uma mesma face do CDP⁽⁴⁾.

As medidas da relação DT/DC em relação à tensão máxima aplicada em cada ciclo encontra-se na Figura 1. Antes do intervalo identificado como escoamento, os valores da Relação DT/DC estão entre 0,44 e 0,45, após o escoamento, os valores se encontram entre 0,48 e 0,49. Isto indica que a medição da Relação DT/DC pode ser utilizada como indicador do limite de escoamento do material. Este aumento significativo em direção à 0,5 aponta que a plasticidade no PTFE ocorre sem uma alteração considerável de volume.

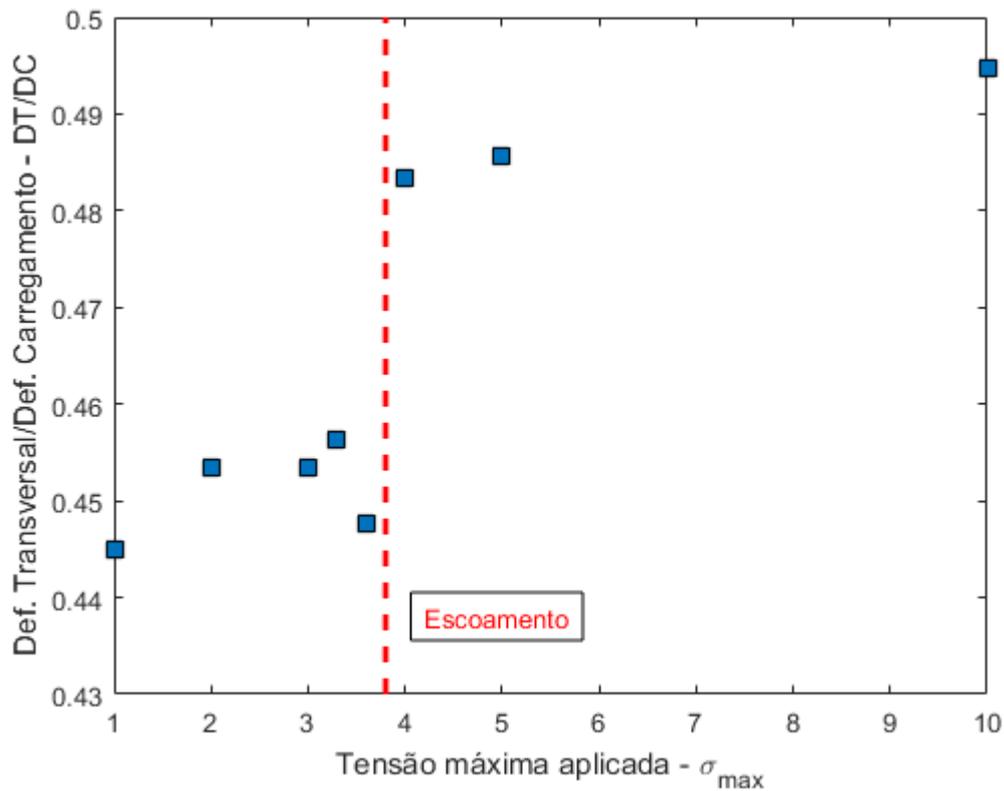


Figura 1: Relação DT/DC em cada etapa dos ensaios cíclicos. A linha tracejada denota a tensão de escoamento do material, obtida experimentalmente.

CONCLUSÕES

A observação de uma variação significativa da Relação DT/DC antes e após o escoamento do material demonstra que a técnica de Correlação de Imagens Digitais é uma ferramenta importante na análise mecânica de materiais poliméricos. Além disso, os ensaios com duas câmeras em faces opostas revelaram que é importante se levar em consideração a deformação fora do plano nas análises de materiais poliméricos, uma vez que este efeito é significativo nas medições dos campos de deformação, o que pode levar a uma determinação equivocada de parâmetros importantes do material.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pelo apoio financeiro para realização desse trabalho com bolsa de estudos, processo nº 88887.388233/2019-00 e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo financiamento através dos processos 2020/08077-6 e 2018/02801-4. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

1. SWALLOWE, G. M. Mechanical properties and testing of polymers: an A–Z reference. Vol. 3. Dordrecht: Springer Science & Business Media, 1999.
2. SUTTON, M. A.; YAN, J. H.; TIWARI, V.; SCHREIRER, H. W.; ORTEU, J. J. The effect of out-of-plane motion on 2D and 3D digital image correlation measurements. *Optics and Lasers in Engineering*, v. 46, p. 746-757, 2008.
3. STRABELLI, P. G.; SCIUTI, V. F.; MONTILHA, F. S.; CANTO, L. B.; CANTO, R. B. Influência de variáveis de sinterização na microestrutura de peças de PTFE moldadas por prensagem isostática. *Polímeros*, v. 24, p. 612-619, 2014.

4. GAMBONI, O. C.; RIUL, C.; BILLARDON, R.; BOSE FILHO, W. W.; SCHIMITT, N.; CANTO, R. B. On the formation of defects induced by air trapping during cold pressing of PTFE powder. *Polymer*, v. 82, p. 75-86, 2016.
5. SUTTON, M.A.; McNEIL, S.R.; HELM, J.D.; CHAO, Y.J. Advances in two-dimensional and three-dimensional computer vision. In *Photomechanics*, p. 323-372, 2000.

Analysis of the relation between transversal and longitudinal strains, before and after yield, in a simple compression mechanical test of PTFE.

ABSTRACT

In an isotropic material submitted to a uniaxial mechanical test, the relation between the strains in the transversal direction (TS) of the load axis and the strain in the direction of the load axis (SL) is an important parameter to describe the mechanical behavior of the material. In the elastic domain, the absolute value of the TS/SL relation is called the Poisson ratio. Identifying the value of this relationship beyond the yield limit can bring relevant information about the plastic deformation mechanisms of the material. In this study, the identification of the TS/SL relation was performed during a cyclic simple compression mechanical test in a Polytetrafluoroethylene (PTFE) specimen, using the digital image correlation (DIC) technique. The measurement of the bi-dimensional strain (and displacement) fields by the DIC precision depends on the quality of the optical system utilized. However, only the usage of high-resolution cameras was not enough to guarantee an adequate measurement of the strains needed for this study, being required the employment of (i) temperature control between 24.5 and 25 °C, made possible by a thermal chamber with windows to allow image acquisition; (ii) specimen with larger dimensions to form an adequate measurement plane - 48.93 mm de height and 33.57 mm width – and a relative lower thickness – 15.70 mm –, to decrease the horizontal displacement of the photographed field; (iii) distancing of the acquisition system to a distance of 3.5 m away from the specimen, to minimize the out-of-plane displacement effect. To determine the PTFE yield stress in the test conditions, loading and unloading procedures were applied in cycles, increasing the maximum applied load at the end of each loading phase. At the end of every unloading process, the recovered longitudinal strain was monitored until stabilization. When residual strains higher than the measurement uncertainties were observed, the yield limit was reached in the maximum load applied in the previous cycle. The results indicated that the yield stress of PTFE lies between 3.6 and 4 MPa. The absolute value of the TS/SL relation for the loads below 3.5 MPa varied between 0.44 and 0.45, in correlation to the values found in the literature for the Poisson ratio of PTFE. For the loads above the identified yield stress, the absolute values of the TS/SL relation varied between 0.48 and 0.49, indicating that the plastic deformation of PTFE occurs without a considerable variation in volume. As a future perspective, the same methodology can be applied in uniaxial tension tests, which can reveal additional important characteristics to comprehend the macroscopical plastic behavior of PTFE

Keywords: *PTFE, Mechanical testing, Digital image correlation, Poisson ratio*