



COMPROMETIDA COM A PROMOÇÃO DO DESENVOLVIMENTO DA ENGENHARIA E DAS CIÊNCIAS MECÂNICAS

VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA
VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING
18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil
August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil

ESTUDO EXPERIMENTAL DA ABERTURA DE TRINCA DO POLÍMERO PTFE USANDO MÉTODO DIC

P.A. Farias, priafarias@gmail.com¹
L.C.S. Nunes, luizcsn@mec.uff.br¹

¹Departamento de Engenharia Mecânica, TEM/PGMEC, Universidade Federal Fluminense, Rua Passo da Pátria, 156, Niterói, RJ, CEP 24210-240, Brazil

Resumo: Desde a revolução industrial, os materiais estão sendo modificados e/ou substituídos por outros, com melhores propriedades, adequadas a cada aplicação do projeto. Os polímeros podem ser citados como materiais que apresentam um aumento considerável no seu campo de aplicação, principalmente nas engenharias, no setor de petróleo & gás, automotivo e aeronáutico. Em vista a esta crescente evolução, surge à necessidade da identificação e avaliação do comportamento destes materiais quando sujeitos a carregamentos diversos. O estudo de abertura e propagação de trincas em materiais metálicos é bem estabelecido há anos, porém para polímeros ainda existem muitos estudos a serem feitos. Em trabalhos recentes o uso de técnicas de medidas globais está sendo usadas para auxiliar o entendimento do comportamento mecânico de trincas em materiais poliméricos. Este trabalho tem como principal objetivo o estudo da abertura de trincas em materiais poliméricos, em particular o politetrafluoroetileno (PTFE). Tal material apresenta inúmeras vantagens e é comumente usado em vários ramos da engenharia. Para isso, os resultados experimentais serão obtidos usando a técnica de correlação de imagem digital que é uma técnica óptica desenvolvida para a determinação de campos de deslocamentos e deformações sem a necessidade de contato. Esta técnica requer um sistema óptico para capturar as imagens da superfície do espécime antes e depois de sofrer os esforços. As imagens são então, processadas utilizando um algoritmo de correlação de imagem onde é possível obter os campos de deformação e deslocamento.

Palavras-chave: Polímero-PTFE, fratura, método DIC, análise de deformação

1. INTRODUÇÃO

Os polímeros têm sido utilizados por muitos séculos (Callister, 2002), ferramentas modernas de pesquisa científica tornaram possíveis as determinações das estruturas moleculares deste grupo de materiais, bem como o desenvolvimento de numerosos polímeros, os quais são sintetizados a partir de pequenas moléculas orgânicas. Após a Segunda Guerra Mundial, o campo de materiais foi virtualmente revolucionado pelo advento dos polímeros. Estes polímeros podem substituir as peças metálicas e madeiras, pois em muitos casos possuem propriedades satisfatórias e podem ser produzidos a custos mais baixos. Como ocorrem com outros materiais, as propriedades dos polímeros estão relacionadas de maneira complexa aos elementos estruturais do material. O politetrafluoroetileno (PTFE), por exemplo, é constituído em sua estrutura de átomo de carbono e átomo de flúor, conhecido como fluorocarbono.

O objetivo do trabalho proposto é fazer uma análise experimental do comportamento mecânico de trincas em polímeros-PTFE, em particular o estudo da distribuição do campo de deslocamento na proximidade da trinca, e conseqüentemente a abertura da trinca. Para isto, será utilizado o método de correlação de imagens digitais (DIC). Os resultados experimentais encontrados serão confrontados com a teoria clássica da mecânica da fratura elasto-plástica.

O polímero semicristalino Politetrafluoroetileno – PTFE (CF₂)_n, cujo nome comercial é Teflon[®], foi escolhido por ser amplamente utilizado na indústria aeronáutica e ultimamente na área do Petróleo&Gás. Podem ser citadas algumas características como, excelentes propriedades químicas e físicas, alta resistência à temperatura, excelente isolante térmico e elétrico. Com essas características, o PTFE é aplicado em revestimentos de cabos e tubos, principalmente destinados a condução de fiações elétricas existente nas aeronaves, revestimento em pistões empregados em amortecedores, revestimento em válvulas, entre outros.

Recentemente, muitos trabalhos foram desenvolvidos com o PTFE. Rae *et al* (2004), analisou as propriedades dos polímeros politetrafluoroetileno (PTFE) na compressão, especificamente PTFE 7A e 7C. Estes polímeros foram testados na compressão com um taxa de deslocamento entre 10⁻⁴ e 1 s⁻¹ e temperaturas entre -198 e 200°C. Brown *et al* (2005), analisou a função da fase cristalina na fratura e a evolução da microestrutura do politetrafluoroetileno (PTFE), aplicando dois métodos diferentes para medir a extensão da trinca: a técnica normalizada da curva J-integral e medida óptica da ponta da trinca. Yoneyama *et al*. (2006) propôs um método para estimar os fatores de concentração de tensão

modo I, II e misto a partir do campo de deslocamento obtido usando o método DIC e o método de mínimos quadrados não linear. Rae *et al* (2005), continuando os seus estudos, analisou as propriedades dos polímeros PTFE 7A e 7C na tração, com diferentes taxas de deslocamento e diferentes temperaturas. Abanto-Bueno *et al* (2001) analisou a propagação da trinca nos materiais não-homogêneos utilizando o método de correlação de imagem digital (DIC) e comparando com modelos teóricos. Ozelo *et al* (2009), monitorou a propagação da trinca utilizando a técnica de correlação de imagem digital e o método COD no corpo de prova de liga de alumínio, 2024-T3, com um entalhe. Este foi submetido a ensaios com carregamento cíclicos do modo I.

2. FRATURA ELASTO-PLÁSTICA: ABERTURA DE TRINCA

Existem três modos distintos que auxiliam de forma empírica-experimental para determinar o comportamento da trinca na mecânica da fratura, o modo I, também chamado de modo de abertura, o modo II, também chamado de modo de deslizamento, e o modo III, também chamado de modo de cisalhamento. Conforme Unger (1995), o modo I é o principal modo de fratura que ocorre quando as superfícies da trinca estão sendo separadas por uma tensão aplicada perpendicularmente ao plano da trinca conforme apresentado na Fig. (1.a). O modo II ocorre quando uma tensão de cisalhamento está sendo aplicada diretamente na trinca conforme apresentado na Fig. (1.b). O modo III ocorre quando uma tensão de cisalhamento está sendo aplicada fora do plano da trinca conforme apresentado na Fig. (1.c). No presente trabalho somente será tratado o modo I.

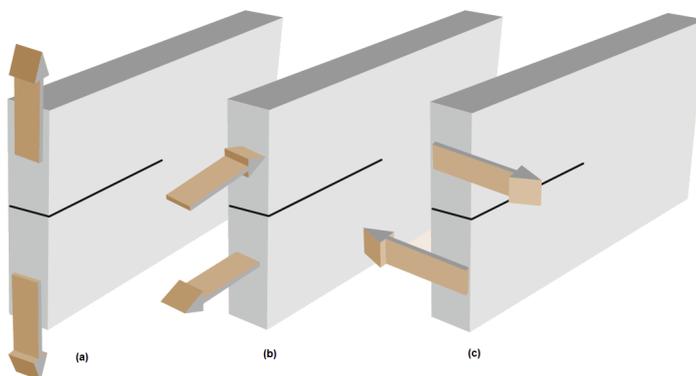


Figura 1. (a) Modo I, (b) Modo II e (c) Modo III. (Sharpe, 2008).

A abertura da trinca (*crack opening displacement-COD*) é definida como (Broek, 1996)

$$COD = \frac{4\sigma}{E} \sqrt{a^2 - \chi^2} \quad (1)$$

onde σ é a tensão aplicada no corpo de prova, E o módulo de elasticidade, a o tamanho da trinca e χ a posição ao longo da trinca. Os detalhes geométricos da trinca podem ser vistos nas Figs. (4) e (6-b)

Se ocorrer plasticidade, a abertura da ponta da trinca (*crack tip opening displacement-CTOD*) é diferente de zero. Neste caso, a equação da abertura da trinca, pode ser reescrita da seguinte forma

$$COD = \frac{4\sigma}{E} \sqrt{a^2 - \chi^2 + \frac{E^2}{16\sigma^2} (CTOD)^2} \quad (2)$$

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1. Método de Correlação de Imagens Digitais (DIC)

O método de correlação de imagem digital (DIC) é baseado numa metodologia óptico-numérico de medida capaz de inferir campos de deslocamentos de superfícies (Nunes, 2009). Este é baseado na comparação entre duas imagens do mesmo corpo de prova, em dois estados distintos, ou seja, não deformado e deformado. Este método apresenta várias vantagens, entre elas, a não necessidade de contato físico com o corpo de prova e também não precisa de uma iluminação especial, sendo um sistema óptico simples. O processo de preparação do corpo de prova é baseado na pintura de um padrão aleatório, responsável pela informação de toda a área.

O princípio básico do método DIC é encontrar uma correlação máxima entre pequenas áreas das imagens deformada e não deformada. Como ilustrado na Fig. (2), é selecionado uma pequena área na imagem não deformada, ou sub-imagem de referência, em seguida é selecionado uma área maior na imagem deformada, também conhecida como sub-imagem de busca. Através da função correlação, Eq. (3), é possível obter o pico de correlação entre as imagens e consequentemente, obtém-se a posição da imagem deslocada.

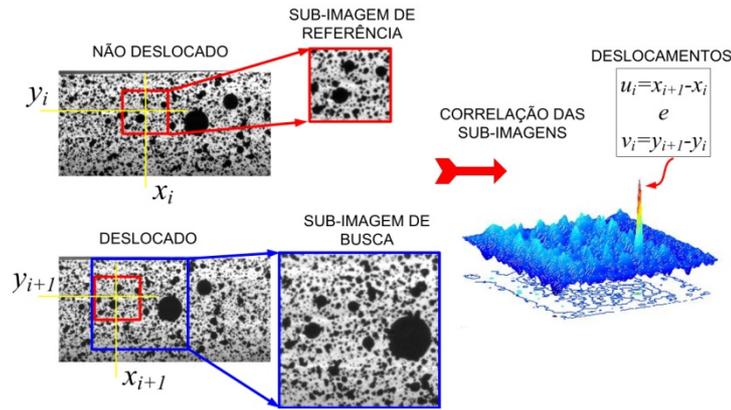


Figura 2. Esquema de correlação de imagens digitais

Normalmente o coeficiente de correlação é definido na seguinte forma

$$c(u, v) = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [f(x_i, y_j) - \bar{f}] [g(x'_i, y'_j) - \bar{g}]}{\sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [f(x_i, y_j) - \bar{f}]^2} \sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [g(x'_i, y'_j) - \bar{g}]^2}} \quad (3)$$

Onde,

$$\begin{aligned} x' &= x + u_0 + \frac{\partial u}{\partial x} dx + \frac{\partial u}{\partial y} dy \\ y' &= y + v_0 + \frac{\partial v}{\partial x} dx + \frac{\partial v}{\partial y} dy \end{aligned} \quad (4)$$

$f(x, y)$ é o valor do pixel em tons de cinza (intervalo de 0 a 255) nas coordenadas (x, y) , para o corpo não deformado e $g(x', y')$ é o valor do pixel em tons de cinza nas coordenadas (x', y') para o corpo deformado. Neste caso, \bar{f} e \bar{g} são os valores médios das imagens e u e v são, respectivamente, as componentes centrais dos deslocamentos nas direção x e y .

3.2. Arranjo Experimental

O arranjo experimental ilustrado na Fig. (3) foi usado para realizar o ensaio de tração em um corpo de prova com dupla trinca. Tal arranjo é composto por uma câmera digital CCD (Sony XCD-SX910) com resolução de 1376 x 1024 pixels e tamanho de pixel igual a $4.65 \times 4.65 \mu\text{m}^2$, posicionada perpendicularmente ao corpo de prova, uma fonte de luz (LED vermelho para melhorar o contraste), um aparato desenvolvido para aplicar um carregamento unidirecional no corpo de prova. As imagens capturadas com a câmera são salvas e processadas com auxílio do computador.

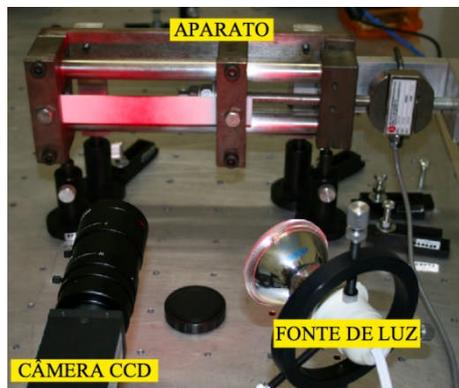


Figura 3. Arranjo experimental

O corpo de prova ilustrado na Fig. (4), feito em material polimérico PTFE, foi submetido a diferentes carregamentos. Um padrão aleatório foi gerado no corpo de prova usando um spray na cor preta. Tal tratamento superficial é necessário para localizar áreas idênticas nas imagens deformada e não deformada. As dimensões do corpo

de prova com formato retangular com dupla trinca são: largura $W = 25,4$ mm; comprimento 180 mm; comprimento da trinca $a = 2,5$ mm.

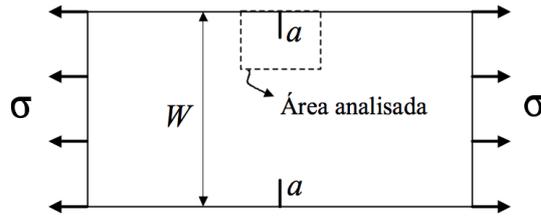


Figura 4. Detalhes geométricos do corpo de prova em polímero PTFE com duas trincas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Figura (5) são mostrados os resultados experimentais dos campos de deslocamento nas direções x e y , ou seja, $u(x,y)$ e $v(x,y)$, que estão associados a direção do carregamento e a direção perpendicular ao carregamento, respectivamente. É importante ressaltar que estes valores foram obtidos a partir de toda a área do corpo de prova, incluindo as duas trincas. O valor da força aplicada ao corpo de prova para gerar tais deslocamentos foi de 260 N e os valores dos deslocamentos são ajustados para manter a simetria.

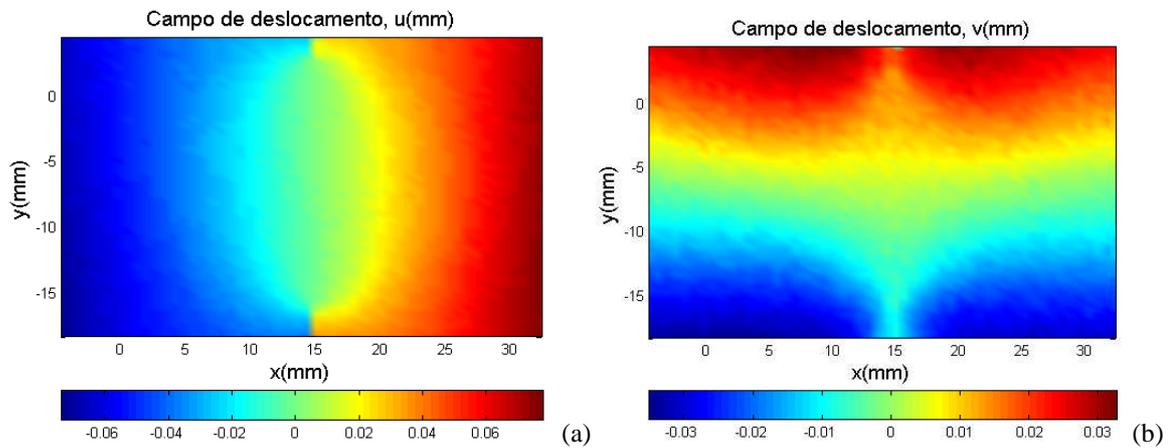


Figura 5. (a) Campo de deslocamento na direção x ; (b) campo de deslocamento na direção y .

Pode ser observadas descontinuidades nos resultados dos deslocamentos u e v nas proximidades das trincas localizadas nos extremos superior e inferior, como apresentados na Fig. (5). A partir destes dados é possível obter várias informações a respeito da trinca.

Para realizar o estudo do comportamento da trinca foi selecionada uma pequena região na proximidade da mesma, como indicado nas Figs. (4) e (6), sendo identificada como área analisada. Como os resultados da distribuição dos deslocamentos são simétricos foi escolhido somente a área associada a trinca superior para ser analisada.

Como forma ilustrativa, a área analisada no corpo de prova é apresentada na Fig. (6-a). Nesta, o corpo de prova é submetido a diferentes carregamentos (400N, 455N, 485N, 500N). Os resultados dos deslocamentos $u(x,y)$ e $v(x,y)$, para o carregamento de 500N, são ilustrados na Fig. (7).

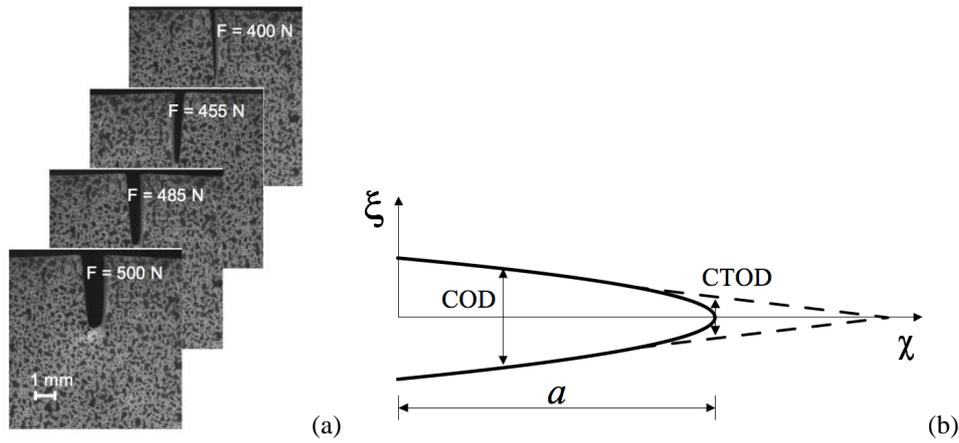


Figura 6. Abertura de trinca: (a) abertura em diferentes carregamentos; (b) ilustração da trinca

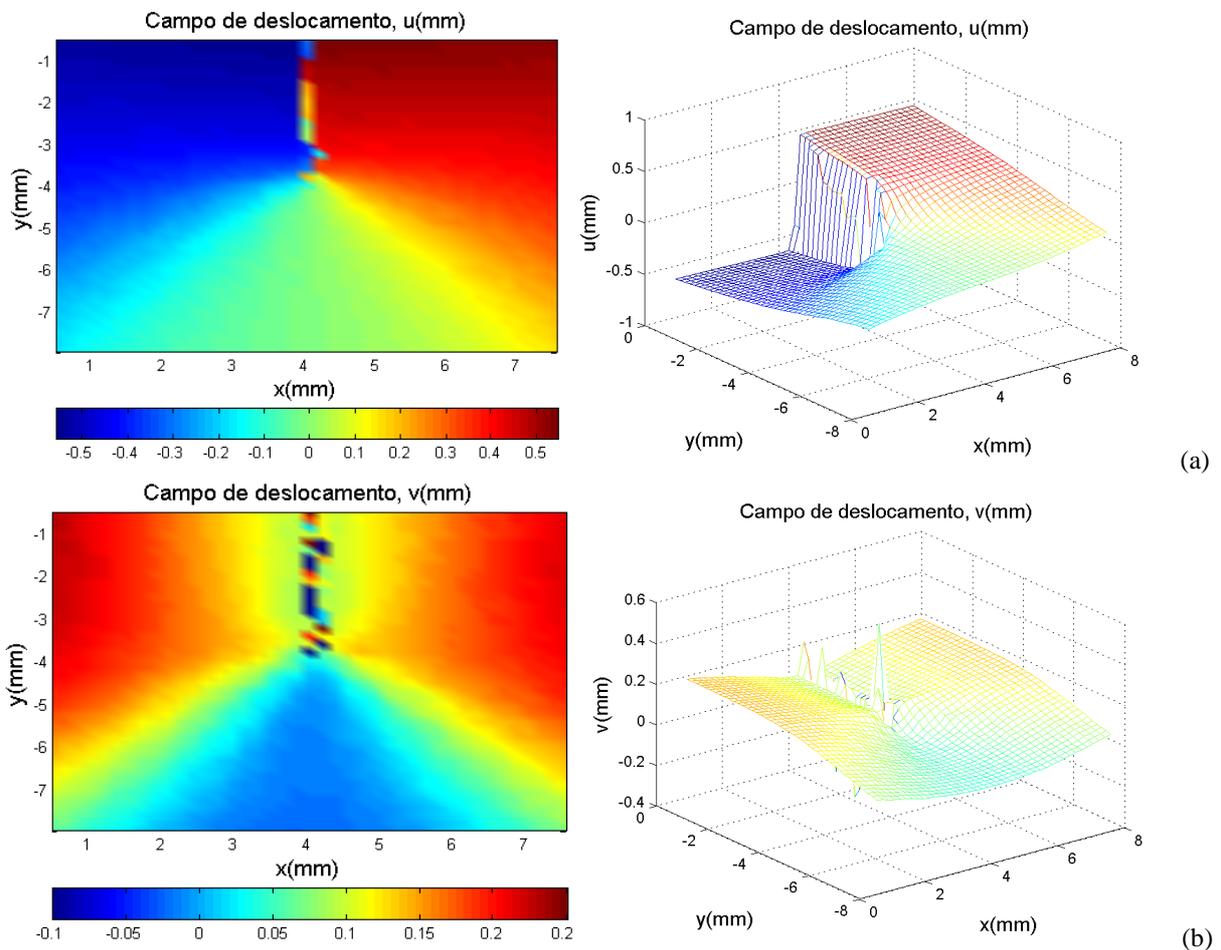


Figura 7. Campo de deslocamento na região analisada relativa a um carregamento de 500N: (a) $u(x,y)$; (b) $v(x,y)$

Pelos resultados mostrados na Fig. (7), verifica-se que há uma quantidade muito grande de informações, entretanto, neste trabalho o intuito é analisar a abertura da trinca ao se aplicar diferentes carregamentos. Na Fig. (8) são ilustrados os resultados da abertura da trinca COD em função da posição χ , como indicado na Fig. (6-b), para carregamentos de 89, 194, 304, 400, 455, 485 e 500 N. Também é feita comparações entre os dados obtidos experimentalmente e a teoria, considerando a Eq. (2) para carregamentos de 89, 194, 304, 400 N. Para descrever o comportamento analítico, a geometria foi a mesma descrita anteriormente, com os carregamentos associados e com o módulo de elasticidade igual a 0.8 GPa.

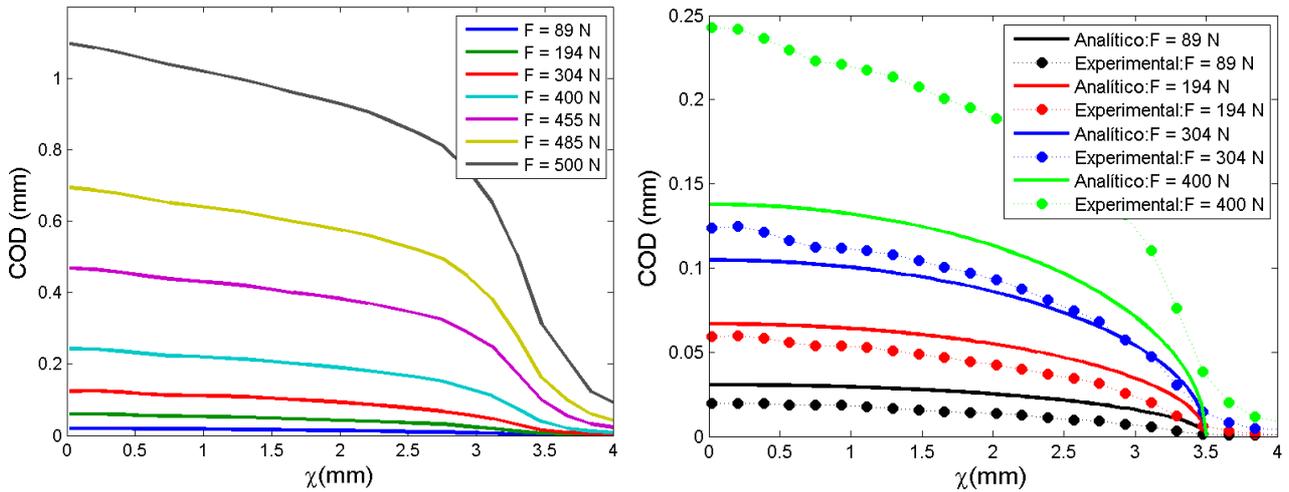


Figura 8. Abertura da trinca COD em função da posição χ

Pode ser observado na Fig. (8) que o comportamento esperado da abertura da trinca tem a forma analítica, porém os resultados diferem dos experimentais. Entretanto, deve ser lembrado que foi considerado uma equação considerando um comportamento elástico linear e o material em estudo tem comportamento elasto-plástico. Por isso, a medida que se eleva o carregamento, mais se divergem os resultados experimentais e analíticos. Para visualizar melhor o comportamento não linear e plástico, é ilustrado na Fig. (9) a tensão aplicada em função da abertura da trinca em diferentes posições.

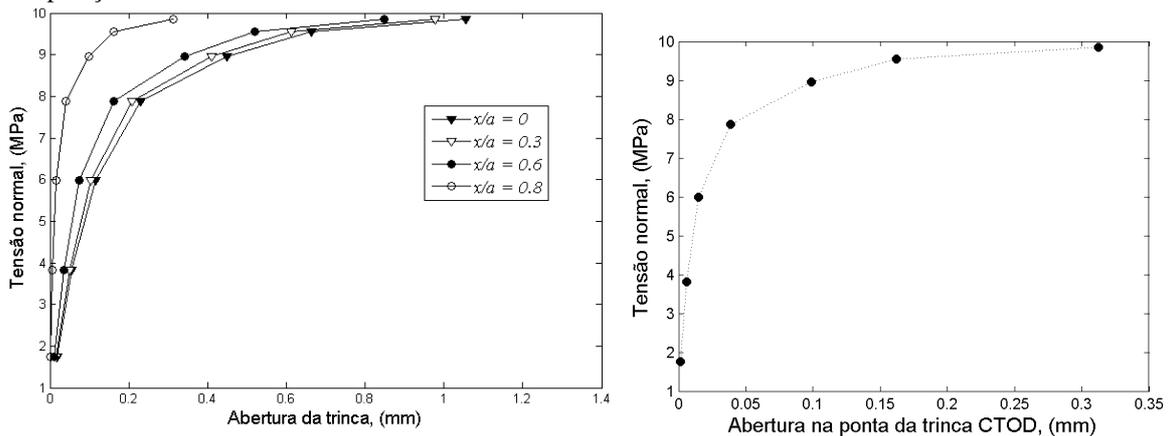


Figura 9. Tensão em função da abertura de trinca em diferentes posições

Claramente pode ser observado na Fig. (9) o comportamento não linear ao se aplicar carregamentos distintos. De forma geral, conclui-se que a equação clássica de abertura de trinca não é bem posta para este material, o que já era esperado.

5. CONCLUSÕES

No presente trabalho foi apresentado um estudo experimental preliminar da distribuição dos campos de deslocamentos $u(x,y)$ e $v(x,y)$ na proximidade da trinca de um corpo de prova feito em polímero PTFE. No processo experimental foi usado o método de correlação de imagem digital (DIC). Através destes resultados foi possível analisar a abertura da trinca COD e também a abertura da ponta da trinca CTOD. Os resultados obtidos mostram que, quando comparados com modelos teóricos clássicos, apresentam certas discrepâncias, entretanto é importante ressaltar que o modelo usado é bem posto para materiais metálicos. O polímero PTFE apresenta um comportamento onde ocorre uma deformação plástica muito grande antes de romper. Como continuação deste trabalho, pretende-se obter equações que possibilitem uma melhor compreensão de tal comportamento.

6. AGRADECIMENTOS

Os Autores gostariam de agradecer ao Ministério de Ciências e Tecnologia através das suas Agencias de pesquisa CNPq e FAPERJ, e também a Universidade Federal Fluminense.

7. REFERÊNCIAS

- Abanto-Bueno, J. and Lambros, J., 2001. "Investigation of crack growth in functionally graded materials using digital image correlation". *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 69 (2002), pp. 1695-1711.
- Broek, D., 1996. "Elementary Engineering Fracture Mechanics". 4th Ed. Klumer Academic Publishers.
- Brown, E. N. and Dattelbaum, D. M., 2005. "The role of crystalline phase on fracture and microstructure evolution of polytetrafluoroethylene (PTFE)". *Polymer*, Vol. 46, pp. 3056-3068.
- Callister, W. D., Jr., 2002. *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*. 5th Ed. LTC, Rio de Janeiro, Brasil.
- Nunes, L. C. S., 2009. "Shear modulus estimation of the polymer polydimethylsiloxane (PDMS)". *Materials and Design*, Vol. 31 (2010), pp. 583-588.
- Ozelo, R. R. M., Sollero, P., Sato, M. and Barro, R. S. V., 2009. "Monitoring crack propagation using digital image correlation and cod techniques". In *Proceedings of 20th International Congress of Mechanical Engineering*. Gramado, RS, Brazil.
- Rae, P. J. and Brown, E. N., 2005. "The properties of poly(tetrafluoroethylene) (PTFE) in tension". *Polymer*, Vol. 46, pp. 8128-8140.
- Rae, P. J. and Dattelbaum, D. M., 2004. "The properties of poly (tetrafluoroethylene) (PTFE) in compression". *Polymer*, Vol. 45, pp. 7615-7625.
- Sharpe, W. N., Jr., 2008. "Springer Handbook of Experimental Solid Mechanics". Ed. Springer Science and Business Media, LLC, New York.
- Unger, D. J., 1995. *Analytical Fracture Mechanics*. Ed. Academic Press, San Diego, California, USA.
- Yoneyama, S., Ogawa, T. and Kobayashi, Y., 2006. "Evaluating mixed-mode stress intensity factor from full-displacement fields obtained by optical methods". *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 74 (2007), pp. 1399-1412.

8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

EXPERIMENTAL STUDY OF CRACK OPENING OF THE POLYMER PTFE USING DIC METHOD

P.A. Farias, PFarias@technip.com¹
L.C.S. Nunes, luizcsn@mec.uff.br¹

¹Department of Mechanical Engineering TEM/PGMEC, Universidade Federal Fluminense, Rua Passo da Pátria, 156, Niterói, RJ, CEP 24210-240, Brazil

Abstract: *Since the industrial revolution, the materials are being modified and / or replaced by others with better properties suitable for each application of the project. The material is growing increasingly its use, are polymers, especially in engineering, in the oil & gas, automotive and aviation. In view of this growing trend of new products, it comes the need for identification and valuation of the behavior of these materials when applied to a load. The study of opening and crack propagation in metallic materials is well established for years, but for polymers there are still many studies to be made. In recent studies the use of techniques of comprehensive measures are being used to aid the understanding of the mechanical behavior of cracks in polymeric materials. This work has as main objective the study of the opening in polymeric materials, particularly polytetrafluoroethylene (PTFE). Such material has many advantages and is commonly used in various branches of engineering. For this, the experimental results will be obtained using the technique of digital image correlation that is an optical technique developed for the determination of fields of displacements and deformations without contact. This technique requires an optical system to capture images of the surface of the specimen before and after sustaining efforts. The images are then processed using a correlation algorithm of the image where you can get the fields of deformation and displacement.*

Keywords: *Polymer-PTFE, fracture, DIC method, deformation analysis*