

## FRACTURA DE MATERIAIS COMPÓSITOS: UMA REVISÃO DE ALGUNS RESULTADOS

P. T. de Castro\*, A. T. Marques\*, A. B. de Morais†

\*Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial  
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP)  
Rua dos Bragas 4099 Porto Codex

†Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial (INEGI)  
Rua do Barroco 174/214 4465 S. Mamede de Infesta

**Resumo.** Neste artigo são revistos alguns aspectos relativos à fractura de materiais compósitos de matriz polimérica. Abordam-se os problemas actuais em dois domínios fundamentais: a fractura interlaminar e a fractura intralaminar. A discussão é complementada com a apresentação de alguns resultados experimentais obtidos pela FEUP.

**Abstract.** In this paper certain aspects of the fracture of Polymer matrix composite materials are reviewed. Both inter and intra-laminar fracture are discussed. Experimental results obtained by FEUP are also presented.

## 1. INTRODUÇÃO

Os compósitos de matriz polimérica são hoje alvo de grande interesse por parte dos investigadores e da indústria, dadas as excelentes propriedades mecânicas combinadas com baixo peso específico. Todavia alguns aspectos do seu complexo comportamento permanecem mal compreendidos, o que tem limitado o campo de aplicações. Os laminados são constituídos por várias camadas fortemente anisotrópicas, facto que está na origem dos diversos modos de rotura observados.

A anisotropia da camada gera tensões interlaminares, de cálculo extremamente elaborado, e que podem provocar delaminagens. Estes defeitos podem ser gerados em situações furtivas, como por exemplo o impacto resultante da queda de uma ferramenta em operações de manutenção. Sendo frequentemente invisíveis, podem contudo debilitar fortemente a estrutura, particularmente no que toca ao comportamento à compressão, devido a encurvadura localizada. Torna-se assim evidente o interesse [1-7] no desenvolvimento de métodos normalizados de ensaio que permitam quantificar a resistência à propagação de delaminagens, ou seja, medir a

tenacidade interlaminar. Em 2. são abordadas questões relativas a estes ensaios e apresentados alguns resultados obtidos pela FEUP no âmbito dos trabalhos da ESIS (*European Structural Integrity Society*).

Ao nível da camada podem surgir vários modos de rotura, sendo os mais comuns a rotura longitudinal e a fissuração transversal [8-10]. Tradicionalmente recorre-se a modelos macromecânicos (Teoria Clássica dos Laminados, vulgarmente), que, combinados com critérios de rotura da camada (por exemplo o critério de Tsai-Hill), permitem prever a ocorrência daqueles modos de rotura. A rotura longitudinal deve-se, ao nível micromecânico, à fractura das fibras. É naturalmente o modo de rotura mais importante, ao qual corresponde a maior tensão de rotura, e que acarreta geralmente a rotura do laminado. Pelo contrário, laminados com camadas fissuradas transversalmente podem continuar a suportar cargas crescentes [11-13]. Há portanto que considerar o carácter progressivo do dano sofrido pelos laminados, o que dificulta em muito a previsão da resistência, dados os complexos fenómenos de redistribuição de tensões e interacções dos diversos modos de rotura. A presença de descontinuidades introduz complexidades adicionais, em face da natureza localizada do dano.

Este é contudo um problema de grande interesse pois a presença de descontinuidades é essencial em grande parte das aplicações. Este caso é tratado em 3., sendo referida a contribuição da FEUP para um projecto BRITE/EURAM [14-15].

## 2. FRACTURA INTERLAMINAR

Existem actualmente protocolos e normas apresentados pela ASTM, JIS (*Japanese Industrial Standards*) e pela ESIS (*European Structural Integrity Society*), da qual a FEUP faz parte.

Os métodos de ensaio [1-3] permitem reproduzir as situações de carregamento na frente da fenda, nomeadamente (Fig. 1)

- o ensaio de modo I *Double Cantiliver Beam* (DCB);
- os ensaios de modo II *End Notched Flexure* (ENF) e *End Loaded Split* (ELS);
- o ensaio de modo misto I/II *Asymetrical Double Cantiliver Beam* (ADCB);

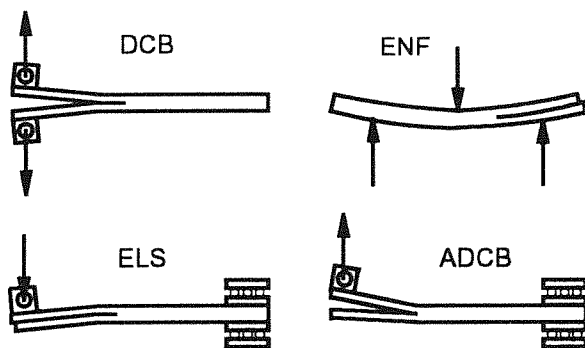


Fig. 1. Esquema ilustrando os vários ensaios de fractura interlaminar.

Os provetes utilizados são unidireccionais, cujo comportamento essencialmente linear elástico é consistente com a Mecânica da Fractura Linear Elástica. A delaminação inicial é criada aquando do fabrico da placa da qual aqueles são cortados. Para tal recorre-se a um filme desmoldante que é inserido a meio da espessura da placa. Um dos bordos do provete é coberto por uma fina camada de fluido corrector para facilitar a observação da frente da fenda, cujo crescimento é seguido durante o ensaio através de um microscópio móvel. Cada vez que a fenda atinge uma das marcas previamente realizadas no bordo, são registados os valores da carga ( $P$ ) e do deslocamento ( $d$ ), associados ao comprimento de fenda ( $a$ ). Após a

propagação desejada, procede-se à descarga de modo a detectar eventuais deformações permanentes, que põem em causa a validade dos resultados.

O tratamento de dados permite a obtenção das taxas críticas de libertação de energia  $G_{Ic}$  e  $G_{IIc}$ . Os métodos [1-3] são essencialmente de dois tipos. Um primeiro, em que cada metade do provete (acima e abaixo da fenda) é tratada como uma viga. Um segundo, que recorre à aproximação por curvas adequadas dos dados obtidos em termos da *compliance* ( $C=d/P$ ) em função de  $a$ . Para qualquer dos métodos estão disponíveis correcções para grandes deslocamentos, corte transversal e efeitos dos *tabs* (peças em Al para transmissão da carga). Os métodos designam-se habitualmente por Teoria das vigas corrigida (*corrected beam Theory* - CBT) e calibração experimental da *compliance* (*experimental compliance calibration*).

Actualmente existe um *workbook* desenvolvido pela EMPA [2-4] que permite fazer de uma forma bastante expedita o tratamento de dados utilizando o programa EXCEL. Desta forma procura-se garantir a homogeneidade e evitar erros no confronto de resultados obtidos pelos vários participantes nos *round-robins* promovidos pelo *Technical Committee 4* (*Polymers and Composites Group*) da ESIS.

Nos parágrafos que se seguem são revistos os principais resultados obtidos pela FEUP no âmbito da sua participação nos trabalhos da ESIS. São referidos os problemas actuais e os objectivos do trabalho em curso.

### 2.1. O ENSAIO DCB

Trata-se do ensaio mais estudado, para o qual existem inclusive várias normas [5]: ASTM D5528, JIS K7086 e o *draft* proposto pela ESIS [2] e que é actualmente o documento de trabalho da ISO. Apesar de tudo subsistem algumas questões a esclarecer.

No ensaio DCB verifica-se geralmente uma propagação estável da fenda (Fig. 2), cujo crescimento é seguido com relativa facilidade, permitindo posteriormente a obtenção da chamada curva R, isto é,  $G_{Ic}$  em função de  $a$ .

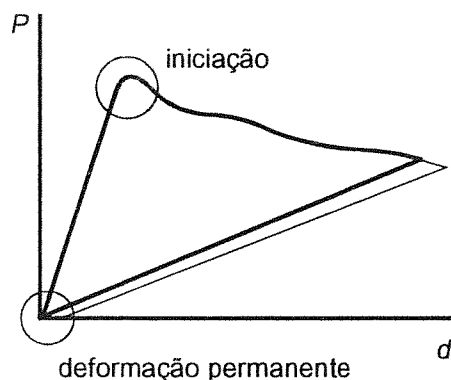


Fig. 2. Curva carga - deslocamento ( $P-d$ ) típica num ensaio DCB. A eventual ocorrência de deformações permanentes põe em causa a validade dos resultados.

Em geral os compósitos de fibra de vidro apresentam curvas R algo pronunciadas (Fig. 3), ao contrário dos de fibra de carbono (Fig. 4). Crê-se que esta se deve sobretudo ao chamado *fibre bridging* (fibras ligando as metades do provete). Em provetes carbono/epóxico de boa qualidade não se observa geralmente tal efeito, pelo que a curvatura da frente de delaminação poderá ser o factor responsável.

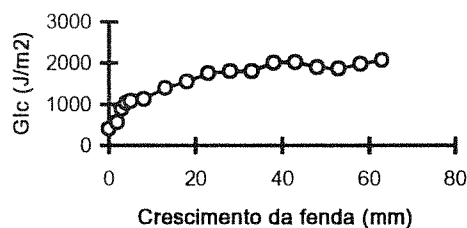


Fig. 3. Curva R obtida para um laminado vidro/epóxico.

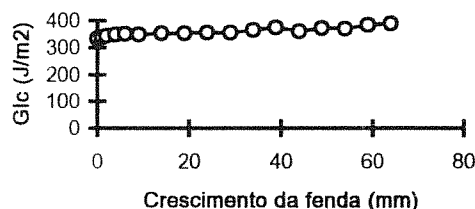


Fig. 4. Curva R obtida para um laminado carbono/epóxico [6].

Uma das dificuldades é a definição do valor de  $G_{Ic}$  de início de propagação. Esta pode ser estável (Fig. 5) ou instável (*stick-slip*), podendo neste caso ser precedida de algum crescimento estável.

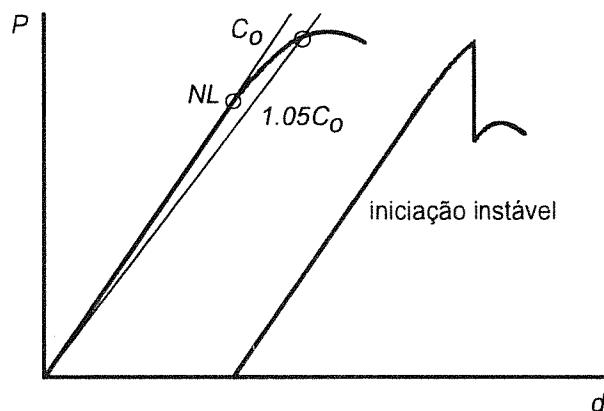


Fig. 5. Início do crescimento da fenda em ensaios DCB: tipo e critérios da ESIS.

Em qualquer dos casos ao operador será praticamente impossível assinalar exactamente o momento do início da propagação. A ESIS preconiza dois critérios adicionais para a definição deste (Fig. 5): o limiar da não-linearidade (critério NL) da curva, e o ponto de 5 % de acréscimo da *compliance*, ou, caso anterior a este, o ponto de carga máxima da curva (critério 5/M). O  $G_{Ic}$  é calculado com base no valor inicial do comprimento da fenda. Na prática o critério NL, naturalmente mais conservador, tem como principais desvantagens a dependência da escala do gráfico utilizado, bem como o facto de poder ser falseado por grandes deslocamentos que nada têm a ver com a propagação da fenda. O critério 5/M é uma definição arbitrária mas que poderia constituir o compromisso necessário e fornecer os valores conservadores desejados. A prática contudo tem demonstrado (Fig. 6) que a observação visual fornece menores valores de  $G_{Ic}$  que o referido critério. É opinião dos autores que, apesar dos erros inevitáveis que lhe são inerentes, a observação visual parece ser o critério de início de propagação a utilizar.

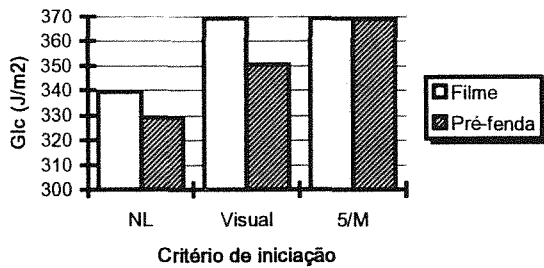


Fig. 6. Valores de  $G_{Ic}$  de início de propagação obtidos para laminados carbono/epóxico segundo os critérios ESIS. Resultados obtidos a partir do filme e de pré-fenda gerada em ensaios DCB anteriormente realizados.

Outra questão fundamental é a natureza da fenda inicial. A ASTM [5] e a ESIS [1,2] estabelecem que esta deve ser gerada por um filme de espessura não superior a 15  $\mu\text{m}$ . Entre os problemas das fendas assim geradas incluem-se adesão parcial, acumulação de resina na frente do filme, que enrugua facilmente. O início de propagação é invariavelmente instável e conduz a valores de  $G_{Ic}$  superiores aos obtidos com pré-fendas geradas em ensaios DCB realizados previamente (Fig. 6). O argumento contra a geração de pré-fendas advém da existência de uma curva R, e consequentemente de este procedimento implicar a perda do valor de  $G_{Ic}$  para o comprimento do filme. Tal não se verifica se a pré-fenda for criada por um ensaio DCB, mas ocorre se se recorrer à inserção de uma lâmina, método mais expedito actualmente em avaliação.

Outro ponto a esclarecer neste método de ensaio prende-se com o tratamento de dados. A Teoria das vigas corrigida permite, para cada comprimento da fenda, o cálculo do módulo de elasticidade  $E$ , o que pode ser utilizado para efeitos de verificação da qualidade dos dados. Tem-se verificado contudo que o valor calculado é geralmente superior em cerca de 10-20 % [7] ao medido no ensaio de flexão em 3 pontos. Na origem destas discrepâncias podem estar o já referido *bridging* e a curvatura da frente de delaminação. De referir que problemas semelhantes afectam o método da calibração experimental da *compliance*, com a agravante das aproximações que este envolve serem mais sensíveis à qualidade e quantidade dos pontos experimentais obtidos.

Em resumo, no ensaio DCB são questões importantes a esclarecer a definição do início do crescimento da fenda e a robustez do método de tratamento de dados.

## 2.2. OS ENSAIOS DE MODO II

Conforme se viu em 1., são dois os métodos de ensaio estudados pela ESIS. O preferido tem sido o ELS, uma vez que este, ao contrário do ENF, envolve um crescimento estável da fenda, o que permite a obtenção de uma curva R. De facto no ensaio ENF o início de propagação é intrinsecamente instável. O maior interesse [5] que lhe têm devotado a ASTM e a JIS, que apresentou inclusive uma norma (K7086), reside na simplicidade e disponibilidade do dispositivo, que não é mais do que o de flexão em 3 pontos.

Os problemas que se põem neste tipo de ensaios são muito semelhantes aos referidos em 2., sendo porém quantitativamente mais graves. A definição do início da propagação baseia-se nos mesmos critérios. Nos ensaios ENF o critério NL resulta geralmente em valores bastante baixos (Fig. 7) para  $G_{IIc}$ .

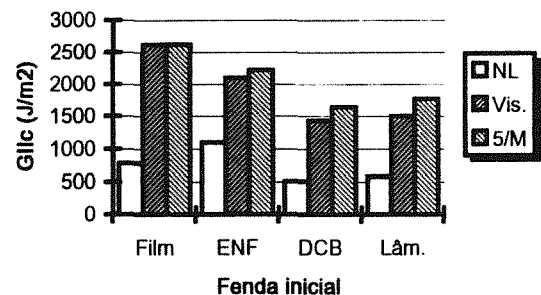


Fig. 7. Resultados obtidos em ensaios ENF de provetes vidro/epóxico. Foram empregues pré-fendas geradas em ensaios ENF, DCB e feitas com uma lâmina de barbear.

Em geral os ensaios ENF fornecem  $G_{IIc}$  [7] inferiores cerca de 20 % aos ELS.

A detecção visual é mais difícil que nos ensaios DCB, dada a ausência de qualquer abertura da fenda. Nos ensaios ELS o início de propagação pode ser estável, mas permanecem as questões já referidas em 2. A estabilidade do início da propagação está condicionada, tal como nos ensaios de modo I, ao tipo de pré-fenda utilizado. A partir do filme obtém-se uma iniciação instável e valores para  $G_{IIc}$  superiores que com pré-fendas. São as pré-fendas DCB as que resultam em menores valores de  $G_{IIc}$  de início de propagação, quer nos ensaios ENF (Fig. 7) quer nos ensaios ELS (Fig. 8)

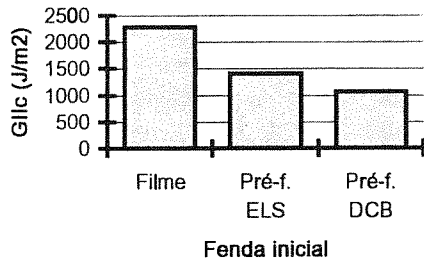


Fig. 8. Valores de  $G_{IIc}$  de início de propagação obtidos em ensaios ELS de provetes carbono/epóxico [6]. O critério empregue é a observação visual.

Conforme já foi referido a grande vantagem dos ensaios ELS é o facto de permitirem a obtenção de uma curva R. Todavia é de assinalar que seguir a fenda não é tarefa fácil nestes ensaios. Por outro lado a *compliance* varia pouco com o comprimento da fenda. Por estas razões a calibração experimental da *compliance* é um método a preterir em relação à Teoria das vigas corrigida. De facto as diferenças entre os  $G_{IIc}$  obtidos pelos dois métodos são por vezes significativas [4-7].

Outra desvantagem dos ensaios ELS é a grande propensão para grandes deslocamentos, em particular quando se desejam propagações importantes, o que obriga a empregar maiores comprimentos livres. Os critérios de início da propagação NL e 5/M são portanto de excluir. Recentemente verificou-se a impossibilidade de ensaiar provetes vidro/epóxico de módulo relativamente baixo (20 GPa), enquanto que o ensaio ENF pôde ser aplicado.

Finalmente, e talvez a deficiência mais grave, o aperto do provete na guia móvel (Fig. 1) parece exercer uma indesejável influência [7]. Isto é notório quando se usa o dispositivo para medir o módulo, o que é feito alterando a posição do provete de modo a excluir a fenda do comprimento livre. Os valores de  $E$  assim obtidos são consideravelmente (20-30%) inferiores aos medidos em flexão em 3 pontos, e são afectados pela força de aperto empregue. Estas discrepâncias reflectem-se nos  $G_{IIc}$ , o que põe de alguma forma em causa este método de ensaio. Estão previstos novos *round-robins* com o objectivo de esclarecer estas questões.

3. FRACTURA INTRALAMINAR

Uma das grandes vantagens dos laminados compósitos é a adaptabilidade da construção do laminado (orientações das camadas e sequência de empilhamento) às solicitações. Em geral procurar-se tirar pleno partido da elevada resistência longitudinal da camada, caso a que se restringe esta discussão.

A presença de discontinuidades é essencial em grande número de aplicações, daí a importância do estudo do seu efeitos na resistência dos laminados. São diversos [9-15] os estudos dedicados ao problema, em particular à resistência à tracção e à compressão de placas contendo um furo circular (Fig. 9).

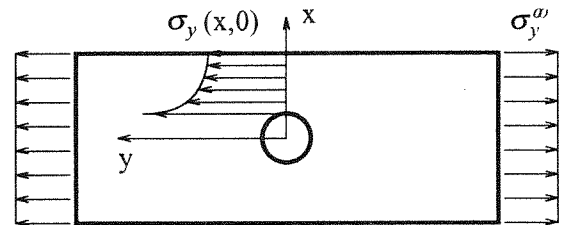


Fig. 9. Placa de dimensões infinitas com um furo circular submetida a uma tensão no topo.

A previsão da resistência pode basear-se directamente na Mecânica da Fractura [8,11,12]. Pressupõe-se que o dano localizado na frente da discontinuidade é representável por uma fenda equivalente (Fig. 10), que, ao atingir um determinado comprimento crítico, provoca a rotura da placa.

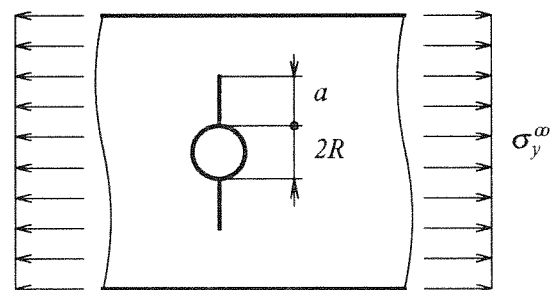


Fig. 10. Fenda equivalente numa placa com um furo circular.

A propagação da fenda equivalente ocorre quando a tensão na frente da fenda é igual à tensão de rotura do laminado (sem furo)  $\sigma_u$ . As distribuições de tensão  $\sigma_y(x,0)$  utilizadas são obtidas da Elasticidade 2D para os diversos tipos de discontinuidades. O comprimento

crítico da fenda é relacionável com a Tenacidade  $K_c$  [8]

$$a_0 = \left( \frac{\sigma_u}{K_c} \right)^2 \frac{1}{\pi} \tag{1}$$

ou com a Taxa Crítica de Libertação de energia  $G_c$  [11,12]. Uma vez obtida uma destas quantidades, é possível obter a tensão de rotura da placa  $\sigma_{uN}$

$$\sigma_{uN} = \frac{\sigma_u}{f\left(\frac{a_0}{R}\right)} \tag{2}$$

em que  $f$  é uma função tabelada e  $R$  a dimensão característica do entalhe.

Os critérios de Tensão Pontual (Point Stress) e de Tensão Média (Average Stress) de Whitney e Nuismer [9] estão bastante divulgados. O critério de Tensão Pontual admite que a rotura se dá quando a tensão  $\sigma_y$  a uma distância crítica  $d_0$  atingir a tensão de rotura do laminado  $\sigma_u$ . No critério de Tensão Média a rotura da placa ocorre quando a tensão média ao longo de uma distância crítica  $a_0$  é  $\sigma_{uN}$ . Recorrendo à Elasticidade 2D, o critério de tensão pode exprimir-se

$$\sigma_{uN} = \sigma_u \frac{2}{2 + \xi^2 + 3\xi^4 - (K_T - 3)(5\xi^6 - 7\xi^8)} \tag{3}$$

onde  $K_T$  é o factor de concentração de tensão e

$$\xi = \frac{R}{R + d_0} \tag{4}$$

O critério da Tensão Média exprime-se de modo análogo. Na realidade estes critérios são equivalentes à abordagem anterior, conduzindo, para uma placa com uma fenda central de comprimento  $2a$ , a uma Tenacidade

$$K_c = \sigma_u \sqrt{\pi a (1 - \zeta^4)} \tag{5}$$

sendo

$$\zeta = \frac{a}{a + d_0} \tag{6}$$

Trata-se de um critério simples de aplicar, mas cuja utilidade prática depende de a distância crítica  $d_0$  ser constante. Na realidade esta tem-se revelado [8] sensível à construção do laminado. Alternativamente, a abordagem baseada na Mecânica da Fractura requiere

a medição da Tenacidade  $K_c$ , o implica a realização de um ensaio complexo e dispendioso. Neste caso seria mais fácil e directo realizar um ensaio de resistência. Outra desvantagem importante de qualquer destes métodos é a necessidade da resistência do laminado sem entalhe, particularmente se tivermos em conta a grande variedade de construções possíveis para os laminados. Finalmente, há que salientar que, baseiando-se estes critérios em distribuições de tensão da Elasticidade 2D, não têm em conta dano intermédio que provoca redistribuição de tensões. Apesar de tudo mantem-se aceso o interesse nos critérios de Whitney e Nuismer, dada a simplicidade de aplicação e a falta de abordagens mais rigorosas.

A FEUP realizou, no âmbito de um projecto BRITE/EURAM, um estudo [14,15] sobre o comportamento à tracção e à compressão de provetes contendo um furo circular. Tratou-se de dois materiais fibra de carbono (T300)/ resina epoxy, aqui designados por C/R1 e C/R5. Os laminados tinham construções do tipo  $[(0^\circ)_n/(45^\circ)_n/(90^\circ)_n/(-45^\circ)_n]_{ms}$  com  $n=1,2$  e  $4$  e  $m=4/n$ , com o objectivo de estudar o efeito da sequência de empilhamento. Os provetes tinham 150 mm de comprimento, 30 mm de largura, aproximadamente 4 mm de espessura e um furo central circular de 6mm de diâmetro. Os comprimentos livres adoptados foram de 60 mm para os ensaios de tracção e 30 mm para os ensaios de compressão. Nestes, de execução mais delicada, utilizou-se o dispositivo IITRI modificado [14-16]. Os resultados estão expostos na Tabela 1

**Tabela 1.** Resultados dos ensaios de resistência de provetes com um furo circular.

Material	n	Ensaio	Res. (MPa)
C/R0	1	tracção	274
	2		285
	4		298
C/R0	1	compressão	335
	2		325
	4		373
C/R5	1	tracção	287
	1	compressão	316

Conforme se pode constatar, no caso presente, as resistências à tracção e à compressão são relativamente pouco sensíveis à sequência de empilhamento. Radiografias revelaram a ausência de dano intermédio nos provetes sem agrupamento de camadas da mesma orientação ( $n=1$ ). Pelo contrário, nos provetes ( $n=4$ ) notam-se quantidades apreciáveis de dano intermédio (Fig. 11), incluindo fissuração transversal e delaminagens. O dano intermédio parece portanto provocar um certo relaxar da concentração de tensão.

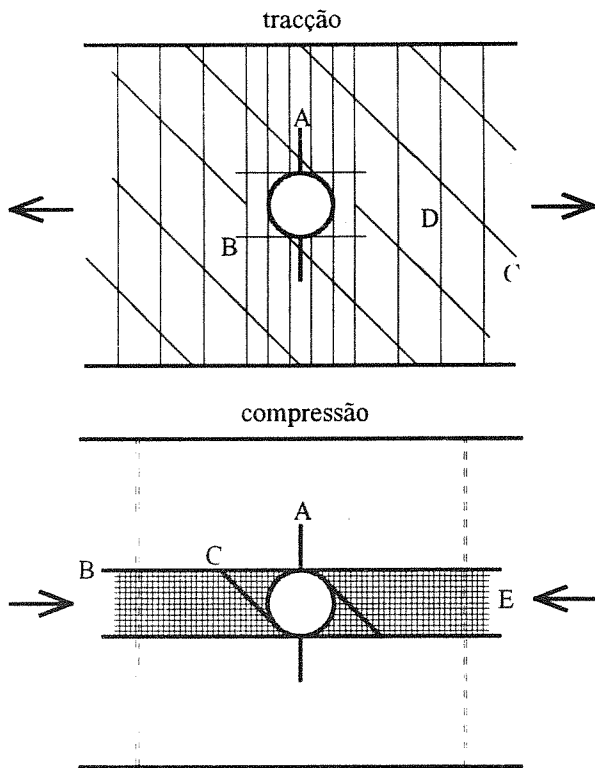


Fig. 11. Representação esquemática do dano intermédio em provetes  $[(0^\circ)_4/(45^\circ)_4/(90^\circ)_4/(-45^\circ)_4]_s$ . A-fenda longitudinal responsável pela rotura final; B-fissuração transversal das camadas a  $0^\circ$ ; C-fissuração transversal das camadas a  $45^\circ$ ; D-fissuração transversal das camadas a  $90^\circ$ ; E-delaminagem entre as fendas transversais B.

Apesar de se medirem resistências ligeiramente superiores com crescente agrupamento de camadas, na prática utilizar-se-ão geralmente sequência de empilhamento ( $n=1$ ) ou ( $n=2$ ), por razões de melhor comportamento ao impacto. Nestes casos o dano intermédio é nulo ( $n=1$ ) ou incipiente ( $n=2$ ), facto que favorece a aplicabilidade dos critérios de Whitney e Nuismer aos laminados de construção  $[(0^\circ)_n/(45^\circ)_n/(90^\circ)_n/(-45^\circ)_n]_{ms}$ . Os valores experimentais até agora disponíveis apontam para uma distância crítica de 0.45 mm. Naturalmente os dados experimentais são nesta fase limitados para tirar conclusões definitivas.

#### 4. CONCLUSÕES

Trataram-se questões relativas ao comportamento à fractura de materiais compósitos

Foi abordado o estado da arte dos ensaios de fractura interlaminar de laminados compósitos. Expuseram-se as questões relativas aos procedimentos e interpretação dos resultados, ilustradas com resultados obtidos pela

FEUP no âmbito da sua participação na ESIS. Trabalho futuro procurará dar resposta aos principais problemas aqui analisados.

Foram também analisado o problema da fractura intralaminar, em particular dos laminados contendo descontinuidades. Apresentaram-se critérios de previsão da resistência e discutiram-se as condições de aplicabilidade.

#### 5. REFERÊNCIAS

- [1] ESIS, Polymers & Composites Task Group. "Protocols for Interlaminar Fracture Testing of Composites", Edited by P. Davies, Marine Materials Laboratory IFREMER.
- [2] ESIS, Polymers & Composites Task Group. "Determination of the Mode I Delamination Resistance of Unidirectional Fibre-Reinforced Polymer Laminates using the Double Cantilever Beam (DCB) Specimen", draft standard presented to ISO.
- [3] ESIS, Polymers & Composites Task Group. "Determination of the Mode II Delamination Resistance of Unidirectional Fibre-Reinforced Polymer Laminates using the End Loaded Split (ELS) Specimen", draft standard presented to ISO.
- [4] Brunner, A. J., S. Tanner, P. Davies, H. Wittich. "Interlaminar Fracture Testing of Unidirectional Fibre-Reinforced Composites: Results from ESIS Round-Robins", Proceedings of the European Conference on Composite Materials - Composites Testing and Standardisation 2, Hamburg, September 1994, pp. 523-523.
- [5] Williams, J. G., P. Davies, A. J. Brunner, "Standard Tests for the Toughness Measurement of Composite Laminates - some bones of contention", Proceedings of the 10th International Conference on Composite Materials, Canada August 1995. Vol. 1, pp. 71-75.
- [6] Morais, A. B., P. T. de Castro, A. T. Marques. "Determinação das Taxas Críticas de Libertação de Energia ( $G_{Ic}$  e  $G_{IIc}$ ) de Laminados Compósitos Carbono/Epóxico", 5<sup>as</sup> Jornadas de Fractura, Sociedade Portuguesa de Materiais, Abril 1994.
- [7] Brunner, A. J., P. Flüeler, "Interlaminar Fracture Toughness Testing: Comments, Ideas and Suggestions", EMPA-Report 149'956/4, 1994.

- [8] Beaumont, P. W. R., "The failure of Composite Materials: An Overview", *Journal of Strain Analysis*, Vol. 24 N. 4, pp.189-205, 1989.
- [9] Whitney, J., R. Nuismer, "Stress Fracture Criteria for Laminated Composites Containing Stress Concentrations", *Journal of Composite Materials*, 8, pp. 253-265, 1974.
- [10] Tan, S. "Effective Stress Fracture Models for Unnotched and Notched Multidirectional Laminates", *Journal of Composite Materials*, 22, pp. 322-340, 1988.
- [11] Soutis, C., N. Fleck, "Static Compression Failure of Carbon Fibre T800/924C Compression Plate with a Single Hole" *Journal of Composite Materials*, 24, pp. 536-558, 1990.
- [12] Soutis, C., N. Fleck, P. Smith, "Failure Prediction Technique for Compression Loaded Carbon Fibre-Epoxy Laminates with Open Holes" *Journal of Composite Materials*, 25, pp. 1476-1498, 1991.
- [13] Chang, F., L. Lessard, "Damage Tolerance of Laminated Composites Containing an Open Hole and Subjected to Compressive Loadings: Part II-Experiment" *Journal of Composite Materials*, 25, pp. 44-64, 1991.
- [14] Balacó de Morais, A., A. Torres Marques, "NT-1401-U/1: Contribution of the University of Porto to Subtask 1.4", BRITE/EURAM project contract N° BRE2-CT92-0314.
- [15] Balacó de Morais, A., A. Torres Marques, "NT-1401-U/1: Contribution of the University of Porto to Subtask 1.4", BRITE/EURAM project contract N° BRE2-CT92-0314.
- [16] ASTM D3410-87: "Standard Test Method for Compressive Properties of Unidirectional or Crossply Fiber-Resin Composites".