

ESTUDO DE JUNTAS COLADAS DE MATERIAL COMPÓSITO SUJEITAS A ESFORÇOS DE FADIGA EM MODO I

Maria V. Fernández^{*}, Marcelo F. S. F. de Moura^{*}, Lucas F. M. da Silva^{*}, António T. Marques^{*}

^{*} Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP)
Universidade do Porto
Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto, Portugal
e-mail: mavicfernandez@gmail.com, web page: <http://www.fe.up.pt>

Palavras - Chave: Materiais Compósitos, fadiga, juntas coladas, DCB.

Resumo. *A capacidade de reparação de estruturas em material compósito tem vindo a ganhar importância ao longo dos anos. Consequentemente, é de primordial importância uma melhor compreensão do desempenho de reparações por junta colada de compósitos sob solicitações de fadiga. Neste trabalho pretende-se analisar o desempenho de juntas adesivas de carbono-epóxico sob solicitações de fadiga em modo I. Foram realizados ensaios experimentais com o objectivo, tendo-se verificado a existência de diferentes modos de rotura. O objectivo fundamental consistiu na obtenção da lei de Paris aquando da ocorrência de rotura coesiva. Pretende-se assim determinar o tempo de vida útil de estruturas reparadas e sujeitas a este tipo de solicitação.*

1 INTRODUÇÃO

Os CFRP (“Carbon Fibre Reinforced Polymer”) são usados em varias aplicações como é o caso da indústria aeroespacial ou a indústria aeronáutica. As principais vantagens destes materiais são a leveza, a baixa taxa de degradação e manutenção reduzida [1]. Com a entrada no meio industrial, os métodos de reparação deste tipo de materiais têm vindo a ganhar importância, visto que os compósitos não são recicláveis. Assim sendo, as ligações coladas aparecem como uma opção importante na reparação, dada a dificuldade inerente ao estabelecimento de ligações mecânicas alternativas. As ligações coladas constituem ainda uma técnica estruturalmente eficiente pois apresentam uma melhor distribuição das tensões e uma relação resistência/peso elevada (quando comparado com os sistemas de ligações mecânicas alternativos) [1]. Este trabalho analisa o comportamento mecânico em modo I de ligações coladas de CFRP em regime dinâmico. O objectivo fundamental consiste em avaliar o tempo de vida de uma estrutura previamente reparada.

2 FADIGA

Um dos métodos mais eficazes para analisar os efeitos de solicitações de fadiga é através da mecânica da fractura. A taxa de propagação da fenda (da/dN) pode ser relacionada com a taxa de libertação de energia (G) [1], dando origem a uma representação gráfica com escala logarítmica, similar à representada na figura 1 [1]. As três regiões do gráfico representam as três etapas da vida à fadiga: a primeira é a zona onde o crescimento da fenda não é visível, a terceira é onde ocorre a falha catastrófica do provete e a segunda corresponde a um crescimento linear da fenda, e é a zona onde a lei de paris (equação 1) é aplicável.

$$\frac{da}{dN} = K(\Delta G)^m \quad (1)$$

Os valores de K e m desta lei podem ser consideradas constantes da curva de fadiga, e retratam várias características do provete (dimensões e o material) [2].

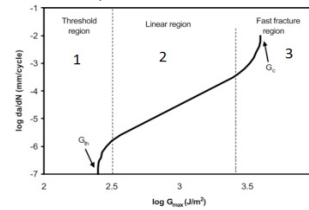


Figura 1: Gráfico da taxa de propagação da fenda em função da taxa de libertação de energia máxima ($G_{\max}$) [1].

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 Ensaio DCB

Os ensaios DCB (“*Double Cantilever Beam*”) são efectuados com provetes contendo uma pré-fenda (a_0), como indicado na figura 2. No caso das ligações coladas, os braços do provete são ligados com adesivo e o valor do a_0 obtém-se pela não colocação de cola num determinado comprimento. Finalmente, uma força F ou uma amplitude de forças (no caso de dinâmico) é aplicada e determina-se a taxa de libertação de energia do modo I (G_I), durante a propagação de fenda. [4]

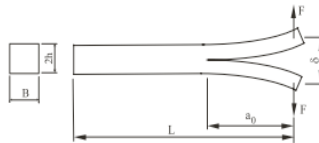


Figura 2: Desenho de um provete DCB.

Para este trabalho o ensaio foi efectuado numa máquina servo-hidráulica MTS, com uma célula de carga de 5kN. Realizou-se com controlo de força, a uma força máxima ($P_{\max}$) de 230 N. A razão (R) foi de 0,1 e a frequência de 4 Hz. Finalmente, para a medição da fenda foram colocadas duas lentes, uma em cada lado do provete.

3.2 Geometria do Provette DCB e Propriedades do Material

Os provetes DCB foram feitos a partir de placas de prepreg unidireccionais de CFRP cada

um com 36 camadas ($h=5,7\text{mm}$), e um ciclo de cura a 140°C durante uma hora. Seguidamente, os provetes foram cortados com as dimensões desejadas ($L=125\text{mm}$, $B=25\text{mm}$). Para a realização da junta, as superfícies de colagem foram polidas com lixa e limpas com acetona. Duas fitas calibradas de $0,2\text{ mm}$ foram coladas no provete para garantir a espessura do adesivo: a primeira cobriu uma distância de 45mm a partir de uma das extremidades do provete definindo assim a_0 e o segundo colocou-se na outra extremidade do provete. O adesivo usado foi o Araldite 2015, cujo processo de cura demora 5 dias à temperatura ambiente. As propriedades do adesivo ($E=1850\text{ MPa}$, $\nu=0,3$) e do substrato (Tabela 1) foram determinadas por Campilho em [5].

Módulos de elasticidade	Coefficientes de Poisson	Módulos de Corte
$E_1=1,09\text{E}+05\text{MPa}$	$\nu_{12}=0,34$	$G_{12}=4315\text{ MPa}$
$E_2=8819\text{MPa}$	$\nu_{13}=0,34$	$G_{13}=4315\text{ MPa}$
$E_3=8819\text{MPa}$	$\nu_{23}=0,38$	$G_{23}=3200\text{ MPa}$

Tabela 1: Propriedades ortotrópicas de camadas de CFRP unidireccionais [5].

4 MÉTODO ANALÍTICO

4.1 Determinação do da/dN

A lei de Paris (equação 1) pode ser reescrita em função do rácio entre a energia máxima $G_{\max}$ e a taxa crítica de libertação de energia para o modo I, G_{Ic} [3]

$$\frac{da}{dN} = K \left(\frac{G_{\max}}{G_{Ic}} \right)^m \quad (2)$$

Experimentalmente, o da/dN pode ser calculado pelo método da secante (equação 3) proposto na Norma ASTM E647-08. Neste método, o $(da/dN)_{\bar{a}}$ representa a taxa de propagação média da fenda (a) ao longo de um determinado número de ciclos (N), i representa o número de medições feitas até um determinado momento do ensaio ($0 \leq i \leq n$) e $i+1$ representa a medição seguinte. O comprimento médio da propagação da fenda ($\bar{a}$) é determinado pela segunda equação 3, onde o valor médio da fenda se obtém a partir de medições consecutivas do seu comprimento a entre i e $i+1$.

$$\left(\frac{da}{dN} \right)_{\bar{a}} = \frac{(a_{i+1} - a_i)}{(N_{i+1} - N_i)} ; \quad \bar{a} = \frac{1}{2} (a_{i+1} + a_i) \quad (3)$$

4.2 Determinação do G_I e do G_{Ic}

Para a determinação do G_I e G_{Ic} utilizou-se o Método Baseado na Flexibilidade da Viga (MBFV) [4]. Este método depende somente da flexibilidade, não sendo necessária a medição do comprimento da fenda durante a execução do ensaio. Recorrendo à teoria de vigas a flexibilidade escreve-se

$$C = \frac{\delta}{P} = \frac{8a^3}{E_1 B h} + \frac{12a}{5 B h G_{12}} \quad (4)$$

Esta equação não contempla o efeito da concentração de tensões na extremidade da fenda, bem como a presença do adesivo. Para ultrapassar estas dificuldades, determina-se o módulo equivalente (E_f) a partir da flexibilidade inicial medida (C_0) e do comprimento inicial da fenda corrigido ($a_0 + \Delta$)

$$E_f = \left(C_0 - \frac{12(a_0 + |\Delta|)}{5BhG_{12}} \right)^{-1} \frac{8(a_0 + |\Delta|)^3}{Bh^3} \quad (5)$$

A correcção Δ contempla o efeito de rotação da fenda e pode ser obtida por [4]

$$\Delta = h \sqrt{\frac{E_f}{11G_{12}} \left[3 - 2 \left(\frac{\Gamma}{1 + \Gamma} \right)^2 \right]}, \quad \Gamma = 1,18 \frac{\sqrt{E_f E_R}}{G_{12}} \quad (6)$$

A determinação de Δ requer a utilização de um processo iterativo envolvendo as equações (5) e (6). A equação (4) pode ainda ser usada para a obtenção da fenda equivalente a_e durante a propagação, a partir da flexibilidade do provete medida no decurso do ensaio. A solução da equação cúbica resultante pode ser obtida através do Matlab e encontra-se detalhada em [4]. Finalmente, o G_I e o G_{Ic} podem ser obtidos pela substituição das variáveis na equação de Irwin-Kies, como se pode ver na equação (7).

$$G_I = \frac{P}{2B} \frac{dC}{da} = \frac{6P^2}{B^2h} \left(\frac{2a_e^2}{E_f h^2} + \frac{1}{5G_{12}} \right) \quad (7)$$

Finalmente, os valores de K e m podem ser obtidos por substituição dos valores de da/dN , G_I e o G_{Ic} na equação (2).

4 RESULTADOS

Ensaïaram-se 12 provetes, dos quais 6 apresentaram rotura coesiva, 2 rotura adesiva, 2 delaminaram e 2 romperam pelos substratos de compósito. A figura 3 mostra fotografias dos tipos de dano referidos.

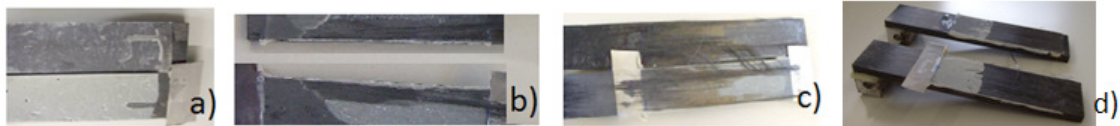


Figura 3: Modos de rotura obtidos durante os ensaios: a) coesiva, b) interfacial, c) delaminação e d) falha pelo compósito.

Quando a fenda iniciou a sua propagação pelo compósito, os provetes apresentaram uma duração de mais de 100000 ciclos, enquanto nos outros casos o ensaio durou entre 10000 e 20000 desde o momento da iniciação visível da fenda até a falha catastrófica. Decidiu-se então, que só os provetes com falha coesiva seriam utilizados para análise dos resultados. Considerou-se também que o valor de G_{min} é desprezável porque representa 1% de G_{max} (G para o $P=230$ N).

Na figura 4, está representado o comprimento de fenda medido experimentalmente (a medido) e o comprimento de fenda equivalente (a_e). Verifica-se que a_e é superior a a com uma diferença aproximadamente constante que corresponde ao facto de a_e contemplar a

existência da ZPF.

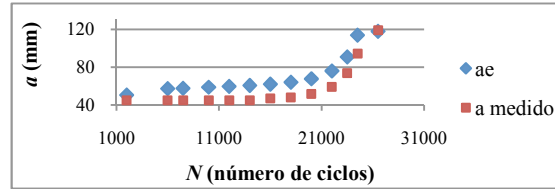


Figura 4: Gráfico da propagação do comprimento da fenda em função do número de ciclos.

De uma forma geral, nos provetes seleccionados, as curvas da/dN apresentam-se com formato esperado. A figura 5 apresenta uma curva demonstrativa dos ensaios realizados. Nota-se a existência de uma zona linear e crescente com um aumento da taxa de crescimento mais pronunciado no final do ensaio. Este aumento representa a ruptura catastrófica.

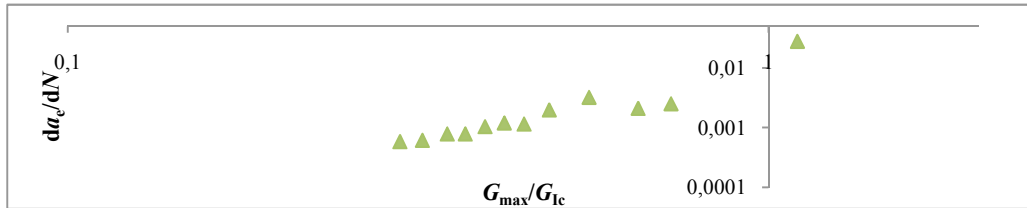


Figura 5: Evolução típica de da/dN em função do $G_{\max}/G_{Ic}$.

Para determinar as constantes K e m , realizou-se uma aproximação linear de todos os ensaios seleccionados (figura 6).

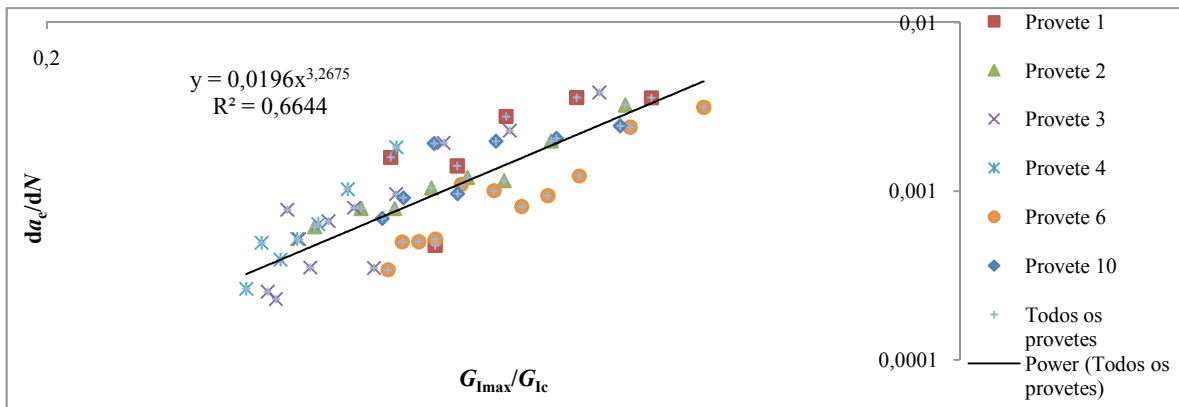


Figura 6: Determinação das constantes da velocidade de propagação da fenda.

Esta aproximação permitiu obter uma aproximação linear geral representativa dos ensaios realizados. Assim sendo, a lei de crescimento da fenda em função de N é dada pela equação 9, onde $K = 0,019$ e $m = 3,2675$.

Na figura 7 apresentam-se os resultados experimentais de três provetes, comparados com os propiciados pela equação 9 quando aplicada aos valores de $G_{I\max}/G_{Ic}$ do respectivo provete. Constata-se que existe um bom acordo o que evidencia a adequabilidade do processo utilizado

na obtenção da lei geral (equação 9).

$$\frac{da}{dN} = 0,019 \left(\frac{G_{\max}}{G_{Ic}} \right)^{3,2675} \quad (9)$$

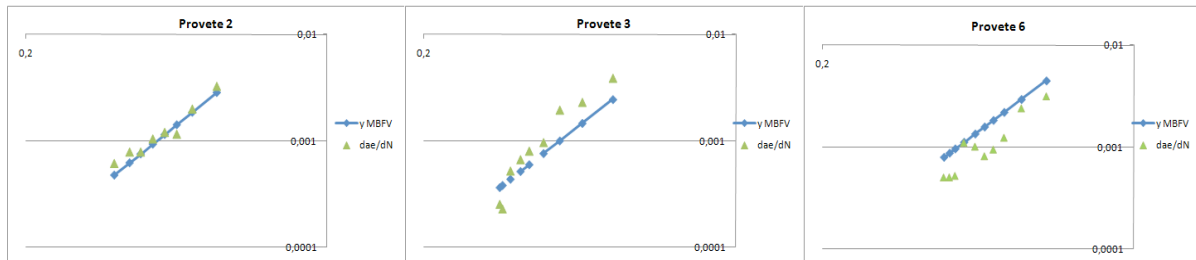


Figura 7: Comparação entre os resultados experimentais (da_e/dN) com os obtidos pela aplicação da equação 9.

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho permitiu concluir que existem diferentes tipos de dano nas juntas coladas de carbono-epóxico quando submetidas a solicitações de fadiga em modo I, sendo difícil garantir a propagação da fenda pelo adesivo. Todavia, verificou-se que o comportamento dos provetes onde ocorreu rotura coesiva é o esperado. Efectivamente, obtiveram-se as zonas de propagação linear e falha catastrófica, observadas nas curvas características deste tipo de ensaios.

Foi proposto um novo método de tratamento de resultados para a determinação das taxas de libertação de energia baseado no conceito da fenda equivalente. Este método permite a obtenção da lei de Paris de uma forma mais expedita, uma vez que não requer a monitorização do comprimento de fenda durante a sua propagação. A validação do método foi feita por comparação dos comprimentos da fenda real com a fenda equivalente, tendo-se verificado uma evolução congruente de a_e em função de N quando comparada com a .

REFERENCES

- [1] I.A. Ashcroft, S.J. Shaw, “Mode I Fracture of Epoxy Bonded Composite Joints 2. Fatigue Loading”, *Int. J. of Adhesion and Adhesives*, 22, 151-167 (2002)
- [2] D. L. Erdeman, J. M. Starbuck, “Fatigue Crack Growth in Adhesive Joints”, *Eng. Tech Division*
- [3] W.S. Johnson, *A Delamination and debonding of materials*, ASTM (1985)
- [4] M.F.S.F. de Moura; J.J.L. Morais, N. Dourado, “A New Data Reduction Scheme For Mode I Wood Fracture Characterization Using The Double Cantilever Beam Test”, *Eng. Fract. Mechanics*, 75, 3852-3865 (2008)
- [5] R.D.S.G. Campilho, M.F.S.F. de Moura, D.A. Ramantani et al., “Obtaining the Cohesive Laws of a Trapezoidal Mixed-Mode Damage Model using an Inverse Method”, *C.Tecn. Mat.*, 20, 81-86 (2008)