

Special Issue on Polymers and Composites

## Critérios de delaminação em modo-misto de materiais compósitos laminados de vidro/epóxico

*Mixed-mode delamination of glass/epoxy laminated composite materials*

R. Marat-Mendes<sup>a,\*</sup>, M. Freitas<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Escola Superior de Tecnologia de Setúbal, Departamento Engenharia Mecânica, Campus do IPS, Estefanilha, 2910-761 Setúbal, Portugal

<sup>b</sup>Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Departamento Engenharia Mecânica, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal

### Resumo

A taxa crítica de libertação de energia de laminados de vidro/epóxico usando a *Técnica Virtual de Fecho de Fenda* para o modo I, modo II, modo misto I+II e modo III foram determinados através dos ensaios *Double Cantilever Beam*, *End Notch Flexure*, *Mixed-Mode Bending* e *Edge Crack Torsion*, respectivamente. Os resultados foram analisados por meio dos critérios mais utilizados para prever a propagação da delaminação em modo-misto: os critérios *Power Law* e *Benzeggagh & Kenane*. Os resultados da taxa crítica de libertação de energia parecem representar com razoável precisão o modo misto.

© 2013 Sociedade Portuguesa de Materiais (SPM). Publicado por Elsevier España, S.L. Todos os direitos reservados.

*Palavras chave:* fibra de vidro/epóxico; critérios de falha; delaminação em modo misto.

### Abstract

Critical strain energy release rate of glass/epoxy laminates using the *Virtual Crack Closure Technique* for mode I, mode II, mixed mode I+II and mode III were determined using the *Double Cantilever Beam* test, the *End Notch Flexure* test, the *Mixed-Mode Bending* test and the *Edge Crack Torsion* test respectively. Results were analysed through the most widely used criteria to predict delamination propagation under mixed-mode loading: the *Power Law* and the *Benzeggagh & Kenane* criteria. Mixed-mode fracture toughness results seem to represent the data with reasonable accuracy.

© 2013 Sociedade Portuguesa de Materiais (SPM). Published by Elsevier España, S.L. All rights reserved.

*Keywords:* glass fibre/epoxy; failure criteria; mixed mode delamination.

### 1. Introdução

A utilização de materiais compósitos de matriz polimérica reforçada por fibras de alto desempenho, tem apresentado um grande incremento na indústria aeroespacial, automóvel, desporto de alta competição, construção civil, etc. Os desafios que os engenheiros

de concepção e de projecto enfrentam quotidianamente tornam-se cada vez mais estimulantes dada a cada vez maior aplicação destes materiais em componentes estruturais. Esta expansão deve-se não só às vantagens competitivas dos materiais compósitos laminados, que apresentam uma rigidez e resistência específica (relação resistência/densidade) superior aos materiais metálicos, mas também por permitirem configurar, através da orientação dos reforços no plano do laminado, as propriedades mecânicas de acordo com a utilização pretendida e o carregamento existente. Por

\* Corresponding author.

E-mail address: [rosa.marat@estsetubal.ips.pt](mailto:rosa.marat@estsetubal.ips.pt) (R. Marat-Mendes)

outro lado, existe um cada vez maior conhecimento do comportamento destes materiais, o que leva à existência de uma maior confiança na sua utilização. No entanto, devido às características destes materiais, danos tais como a delaminação podem ser produzidos durante o fabrico ou por cargas de serviço inadequados ou perigosos. Este mecanismo de dano, típico dos materiais compósitos laminados, é responsável por uma grande parte da ruína de estruturas em materiais compósitos. Pode-se descrever de uma forma simples a delaminação, como sendo a “descolagem” das camadas de reforço devida à presença de tensões interlaminares.

A delaminação e a propagação interlaminar em modos puros: modo I, modo II e modo III (Fig. 1) estão relacionadas com as propriedades da fractura do material. Deste modo, o crescimento de fenda em modo I puro fornece a taxa crítica de libertação de energia do material em modo I,  $G_{IC}$ . Do mesmo modo, o crescimento de fenda em modo II puro e modo III puro, fornecem a taxa crítica de libertação de energia do material em modo II,  $G_{IIC}$  e modo III,  $G_{IIIC}$ , respectivamente. No entanto, quando existe modo misto, é necessário recorrer-se a um critério de fractura específico para o estudo do crescimento de fenda (delaminação).

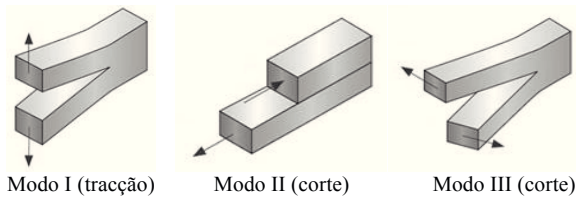


Fig. 1. Modos de fractura de fenda.

A determinação experimental das taxas de libertação de energia críticas em materiais compósitos laminados não é ainda de consenso geral, sendo que apenas os ensaios em modo I e em modo misto I+II, realizados através do provete *Double Cantilever Beam* (DCB) [1] e do provete *Mixed-Mode Bending* (MMB) [2] respectivamente, são consensuais. O ensaio para caracterização do modo II não é ainda consensual e configura-se que o provete *End Notch Flexure* (ENF) [3] parece ser o mais utilizado. Quanto à caracterização do modo III, após a proposta de algumas variantes anteriores, parece gerar relevância o ensaio *Edge Crack Torsion* (ECT) [4, 5]. Só recentemente têm sido propostos na literatura, desenvolvimentos experimentais que envolvam a simultânea activação em delaminação dos três modos de rotura (I, II e III) [6] ou da junção de modo misto

II+III [7, 8] embora essa necessidade se revele da maior importância.

No entanto quando existe modo misto, é necessário recorrer-se a um critério de fractura específico para o estudo do crescimento de fenda (delaminação). Os critérios de fractura são elementos fundamentais no projecto de qualquer estrutura e têm sido largamente utilizados na abordagem da delaminação em modo misto I+II, e menos utilizados nos outros modos mistos, em grande parte devido à falta de estudos nestes tipos de modos mistos. Uma das tarefas mais complicadas no projecto de estruturas em materiais compósitos é a escolha do critério mais adequado.

Ao longo dos últimos tempos, muitos critérios de fractura dos materiais compósitos têm sido propostos, no entanto quase só abrangendo as componentes de modo I e modo II. O trabalho de Reeder [9] apresenta uma boa revisão do estado da arte dos critérios de fractura em modo misto I+II. Reeder [10] apresenta igualmente uma inovação nos critérios de fractura de materiais compósitos em modo misto I+II+III. Alguns dos critérios de delaminação mais utilizados na literatura estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Critérios de delaminação bidimensionais.

$G_{IC}$ [11]	$\frac{G_I}{G_{IC}} \geq 1$
$G_{IIC}$ [12]	$\frac{G_{II}}{G_{IIC}} \geq 1$
$G_{IIC}$ [13]	$\frac{G_T}{G_C} \geq 1$
Power Law [11]	$\left(\frac{G_I}{G_{IC}}\right)^\alpha + \left(\frac{G_{II}}{G_{IIC}}\right)^\beta \geq 1$
Polinomial [14]	$\frac{G_T}{G_{IC} + \rho \left(\frac{G_{II}}{G_I}\right) + \tau \left(\frac{G_{II}}{G_I}\right)^2} \geq 1$
Hacke [15]	$\frac{G_T}{(G_{IC} - \chi) + \chi \sqrt{1 + \frac{G_{II}}{G_I} \frac{E_{11}}{E_{22}}}} \geq 1$
Exponencial Hacke [16]	$\frac{G_T}{(G_{IC} - G_{IIC}) + e^{\gamma(1-N)}} \geq 1$ onde $N = \sqrt{1 + \frac{G_{II}}{G_I} \frac{E_{11}}{E_{22}}}$
Modo Misto [17]	$\frac{G_I}{G_{IC}} + (\kappa - 1) \frac{G_I}{G_{IC}} \frac{G_{II}}{G_{IIC}} + \frac{G_{II}}{G_{IIC}} \geq 1$
Linear [18]	$\frac{G_I}{G_{IC}} + \left( \kappa - 1 + \phi \left( \frac{1}{1 + \frac{G_{II}}{G_I}} \right) \right) \frac{G_I}{G_{IC}} \frac{G_{II}}{G_{IIC}} + \frac{G_{II}}{G_{IIC}} \geq 1$

Tabela 1. (continuação)

Bilinear [19]	$\frac{G_I - \xi G_{II}}{G_{IC}} \geq 1$ para $\frac{G_{II}}{G_I} < \frac{\frac{1}{\xi} G_{IC} + G_{IIC}}{G_{IC} + \xi G_{IIC}}$
	$\frac{\xi G_{II} - G_I}{\xi G_{II}} \geq 1$ para $\frac{G_{II}}{G_I} < \frac{\frac{1}{\xi} G_{IC} + G_{IIC}}{G_{IC} + \xi G_{IIC}}$
Benzeggagh & Kenane [20]	$\frac{G_T}{G_{IC} + (G_{IIC} - G_{IC}) \left( \frac{G_{II}}{G_I} \right)^\eta} \geq 1$

Os termos  $G_{IC}$ ,  $G_{IIC}$ ,  $G_C$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\rho$ ,  $\tau$ ,  $\chi$ ,  $\gamma$ ,  $\kappa$ ,  $\varphi$ ,  $\xi$ ,  $\zeta$  e  $\eta$  são parâmetros do material que são utilizados pelos diferentes critérios para ajustar aos resultados experimentais.  $G_T$  é a soma das componentes da taxa de libertação de energia  $G_T = G_I + G_{II}$ .

**2. Procedimento experimental**

Os diferentes ensaios utilizados, para a determinação da taxa crítica de libertação de energia em modo I, modo II, modo misto I+II e modo III, respectivamente DCB, ENF, MMB e ECT fornecem meios eficazes para obter a resistência à fractura sob condições de carga diferentes. É necessário um exame cuidado às características de cada ensaio, para definir as informações apropriadas da falha por delaminação a serem usadas nos modelos numéricos.

Os provetes foram obtidos através do empilhamento de um pré-impregnado unidireccional, de resina epóxida (ET443) reforçada com fibra de vidro (UE400REM) fornecida pela Texipreg®, de modo a se obter um painel. As propriedades do laminado são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Propriedades do laminado.

$E_{11}$ (GPa)	$E_{22}=E_{33}$ (GPa)	$G_{12}=G_{13}=G_{23}$ (GPa)	$\nu_{12}=\nu_{13}$	$\nu_{23}$	$V_f$ (%)
43.94	16.71	6.57	0.30	0.095	58.16

Os provetes foram cortados dos painéis previamente curados numa autoclave de acordo com as recomendações do fornecedor. A pré-fenda foi obtida através da inserção de uma folha de Teflon® com 12.7 µm de espessura a meio do empilhamento dos provetes. Neste trabalho foram utilizados dois empilhamentos diferentes. Para o modo I, modo II e modo misto I+II foi usado um laminado unidireccional  $[0]_{24}$  com 24 lâminas unidireccionais.

Para o modo III o empilhamento escolhido foi o  $[90/(\pm 45)_3/(\mp 45)_3/90]_s$  com 28 lâminas.

As dimensões nominais e as configurações dos diferentes provetes são apresentadas na Tabela 3 e na Fig. 2a) para os provetes DCB, ENF e MMB e na Fig. 2b) para os provetes ECT.

Tabela 3. Dimensões nominais.

Empilhamento	Dimensões nominais [mm]					
	w	b	2h	a <sub>0</sub>		
$[0]_{24}$ DCB; ENF; MMB	162.0	25.0	6.5	30.0		
	L	b	2h	a <sub>0</sub>	l	w
$[90/(\pm 45)_3/(\mp 45)_3/90]_s$ ECT				0		
				8		
	89.0	38.0	8.17	13	76.00	32.00
				19		
			23			

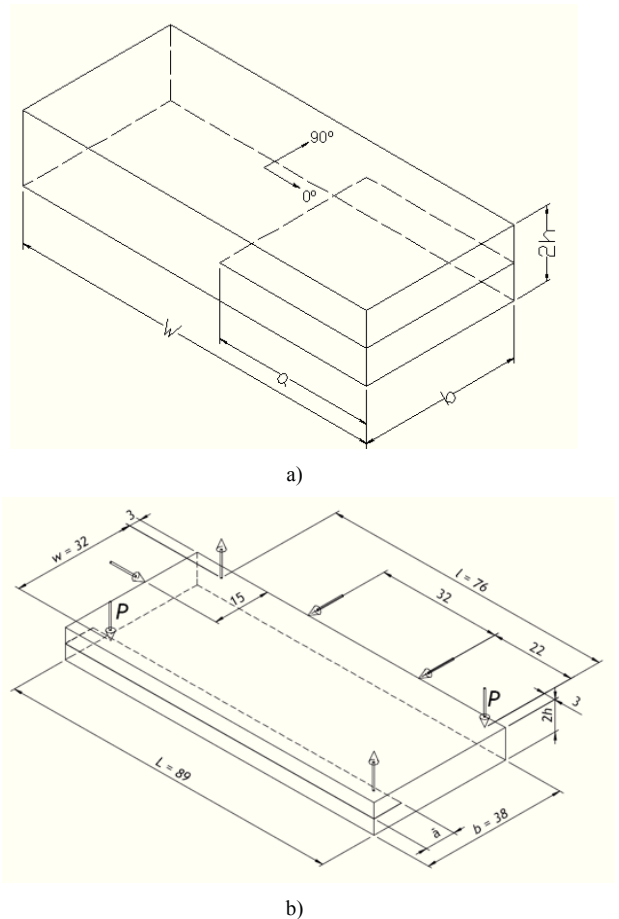


Fig. 2. Geometria dos provetes a) DCB, ENF e MMB; b) ECT.

Todos os ensaios foram realizados a uma velocidade de deslocamento do travessão constante de 0.5 mm/min para o carregamento até se dar o início da propagação de fenda. Durante o ensaio registaram-se as curvas de carga vs deslocamento,  $P$ - $\delta$ , e para cada uma das curvas de carregamento foram obtidos os valores de carga e deslocamento referentes a  $P_{NL}$ ,  $P_{5\%}$  e  $P_{max}$ .  $P_{NL}$  é a carga a partir da qual a curva carga ( $P$ )-deslocamento ( $\delta$ ) deixa de se apresentar linear,  $P_{5\%/max}$  é a carga onde a flexibilidade é acrescida de 5% ou a carga atinge o seu valor máximo, dependendo qual ocorre em primeiro lugar. Este método é menos ambíguo que o anterior, no entanto apresenta valores da taxa de libertação de energia superiores.

### 3. Análise numérica

#### 3.1. Modelo de elementos finitos

O modelo numérico utilizado neste trabalho foi construído por elementos sólidos tridimensionais (3D) para laminados *SOLID46* de oito nós do código *ANSYS*<sup>®</sup>. Elementos de contacto *CONTAC174* e *TARGE170* foram aplicados ao longo do plano delaminado para prevenir a interpenetração entre as duas superfícies em contacto durante a análise. A espessura do elemento na frente de fenda foi definida como sendo a espessura de uma lâmina do laminado. A distribuição ao longo da frente de fenda das componentes da taxa de libertação de energia,  $G_I$ ,  $G_{II}$  e  $G_{III}$  (Eq. 1) foram obtidas recorrendo ao *Método de Fecho Virtual de Fenda* (VCCT) [21, 22];

$$G_I = \frac{F_{zj} \delta_{zj}}{2\Delta a \Delta y} \quad G_{II} = \frac{F_{xj} \delta_{xj}}{2\Delta a \Delta y} \quad G_{III} = \frac{F_{yj} \delta_{yj}}{2\Delta a \Delta y} \quad (1)$$

em que  $\Delta a$  é o comprimento dos elementos na frente de fenda,  $\Delta y$  é a largura dos elementos.  $F_{zj}$ ,  $F_{xj}$  e  $F_{yj}$  representam as forças nos nós da frente de fenda e  $\delta_{zj}$ ,  $\delta_{xj}$  e  $\delta_{yj}$  representam os deslocamentos nos nós imediatamente anteriores à frente de fenda [22].

#### 3.2. Critério de falha

O critério *Power Law* exprime-se pela Eq. 2;

$$\left(\frac{G_I}{G_{IC}}\right)^\alpha + \left(\frac{G_{II}}{G_{IIC}}\right)^\beta + \left(\frac{G_{III}}{G_{IIIC}}\right)^\chi = 1 \quad (2)$$

onde os termos  $G_{IC}$ ,  $G_{IIC}$ ,  $G_{IIIC}$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\chi$  são parâmetros do material utilizados para ajustar aos resultados experimentais.

Devido à boa aproximação do critério bidimensional de *Benzeggagh & Kenane* aos

resultados experimentais, este apresenta-se como uma boa escolha como base para a modificação para o critério tridimensional. Deste modo, Reeder [10] apresenta um novo critério modificado de *Benzeggagh & Kenane* [20];

$$\frac{G_T}{G_{IC} + \left( (G_{IIC} - G_{IC}) \frac{G_{II}}{G_T} + (G_{IIIC} - G_{IC}) \frac{G_{III}}{G_T} \right) \left( \frac{G_{II} + G_{III}}{G_T} \right)^{\eta-1}} \geq 1 \quad (3)$$

onde os termos  $G_{IC}$ ,  $G_{IIC}$ ,  $G_{IIIC}$  e  $\eta$  são parâmetros do material utilizados para ajustar aos resultados experimentais.  $G_T$  é a soma das componentes da taxa de libertação de energia  $G_T = G_I + G_{II} + G_{III}$ .

Este critério é baseado na suposição de que a relação entre a rigidez do modo I e do modo III é similar à relação entre a rigidez do modo I e do modo II e de que uma interpolação linear pode ser utilizada entre o modo II e o modo III [10].

A abordagem seguida neste trabalho, para a análise dos critérios bidimensionais e tridimensionais de delaminação em modo misto, consiste na utilização dos critérios de *Power Law* (PL) e de *Benzeggagh & Kenane* (B&K) originais (bidimensionais) e modificados (tridimensionais) [23].

### 4. Resultados e discussão

Através dos critérios apresentados, foram realizados estudos de combinações de parâmetros, de modo a se obterem os melhores ajustes dos resultados das taxas de libertação de energia aos critérios para os modos mistos I+II, II+III e I+III.

Para cada um dos critérios e cada um dos modos mistos foi realizado um tipo de ajuste:

- São utilizados os valores críticos das taxas de libertação de energia,  $G_{IC}$ ,  $G_{IIC}$  e  $G_{IIIC}$ , calculados através do método do fecho virtual de fenda (VCCT) de cada um dos ensaios experimentais, DCB, ENF e ECT, respectivamente, assim como os valores das taxas de libertação de energia em modo misto,  $G_I$ ,  $G_{II}$  e  $G_{III}$ , calculados através dos ensaios em modo misto I+II (MMB) e II+III (ECT) e são então obtidos os expoentes das expressões, ou seja, os parâmetros de ajuste ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\chi$ ,  $\eta$ ). Expresso nos gráficos por: *impondo*  $G_C$ .
- São utilizados os valores das taxas de libertação de energia em modo misto,  $G_I$ ,  $G_{II}$  e  $G_{III}$ , calculados através dos ensaios em modo misto I+II (MMB) e II+III (ECT) e são obtidos os parâmetros de ajuste ( $G_{IC}$ ,  $G_{IIC}$  e  $G_{IIIC}$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\chi$ ,  $\eta$ ). Expresso nos gráficos por: *não impondo*  $G_C$ .

Foram utilizados os valores das taxas de libertação de energia em modo misto,  $G_{II}$  e  $G_{III}$  calculados através do ensaio ECT visto este apresentar características de modo misto II+III nos bordos do provete, devido a que tal como demonstrado na literatura [4, 5] este ensaio não possui características de modo III puro, mas sim modo misto II+III, uma vez que possui uma partição de modo II bastante elevada junto dos bordos do provete. No entanto na zona central do provete, este apresenta-se como um ensaio em modo III puro.

Na Tabela 4 estão representadas as equações utilizadas em cada critério para cada modo misto e para cada tipo de ajuste.

O estudo do tipo de ajuste e da obtenção dos parâmetros em modos mistos I+II, II+III e I+III, foi realizado utilizando os valores obtidos numericamente

através do método virtual de fecho de fenda (VCCT). Na Tabela 5 apresentam-se a sombreado os valores de  $G_{IC}$ ,  $G_{IIC}$  e  $G_{IIIC}$  obtidos por meio do VCCT através das modelações dos ensaios DCB, ENF e ECT, respectivamente, que se caracterizam pelos valores utilizados nas curvas de ajuste dos critérios *Power Law* e *B&K* segundo os vários tipos de ajuste para os dois critérios de iniciação NL e 5%/Max. Na Tabela 5 apresentam-se igualmente os resultados calculados pelos dois critérios, *Power Law* e *B&K*, através dos dois tipos de ajuste, *não impondo  $G_C$*  e *impondo  $G_C$* .

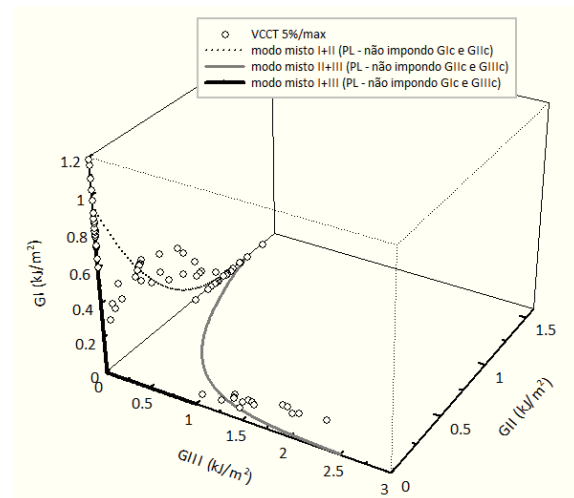
Nas Fig. 3 e 4 apresentam-se os modos mistos I+II, II+III e I+III segundo o critério *Power Law* para os vários tipos de ajuste e para o critério de iniciação de fenda 5%/Max num gráfico  $G_I$  vs  $G_{II}$  vs  $G_{III}$ .

Tabela 4. Critérios de modo misto.

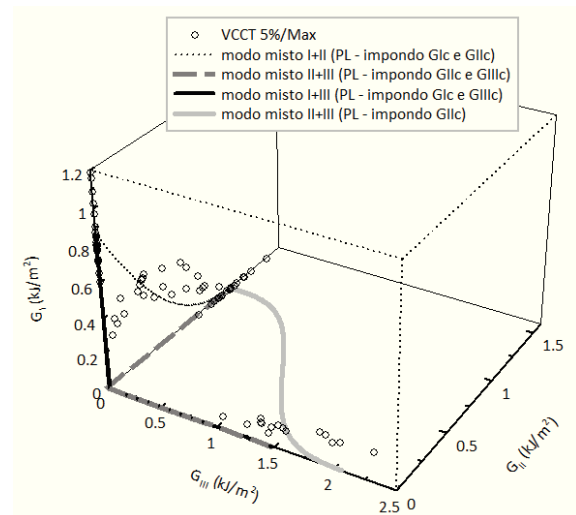
Critério	Condição	Expressão	Tipo de ajuste	Parâmetros calculados
<b>Modo Misto I+II</b>				
Power Law	$G_{III}=0$	$\left(\frac{G_I}{G_{IC}}\right)^\alpha + \left(\frac{G_{II}}{G_{IIC}}\right)^\beta \geq 1$	<i>não impondo <math>G_{IC}</math> e <math>G_{IIC}</math></i>	$G_{IC}, G_{IIC}, \alpha, \beta$
			<i>impondo <math>G_{IC}</math> e <math>G_{IIC}</math></i>	$\alpha, \beta$
B&K (2D)	$G_{III}=0$	$\frac{G_T}{G_{IC} + (G_{IIC} - G_{IC})\left(\frac{G_{II}}{G_T}\right)^\eta} \geq 1$	<i>não impondo <math>G_{IC}</math> e <math>G_{IIC}</math></i>	$G_{IC}, G_{IIC}, \eta$
			<i>impondo <math>G_{IC}</math> e <math>G_{IIC}</math></i>	$\eta$
<b>Modo Misto II+III</b>				
Power Law	$G_{IC}=0$	$\left(\frac{G_{II}}{G_{IIC}}\right)^\beta + \left(\frac{G_{III}}{G_{IIIC}}\right)^\chi \geq 1$	<i>não impondo <math>G_{IIC}</math> e <math>G_{IIIC}</math></i>	$G_{IIC}, G_{IIIC}, \beta, \chi$
			<i>impondo <math>G_{IIC}</math> e <math>G_{IIIC}</math></i>	$\beta, \chi$
			<i>impondo <math>G_{IIC}</math></i>	$G_{IIIC}, \beta, \chi$
B&K (3D)	$G_{IC}=0$ $G_I=G_{II}+G_{III}$	$\frac{G_T}{(G_{IIC})\left(\frac{G_{II}}{G_T}\right) + (G_{IIIC})\left(\frac{G_{III}}{G_T}\right)} \geq 1$	<i>não impondo <math>G_{IIC}</math> e <math>G_{IIIC}</math></i>	$G_{IIC}, G_{IIIC}$
			<i>impondo <math>G_{IIC}</math></i>	$G_{IIIC}$
<b>Modo Misto I+III</b>				
Power Law	$G_{IIC}=0$	$\left(\frac{G_I}{G_{IC}}\right)^\alpha + \left(\frac{G_{III}}{G_{IIIC}}\right)^\chi \geq 1$	<i>não impondo <math>G_{IC}</math> e <math>G_{IIIC}</math></i>	$G_{IC}, G_{IIIC}, \alpha, \chi$
			<i>impondo <math>G_{IC}</math> e <math>G_{IIIC}</math></i>	$\alpha, \chi$
B&K (3D)	$G_{IIC}=0$ $G_I=G_I+G_{III}$	$\frac{G_T}{G_{IC} + (G_{IIIC} - G_{IC})\left(\frac{G_{III}}{G_T}\right)^\eta} \geq 1$	<i>não impondo <math>G_{IC}</math> e <math>G_{IIIC}</math></i>	$G_{IC}, G_{IIIC}, \eta$
			<i>impondo <math>G_{IC}</math> e <math>G_{IIIC}</math></i>	$\eta$

Tabela 5. Resultados dos critérios *Power Law* e *B&K*.

	<i>Power Law (PL)</i>						<i>Benzeggagh &amp; Kenane (B&amp;K)</i>			
	$G_{IC}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]	$G_{IIC}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]	$G_{IIIc}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]	$\alpha$	$\beta$	$\chi$	$G_{IC}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]	$G_{IIC}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]	$G_{IIIc}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]	$\eta$
<b>Modo Misto I+II</b>										
(NL)										
não impondo $G_{IC}$ e $G_{IIC}$	0.945	1.308		1.061	0.240		0.777	0.821		2.094
impondo $G_{IC}$ e $G_{IIC}$	0.846	0.800		1.187	0.347		0.846	0.800		5.436
(5%/Max)										
não impondo $G_{IC}$ e $G_{IIC}$	0.951	1.192		0.401	0.990		0.869	1.092		4.098
impondo $G_{IC}$ e $G_{IIC}$	0.869	1.095		0.458	1.046		0.869	1.095		9.549
<b>Modo Misto II+III</b>										
(NL)										
não impondo $G_{IIC}$ e $G_{IIIc}$		0.849	10.936		4.210E-07	5.438		0.800	0.873	-
impondo $G_{IIC}$		0.800	11.187		4.840E-07	5.334		0.800	0.873	-
impondo $G_{IIC}$ e $G_{IIIc}$		0.800	0.787		0.670	3.630E-18				
(5%/Max)										
não impondo $G_{IIC}$ e $G_{IIIc}$		1.311	1317.095		3.784E-04	1.036		1.096	1.674	-
impondo $G_{IIC}$		1.095	24.956		6.010E-05	3.176		1.095	1.674	-
impondo $G_{IIC}$ e $G_{IIIc}$		1.095	1.472		1.070	2.870E-14				
<b>Modo Misto I+III</b>										
(NL)										
não impondo $G_{IC}$ e $G_{IIIc}$	0.886		0.952	8.670E-06		1.210E-08	0.818		0.787	1.000
impondo $G_{IC}$ e $G_{IIIc}$	0.818		0.787	5.060E-06		2.310E-63	0.818		0.787	1.000
(5%/Max)										
não impondo $G_{IC}$ e $G_{IIIc}$	0.886		1.021	2.790E-06		4.080E-06	0.853		1.472	1.000
impondo $G_{IC}$ e $G_{IIIc}$	0.869		1.472	4.090E-07		9.610E-06	0.869		1.472	1.000

Fig. 3. Representação 3D do critério *Power Law* para os modos mistos I+II, II+III e I+III usando o ajuste: não impondo  $G_c$ .

Analisando as Fig. 3 e 4 nos modos mistos I+II e II+III, o critério *Power Law* apresenta uma representação razoável dos resultados experimentais. Já para o modo misto I+III é claramente visível que o critério *Power Law* não é adequado para o captar.

Fig. 4. Representação 3D do critério *Power Law* para os modos mistos I+II, II+III e I+III usando o ajuste: impondo  $G_c$ .

Deste modo, o critério *Power Law* é representado em função de  $G_T$  vs  $G_{II}/G_T$  vs  $G_{III}/G_T$  e está representado nas Fig. 5 e 6 para os vários tipos de ajuste e para o critério de iniciação de fenda 5%/Max.

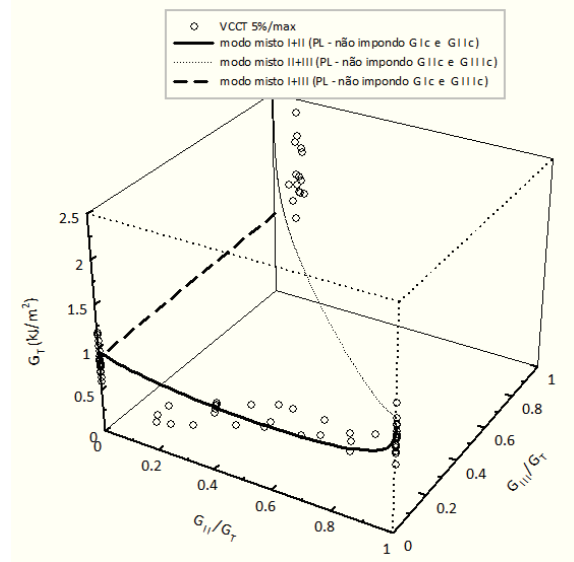


Fig. 5. Representação 3D do critério *Power Law* para os modos mistos I+II, II+III e I+III usando os ajustes: *não impondo  $G_C$* .

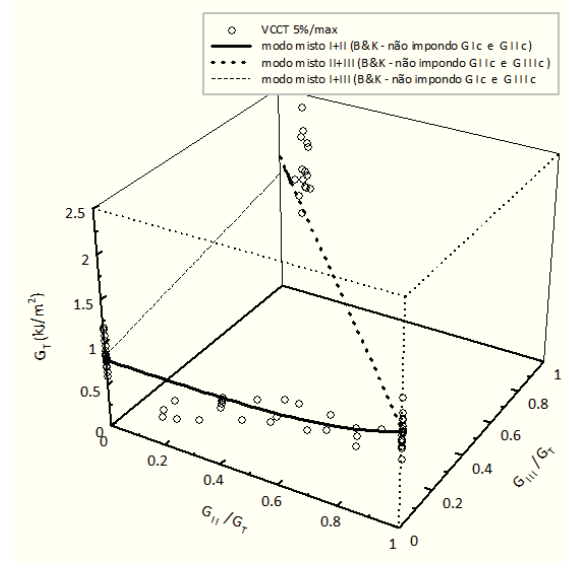


Fig. 7. Representação 3D do critério B&K para os modos mistos I+II, II+III e I+III usando os ajustes: *não impondo  $G_C$* .

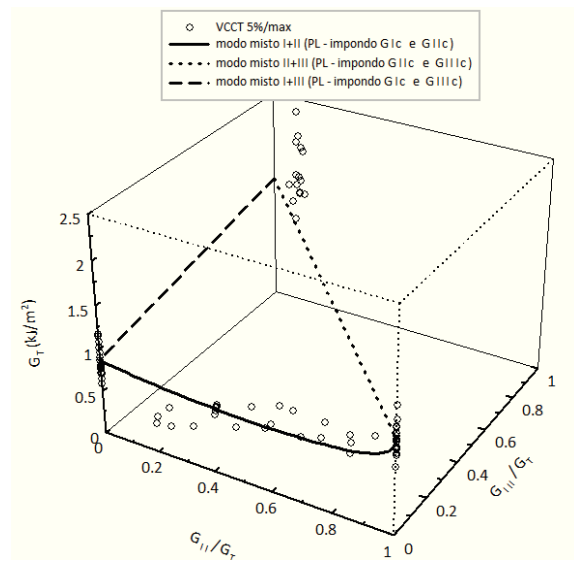


Fig. 6. Representação 3D do critério *Power Law* para os modos mistos I+II, II+III e I+III usando os ajustes: *impondo  $G_C$* .

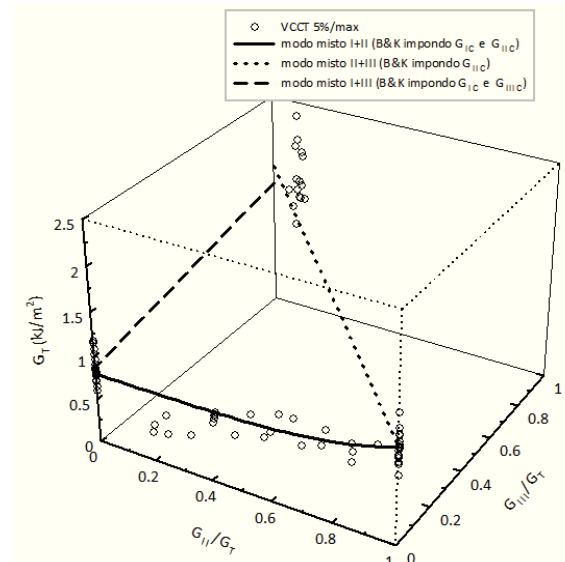


Fig. 8. Representação 3D do critério B&K para os modos mistos I+II, II+III e I+III usando os ajustes: *impondo  $G_C$* .

Analisando as Fig. 5 e 6, pode-se verificar que o critério *Power Law* apresenta uma representação razoável dos resultados experimentais principalmente quando utilizado o ajuste impondo  $G_C$ . Nas Fig. 7 e 8 estão representados os modos mistos I+II, II+III e I+III segundo o critério *B&K* para os vários tipos de ajuste e para o critério de iniciação de fenda 5%/Max.

Como conclusão pode-se afirmar que o critério *Power Law* apresenta resultados razoáveis para o modo misto I+II mas falha quando o modo III está presente.

O critério *B&K* apresenta resultados bastante favoráveis quando o modo III está presente

Deste modo, está claro que o critério *B&K* e a sua extensão para o proposto por Reeder [10] parecem muito mais convenientes para se ajustar aos resultados da taxa de libertação de energia nos três modos mistos do que o critério *Power Law*

## 5. Conclusões

Foi avaliada a aplicabilidade dos critérios de delaminação em modo misto, aos três tipos de modos mistos I+II, II+III e I+III, onde se averiguou que o critério Power Law apresenta resultados razoáveis para o modo misto I+II mas falha quando o modo III está presente. O critério B&K apresenta resultados mais coerentes quando o modo III está presente. Deste modo, pode-se concluir que o critério B&K e a sua extensão para o modo III proposto por Reeder apresenta-se mais conveniente para se ajustar aos resultados da taxa de libertação de energia nos três modos mistos do que o critério Power Law.

Esta verificação experimental do critério de B&K na sua extensão de Reeder permite obter uma ferramenta de cálculo para a caracterização da delaminação em modos mistos, através da mecânica da fractura.

No entanto, a definição de um rácio de modo misto junto ao bordo do provete ECT é muito questionável, face à forte variação de  $G_{II}$  e  $G_{III}$  e a ausência de um volume significativo de resultados nas condições de modo misto I+III e II+III não permite tirar conclusões seguras acerca da aplicabilidade dos critérios nestes domínios. Deste modo, deve-se salientar a elevada incerteza no ajuste dos critérios na presença de modo III, dada a falta de medições experimentais perante os modos mistos I+III e II+III.

Quanto aos critérios de iniciação de fenda, em todos os ensaios realizados, mostrou-se que o critério 5%/Max majora o valor de  $G_i$  em relação ao critério NL.

## Agradecimentos

Os autores agradecem o suporte financeiro da Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) pela bolsa de Doutoramento No. SFRH/BD/25561/2005.

## Referências

[1] ASTM D5528-01, Standard Test Method for Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites. American Society for Testing and Materials Standards, 2005.  
 [2] ASTM D6671-01, Standard Test Method for Mixed Mode I-Mode II Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber Reinforced Polymer Matrix Composites. American Society for Testing and Materials Standards, 2003.  
 [3] P. Davies (Ed.), ESIS Protocol for Interlaminar Fracture Testing of Composites, ESIS-Polymers & Composites Task Group, 1993.

[4] J.G. Ratcliffe, Characterization of the Edge Crack Torsion (ECT) Test for Mode III Fracture Toughness Measurement of Laminated Composites. NASA/TM-2004-213269, 2004.  
 [5] R. Marat-Mendes, M. Freitas, *Eng. Fract. Mech.* **76**, 2799 (2009).  
 [6] B. D. Davidson, F. O. Sediles, *Composites: Part A.* **42**, 589 (2011).  
 [7] A.B. de Moraes, A.B. Pereira, *Compos. Sci. Technol.* **68**, 2022 (2008).  
 [8] A. Szekrényes, W. M. Vicente, *Composites: Part A.* **43**, 95 (2012).  
 [9] J.R. Reeder, An Evaluation of Mixed-Mode Delamination Failure Criteria. NASA/TM-1992-104210, 1992.  
 [10] J.R. Reeder, 3D Mixed Mode Delamination Fracture Criteria - An Experimentalist's Perspective. *Proceedings of American Society for Composites, 21st Annual Technical Conference*, Dearborn, MI, United States, 17-20 September, 2006.  
 [11] J.D. Whitcomb, Analysis of Instability-Related Growth of a through-Width Delamination. NASA/TM-1984-86301, 1984.  
 [12] J.W. Gillespie Jr., L.A. Carlsson, B.R. Pipes, R. Rothschilds, B. Trethewey, and A. Smiley, Delamination Growth in Composite Materials. NASA/CR-1985-176416, 1985.  
 [13] E.M. Wu, R.C. Reuter Jr., Crack extension in fiberglass reinforced plastics. T&AM Report No. 275, University of Illinois, 1965.  
 [14] X.Q. Yan, S.Y. Du, W. Duo, *Eng. Fract. Mech.* **39**, 4, 623 (1991).  
 [15] H.T. Hahn, T. Johannesson, A Correlation between Fracture Energy and Fracture Morphology in Mixed-Mode Fracture of Composites. *Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Conference on the Mechanical Behaviour of Materials*, Sweden, Vol. 1 431-438, 1983.  
 [16] S.L. Donaldson, *Composites.* **16**, 2, 103 (1985).  
 [17] S. Hashemi, A.J. Kinloch, J.G. Williams, *J. Compos. Mater.* **24**, 918 (1990).  
 [18] S. Hashemi, A.J. Kinloch, J.G. Williams, Mixed-Mode Fracture in Fiber-Polymer Composite Laminates. *Composite Materials: Fatigue and Fracture.* **3**, ASTM STP 1110, T.K. O'Brien, Ed. ASTM Int. (1991).  
 [19] J.R. Reeder, *Composite Materials: Testing and Design.* **11**, ASTM STP 1206, E.T. Camponeschi, Jr., Ed. ASTM Int, pp. 303-322 (1993).  
 [20] M.L. Benzeggagh, M. Kenane, *Compos. Sci. Technol.* **56**, 439 (1996).  
 [21] R. Krueger, The Virtual Crack Closure Technique: History, Approach and applications. NASA/CR-2002-211628. ICASE Report No. 2002-10 (2002).  
 [22] R. Marat-Mendes, M. Freitas, *Compos. Struct.* **92**, 2292 (2010).  
 [23] R. Marat-Mendes Critérios de delaminação em materiais compósitos sob solicitações multiaxiais. Universidade Técnica de Lisboa – Instituto Superior Técnico - Dissertação para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Mecânica. (2009).