

Artigo REF: 34A002

## APLICAÇÃO DE MODELOS COESIVOS PARA A DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DE JUNTAS COLADAS

Marcelo F.S.F. de Moura<sup>1(\*)</sup>, Raul D.S.G. Campilho<sup>1</sup> e João P.M. Gonçalves<sup>2</sup><sup>1</sup>Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia, Depart. Eng<sup>a</sup> Mecânica e Gestão Industrial - Porto, Portugal<sup>2</sup>Mathematical Sciences Department, IBM T. J. Watson Research Center - New York, USA

(\*)Email: mfmoura@fe.up.pt

### RESUMO

O desenvolvimento de ferramentas de cálculo que permitam prever com rigor o comportamento mecânico das juntas coladas é fundamental para permitir a sua utilização em aplicações estruturais. Neste trabalho desenvolve-se um modelo coesivo de modo misto (I+II) adequado para a previsão da resistência mecânica de juntas coladas de carbono-epóxico. O modelo de dano baseia-se numa lei constitutiva trapezoidal que permite simular o comportamento de adesivos dúcteis. Os parâmetros coesivos nos modos puros I e II foram determinados recorrendo a um método inverso aplicado aos ensaios Double Cantilever Beam e End-Notched Flexure, respectivamente. As leis coesivas obtidas foram usadas na previsão da resistência mecânica de juntas coladas de sobreposição simples com substratos de carbono-epóxico. Os resultados obtidos pela simulação numérica para diferentes comprimentos de sobreposição evidenciaram boa concordância com os resultados experimentais.

### 1. INTRODUÇÃO

As juntas adesivas estruturais apresentam vantagens importantes relativamente aos métodos de ligação alternativos habitualmente utilizados. De facto, as juntas coladas apresentam menor concentração de tensões, bom desempenho sob solicitações de fadiga e permitem a ligação entre materiais diferentes (da Silva et al., 2007). Todavia, a confiança actual dos projectistas neste modo de ligação não propicia a sua aplicação generalizada em componentes estruturais. Consequentemente, é fundamental o desenvolvimento de métodos que permitam a previsão com rigor do seu comportamento mecânico. Neste contexto, os modelos coesivos adquirem especial relevo, uma vez que combinam as potencialidades da resistência dos materiais e da mecânica da fractura.

As previsões baseadas nos critérios de tensões (resistência dos materiais) apresentam uma dificuldade na sua aplicação às juntas coladas. De facto, existem singularidades no campo das tensões/deformações nomeadamente nas extremidades das zonas de sobreposição. Esta circunstância traduz-se por dificuldades na aplicação destes critérios, recorrendo por exemplo aos elementos finitos, uma vez que os resultados são fortemente dependentes do refinamento da malha utilizado. Para ultrapassar as dificuldades de dependência da malha dos critérios de tensões, vários autores John et al. (1991) e Towse et al. (1997) recorreram aos critérios da tensão ou deformação pontual a uma dada distância da singularidade (ver Fig. 1). Estes critérios admitem que a rotura ocorrerá quando a tensão ou deformação aplicada, atingir o valor da respectiva resistência do material a uma distância fixa da singularidade. Todavia, tratam-se de critérios semi-empíricos, uma vez que é necessário a definição prévia da distância característica a partir dos dados experimentais.

Alternativamente, podem-se usar critérios baseados nos conceitos de mecânica da fractura. Na mecânica da fractura assume-se que a estrutura não é necessariamente um meio contínuo, podendo conter defeitos causados pelo próprio processo de fabrico ou por um qualquer acidente durante o seu funcionamento. O objectivo é saber se os defeitos existentes serão susceptíveis de causar a rotura catastrófica, ou se, durante o período de vida da estrutura as

suas dimensões se mantêm inferiores às críticas, embora se possam propagar de uma forma estável. O uso de critérios puramente baseados na mecânica da fractura está dependente da existência de uma fenda ou defeito na zona de colagem. Estas fendas são artificialmente consideradas e pretendem simular a existência de dano ou defeitos originados durante o processo de fabrico ou induzidos em serviço. Deste modo, pode-se afirmar que os critérios baseados na mecânica da fractura estão fundamentalmente direccionados para a propagação de fendas em vez da sua iniciação. Por outro lado, existem uma série de dificuldades associadas a este tipo de abordagem. Assim, o tamanho da fenda inicial a considerar e a sua localização são dois problemas com que o método se depara.

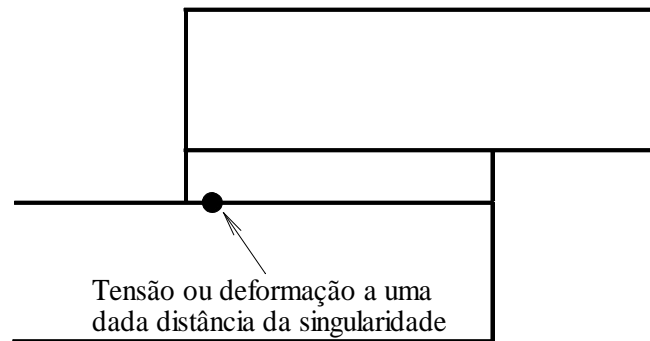


Figura 1. Tensão ou deformação pontual a uma dada distância da singularidade.

Os modelos coesivos permitem ultrapassar as dificuldades inerentes aos dois métodos anteriores e explorar os seus aspectos positivos. Assim, usando os modelos coesivos é possível prever a iniciação do dano usando um critério de tensões e a sua propagação através de um critério baseado na mecânica da fractura. Consequentemente, é desnecessária a consideração de um defeito inicial e os problemas de dependência da malha são também ultrapassados.

## 2. Modelo coesivo de modo misto

Neste trabalho, usa-se um modelo coesivo de modo misto (I+II) para prever a resistência de juntas coladas de material compósito carbono-epóxico em sobreposição simples. O modelo de dano baseia-se numa lei constitutiva trapezoidal (Fig. 2) que permite simular o comportamento de adesivos dúcteis (Campilho et al., 2008).

A formulação baseia-se no cálculo das tensões que se geram entre os pontos homólogos a partir dos deslocamentos relativos entre esses mesmos pontos,

$$\sigma = \mathbf{E}\delta_r \quad (1)$$

sendo  $\delta_r$  o vector dos deslocamentos relativos entre pontos homólogos e  $\mathbf{E}$  uma matriz diagonal contendo os parâmetros de rigidez definidos pelo rácio entre o módulo longitudinal ou de corte do material ( $E$  ou  $G$ , respectivamente) e a espessura do adesivo. Considerando um modelo de modo puro, o amaciamento decorre a partir do ponto de inflexão  $\delta_{1,i}$ . A respectiva equação constitutiva escreve-se

$$\sigma = (\mathbf{I} - \mathbf{D})\mathbf{E}\delta_r \quad (2)$$

sendo  $\mathbf{I}$  a matriz identidade e  $\mathbf{D}$  uma matriz diagonal contendo, na posição correspondente ao modo  $i$  ( $i=I, II$ ), o parâmetro de dano.

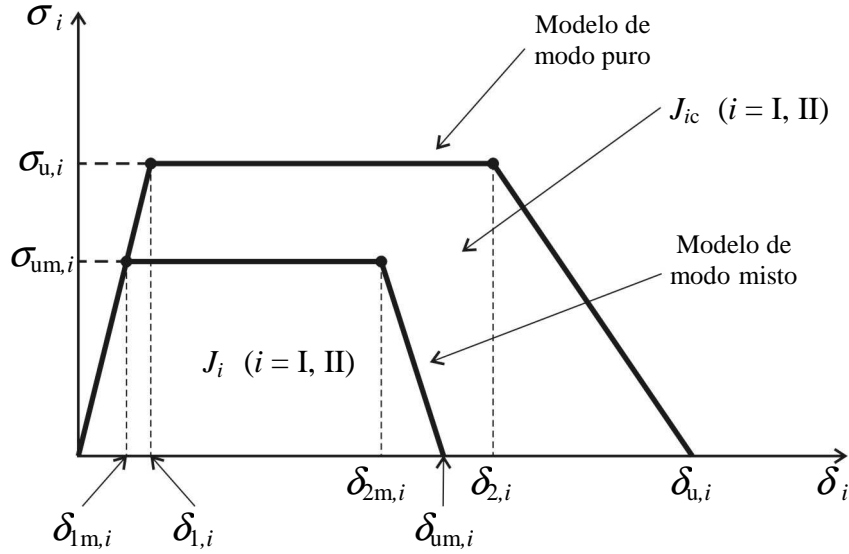


Figura 2. Lei constitutiva trapezoidal para modo puro e modo misto.

As juntas coladas apresentam um estado de tensão complexo e a propagação de dano ocorre em modo misto, na maioria das situações em modo misto I+II. Conseqüentemente, é necessário considerar uma formulação de propagação em modo misto. A iniciação do dano é assim prevista recorrendo a um critério quadrático baseado em tensões

$$\left(\frac{\sigma_I}{\sigma_{u,I}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{II}}{\sigma_{u,II}}\right)^2 = 1 \quad \text{if } \sigma_I > 0 \quad (3)$$

$$\sigma_{II} = \sigma_{u,II} \quad \text{if } \sigma_I \leq 0$$

onde  $\sigma_i$ , ( $i=I, II$ ) representa as tensões em cada modo. Assume-se que as tensões normais compressivas não contribuem para o dano. Combinando as equações (1) e (3), obtém-se uma relação para os deslocamentos relativos

$$\left(\frac{\delta_{1m,I}}{\delta_{1,I}}\right)^2 + \left(\frac{\delta_{1m,II}}{\delta_{1,II}}\right)^2 = 1 \quad (4)$$

onde  $\delta_{1m,i}$  ( $i=I, II$ ) são os deslocamentos relativos em cada modo correspondentes à iniciação do dano em modo misto e  $\delta_{1,i}$  ( $i=I, II$ ) os correspondentes valores críticos em modo puro. O ponto relativo ao início do decréscimo das tensões em função dos deslocamentos relativos é definido a partir de um critério quadrático de deslocamentos relativos similar ao utilizado para o primeiro ponto de inflexão (equação (4))

$$\left(\frac{\delta_{2m,I}}{\delta_{2,I}}\right)^2 + \left(\frac{\delta_{2m,II}}{\delta_{2,II}}\right)^2 = 1 \quad (5)$$

sendo  $\delta_{2m,i}$  ( $i=I, II$ ) os deslocamentos relativos em cada modo correspondentes à inflexão em modo misto e  $\delta_{2,i}$  ( $i=I, II$ ) os correspondentes valores críticos em modo puro. A propagação do dano é simulada recorrendo a um critério de fractura linear energético

$$\frac{J_I}{J_{Ic}} + \frac{J_{II}}{J_{IIc}} = 1 \quad (6)$$

Nesta equação,  $J_i$  e  $J_{ic}$  ( $i=I, II$ ) representam respectivamente, as energias de fractura libertadas em cada modo e os seus valores críticos. A energia de fractura  $J_i$  pode ser obtida pela área do trapézio menor da Fig. 2, permitindo assim o estabelecimento de uma equação para o cálculo do deslocamento relativo equivalente  $\delta_{um}$  que origina a rotura. Usando os referidos critérios (equações (4), (5) e (6)) é possível a definição dos deslocamentos equivalentes em modo misto ( $\delta_{1m}$ ,  $\delta_{2m}$  e  $\delta_{um}$ ) que permitem o cálculo do parâmetro de dano na região do patamar do trapézio

$$d_m = 1 - \frac{\delta_{1,m}}{\delta_m} \quad (7)$$

e no tramo descendente

$$d_m = 1 - \frac{\delta_{1,m} (\delta_{u,m} - \delta_m)}{\delta_m (\delta_{u,m} - \delta_{2,m})} \quad (8)$$

O parâmetro de dano obtido a partir das equações (7) ou (8) é introduzido na equação (2), simulando assim a propagação de dano. Mais detalhes sobre o modelo podem ser encontrados em Campilho et al. (2008).

### 3. DETERMINAÇÃO DAS LEIS COESIVAS

Os parâmetros coesivos nos modos puros I e II foram determinados recorrendo a um método inverso aplicado aos ensaios Double Cantilever Beam (DCB) (de Moura et al., 2008a) e End-Notched Flexure (ENF) (de Moura et al., 2008b), respectivamente. Neste método, os parâmetros referentes à resistência local ( $\sigma_{u,i}$ ,  $i=I,II$ ) e ao deslocamento respeitante ao segundo ponto de inflexão ( $\delta_{2,i}$ ,  $i=I,II$ ) são determinados por sucessivas iterações que originam uma boa concordância entre as curvas força-deslocamento ( $P-\delta$ ) numérica e experimental. A determinação destes parâmetros é fundamental para a aplicação do modelo de modo misto. O método consiste em três etapas fundamentais:

- Inicialmente realizam-se ensaios experimentais de fractura em modo I (DCB) e em modo II (ENF) – ver Fig. 3. A partir das curvas  $P-\delta$  obtêm-se as respectivas curvas  $R$  (Fig. 4). As curvas  $R$  obtêm-se aplicando um método baseado no comprimento de fenda equivalente e denominado por Compliance Based Beam Method (CBBM) (de Moura et al., 2008a e de Moura et al., 2008b);

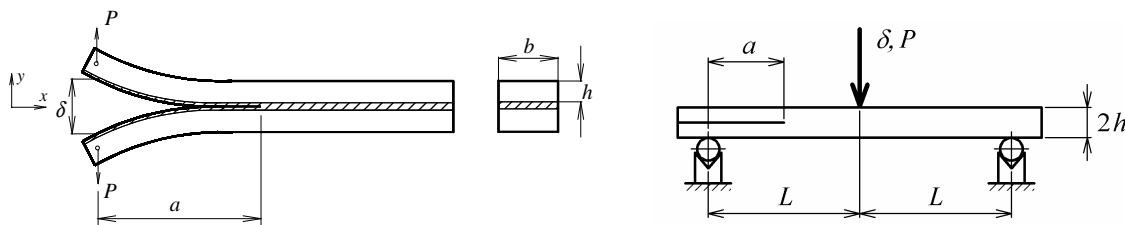


Figura 3. Ensaios DCB e ENF, respectivamente.

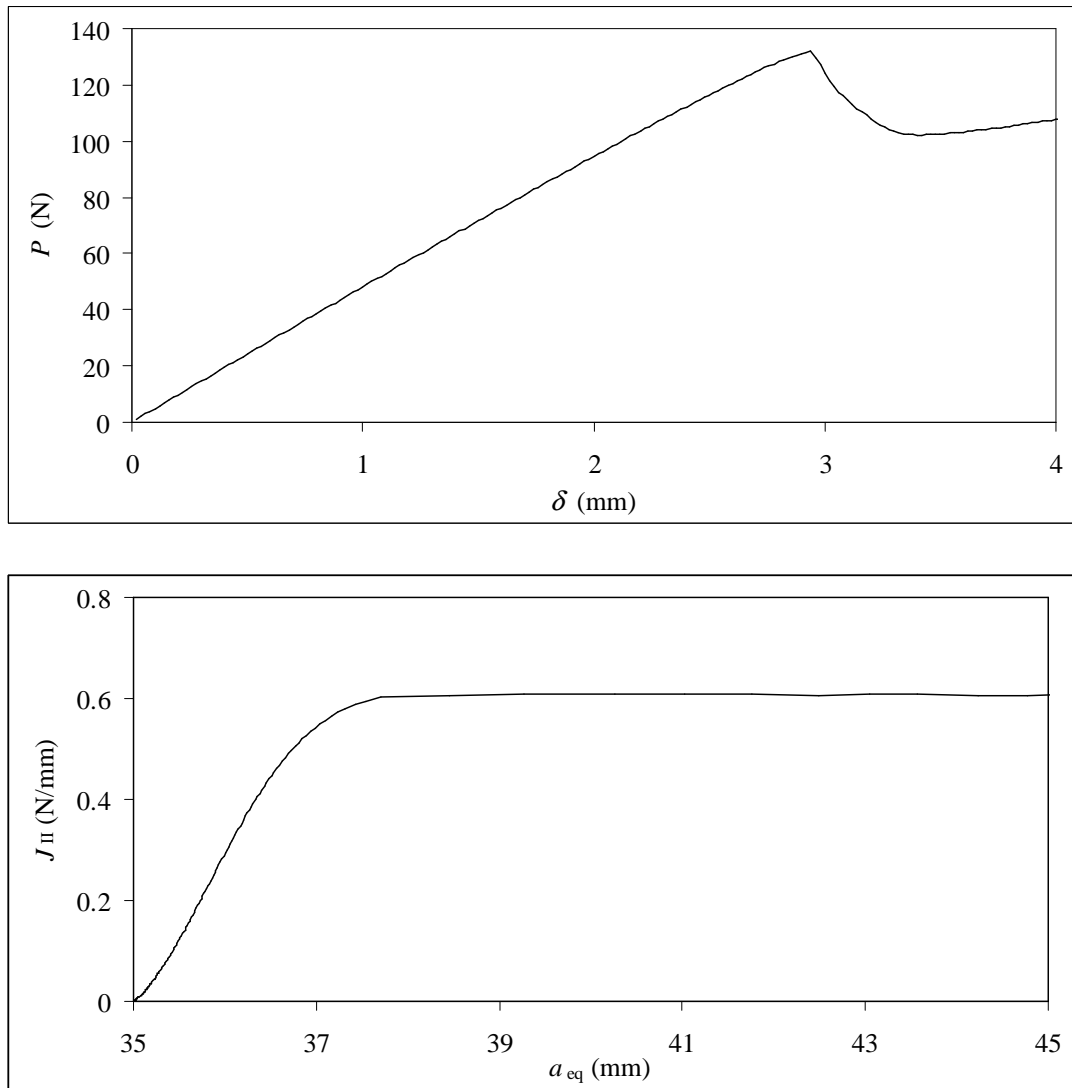


Figura 4. Curva  $P$ - $\delta$  e respectiva curva  $R$  típicas do ensaio ENF.

- O patamar da curva  $R$  permite definir o valor de  $J_{ic}$  ( $i=I, II$ ) e é inserido no modelo de dano coesivo como parâmetro de entrada. O modelo numérico contempla elementos finitos sólidos e de interface permitindo a correcta simulação do ensaio experimental (Fig. 5);

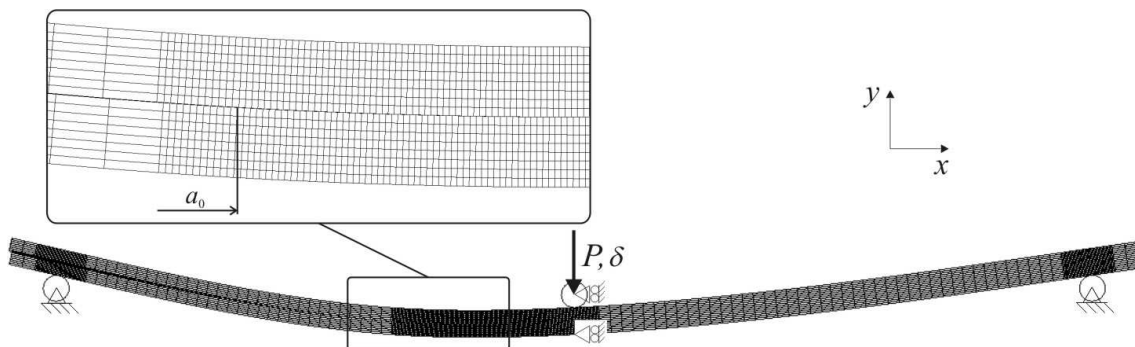


Figura 5. Simulação numérica do ensaio ENF.

- Finalmente, são realizadas diversas iterações até que a curva  $P$ - $\delta$  numérica apresente um acordo satisfatório com a curva experimental, definindo assim os respectivos valores dos parâmetros da lei coesiva (Fig. 6).

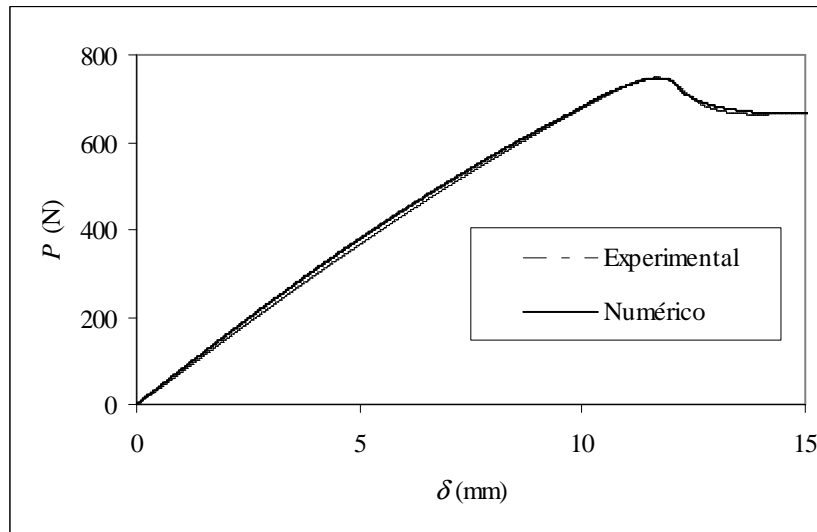


Figura 6. Concordância entre as curvas numérica e experimental do ensaio ENF.

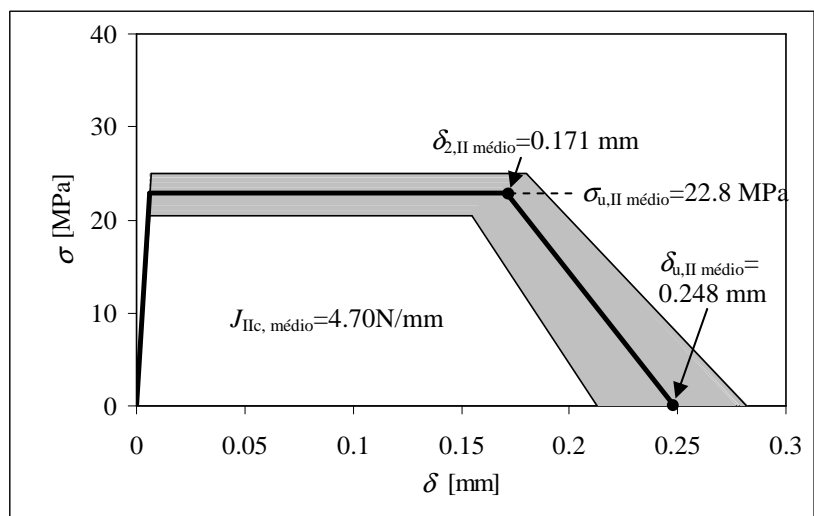
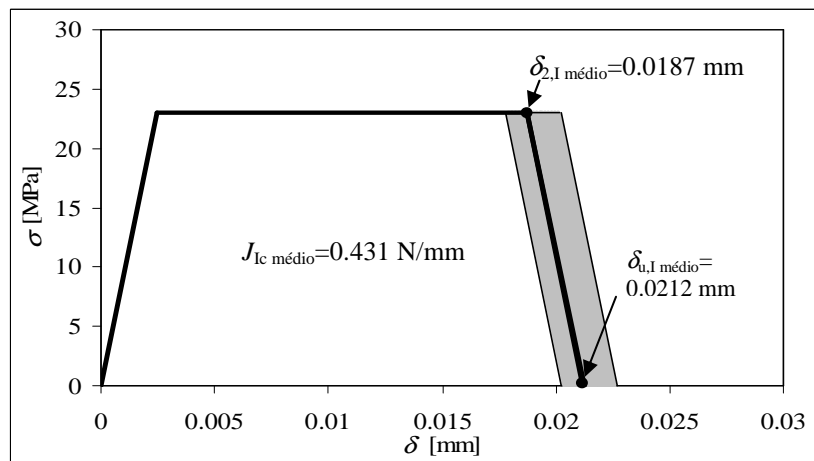


Figura 7. Leis coesivas obtidas em modo I e em modo II, respectivamente.

Usando o procedimento descrito obtiveram-se as leis coesivas em modo I e em modo II que se apresentam na Fig. 7. Foram utilizados substratos de compósito de carbono-epóxico (TEXIPREG HS 160 RM da SEAL<sup>TM</sup>, Legnano, Itália) com 16 camadas de espessura unidireccionais com 0.15 mm de espessura, cujas propriedades elásticas se apresentam na tabela 1. O adesivo utilizado foi um epóxico Araldite<sup>®</sup> 2015 da Huntsmann (Basel, Switzerland) com  $E = 1850$  MPa e  $\nu = 0.3$ .

Tabela 1 – Propriedades elásticas da lâmina do compósito de carbono-epóxico.

$E_1=1.09E+05$ MPa	$\nu_{12}=0.342$	$G_{12}=4315$ MPa
$E_2=8819$ MPa	$\nu_{13}=0.342$	$G_{13}=4315$ MPa
$E_3=8819$ MPa	$\nu_{23}=0.380$	$G_{23}=3200$ MPa

#### 4. Aplicação a juntas de sobreposição simples

Com o objectivo de validar o modelo foram realizados ensaios de tracção em juntas de sobreposição simples com diferentes comprimentos de sobreposição (Fig. 8). Refira-se que os materiais e a espessura do adesivo são os mesmos usados nos ensaios DCB e ENF. Assim, utilizaram-se substratos unidireccionais de carbono-epóxico com 16 camadas que originaram uma espessura nominal de 2.4 mm. Os provetes apresentavam um comprimento entre amarras de 240 mm, uma largura de 15 mm e uma espessura de adesivo de 0.2 mm. Foram testados oito comprimentos de sobreposição diferentes (10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 e 80 mm). Para cada caso consideraram-se cinco provetes, tendo sido registada a força máxima que foi considerada como sendo a medida da resistência da junta. Observou-se a existência de roturas coesivas em todos os casos.

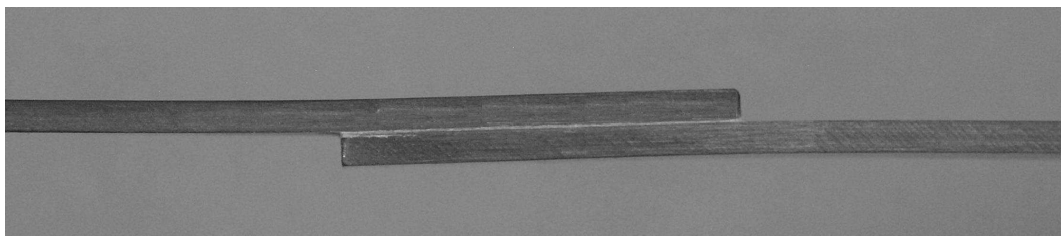


Figura 8. Provede de 30 mm de sobreposição sob tracção.

As simulações numéricas foram feitas considerando as dimensões reais médias para cada grupo de cinco provetes ensaiados para cada comprimento de sobreposição analisado (ver Fig. 9). As propriedades coesivas médias medidas para modo I e modo II, determinadas pelos ensaios DCB e ENF, foram inseridas como parâmetros de entrada no modelo numérico.

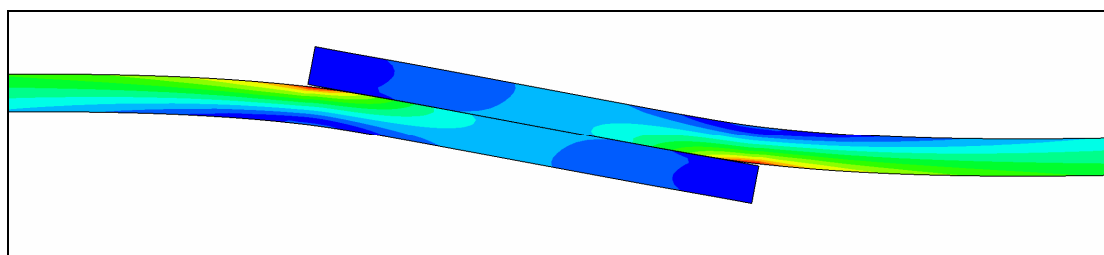


Figura 9. Visualização da deformada e distribuição de tensões de von Mises durante a simulação de uma junta de sobreposição simples.

A força máxima obtida para cada uma dos comprimentos de sobreposição foi registada e comparada com o valor obtido experimentalmente (ver Fig. 10). De um modo geral constata-se a existência de uma boa concordância entre os resultados numéricos e os experimentais. Registe-se todavia uma ligeira tendência para o sub-dimensionamento por parte do modelo para os maiores comprimentos de sobreposição.

## 5. CONCLUSÕES

Neste trabalho é proposto um novo método para a previsão da resistência mecânica de juntas coladas. O método baseia-se no uso de um modelo de dano coesivo de modo misto adequado para o comportamento de adesivos dúcteis. As leis coesivas de modos puros I e II de forma trapezoidal foram determinadas pelo método inverso aplicado aos ensaios de caracterização à fractura em modo I (DCB) e modo II (ENF). O método inverso consiste num processo iterativo cujo objectivo final é a obtenção de uma boa concordância entre as curvas força-deslocamento numérica e experimental dos referidos ensaios, determinando assim os parâmetros definidores das respectivas leis coesivas.

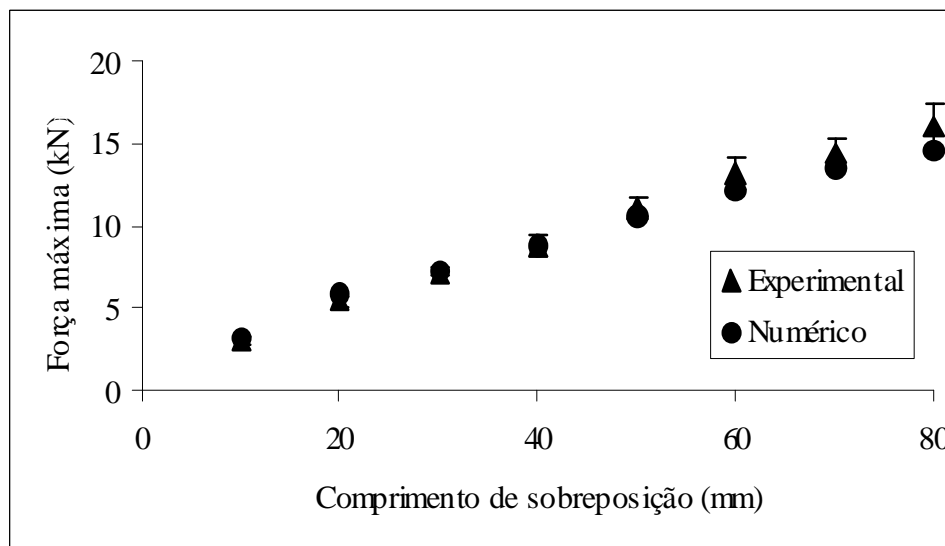


Figura 10. Comparação entre as resistências numérica e experimental em função do comprimento de sobreposição.

As leis coesivas determinadas pelo método inverso foram posteriormente aplicadas na previsão da resistência mecânica de juntas coladas de sobreposição simples. Obteve-se boa concordância entre os resultados numéricos e os experimentais, o que demonstra a eficácia dos modelos coesivos na previsão do comportamento mecânico de juntas coladas.

## REFERÊNCIAS

- Campilho, R.D.S.G., de Moura, M.F.S.F., Domingues, J.J.M.S. (2008), Using a cohesive damage model to predict the tensile behaviour of CFRP single-strap repairs, *Int. J. Sol. Struct.*, 45, 1497–1512.
- da Silva, L.F.M., Magalhães, A.G., de Moura, M.F.S.F. (2007), *Juntas adesivas estruturais*, Publindústria, Edições Técnicas, ISBN 978-972-8953-21-8,.
- de Moura (a), M.F.S.F., Campilho, R.D.S.G., Gonçalves, J.P.M. (2008), Crack Equivalent Concept Applied to the Fracture Characterization of Bonded Joints under Pure Mode I Loading, Aceite para publicação na *Compos. Sc. Technol.*



de Moura (b), M.F.S.F., Campilho, R.D.S.G., Gonçalves, J.P.M. (2008), Pure mode II fracture characterization of composite bonded joints. Submetido à revista Int. J. Sol. Struct.

John SJ, Kinloch AJ, Matthews FL (1991), Measuring and predicting the durability of bonded carbon fibre/epoxy composite joints, *Composites*, 22, 121-127.

Towse A, Davies RGH, Clarke A, Wisnom MR, Adams RD, Potter KD (1997), 4th International Conference on Deformation and Fracture of Composites, p 479, Institute of Materials.