

Artigo REF: 34A001

## REPARAÇÕES EM MATERIAIS COMPÓSITOS

Raul D.S.G. Campilho<sup>1</sup>, Marcelo F.S.F. de Moura<sup>1(\*)</sup>, José J.L. Morais<sup>2</sup> e Joaquim J.M.S. Domingues<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia, Depart. Eng<sup>a</sup> Mecânica e Gestão Industrial - Porto, Portugal

<sup>2</sup>CITAB/UTAD, Depart. Engenharias - Vila Real, Portugal

<sup>3</sup>Instituto Superior de Engenharia do Porto, Depart. Eng<sup>a</sup> Mecânica - Porto, Portugal

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

### RESUMO

Neste trabalho descrevem-se estudos experimentais e numéricos relativos à resistência residual de reparações adesivas por sobreposição simples e dupla de laminados de carbono-epóxico. É utilizado um modelo de dano coesivo em modo misto baseado no uso indirecto da Mecânica da Fractura para simular numericamente a iniciação e propagação do dano nas reparações. O método numérico é inicialmente validado com resultados experimentais em reparações bidimensionais por sobreposição simples. Os parâmetros analisados são o modo de rotura, a tensão de colapso e a rigidez equivalente das reparações em função do comprimento de sobreposição e da espessura do remendo. Obteve-se boa concordância entre os resultados numéricos e os experimentais, no que diz respeito aos parâmetros estudados. O modelo numérico é posteriormente aplicado na identificação das alterações geométricas que maximizam a resistência residual de reparações tridimensionais por sobreposição simples e dupla sujeitas a solicitações de tracção, compressão e flexão.

### 1. INTRODUÇÃO

Os compósitos de carbono-epóxico (CFRP) têm sido amplamente usados em aplicações aeronáuticas, automóveis e outras, onde é necessária a utilização de materiais de elevada resistência e rigidez específicas. No entanto, as estruturas de CFRP são susceptíveis a sofrer dano, nomeadamente delaminação entre camadas devido a impacto de baixa velocidade. Este tipo de dano pode reduzir substancialmente a resistência das estruturas o que, associado às dificuldades de reciclagem e elevados custos de substituição, torna a sua reparação muito vantajosa. A reparação por ligação adesiva apresenta várias vantagens, comparativamente com as ligações aparafusadas ou rebitadas, nomeadamente o reduzido aumento de peso, as distribuições de tensões mais uniformes, a reduzida alteração na forma e a redução dos custos de manutenção. Os métodos mais utilizados para reparar as estruturas por ligação adesiva são a sobreposição simples e dupla, e o remendo embebido. As reparações por sobreposição simples e dupla consistem na realização de um furo para remoção do material danificado e posterior colagem de um remendo numa (sobreposição simples) ou ambas (sobreposição dupla) as faces do laminado. A ligação adesiva de dois laminados rectangulares com remendos rectangulares é por vezes considerada como uma aproximação bidimensional desta geometria tridimensional, sendo considerada adequada apenas para estudo do efeito de alguns parâmetros geométricos (Hu and Soutis, 2000). Estas técnicas de reparação apresentam as vantagens de fácil execução e custos reduzidos. No entanto, normalmente não é conseguida a restituição da resistência inicial, devido às concentrações de tensões criadas e à excentricidade da carga transmitida.

Hu e Soutis (2000) estudaram reparações adesivas por sobreposição dupla de laminados compósitos de CFRP solicitados à compressão, usando modelos de elementos finitos bi e tridimensionais para identificar as áreas críticas em termos de tensões, usando posteriormente um critério baseado na Mecânica da Fractura para prever a resistência das reparações. O mesmo tipo de reparações foi estudado por Soutis e Duan (1999), que utilizaram um modelo de elementos finitos tridimensional para simular o comportamento mecânico à compressão de um laminado com furo circular reparado por ligação adesiva com remendos circulares em sobreposição dupla. Foram previstas numericamente as regiões de iniciação do dano. Os autores chegaram à conclusão, comprovando os resultados por uma análise experimental, que o dano se inicia por descolamento do remendo seguido por microencurvatura das fibras a 0° do laminado.

Campilho et al. (2005) analisaram numericamente através de modelos bidimensionais reparações adesivas por sobreposição simples e dupla de laminados de CFRP solicitados à tracção. Os autores observaram que, para sobreposição simples e dupla, existe um comprimento de sobreposição da reparação a partir do qual não se observa aumento significativo da resistência da reparação, pois a zona central do adesivo deixa de ser solicitada. Para ambas as geometrias constatou-se que as tensões de corte e normais segundo a espessura apresentam magnitude superior nas interfaces laminado/adesivo e adesivo/remendo, significando que provavelmente a rotura ocorrerá nas ou próximo das referidas interfaces. Foi utilizado um modelo de dano coesivo em modo misto para simular o processo de rotura das reparações, tendo-se verificado a ocorrência de roturas adesivas em ambas as geometrias, considerando propriedades de resistência e de fracturas idênticas para o adesivo e as interfaces já mencionadas.

Uma abordagem diferente foi recentemente proposta por Liu e Wang (2007). Estes autores fizeram uma análise numérica e experimental de reparações adesivas tridimensionais por sobreposição dupla sujeitas a uma solicitação de tracção. Foram utilizados laminados e remendos de carbono-epóxico com a sequência de empilhamento  $[(0/90/\pm 45/90/0)_2]_S$  para os laminados e diferentes sequências de empilhamento para os remendos. Numericamente, a resistência residual das reparações foi estimada combinando o critério de Tsai-Wu para prever a rotura de fibras e intralaminar na direcção transversa nos laminados e remendos, o critério de Ye para prever delaminação entre camadas e o critério da tensão de corte máxima para a camada de adesivo. Associado ao modelo numérico, foi implementado um modelo de dano progressivo de degradação das propriedades quando qualquer um dos critérios acima era satisfeito. Observou-se uma boa concordância entre os modos de rotura e cargas máximas observados experimentalmente e as respectivas previsões numéricas.

Neste trabalho descrevem-se estudos experimentais e numéricos relativos à resistência residual de reparações adesivas por sobreposição simples e dupla de laminados de carbono-epóxico. É utilizado um modelo de dano coesivo em modo misto baseado no uso indirecto da Mecânica da Fractura para simular numericamente a iniciação e crescimento do dano das reparações. O modelo proposto é validado inicialmente com resultados experimentais em reparações bidimensionais por sobreposição simples. São considerados o modo de rotura, a tensão de colapso e a rigidez equivalente das reparações em função do comprimento de sobreposição e da espessura do remendo. Obteve-se boa concordância entre os resultados numéricos e os experimentais, no que diz respeito aos parâmetros estudados. O modelo numérico é posteriormente aplicado na identificação das alterações geométricas que maximizam a resistência residual de reparações tridimensionais por sobreposição simples e dupla sujeitas a solicitações de tracção, compressão e flexão.

## 2. MODELO DE DANO COESIVO

Um modelo de dano coesivo em modo misto baseado em elementos de interface de espessura nula é usado para simular o início e propagação do dano. O modelo baseia-se numa relação constitutiva linear (Fig. 1) entre as tensões ( $\sigma$ ) e os deslocamentos relativos ( $\delta$ ). É assim necessário o conhecimento das resistências locais na extremidade da fenda ( $\sigma_{u,i}$ ,  $i=I, II, III$ ) e das taxas críticas de libertação de energia ( $G_{ic}$ ,  $i=I, II, III$ ). A iniciação do dano é prevista usando o seguinte critério de tensões quadrático

$$\begin{aligned} \left(\frac{\sigma_I}{\sigma_{u,I}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{II}}{\sigma_{u,II}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{III}}{\sigma_{u,III}}\right)^2 &= 1 \quad \text{if } \sigma_I > 0 \\ \left(\frac{\sigma_{II}}{\sigma_{u,II}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{III}}{\sigma_{u,III}}\right)^2 &= 1 \quad \text{if } \sigma_I \leq 0 \end{aligned} \quad (1)$$

onde  $\sigma_i$ , ( $i=I, II, III$ ) representa a tensão num dado ponto de integração do elemento de interface no modo respectivo. O modo I representa o modo de abertura e os modos II e III os de corte. A propagação do dano é simulada pelo critério energético linear

$$\frac{G_I}{G_{Ic}} + \frac{G_{II}}{G_{IIc}} + \frac{G_{III}}{G_{IIIc}} = 1 \quad (2)$$

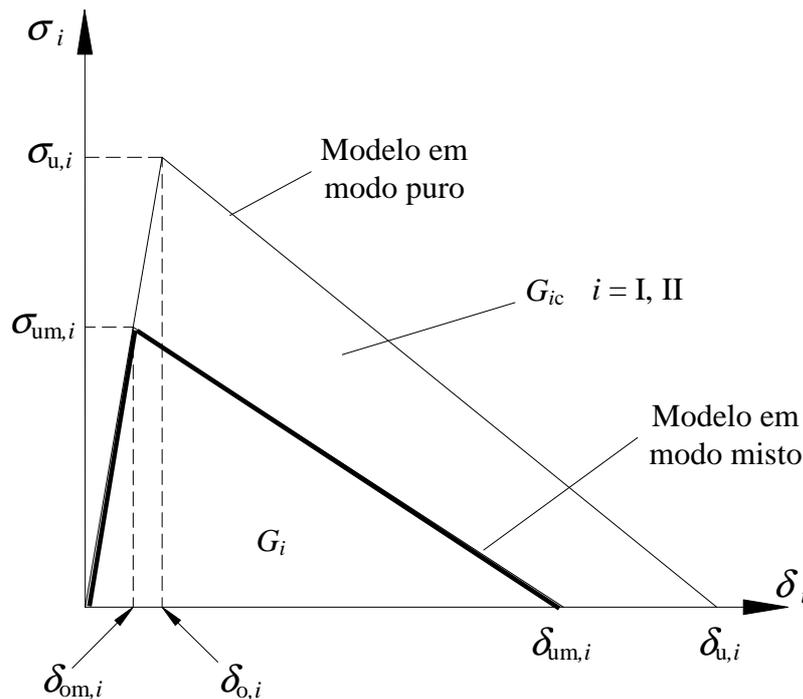


Fig. 1 – Lei de dano em modo puro e modo misto.

A área do triângulo mais pequeno da Fig. 1 representa a energia libertada em cada modo, enquanto que a área do triângulo maior corresponde à respectiva energia crítica de fractura. Quando a equação (2) é satisfeita, há propagação de dano e as tensões são anuladas, com a exceção das normais compressivas. Os índices “o” e “u” referem-se aos deslocamentos de início e propagação do dano, respectivamente, e o índice “m” representa o modo misto. Uma explicação detalhada do modelo descrito pode ser encontrada em (Campilho, 2005, Campilho et al., 2005, Campilho et al., 2007).

### 3. VALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

Inicialmente o modelo de dano coesivo é validado com resultados experimentais de reparações adesivas bidimensionais por sobreposição simples, para diferentes comprimentos de sobreposição e espessuras do remendo.

#### 3.1. Trabalho experimental

A Fig. 2 mostra a geometria das reparações adesivas por sobreposição simples. Utilizaram-se laminados e remendos unidireccionais orientados segundo a direcção da solicitação de carbono-epóxico (SEAL<sup>®</sup> Texipreg HS 160 RM), cujas propriedades se encontram na Tabela 1 (Campilho et al., 2005, Campilho et al., 2007), e cuja espessura de camada é 0.15 mm. Os laminados foram curados numa prensa hidráulica durante duas horas a uma temperatura de 130°C e 0,2 MPa de pressão. As propriedades do adesivo utilizado (Araldite<sup>®</sup> 420) foram determinadas experimentalmente em (Campilho et al., 2008a). O processo de preparação superficial e de ligação incluiu lixagem das superfícies e limpeza com ar comprimido, seguido de colagem e cura à temperatura ambiente com pressão de contacto. Foram testados três provetes para cada geometria à temperatura ambiente em controlo de deslocamentos (0.5 mm/min) usando uma máquina de ensaio Instron (Fig. 3). O deslocamento foi medido com um extensómetro de comprimento característico 55 mm. A Tabela 2 define as geometrias utilizadas neste trabalho, em função do comprimento de sobreposição ( $L_C$ ) e espessura do remendo ( $t_R$ ). As dimensões iniciais da reparação, utilizadas na análise de tensões (geometria S3), encontram-se na Tabela 3.

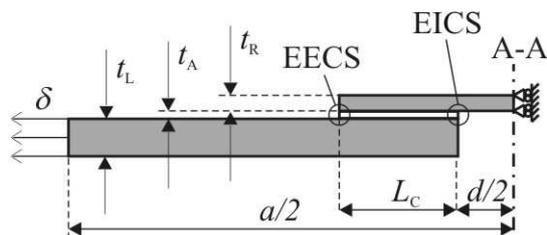


Fig. 2 – Reparação adesiva bidimensional por sobreposição simples.

Tabela 1 – Propriedades mecânicas dos laminados e remendos.

$E_1=1,09E5$ 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

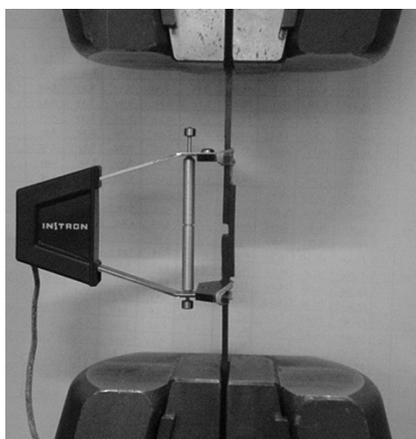


Fig. 3 – Disposição da reparação na máquina de ensaio.

Tabela 2 – Geometrias utilizadas.

Geometria	$L_C$ [mm]	$t_R$ [mm]	Geometria	$L_C$ [mm]	$t_R$ [mm]
S1	5	1,2	S5	15	0,6
S2	10	1,2	S6	15	1,2
S3	15	1,2	S7	15	1,8
S4	20	1,2	S8	15	2,4

Tabela 3 – Dimensões iniciais da reparação (geometria S3).

Laminados	Remendos	Adesivo
Comprimento: $a=110$ mm	Espessura: $t_R=1,2$ mm	Espessura: $t_A=0,2$ mm
Largura: $b=15$ mm	Comp. sobreposição: $L_C=15$ mm	
Espessura: $t_L=2,4$ mm		
Espaçamento: $d=5$ mm		

### 3.2. Análise numérica

Foi efectuada uma análise não linear geométrica e material, usando elementos rectangulares de estado plano de tensão de oito nós disponíveis na biblioteca do ABAQUS<sup>®</sup>. A Fig. 4 a) representa um detalhe da malha usada na zona da sobreposição para a geometria S2 (Tabela 2), bem como a distribuição das tensões normais segundo a direcção da solicitação ( $\sigma_x$ ) no instante referente à iniciação do dano. Foram consideradas dez e seis camadas de elementos segundo a espessura para os laminados e remendo, respectivamente. Para simplificar o modelo recorreu-se a condições de simetria a meio da reparação (linha A-A na Fig. 2), tendo sido aplicado um deslocamento tractivivo ( $\delta$  na Fig. 2). Os elementos de interface foram colocados em cinco planos distintos na reparação (Fig. 4 b), para obter os perfis de tensões normais segundo a espessura ( $\sigma_y$ ) e de corte ( $\tau_{xy}$ ), e também para simular o início e propagação do dano conducente à rotura da reparação: no laminado a 0,05 mm da interface com o adesivo (P1), na interface entre o laminado e o adesivo (P2), a meio da espessura do adesivo (P3), na interface entre o adesivo e o remendo (P4) e no remendo a 0,05 mm da interface com o adesivo (P5). Relativamente aos planos P1 e P5, a sua posição pretende simular os modos de rotura observados experimentalmente (caracterizados posteriormente neste trabalho). As propriedades mecânicas e de fractura utilizadas foram as seguintes:  $\sigma_{u,I}=40$  MPa,  $\sigma_{u,II}=24$  MPa,  $G_{Ic}=0,3$  N/mm e  $G_{IIc}=0,6$  N/mm (de Moura et al., 2006).

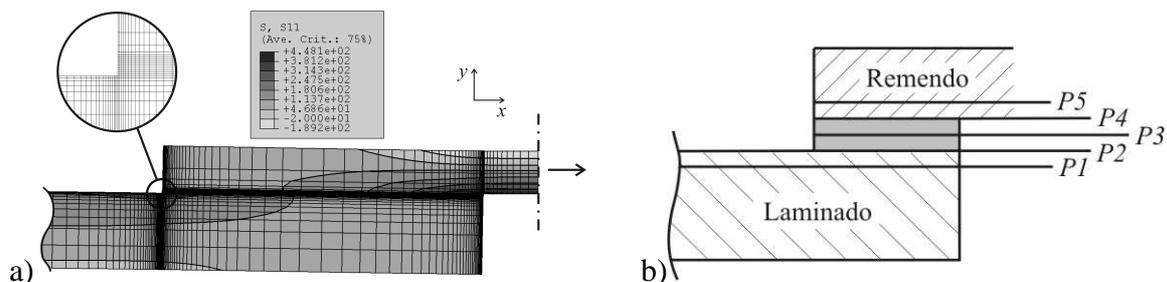


Fig. 4 – Distribuição das tensões normais  $\sigma_x$  na região da reparação para a geometria S2 (a) e planos dos elementos de interface na reparação (b).

### 3.3. Resultados

#### 3.3.1. Análise de tensões

A Fig. 5 representa as tensões normais segundo a espessura  $\sigma_y$  normalizadas pela tensão de corte média a meio da espessura do adesivo ( $\tau_{méd}$ , plano P3 na Fig. 4 b). Observam-se nos cinco planos dois picos tractivos destas tensões em ambas as extremidades da sobreposição (Mortensen and Thomsen, 2002, Ávila e Bueno, 2004, Zou et al., 2004). Na extremidade exterior do comprimento de sobreposição (EECS, Fig. 2), o pico de tensões mais pronunciado encontra-se na interface entre o laminado e o adesivo (plano P2), enquanto que na extremidade interior do comprimento de sobreposição (EICS, Fig. 2) o pico mais pronunciado surge na interface entre o adesivo e o remendo (apresentando aproximadamente o dobro da magnitude do pico oposto). Nos restantes planos, nomeadamente entre camadas do laminado e remendo (planos P1 e P5, respectivamente), também se observam picos, embora de magnitude inferior, o que pode levar à ocorrência de delaminagens entre camadas (Campilho et al. 2005). Na região interior da sobreposição, estas tensões são compressivas e de magnitude reduzida, relativamente às tensões de corte. Comparando as tensões de corte ( $\tau_{xy}$ ) normalizadas por  $\tau_{méd}$  (Fig. 6), observa-se que estas também apresentam picos nas duas extremidades de  $L_C$ , encontrando-se a zona intermédia com um nível de solicitações mais reduzido (Mortensen and Thomsen, 2002, Ávila e Bueno, 2004, Zou et al., 2004). Os picos mais pronunciados localizam-se na interface entre o laminado e o adesivo (EECS) e entre o adesivo e o remendo (EICS), à semelhança do ocorrido relativamente às tensões  $\sigma_y$ . Esta análise sugere que, para propriedades mecânicas idênticas dos cinco planos estudados, consideradas as mais críticas (Campilho et al., 2005, Magalhães et al., 2005), a iniciação do dano ocorrerá nas ou próximo das referidas interfaces.

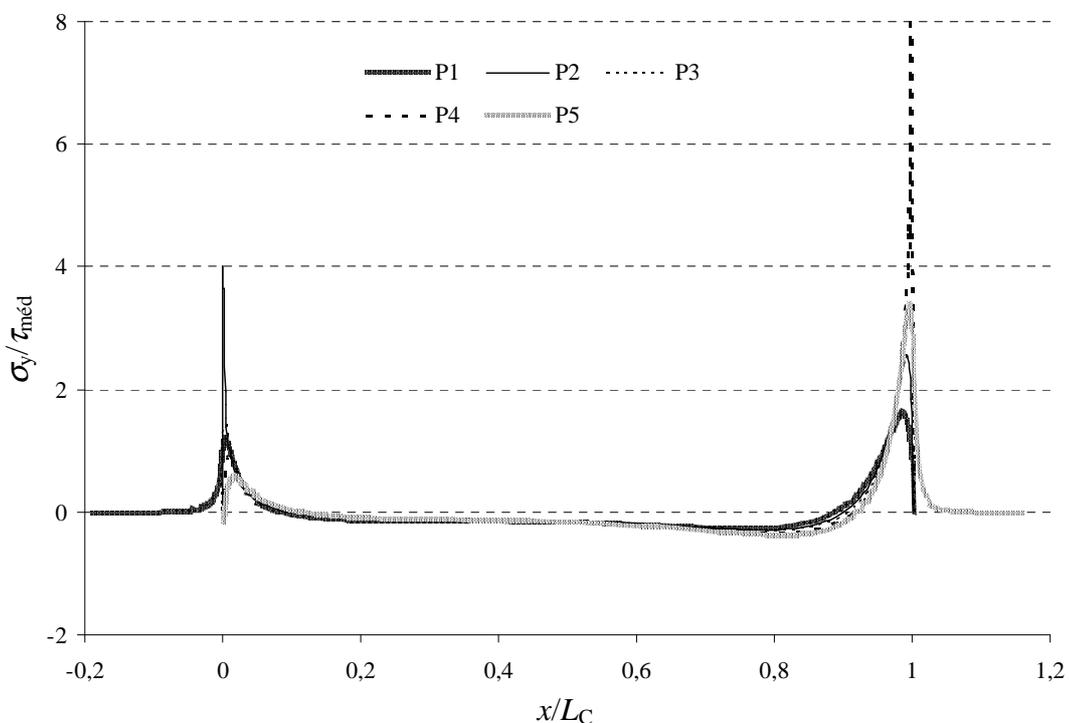


Fig. 5 – Distribuição das tensões  $\sigma_y$  em cinco planos.

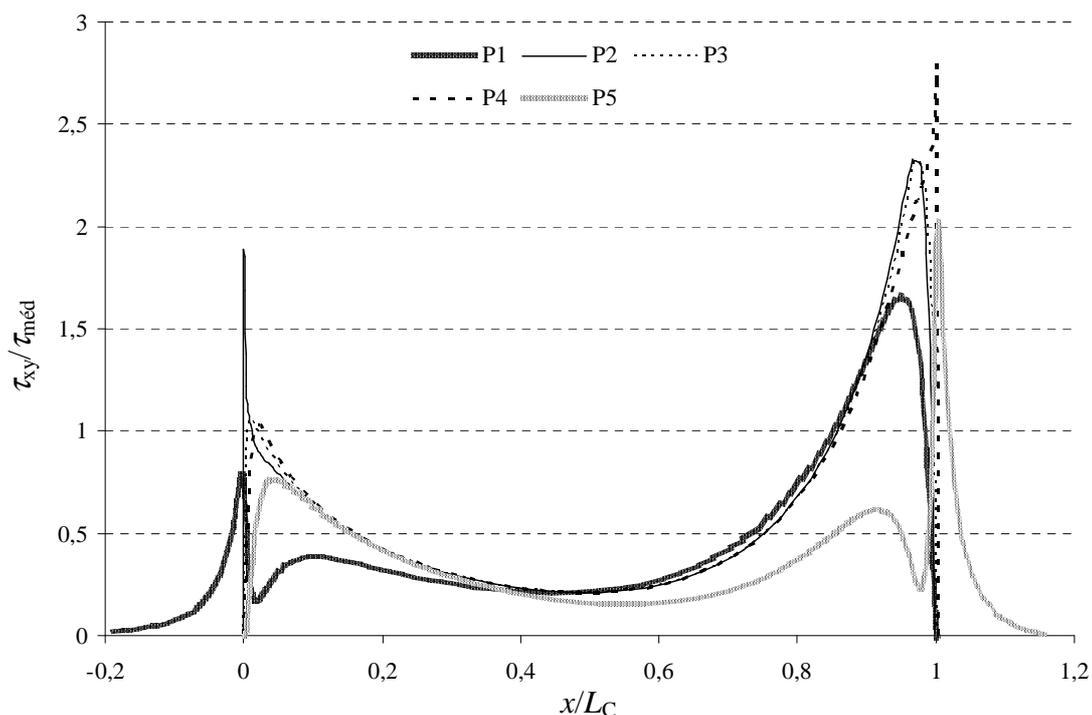


Fig. 6 – Distribuição das tensões  $\tau_{xy}$  em cinco planos.

### 3.3.2. Modos de rotura

Durante a realização dos ensaios experimentais, constatou-se a existência de dois modos de rotura distintos. Observou-se uma rotura intralaminar do remendo (Fig. 7 a) com rotura de fibras no remendo na linha de simetria da reparação (linha A-A na Fig. 2), para todas as reparações, excepto as referentes à geometria S8. Para a geometria S8, observou-se rotura intralaminar do laminado e do remendo (Fig. 7 b), incluindo rotura de fibras do remendo na EICS (Fig. 2). Ambas as roturas são classificadas como intralaminares pois ocorreram a menos de 0,05 mm da interface com o adesivo (comparando com os 0,15 mm correspondentes à espessura de uma camada). Numericamente, foram simulados os modos de rotura verificados experimentalmente. Foram colocados elementos de interface em posição vertical nas localizações 1 e 2 (Fig. 8) para simular a rotura de fibras no remendo na EICS e na linha de simetria A-A, respectivamente. Na Fig. 8 a) apresenta-se uma rotura intralaminar do remendo, obtida para o modelo com a geometria S3, com rotura de fibras no remendo na linha de simetria A-A (localização 2 na Fig. 8 a). Os restantes modelos, à excepção do S8, apresentam uma rotura idêntica. A Fig. 8 b) representa uma rotura intralaminar do remendo com rotura de fibras do remendo na EICS (localização 1 na Fig. 8 b), obtido para o modelo com a geometria S8. No entanto, refira-se que, imediatamente antes da rotura ocorrer, os elementos de interface representativos dos planos P1 e P5 se encontram em estados semelhantes de amaciamento (zona de amaciamento de tensões na Fig. 1), significando que a rotura pode ocorrer em qualquer um dos planos referidos. A alteração do modo de rotura para os provetes de geometria S8 ( $t_R=2,4$  mm) deve-se à diminuição das tensões normais  $\sigma_x$  na linha de simetria A-A, devido ao aumento da área resistente com o aumento de  $t_R$ . Para as reparações com a geometria S8, as tensões  $\sigma_x$  não são suficientes para induzir rotura de fibras no remendo, observando-se a alteração já referida no modo de rotura.

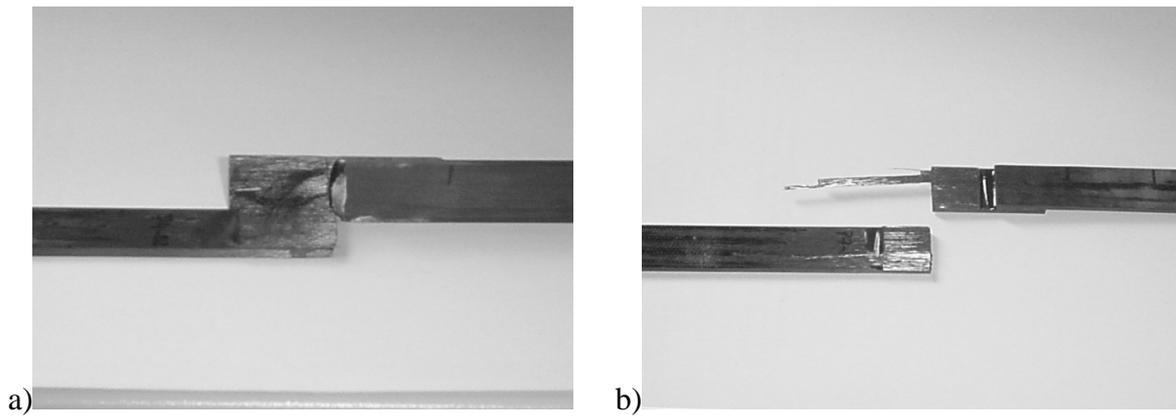


Fig. 7 – Rotura intralaminar do remendo (a) e rotura intralaminar do laminado e remendo (b) obtidas experimentalmente.

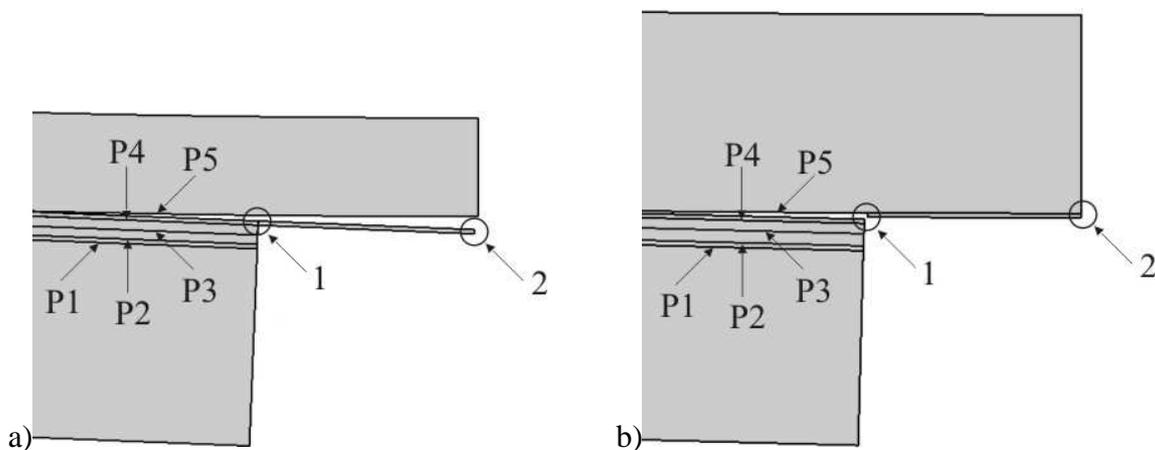


Fig. 8 – Rotura intralaminar do remendo com início do dano em 2 (a) e rotura intralaminar do remendo com início do dano em 1 (b) obtidas numericamente.

### 3.3.3. Tensão de colapso e rigidez equivalente

Apresenta-se de seguida uma comparação numérica/experimental da rigidez equivalente ( $E_{eq}$ ) e tensão de colapso ( $\sigma_C$ ) das reparações, em função de  $L_C$  e  $t_R$ .  $\sigma_C$  é o rácio entre a força máxima sustentada pela reparação e a área de secção dos laminados.  $E_{eq}$  representa a rigidez efectiva nos 55 mm na zona da reparação (Fig. 3), considerada por aproximação a rigidez da reparação. Na Fig. 9 compara-se as curvas  $\sigma$ - $\delta$  experimentais e numéricas obtidas para a reparação com a geometria S5.  $\sigma$  representa a tensão remota aplicada aos laminados (considerando a área da secção do mesmos). A Fig. 10 a) e b) mostra  $E_{eq}$  e  $\sigma_C$ , respectivamente, em função de  $L_C$ . A Fig. 11 a) e b) mostra os mesmos parâmetros em função de  $t_R$ . Analisando os gráficos correspondentes a  $E_{eq}$ , observa-se uma ligeira discrepância, quando em função de  $L_C$ . De facto, experimentalmente não se capturou a tendência de aumento de  $E_{eq}$  com o  $L_C$  observada numericamente. Esta discrepância é atribuída à dificuldade em garantir experimentalmente a espessura de adesivo, definida em 0,2 mm. De facto, é sabido que pequenas alterações na espessura do adesivo levam a grandes variações na rigidez da junta, que depende em grande parte da distorção da camada de adesivo. Considerando a evolução do mesmo parâmetro em função de  $t_R$ , observou-se experimental e numericamente uma tendência crescente. Comparando a evolução de  $\sigma_C$  com os dois parâmetros geométricos estudados, observa-se em geral uma excelente correlação. De facto,  $\sigma_C$  aumenta a uma taxa decrescente em função  $L_C$  (Hu and Soutis, 2000, Campilho et al.,

2005) e diminui gradualmente em função de  $t_R$  (Hu and Soutis, 2000). No primeiro caso, este aumento é explicado pelo aumento da área resistente do adesivo e pelo aparecimento de uma zona interior no adesivo não solicitada, o que leva a que o aumento da resistência não seja proporcional a  $L_C$  (Hu and Soutis, 2000, Campilho et al., 2008a). No segundo caso, a diminuição deve-se ao aumento dos picos de tensões  $\sigma_y$  e  $\tau_{xy}$  na EICS (Campilho et al., 2005).

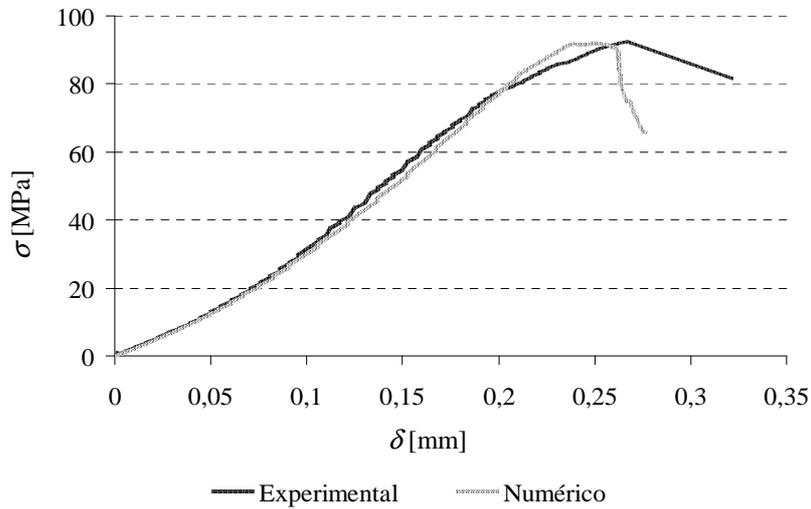


Fig. 9 – Comparação entre as curvas  $\sigma$ - $\delta$  experimentais e numéricas (geometria S5).

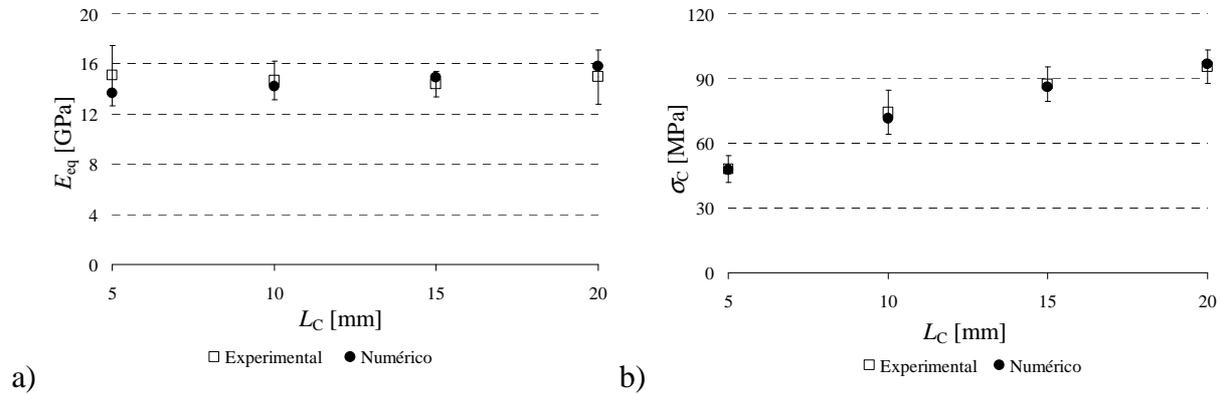


Fig. 10 –  $E_{eq}$  em função de  $L_C$  (a) e  $\sigma_C$  em função de  $L_C$  (b).

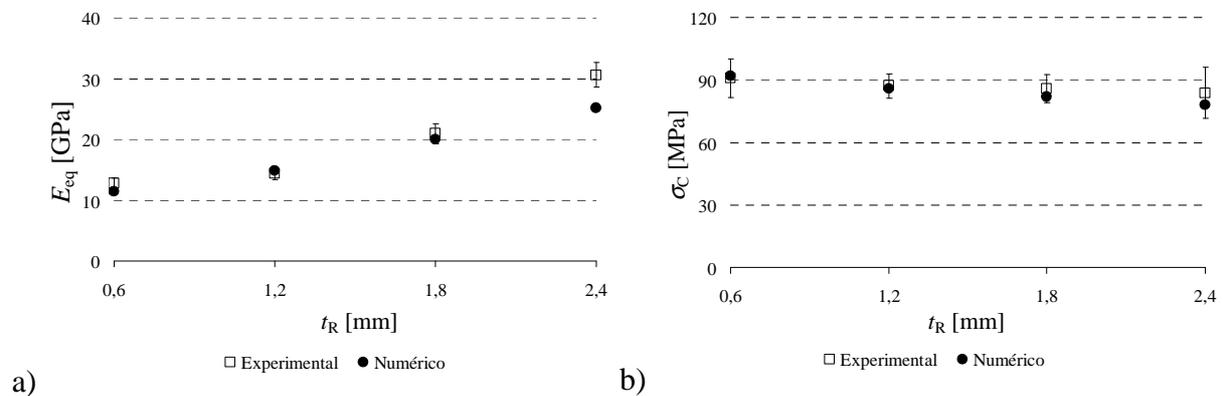


Fig. 11 –  $E_{eq}$  em função de  $t_R$  (a) e  $\sigma_C$  em função de  $t_R$  (b).

#### 4. ESTUDO NUMÉRICO DO EFEITO DAS ALTERAÇÕES GEOMÉTRICAS

Após a validação com resultados experimentais efectuada no capítulo anterior, é realizado um estudo numérico considerando reparações tridimensionais por sobreposição simples e dupla, no sentido de averiguar o efeito das alterações geométricas mais comuns nos modos de rotura e na resistência residual destas reparações sob solicitações de tracção, compressão e flexão em quatro pontos. Como alterações geométricas foram testados a utilização de chanfro nas faces interior e exterior do remendo, enchimento do furo do laminado com adesivo, filetes de diferentes formas e dimensões na EECS, chanfro nas faces interior e exterior do laminado, bem como combinações destas alterações. A importância deste trabalho baseia-se na necessidade de maximizar a resistência destas reparações, uma vez que os métodos de reparação por sobreposição simples e dupla não costumam restituir a resistência inicial dos laminados (Campilho et al., 2005). Na previsão dos modos de rotura e da resistência residual das reparações é utilizado o modelo de dano coesivo apresentado no capítulo 2.

##### 4.1. Análise de tensões

O trabalho numérico desenvolvido consiste numa análise tridimensional não linear geométrica e material, usando o software ABAQUS® com elementos sólidos de 8 e 6 nós, incorporando os elementos finitos de interface em planos distintos para simulação da iniciação e propagação do dano. A Fig. 12 a) ilustra a geometria e dimensões da reparação por sobreposição simples, enquanto que a Fig. 12 b) mostra os planos utilizados para colocação dos elementos de interface para a reparação sem alterações geométricas.

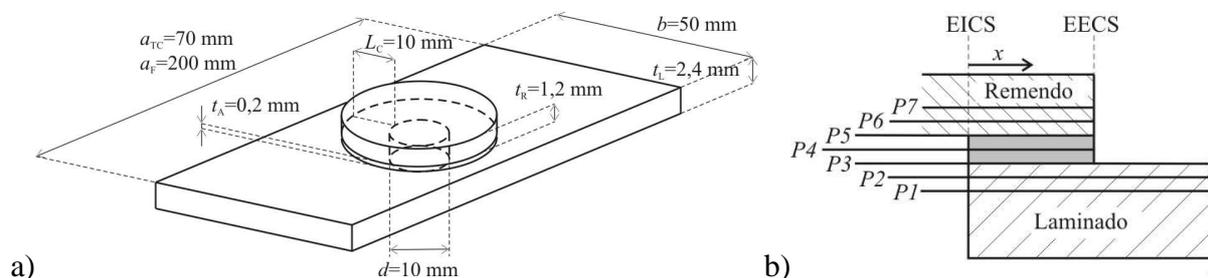


Fig. 12 – Geometria e dimensões da reparação por sobreposição simples (a) e planos de colocação dos elementos de interface (b).

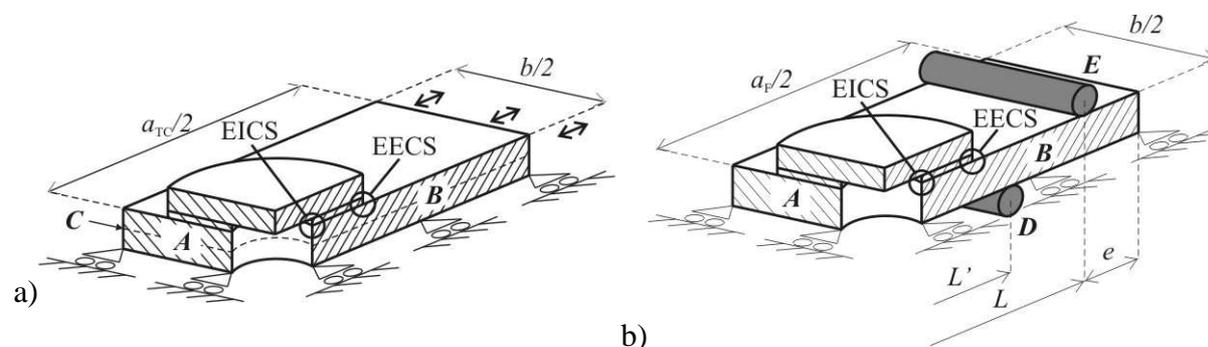


Fig. 13 – Condições fronteira e de simetria sob solicitações de tracção e compressão (a) e flexão em quatro pontos (b).

As condições de simetria impostas permitiram considerar apenas  $\frac{1}{4}$  do laminado (planos de simetria **A** e **B** na Fig. 13). Para as reparações por sobreposição dupla, foram usadas condições de simetria adicionais a meio da espessura do laminado (plano horizontal **C** na Fig. 13), excepto para a solicitação de flexão.

As condições fronteira para as solicitações de tracção e compressão (Fig. 13 a) consistiram na restrição do movimento nos planos **A**, **B** e **C** (quando aplicável) na respectiva direcção normal e na aplicação de um deslocamento na extremidade do modelo. Sob flexão, foram considerados comprimentos entre cilindros de carregamento ( $L'$ ) e cilindros de apoio ( $L$ ) de 60 e 180 mm, respectivamente. O comprimento  $e$ , correspondente à distância entre os cilindros de apoio e a extremidade do laminado, é igual a 10 mm. Foram modelados cilindros com um diâmetro de 4 mm e considerados dois comprimentos do laminado distintos:  $a_{TC}$  (solicitações de tracção e compressão) e  $a_F$  (solicitação de flexão). Esta distinção justifica-se pela necessidade de evitar encurvadura sob compressão e garantir que os cilindros de deslocamento não interferem com a zona da reparação, assegurando um momento constante nessa zona, sob uma solicitação de flexão. O mesmo material foi considerado para os laminados e remendo (Tabela 1) e para o adesivo. As sequências de empilhamento dos laminados e remendos são  $[0_2, 90_2, 0_2, 90_2]_S$  e  $[0_2, 90_2]_S$ , respectivamente.

As propriedades dos elementos de interface foram obtidas no capítulo 3, considerando a mesma lei coesiva para os modos II e III. Estes elementos foram colocados nos seguintes planos (Fig. 12 b), para a reparação sem alterações geométricas: entre as duas camadas diferentemente orientadas mais próximas do adesivo no laminado (P1), entre as duas camadas a  $0^\circ$  mais próximas do adesivo no laminado (P2), na interface entre o laminado e o adesivo (P3), a meio da espessura do adesivo (P4), na interface entre o adesivo e o remendo (P5), entre as duas camadas a  $0^\circ$  mais próximas do adesivo no remendo (P6) e entre as duas camadas diferentemente orientadas mais próximas do adesivo no remendo (P7). Foram considerados elementos de interface em planos adicionais, de acordo com cada alteração geométrica considerada. Os elementos de interface simulam o comportamento da camada de adesivo (P4), das interfaces entre o adesivo e o laminado ou remendo (P3 e P5) e das interfaces interlaminares do laminado e remendo (P1, P2, P6 e P7).

## 4.2. Resultados

### 4.2.1. Análise de tensões

#### 4.2.1.1. Sobreposição simples

A Fig. 14 a) e b) representa as tensões normais segundo a espessura e de corte, respectivamente, para a reparação sem alterações geométricas, sob um deslocamento de tracção de 4  $\mu\text{m}$ . Ambas são mais elevadas no plano de simetria longitudinal da reparação (plano **B** na Fig. 13), apresentando os seus valores máximos nas extremidades da sobreposição. Resultados semelhantes foram obtidos para as solicitações de compressão e flexão. No que respeita à análise destas tensões nos sete planos da Fig. 12 b), estudos anteriores (Campilho et al., 2008b) demonstraram que estas são mais elevadas nos planos P3 e P5, diminuindo substancialmente no laminado e remendo. Estes resultados indicam que o dano inicia nas ou próximo das interfaces P3 e P5, nas suas extremidades, uma vez que ambas as tensões são maiores nessas regiões.

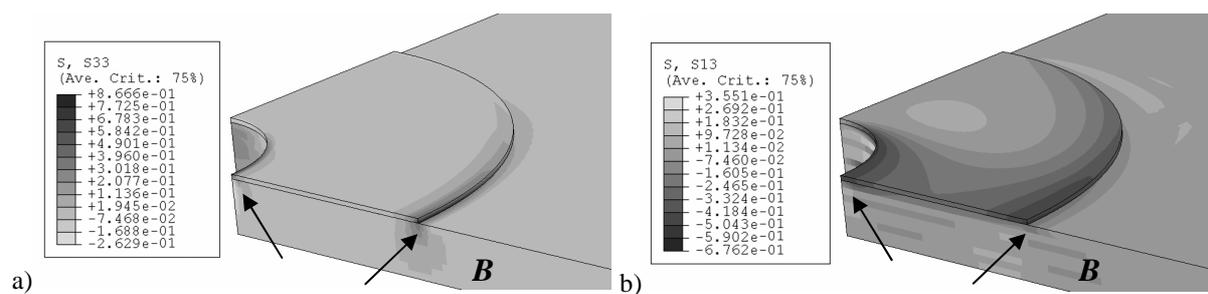


Fig. 14 – Distribuição de tensões normais segundo a espessura (a) e de corte (b) na zona da reparação (sobreposição simples, solicitação de tracção).

#### 4.2.1.2. Sobreposição dupla

Um estudo semelhante é efectuado para a geometria de sobreposição dupla. A Fig. 15 a) e b) mostra as tensões normais segundo a espessura e de corte, respectivamente, para a mesma geometria sob um deslocamento idêntico. Observa-se um comportamento semelhante ao obtido para a reparação por sobreposição simples, pois ambas as tensões apresentam valores mais elevados no plano de simetria  $B$ , sendo máximas nas extremidades da sobreposição. Campilho et al. (2008b) concluíram que, também para esta geometria, as tensões máximas são observadas nos planos P3 e P5, mostrando que o dano se deve iniciar próximo das interfaces laminado/adesivo ou adesivo/remendo. Refira-se que estas conclusões gerais também são válidas para as restantes solicitações estudadas neste trabalho.

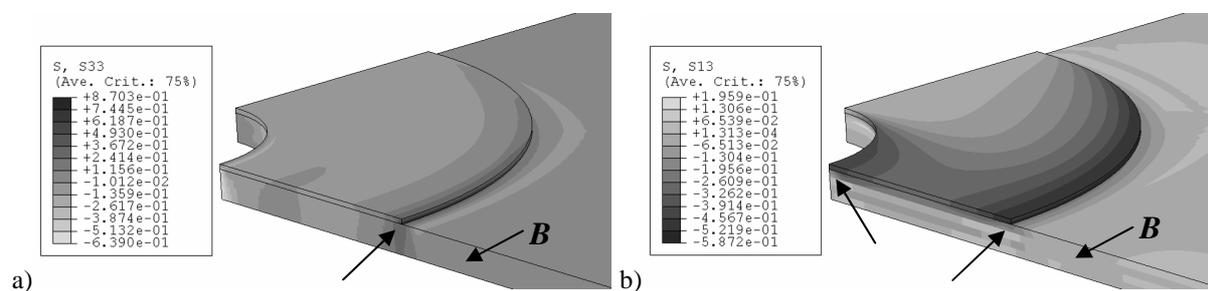


Fig. 15 – Distribuição de tensões normais segundo a espessura (a) e de corte (b) na zona da reparação (sobreposição dupla, solicitação de tracção).

#### 4.2.2. – Alterações geométricas

##### 4.2.2.1. – Sobreposição simples

A Fig. 16 mostra em detalhe as malhas das alterações geométricas de base estudadas. As malhas para as reparações por sobreposição dupla são similares, embora apenas considerando metade da espessura do laminado (excepto para a solicitação de flexão).

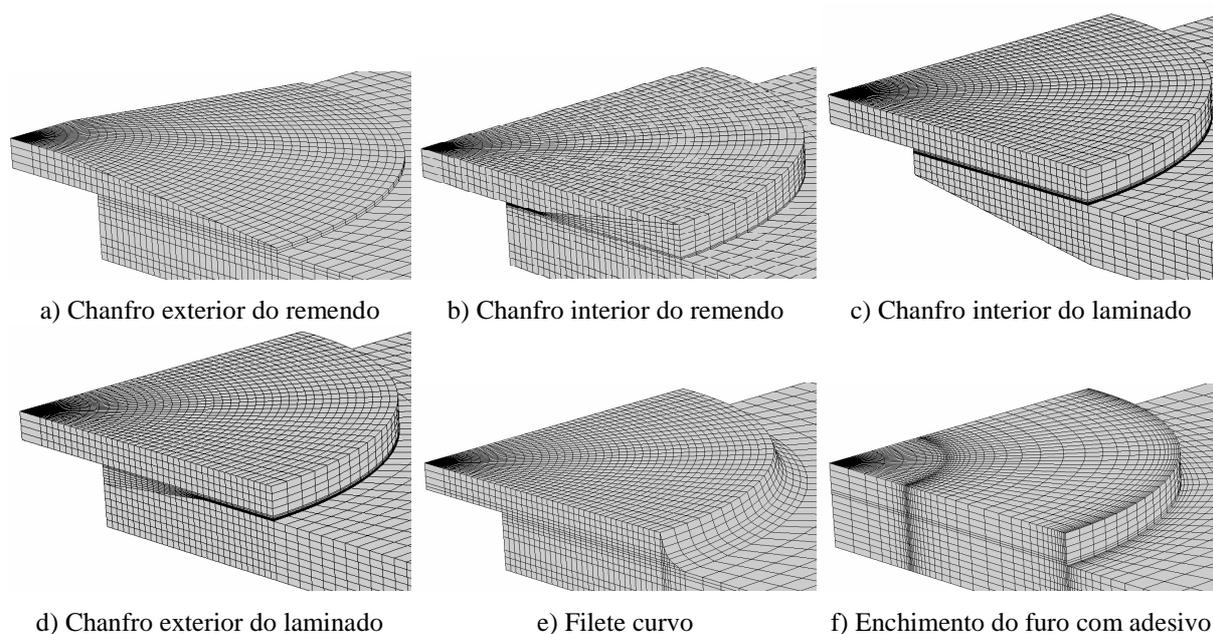
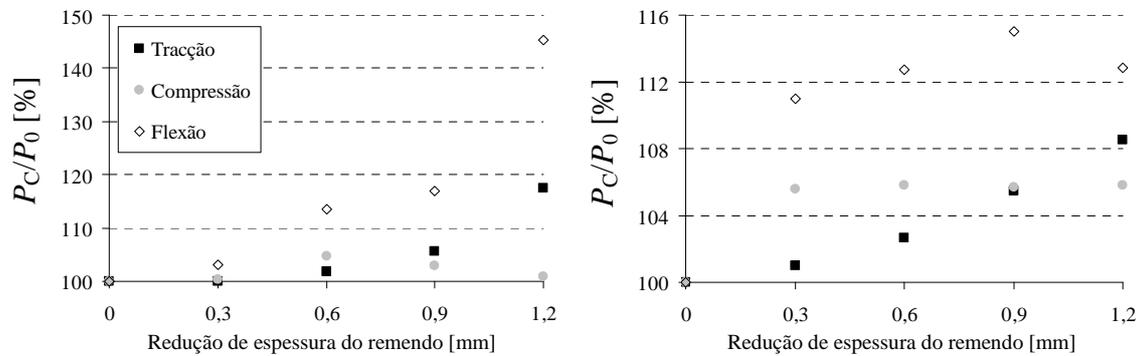


Fig. 16 – Alterações geométricas analisadas.

A Fig. 18 representa um resumo da resistência residual das reparações ( $P_C$ ) por sobreposição simples sujeitas às três solicitações em análise, normalizada pela resistência de uma reparação sem alterações geométricas ( $P_0$ ), em função das dimensões da alteração geométrica respectiva.  $P_C$  é a carga nas extremidades da reparação correspondente à iniciação do descolamento do remendo, embora o laminado ainda possa suportar esforços após descolamento do remendo (Hu and Soutis, 2000). A Tabela 4 apresenta uma lista dos modos de rotura observados e a respectiva descrição. A

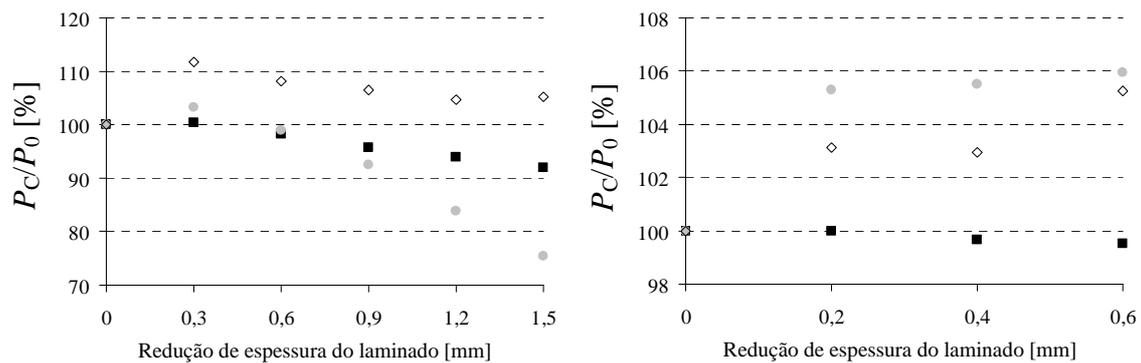
Tabela 5 faz a correspondência entre a geometria da reparação e os modos de rotura para todas as reparações estudadas. A seguir são estudadas em detalhe cada uma das alterações geométricas.



a) Chanfro exterior do remendo

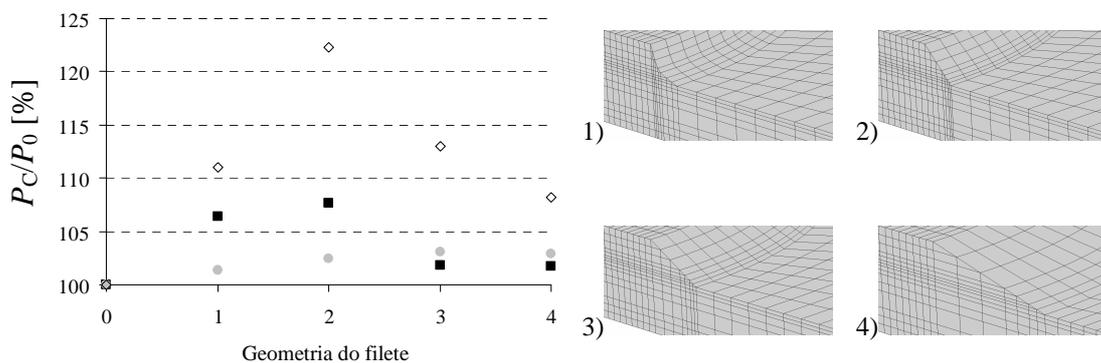
b) Chanfro interior do remendo

Fig. 17 – Resistência normalizada em função das alterações geométricas (reparação por sobreposição simples).



c) Chanfro interior do laminado

d) Chanfro exterior do laminado



e) Filetes

f) Formas de filete

Fig. 18 (continuação) – Resistência normalizada em função das alterações geométricas (reparação por sobreposição simples).

Tabela 4 – Lista de modos de rotura observados e respectiva descrição.

F1	Iniciação do dano no plano de simetria <b>B</b> , na EECS (interface laminado/adesivo) e na EICS (interface adesivo/remendo). Crescimento do dano no sentido da região central da sobreposição.
F2	Iniciação do dano no plano de simetria <b>B</b> , na EECS (interface laminado/adesivo). Crescimento do dano ao longo desta interface no sentido da EICS.
F3	Iniciação do dano no plano de simetria <b>B</b> , na interface vertical remendo/filete e crescimento do dano pela interface adesivo/remendo desde a EECS até à EICS.
F4	Iniciação do dano no plano de simetria <b>B</b> , na interface vertical adesivo do furo/laminado, seguido de propagação pela interface laminado/adesivo desde a EECS até à EICS.
F5	Iniciação do dano no plano de simetria <b>B</b> , simultaneamente na interface laminado/adesivo (EICS) e adesivo/remendo (EECS).
F6	Iniciação do dano a 45° do plano de simetria <b>B</b> , na interface laminado/adesivo (EECS) com crescimento no sentido da EICS ao longo da referida interface.
F7	Iniciação do dano a 45° do plano de simetria <b>B</b> , interface vertical remendo/filete e crescimento pela interface laminado/adesivo desde a EECS até à EICS.
F8	Iniciação do dano no plano de simetria <b>B</b> , simultaneamente em toda a sobreposição pela interface laminado/adesivo.
F9	Iniciação do dano no plano de simetria <b>B</b> , na EICS pela interface laminado/adesivo, crescendo por esta interface até à EECS.

Tabela 5 – Modos de rotura das reparações.

Geometria	Sobreposição simples			Sobreposição dupla		
	Tracção	Compressão	Flexão	Tracção	Compressão	Flexão
Sem alterações geométricas	F1	F6	F2	F2	F8	F2*
Chanfro exterior do remendo	F1	F6	F2	F1/F2	F8	F2*
Chanfro interior do remendo	F1	F6	F2	F1/F5	F5/F9	F2*
Chanfro interior do laminado	F1	F6	F2	-	-	-
Chanfro exterior do laminado	F2	F6	F2	F2	F8	F2*
Filete	F3	F7	F3	F3	F5	F3*
Enchimento do furo com adesivo	F4	F6	F2	F4	F8	F2*

\* *no remendo exterior*

#### 4.2.2.1.1. – Chanfro exterior do remendo

Esta modificação tem como objectivo reduzir os picos de tensões normais segundo a espessura na EECS (Mortensen and Thomsen, 2002, Campilho et al., 2005), aumentando eventualmente a resistência residual da reparação. Foi considerada uma inclinação do chanfro de 1/10 (Hu and Soutis, 2000, Campilho et al., 2008c) e reduções da espessura de remendo de 0,3, 0,6, 0,9 e 1,2 mm, a última englobando a totalidade da espessura do remendo (Fig. 16 a). Esta modificação geométrica causa um aumento significativo de resistência (Fig. 18 a) sob solicitações de tracção (17,4%) e flexão (45,2%), para o chanfro de 1,2 mm, o que pode ser justificado pela redução da rigidez do remendo na zona de iniciação do dano (EECS). Em compressão, observa-se um aumento de resistência de 4,6% com esta alteração geométrica.

#### 4.2.2.1.2. – Chanfro interior do remendo

Esta modificação, que leva a um aumento localizado da espessura da camada de adesivo, também foi estudada no sentido de diminuir os picos de tensões normais segundo a espessura na EECS. Foram estudadas reduções de espessura do remendo de 0,3, 0,6, 0,9 e 1,2 mm, com uma inclinação de 1,5/10 (para permitir que toda a espessura do remendo fosse considerada). A Fig. 16 b) representa a malha da reparação com um chanfro de 1,2 mm. Esta alteração geométrica também é benéfica (Fig. 18 b). De facto, observa-se um aumento exponencial sob tracção, chegando a 8,5% para o chanfro de maiores dimensões. Em compressão, observa-se um aumento de aproximadamente 5,7%, independentemente das dimensões do chanfro. Os melhores resultados são obtidos à flexão (aumento de resistência de 15,0% usando um chanfro de 0.9 mm).

#### 4.2.2.1.3. – Chanfro interior do laminado

Foram estudados chanfros com reduções na espessura do laminado de 0,3, 0,6, 0,9, 1,2 e 1,5 mm e uma inclinação de 1,5/10. A Fig. 16 c) apresenta a malha do modelo com 1,5 mm. Observa-se uma redução da resistência residual sob cargas de tracção e compressão (Fig. 18 c), que é explicada por uma redução da área resistente do laminado causada por esta alteração

geométrica. À flexão, regista-se um aumento de resistência de 11,7% usando o chanfro de 0,3 mm e uma diminuição gradual para valores superiores.

#### **4.2.2.1.4. – Chanfro exterior do laminado**

Esta alteração geométrica, que leva a um aumento localizado da espessura de adesivo na EICS, foi estudada considerando reduções da espessura do laminado de 0,2, 0,4 e 0,6 mm e uma inclinação de 1,5/10. A Fig. 16 d) evidencia a malha com um chanfro de 0,6 mm. Esta modificação causa uma redução ligeira de resistência sob uma solicitação de tracção (Fig. 18 d). Por outro lado, observa-se um aumento de resistência razoável sob compressão (6,0%) e flexão (5,3%).

#### **4.2.2.1.5. – Filetes**

As singularidades de tensão que se observam nas extremidades da sobreposição podem propiciar uma iniciação de dano prematura nestas regiões (Gleich et al., 2001, Panigrahi e Pradhan, 2007). A utilização de filetes de adesivo suprime estas singularidades e aumenta a resistência das reparações (Hildebrand, 1994, Tsai and Morton, 1995, Campilho et al., 2008a). Os modelos numéricos incluíram elementos de interface adicionais nas interfaces laminado/filete e filete/remendo. Foram consideradas quatro formas distintas para os filetes: um filete curvo (Fig. 16 e) e filetes lisos com ângulos de 45, 30 e 15° (Fig. 18 f). Os filetes incluem a totalidade da espessura do remendo, minimizando as tensões normais segundo a espessura na proximidade da EECS (Lang e Mallick, 1998, Cheuk e Tong, 2002). Observa-se que a utilização de filetes é sempre aconselhável, independentemente da sua forma ou do tipo de solicitação (Fig. 18 e). Os melhores resultados são obtidos para uma solicitação de flexão e de uma maneira geral usando um filete recto a 45°. Apenas em compressão o filete de 30° é o mais aconselhável. Os resultados obtidos estão em concordância com o trabalho numérico de Belingardi et al. (2002).

#### **4.2.2.1.6. – Enchimento do furo com adesivo**

Outra técnica consiste no enchimento com adesivo do furo no laminado correspondente à remoção do material danificado. Soutis e Duan (1999) verificaram que a resistência à compressão de reparações tridimensionais por sobreposição dupla aumenta com esta modificação. A malha utilizada encontra-se na Fig. 16 f). Foram colocados elementos de interface adicionais entre o adesivo no furo e o laminado e remendo. Foi obtida uma redução de resistência de 1,2% à tracção, que pode ser explicada por uma rotura na interface entre o adesivo do furo e o laminado antes da rotura na camada de adesivo (Campilho et al., 2008b). À compressão e flexão obteve-se aumentos de resistência de 5,8 e 17,4%, respectivamente, uma vez que em ambos os casos a iniciação de dano se dá na EECS, ao mesmo tempo que o adesivo do furo ainda se encontra a transferir esforços (Campilho et al., 2008b).

#### **4.2.2.1.7. – Combinações de alterações geométricas**

As alterações geométricas mais eficazes em sobreposição simples foram combinadas no sentido de maximizar a resistência das reparações. A Tabela 6 sumariza a solução mais eficaz para cada tipo de reparação (sobreposição ou dupla) e solicitação. À tracção, observou-se que o chanfro exterior e interior do remendo (incluindo a totalidade da espessura do remendo) e um filete liso de 45° eram as soluções mais vantajosas. Como tal, foi construída uma

combinação com o chanfro interior do remendo de 1,2 mm e o filete liso de 45°, obtendo-se um aumento de resistência de 27,7%. A Fig. 19 mostra o processo de iniciação (a) e crescimento (b) do dano para esta geometria à tracção. Sujeitas a uma solicitação de compressão, a resistência residual das reparações por sobreposição simples também aumenta com as modificações acima referidas (embora algumas dimensões óptimas sejam diferentes) e ainda usando chanfros interior e exterior do laminado e enchendo o furo com adesivo. A primeira combinação incluiu um filete liso de 30° (forma óptima para a solicitação de compressão), um chanfro interior do remendo de 1,2 mm, um chanfro exterior do laminado de 0,2 mm e um chanfro interior do laminado de 0,3 mm, tendo-se observado um aumento de resistência de 3,8%. Outra combinação considerando um filete liso de 30°, um chanfro interior do remendo de 1,2 mm e com enchimento do furo com adesivo foi testada. Como foi obtido um aumento de resistência de 6,8%, esta combinação foi considerada a solução óptima neste caso particular. A Fig. 20 a) e b) representa, respectivamente, a iniciação e crescimento do dano para esta combinação de alterações geométricas. Sob uma solicitação de flexão, todas as alterações são benéficas. Registou-se um aumento de resistência de 49,3% combinando um chanfro exterior do remendo de 1,2 mm com o enchimento do furo com adesivo. Combinando um chanfro exterior do remendo de 1,2 mm, um chanfro exterior do laminado de 0,2 mm e um chanfro interior do remendo de 0,3 mm obteve-se a solução mais eficaz para esta solicitação (aumento de resistência de 58,3%).

Tabela 6 – Sumário das melhores soluções.

Geometria	Sobreposição simples			Sobreposição dupla		
	Tracção	Compressão	Flexão	Tracção	Compressão	Flexão
Aumento de resistência [%]	27,7	6,8	58,3	21,4	26,0	12,2
Chanfro exterior do remendo [mm]	-	-	1,2	1,2	-	0,9
Chanfro interior do remendo [mm]	1,2	1,2	-	-	1,2	-
Chanfro interior do laminado [mm]	-	-	0,3	-	-	-
Chanfro exterior do laminado [mm]	-	-	0,2	-	-	-
Filete [°]	45	30	-	45	15	-
Enchimento do furo com adesivo	-	√	-	-	√	-

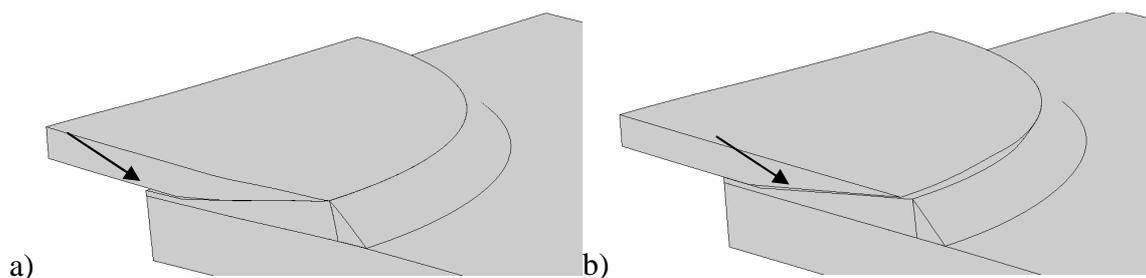


Fig. 19 – Iniciação e crescimento do dano para a seguinte combinação: chanfro interior do remendo de 1,2 mm e filete liso de 45° (sobreposição simples, solicitação de tracção).

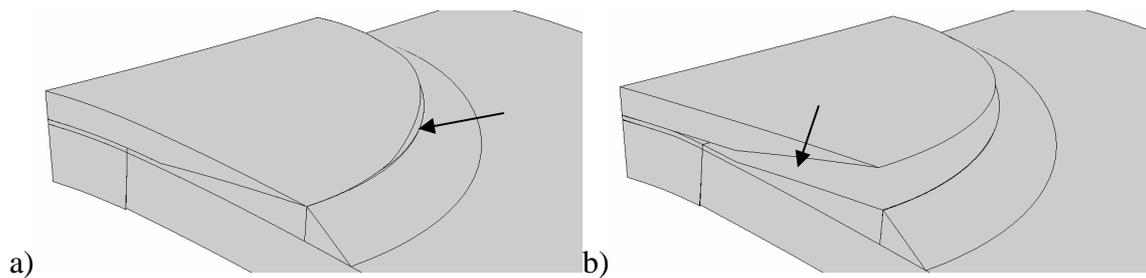


Fig. 20 – Iniciação e crescimento do dano para a seguinte combinação: filete liso de 30°, chanfro interior do remendo de 1,2 mm e enchimento do furo com adesivo (sobreposição simples, solicitação de compressão).

#### 4.2.2.2. – Sobreposição dupla

Em sobreposição dupla, consideraram-se as mesmas alterações geométricas e respectivas dimensões características estudadas em sobreposição simples. A Fig. 21 apresenta a resistência normalizada das reparações com as diferentes alterações geométricas em função das respectivas dimensões.

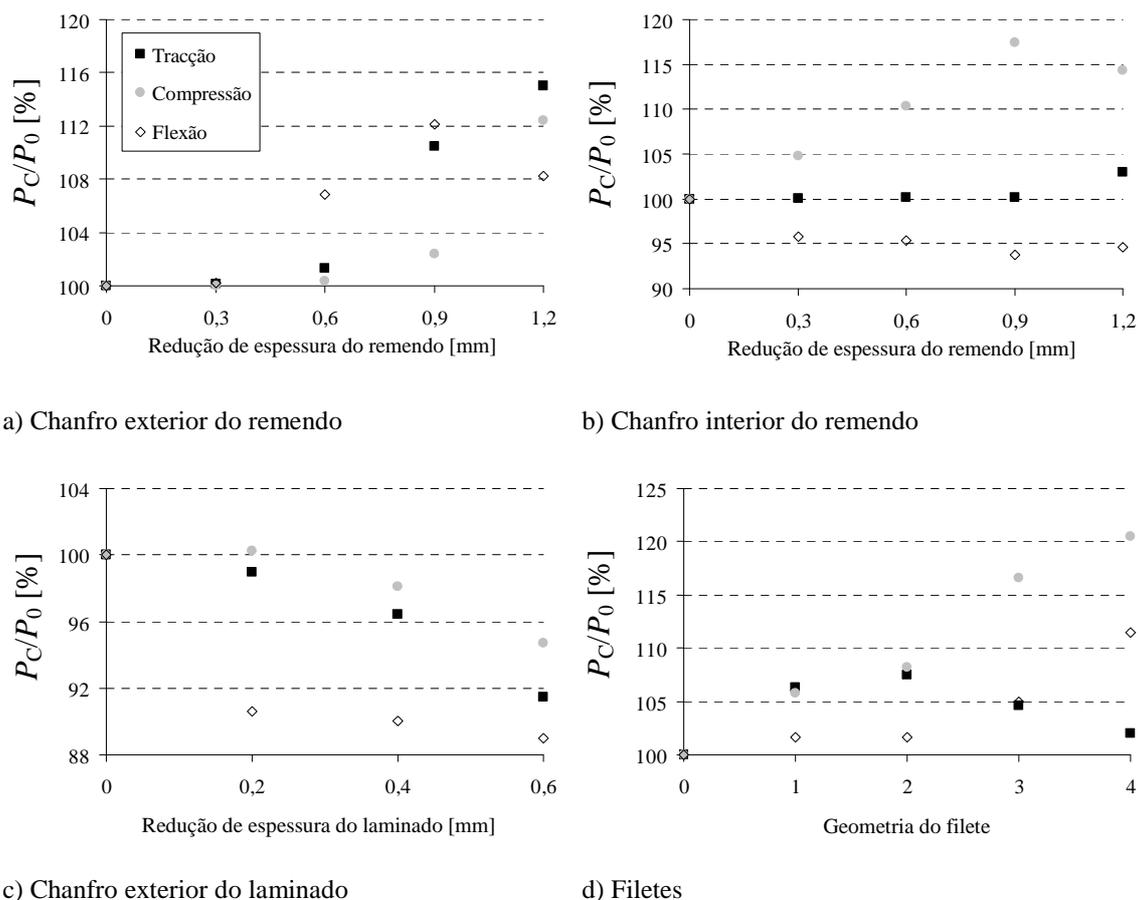


Fig. 21 – Resistência normalizada em função das alterações geométricas (reparação por sobreposição dupla).

#### **4.2.2.2.1. – Chanfro exterior do remendo**

Esta modificação geométrica causa um aumento gradual da resistência da reparação em função das suas dimensões, excepto sob flexão. Os aumentos de resistência (Fig. 21 a) obtidos foram de 15,0% (tracção), 12,4% (compressão) e 12,2% (flexão). Este comportamento é explicado pela redução de rigidez do remendo na zona de iniciação do dano (EECS), o que diminui as concentrações de tensões nessa região.

#### **4.2.2.2.2. – Chanfro interior do remendo**

A utilização de um chanfro interior do remendo aumenta significativamente a resistência das reparações por sobreposição dupla à compressão (Fig. 21 b). De facto, há um aumento de resistência de 17,5% com um chanfro de 0,9 mm. À tracção, o chanfro de 1,2 mm é o mais benéfico (aumento de resistência de 2,9%). Esta melhoria também se encontra relacionada com a diminuição das tensões na EECS. Sob flexão, observa-se um aumento de resistência de aproximadamente 5%, independentemente das dimensões do chanfro.

#### **4.2.2.2.3. – Chanfro exterior do laminado**

Para as três solicitações em estudo verificou-se que não há vantagem em utilizar esta alteração geométrica (Fig. 21 c), uma vez que a resistência das reparações diminui gradualmente com as dimensões do chanfro. Este comportamento é explicado pela redução da área da secção resistente do laminado, uma vez que a zona de iniciação do dano (EECS) não é alterada.

#### **4.2.2.2.4. – Filetes**

Constatou-se que o uso de filetes é sempre vantajoso em sobreposição dupla (Fig. 21 d). À tracção, o filete liso a 45° é o mais aconselhável, induzindo um aumento de resistência de 7,5%. Por outro lado, à compressão e flexão o filete de 15° aumenta a resistência residual das reparações de 20,5% e 11,4%, respectivamente. De facto, de uma maneira geral a utilização de filetes reduz os picos de tensões normais segundo a espessura e de corte na EECS. À compressão, e uma vez que a rotura ocorre na EECS na interface adesivo/remendo, observa-se que ângulos de filete mais reduzidos levam a uma área de corte mais elevada nesse plano, aumentando gradualmente a resistência das reparações.

#### **4.2.2.2.5. – Enchimento do furo com adesivo**

A utilização desta técnica é bastante benéfica à compressão (aumento de resistência de 13,6%). Por outro lado, à tracção e flexão observa-se um comportamento semelhante à reparação por sobreposição simples, não se verificando diferença significativa na resistência residual das reparações.

#### **4.2.2.2.6. – Combinações de alterações geométricas**

À tracção, todas as modificações causam um aumento da resistência das reparações. A solução mais eficiente foi obtida combinando um filete liso de 45° e um chanfro interior do remendo de 1,2 mm (aumento de resistência de 21,4%, Tabela 6). Sob uma solicitação de compressão todas as modificações, excepto o chanfro exterior do laminado, aumentam a resistência das reparações. Obteve-se um aumento de resistência de 26,0% combinando um

filete liso de 15°, um chanfro interior do remendo de 1,2 mm e efectuando enchimento do furo com adesivo. À flexão observou-se que as únicas alterações geométricas benéficas são o filete (um filete liso de 15° leva a um aumento de resistência de 11,4%) e o chanfro exterior do remendo (um chanfro de 0,9 mm aumenta em 12,2% a resistência das reparações). Como não é possível combinar estas duas alterações, considera-se o chanfro exterior do remendo a solução óptima para esta solicitação.

## 5. CONCLUSÕES

Foi apresentado um trabalho experimental e numérico relativo à resistência residual de reparações adesivas por sobreposição simples e dupla de laminados de carbono-epóxico. Para modelar numericamente o comportamento mecânico das reparações foi utilizado um modelo de dano coesivo em modo misto baseado no uso indirecto da Mecânica da Fractura.

Na primeira parte deste trabalho foi feita uma validação da metodologia numérica utilizada com resultados experimentais de reparações bidimensionais por sobreposição simples. Foram considerados o modo de rotura, a tensão de colapso e a rigidez equivalente das reparações em função do comprimento de sobreposição e da espessura do remendo. Inicialmente foi efectuada uma análise de tensões normais segundo a espessura e de corte na zona de sobreposição, em diferentes planos segundo a direcção da espessura. Observou-se que ambas as tensões apresentam picos nas extremidades da sobreposição, sendo estes mais pronunciados para as tensões normais segundo a espessura. Ambas as tensões apresentam os picos de maior magnitude na extremidade exterior do comprimento de sobreposição na interface entre o laminado e o adesivo e na extremidade interior do comprimento de sobreposição na interface entre o adesivo e o remendo, sugerindo que o dano se inicia nas, ou próximo das referidas interfaces. Numericamente, foram simulados os modos de rotura observados experimentalmente. Comparando a tensão de colapso e a rigidez equivalente, em função do comprimento de sobreposição e espessura do remendo, obteve-se uma boa concordância, excepto na rigidez equivalente em função do comprimento de sobreposição, pois a tendência crescente observada numericamente não foi capturada pelos resultados experimentais. Ambas as análises evidenciam uma tendência crescente da rigidez equivalente em função da espessura do remendo. Relativamente à tensão de colapso, foram obtidos excelentes resultados, observando-se uma tendência crescente em função do comprimento de sobreposição e decrescente em função da espessura do remendo, em ambas as análises experimental e numérica.

Após a validação do modelo numérico, este foi aplicado na identificação das alterações geométricas que maximizam a resistência residual de reparações tridimensionais por sobreposição simples e dupla sujeitas a solicitações de tracção, compressão e flexão. De uma forma geral, mostrou-se que é benéfica a alteração geométrica das reparações estudadas, para todas as solicitações consideradas neste trabalho. Utilizando a técnica de reparação por sobreposição simples, os melhores resultados foram obtidos à flexão, sendo que as alterações geométricas mais significativas foram obtidas com os chanfros interior e exterior do remendo e com a utilização de um filete. Diferentes combinações destas alterações geométricas levaram a aumentos de resistência de 27,7% (tracção), 6,8% (compressão) e 58,3% (flexão). Em sobreposição dupla, as alterações geométricas mais significativas foram as mesmas, tendo-se obtido aumentos de resistência de 21,4% (tracção), 26,0% (compressão) e 12,2% (flexão) com diferentes combinações das referidas alterações. Embora estes resultados dependam nas propriedades dos materiais, sequências de empilhamento e parâmetros geométricos da reparação, concluiu-se que a metodologia numérica apresentada simula os

diferentes modos de rotura destas reparações e permite obter directrizes no sentido de maximizar a resistência das reparações.

### **Agradecimentos**

Os autores agradecem à Fundação para a Ciência e Tecnologia por suportar o trabalho aqui apresentado, através da bolsa individual SFRH/BD/30305/2006 e do projecto de investigação POCI/EME/56567/2004.

### **REFERÊNCIAS**

Ávila, A.F., Bueno, P.O., An experimental and numerical study on adhesive joints for composites, *Composite Structures*, Vol.64, 531-537, 2004.

Belingardi, G., Goglio, L., Tarditi, A., Investigating the effect of spew and chamfer size on the stresses in metal/plastics adhesive joints, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, Vol.22, 273-282, 2002.

Campilho, R.D.S.G., *Modelação da Execução de Reparções em Materiais Compósitos*, Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2005.

Campilho, R.D.S.G., de Moura, M.F.S.F., Domingues, J.J.M.S., Modelling single and double-lap repairs on composite materials, *Composites Science and Technology*, Vol.65, 1948-1958, 2005.

Campilho, R.D.S.G., de Moura, M.F.S.F., Domingues, J.J.M.S., Stress and failure analyses of scarf repaired CFRP laminates using a cohesive damage model, *Journal of Adhesion Science and Technology*, Vol.21, 855-970, 2007.

Campilho, R.D.S.G., de Moura, M.F.S.F., Domingues, J.J.M.S., Using a cohesive damage model to predict the tensile behaviour of CFRP single-strap repairs, *International Journal of Solids and Structures*, Vol.45, 1497-1512, 2008a.

Campilho, R.D.S.G., de Moura, M.F.S.F., Domingues, J.J.M.S., Morais, J.J.L., Computational modelling of the residual strength of repaired composite laminates with different geometries using a cohesive damage model, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 10.1163/156856108X309576, 2008b.

Campilho, R.D.S.G., de Moura, M.F.S.F., Domingues, J.J.M.S., Numerical prediction on the tensile residual strength of repaired CFRP laminates under different geometric changes, aceite para publicação na revista *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2008c.

Cheuk, P.T., Tong, L., Failure of adhesive bonded composite lap shear joints with embedded precrack, *Composites Science and Technology*, Vol.62, 1079-1095, 2002.

de Moura, M.F.S.F., Daniaud, R., Magalhães, A.G., Simulation of mechanical behaviour of composite bonded joints containing strip defects, *International Journal of Adhesion & Adhesives* Vol.26, 464-473, 2006.

Gleich, D.M., Van Tooren, M.J.L., Beukers, A., A stress singularity approach to failure initiation in a bonded joint with varying bondline thickness, *Journal of Adhesion Science and Technology*, Vol.15, 1247-1259, 2001.

- Hildebrand, M., Non-linear analysis and optimization of adhesively bonded single lap joints between fibre-reinforced plastics and metals, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, Vol.14, 261-267, 1994.
- Hu, F.Z., Soutis, C., Strength prediction of patch repaired CFRP laminates loaded in compression, *Composites Science and Technology*, Vol.60, 1103-1114, 2000.
- Lang, T.P., Mallick, P.K., Effect of spew geometry on stresses in single lap adhesive joints, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, Vol.18, 167-177, 1998.
- Liu, X., Wang, G., Progressive failure analysis of bonded composite repairs, *Composite Structures*, Vol.81, 331-340, 2007.
- Magalhães, A.G., de Moura, M.F.S.F., Gonçalves, J.P.M., Evaluation of stress concentration effects in single-lap bonded joints of laminate composite materials, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, Vol.25, 313-319, 2005.
- Mortensen, F., Thomsen, O.T., Analysis of adhesive bonded joints: a unified approach, *Composites Science and Technology*, Vol.62, 1011-1031, 2002.
- Panigrahi, S.K., Pradhan, B., Adhesion failure propagation in adhesively-bonded single-lap laminated FRP composite joints, *Journal of Adhesion Science and Technology*, Vol.21, 379-398, 2007.
- Soutis, C., Duan, D.M., Compressive behaviour of CFRP laminates repaired with adhesively bonded external repairs, *Composite structures*, Vol.45, 289-301, 1999.
- Tsai, M.Y., Morton, J., The effect of a spew fillet on adhesive stress distributions in laminated composite single-lap joints, *Composite Structures*, Vol.32, 123-131, 1995.
- Zou, G.P., Shalin, K., Taheri, F., An analytical solution for the analysis of symmetric composite adhesively bonded joints, *Composite Structures*, Vol.65, 499-510, 2004.