

MODELAÇÃO NUMÉRICA DE REPARAÇÕES POR SOBREPOSIÇÃO SIMPLES E DUPLA EM MATERIAIS COMPÓSITOS

R. D. S. G. Campilho¹, M. F. S. F. de Moura¹, J.J.M.S. Domingues²

¹Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, FEUP, Universidade do Porto

²Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Politécnico do Porto

RESUMO

O presente trabalho é dedicado ao estudo numérico das componentes de tensões e resistência residual à tracção de reparações efectuadas em materiais compósitos por sobreposição simples e dupla, utilizando o código comercial de elementos finitos ABAQUS®. O efeito de algumas alterações geométricas nas distribuições de tensões e na resistência da reparação é avaliado. O estudo efectuado permite comprovar que podem ser obtidos bons rendimentos após reparação de uma placa danificada, dependendo da geometria, sequência de empilhamento da placa a reparar e espessura da mesma.

1 – INTRODUÇÃO

A utilização de materiais compósitos reforçados com fibras de carbono tem vindo a aumentar na indústria, nomeadamente a aeroespacial. As excelentes características de resistência e rigidez específicas deste tipo de materiais proporcionam vantagens competitivas, quando comparados com os materiais metálicos de alta resistência, usados regularmente em todas as aplicações em que estas características são exigidas. Os materiais compósitos reforçados com fibras apresentam no entanto uma susceptibilidade elevada ao impacto, nomeadamente o impacto de baixa velocidade, provocado por exemplo por um embate acidental de uma ferramenta numa estrutura em compósito, um embate de uma ave numa asa de um avião, entre outras situações. Este facto, aliado à quase obrigatoriedade de substituição do componente danificado, o que por sua vez se torna num problema acrescido devido às inerentes dificuldades na reciclabilidade deste tipo de materiais, torna

fundamental tentar prever uma forma de reparação destas mesmas estruturas, não só por questões económicas, como também ambientais.

Diversos autores a nível internacional se têm debruçado sobre este assunto, dos quais se destacam F.Z. Hu e C. Soutis [1], tendo estes chegado à conclusão que é possível, otimizando o desenho das juntas coladas, obter resistências residuais após reparação que podem chegar até 80% da resistência inicial. Estes autores estudam, considerando uma solitação de compressão e compósito de vidro-epóxico, o efeito da alteração do comprimento de sobreposição entre as placas a reparar e o remendo. Consideram também o efeito da rigidez da junta colada na resistência da junta, tendo concluído que existe um valor de rigidez do remendo a partir da qual a resistência da junta decresce devido ao aumento das tensões normais segundo a espessura nas placas. É também estudada a influência da tensão e deformação de rotura no adesivo na

resistência da junta. Outros autores, como Davis et al. [2], efectuam um estudo semelhante, tendo obtido a distribuição de tensões de corte do longo do adesivo. Esta distribuição de tensões, verificável genericamente para solicitações de tracção ou compressão, caracteriza-se pelo aparecimento de picos de tensões nas extremidades do comprimento de sobreposição, o que torna mais complicado a análise destas juntas. Estes autores verificam também que, devido a este facto, se desenvolve uma zona plastificada nas extremidades do adesivo que se estende para a zona intermédia do mesmo com o aumento da carga aplicada. Em [3] são estudados por elementos finitos tridimensionais os vários parâmetros que influenciam a resistência mecânica de laminados compósitos com reparações. Faz-se uma comparação das tensões normais na direcção da solicitação para diferentes espessuras do remendo. Os autores constataram uma diminuição dos picos de tensão devido à introdução dos remendos, independentemente da espessura destes. A partir de uma espessura do remendo de 2 mm, não se observa diferença significativa nas tensões axiais segundo a direcção da solicitação. O preenchimento do furo com adesivo (denominado na literatura por “*plug*”) reduz significativamente o valor do factor de concentração de tensões, para valores tão reduzidos como 1,17. Ganesh et al. [4] analisam o efeito da utilização de reparações por sobreposição simples em que as placas possuem módulo E variável segundo a direcção da solicitação e ao longo do comprimento de sobreposição. Comparam-se as distribuições de tensões ao longo da junta para vários tipos de gradação do módulo E . Os resultados obtidos são confrontados com os relativos a juntas em que as placas apresentam módulo E constante. Li et al. [5] foca uma análise bidimensional por elementos finitos de juntas de sobreposição simples em compósito reforçado com fibras de carbono e solicitadas à tracção, considerando não linearidade geométrica. São usadas espessuras de adesivo de 0,13 e 0,26 mm, modelando a espessura de 0,13 mm por dois e seis elementos e a espessura de 0,26 mm

por dez elementos. Os resultados são posteriormente comparados com os obtidos experimentalmente por Tsai et al. [6] Avaliam-se as distribuições de tensões normais segundo a espessura e de corte no adesivo e placas, bem como a dependência destas distribuições com alguns parâmetros geométricos e materiais, como por exemplo a espessura e módulo de elasticidade do adesivo. Osnes et al. [7] investigam para que tipos de solicitação ou deslocamentos prescritos os efeitos não lineares geométricos são mais significativos, ao comparar as análises efectuadas com análises idênticas mas lineares. Os autores estudam juntas de sobreposição simples em CFRP, aço e mistas (no sentido em que cada placa ligada é de um dos materiais apresentados). Os resultados são ainda comparados com os obtidos por algumas teorias analíticas clássicas. Um desenho de junta de sobreposição simples inovador é apresentado em Ávila et al. [8], que considera uma junta de sobreposição simples em que na zona de ligação as duas placas apresentam uma geometria ondulada. O estudo apresentado inclui componentes numérica e experimental, chegando-se à conclusão que é possível aumentar a resistência da junta em cerca de 40% com este tipo de solução. Uma comparação entre juntas coladas, rebitadas e coladas/rebitadas é efectuada por Chan et al. [9] para juntas de sobreposição simples, por via numérica e experimental. Os autores chegam à conclusão que a resistência destas juntas é muito dependente de factores como a sequência de empilhamento, a preparação superficial das superfícies e a natureza anisotrópica das placas. Os modelos numéricos são criados no software ANSYS usando elementos finitos sólidos tridimensionais. No que diz respeito às juntas coladas, são calculadas as tensões normais na direcção da solicitação nas placas base, observando-se que estas são aproximadamente constantes nas zonas afastadas da ligação. Boss et al. [10] avaliam o efeito da utilização de juntas cujas placas, em CFRP, possuem rigidez variável. Esta rigidez variável é conseguida de duas formas distintas. Na primeira, as placas apresentam

um módulo E variável ao longo do seu comprimento, ao passo que na segunda a variação de rigidez é obtida por alteração da própria espessura das placas. A primeira solução é conseguida por modificação do ângulo segundo o qual as fibras se encontram entrelaçadas entre si. Para o estudo realizado, é utilizado o Método de Elementos Finitos para obter as distribuições de tensões que permitem comparar as duas soluções. De uma forma geral, a gradação de rigidez apresenta uma redução das tensões de corte no adesivo mais pronunciada. No entanto, observou-se ser possível combinar as duas soluções propostas para a obtenção de uma junta de características mecânicas superiores. Gonçalves *et al.* [11] apresentam uma análise numérica de tensões em juntas adesivas de sobreposição simples. O modelo utilizado considera não linearidades material e geométrica usando elementos sólidos hexaédricos e elementos de interface especialmente desenvolvidos. Os elementos de interface permitem a determinação das tensões nas interfaces placa/adesivo e a meio da espessura do adesivo. Os autores concluem que a resistência de uma junta colada pode ser prevista com rigor quando se assume um comportamento elasto-plástico para os substratos. O trabalho apresentado por Magalhães *et al.* [12] baseia-se numa análise por elementos finitos bidimensionais de juntas coladas de materiais compósitos $(0_4,90_4)_S$ em sobreposição simples. O modelo desenvolvido utiliza elementos de interface de seis nós compatíveis com os elementos sólidos de oito nós do ABAQUS®. Os elementos de interface são colocados entre as placas e o adesivo, a meio da espessura do adesivo e nas interfaces entre camadas diferentemente orientadas nas placas. O objectivo da utilização dos elementos de interface é o de obter os campos de tensões nas interfaces entre materiais distintos, o que não é possível usando apenas os elementos convencionais. Foram obtidas as distribuições de tensões nas referidas interfaces para juntas de GFRP, CFRP e mistas.

O presente trabalho é dedicado ao estudo numérico das componentes de tensões e resistência residual à tracção de reparações

efectuadas por sobreposição simples e dupla em materiais compósitos reforçados com fibras de carbono, utilizando o código comercial de elementos finitos ABAQUS®. Foi ainda avaliado o efeito de alguns parâmetros de concepção tais como o comprimento de sobreposição, espessura do adesivo e do remendo na resistência da reparação. O objectivo desta última análise é a optimização da geometria das reparações, conducente à máxima resistência residual após danificação.

2 – DESCRIÇÃO DO TRABALHO

O trabalho realizado pressupõe a existência de uma placa de material compósito danificada. A reparação consiste na remoção do material danificado pela execução de um furo circular e posterior aplicação de um ou mais remendos na referida zona. Esta situação é aproximada ao caso bidimensional da Fig 1. Recorreu-se a uma análise bidimensional que, sendo reconhecidamente uma aproximação à realidade, traduz com rigor os fenómenos envolvidos, uma vez que as componentes fundamentais do estado de tensão estão retratadas na abordagem efectuada. São simuladas placas sujeitas a reparação por colocação de remendo em apenas um dos lados (sobreposição simples) ou em ambos os lados (sobreposição dupla). Utilizam-se elementos finitos quadrangulares de oito nós de estado plano de tensão para a modelação das placas, remendos e adesivo. As condições fronteira traduzem-se no encastramento de uma das extremidades da reparação e aplicação de um deslocamento

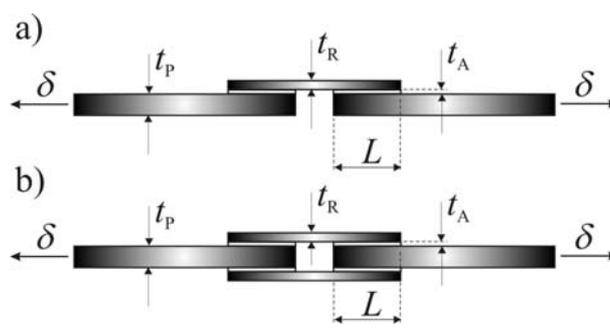


Fig 1 – Reparação por sobreposição simples (a) e dupla (b).

à extremidade oposta. As malhas de elementos finitos utilizadas são apresentadas nas Fig 2 e Fig 11, para reparações por sobreposição simples e dupla, pela ordem respectiva. Existe refinamento de malha ao longo da espessura do adesivo e nas extremidades do mesmo.

Tanto as placas como os remendos apresentam as camadas constituintes a 0^0 , ou seja, alinhadas com a direcção do deslocamento aplicado.

Avalia-se, para os dois tipos de geometrias apresentadas, a resistência residual do conjunto após reparação, bem

como os vários tipos de tensões que condicionam a integridade da ligação, como as tensões de corte e tensões normais segundo y no adesivo, estas últimas de extrema importância devido ao facto de propiciarem a delaminação entre camadas. São também analisados os efeitos da alteração da geometria na resistência da reparação, onde são destacados a alteração no comprimento de sobreposição entre placas e remendo e a alteração na rigidez do remendo. É também efectuada a comparação entre as reparações de sobreposição simples e dupla.

Tabela 1 – Propriedades geométricas e elásticas das placas e remendos [13].

Placas e remendos		Adesivo		
$E_1^*=1,09E+05\text{MPa}$	$\nu_{12}=0,342$	$G_{12}=4315\text{MPa}$	$\sigma_{ced}=12,7\text{MPa}$	$\sigma_{rot}=16,7\text{MPa}$
$E_2=8819\text{MPa}$	$\nu_{13}=0,342$	$G_{13}=4315\text{MPa}$	$E=4\text{GPa}$	$\epsilon_{rot}=0,1$
$E_3=8819\text{MPa}$	$\nu_{23}=0,380$	$G_{23}=3200\text{MPa}$	$\nu=0,35$	

Placas	Remendo	Adesivo
Largura: $w=25\text{mm}$	Espessura: $t_R=2\text{mm}$	Espessura: $t_A=0,2\text{mm}$
Espessura: $t_p=4\text{mm}$	C. sobreposição: $L=15\text{mm}$	
Espaçamento entre placas: $e=5\text{mm}$		
σ_{ced} de uma camada a 0^0 : $1,3\text{GPa}$		

* 1,2,3 – Direcções de ortotropia da camada de compósito

3 – ANÁLISE DE RESULTADOS

Numa fase inicial deste trabalho, consideram-se duas placas de compósito ligadas por um remendo do mesmo material em sobreposição simples e dupla (Fig 1). O objectivo principal consiste em efectuar um estudo no sentido de otimizar a reparação, isto é, determinar os parâmetros geométricos óptimos de forma a maximizar a resistência da reparação para as duas configurações referidas.

3.1 – Sobreposição simples

A Fig 2 mostra a distribuição de tensões normais segundo x para a reparação por sobreposição simples. Uma primeira abordagem permite constatar que o remendo se encontra sujeito a uma sollicitação mista de tracção e flexão. A flexão surge pelo facto das forças de contacto entre remendo e placas serem excêntricas, o que origina o aparecimento de momentos flectores relativamente aos centroides das secções

rectas das placas e do remendo. Constatase assim que esta flexão provoca uma concentração de tensões na face inferior do remendo, onde as tensões de tracção, devido ao esforço axial e ao momento flector, apresentam o mesmo sentido. Verifica-se também que a rotura do conjunto reparado ocorre pela zona do adesivo, pois a sua plastificação acontece antes de se atingirem os valores de resistência das placas e do remendo.

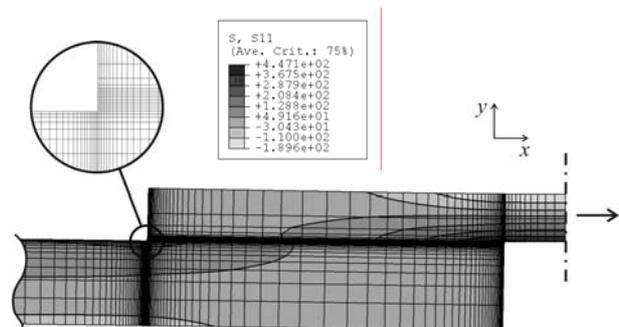


Fig 2 – Distribuição de tensões normais segundo x para sollicitação de tracção.

As distribuições das tensões normais segundo y e de corte a meio da espessura do adesivo são apresentadas nas Fig 3 e Fig 4, respectivamente. Observa-se que a distribuição de tensões normais segundo y evidencia dois picos tractivos nas duas extremidades do comprimento de sobreposição, que propiciam delaminagens entre camadas das placas ou remendo. Observam-se concentrações de tensões de corte nas mesmas extremidades, encontrando-se a zona intermédia com um nível de tensões inferior.

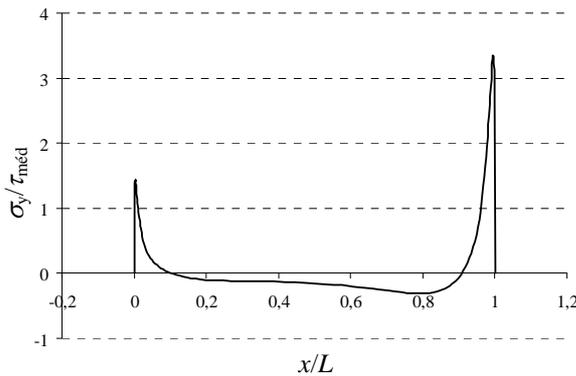


Fig 3 – Tensões normais segundo y a meio da espessura do adesivo.

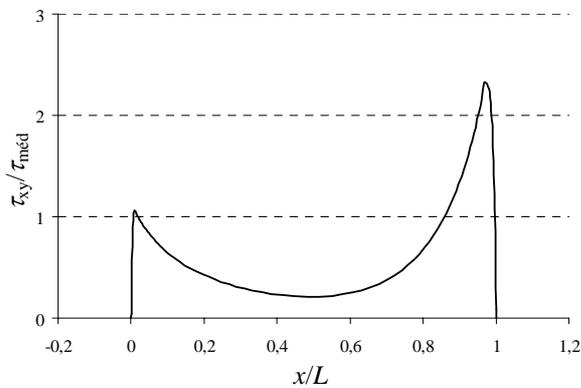


Fig 4 – Tensões de corte a meio da espessura do adesivo.

As figuras seguintes comparam, em regime elástico (antes do início da plastificação do adesivo), as tensões normais segundo y e de corte em cinco localizações distintas. A Fig 5 mostra as localizações referidas, sendo estas na placa entre as duas camadas mais próximas do adesivo (P1), na interface entre as placas e o adesivo (P2), na linha intermédia do adesivo (P3), na interface entre o adesivo e o remendo (P4) e no remendo entre as duas

camadas mais próximas do adesivo (P5). A Fig 6 representa a distribuição da tensões normais segundo y nas referidas localizações, normalizadas pela tensão de corte média a meio da espessura do adesivo ($\tau_{méd}$). Comprova-se que as tensões segundo y atingem o seu valor mais elevado na interface entre o adesivo e o remendo. Como facilmente se observa, para propriedades idênticas do adesivo e do compósito segundo a direcção transversa, o colapso da reparação ocorre próximo desta interface.

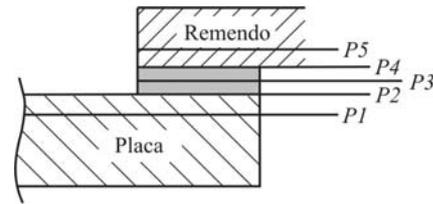


Fig 5 – Localizações para definição das distribuições de tensões σ_y e τ_{xy} .

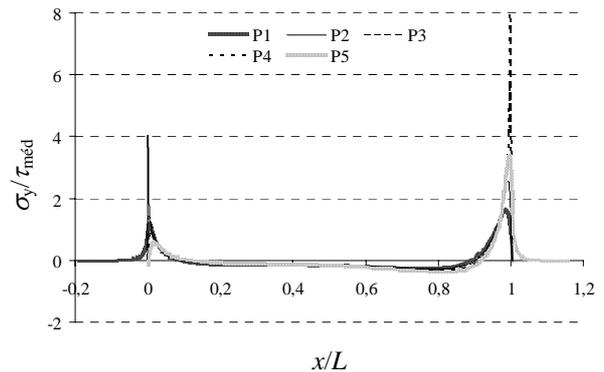


Fig 6 – Comparação das tensões normais segundo y em cinco localizações distintas.

Comparando as tensões de corte nas mesmas localizações, normalizadas pela tensão de corte média a meio da espessura do adesivo ($\tau_{méd}$), constata-se que estas são igualmente mais elevadas na interface entre o adesivo e o remendo (Fig 7). Assim, para propriedades idênticas do adesivo e do compósito segundo a direcção transversa, o colapso da reparação ocorrerá nas proximidades desta interface.

O comprimento de sobreposição entre as placas e o remendo é um dos parâmetros geométricos que mais influencia a resistência da reparação. Verifica-se a existência de um aumento não proporcional

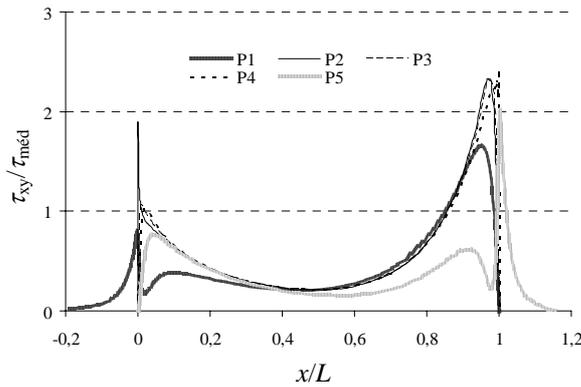


Fig 7 – Comparação das tensões de corte em cinco localizações distintas.

da tensão remota de cedência com o comprimento de sobreposição (Fig 8). A tensão remota de cedência (definida como σ_C) é a tensão remota aplicada às placas conducente ao início da plastificação dos pontos mais solicitados do adesivo (nas extremidades do mesmo). O aumento na tensão remota de colapso é mais acentuado para os menores comprimentos de sobreposição, sendo reduzido para valores deste comprimento acima dos 15 mm. Inclusivamente, ao incrementar o comprimento de sobreposição de 15 para 20 mm, o aumento percentual na tensão remota de colapso é nulo. Na Fig 8 são representados a tensão remota de cedência (σ_C), o aumento percentual de tensão de colapso ($\Delta\sigma_C$) e o rendimento da reparação (η), todos em função do comprimento de sobreposição entre placas e remendo. O rendimento é considerado como sendo igual à razão entre a tensão remota de colapso após reparação e a tensão remota para a placa não danificada.

Analisando o efeito da alteração da espessura do adesivo, verifica-se numericamente que a tensão remota correspondente ao início da plastificação aumenta com a diminuição da espessura do adesivo (Fig 9). Todavia, e tendo em conta o comportamento dúctil do adesivo considerado, a tensão correspondente ao colapso plástico total da reparação não é influenciada pela espessura do adesivo. É introduzido o conceito de tensão remota de colapso plástico (definida como σ_{CP} e correspondente ao máximo valor da carga

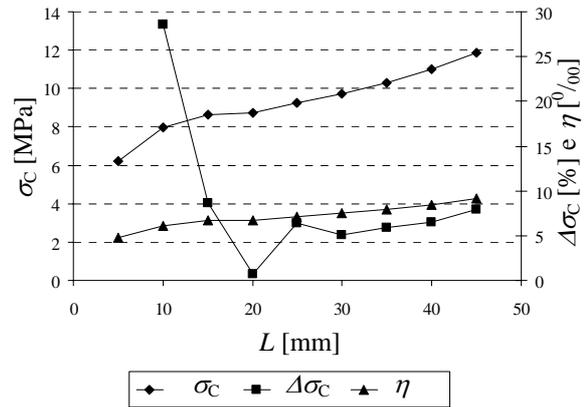


Fig 8 – Tensão remota de cedência em função do comprimento de sobreposição.

sustentada pelo provete que corresponde à plastificação total do adesivo). Convém referir que este comportamento não ocorreria caso estivessemos em presença de um adesivo de carácter mais frágil [14]. A única diferença encontra-se relacionada com o aumento de deslocamento admissível correspondente à plastificação total. De facto, à medida que aumenta a espessura de adesivo, aumenta o deslocamento imposto que provoca a plastificação completa. Assim, o aumento da espessura do adesivo provoca um aumento de flexibilidade da reparação. Para solicitações ao conjunto colado do tipo deslocamentos impostos, o aumento da espessura do adesivo provoca um aumento na resistência da reparação. Para solicitações do tipo força imposta nas extremidades, a espessura do adesivo não tem relevância na plastificação total. Convém realçar que o efeito da espessura também se pode fazer sentir por questões associadas ao fabrico das reparações. Na realidade observa-se que espessuras muito reduzidas de adesivo não garantem a molhagem das superfícies a ligar, enquanto que espessuras muito elevadas levam ao aparecimento de porosidades e outros defeitos. Ambos os casos provocam a diminuição da resistência da reparação.

Ao estudar o efeito de diferentes espessuras do remendo (Fig 10), verificou-se que este parâmetro não influencia significativamente a resistência da reparação para valores de t_R/t_P compreendidos entre os 50 e 100%, devido ao facto da rotura ocorrer por corte no adesivo. De facto, a tensão

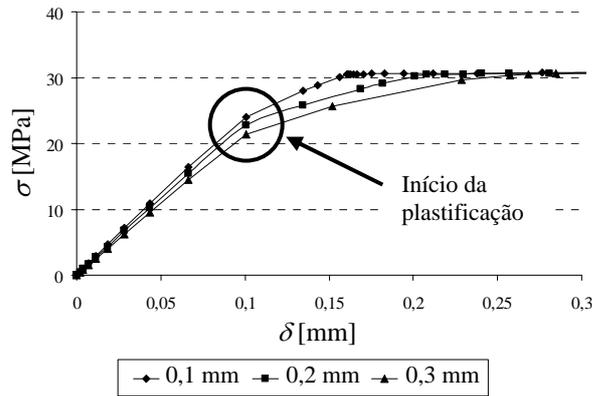


Fig 9 – Evolução da tensão remota com o deslocamento aplicado.

no remendo atinge, no caso mais crítico, cerca de 30% do valor da respectiva tensão de cedência. Apesar deste parâmetro não ter efeito na resistência da reparação, contribui para o aumento de rigidez e conseqüente diminuição das deformações com o aumento da espessura do remendo. Observou-se que as tensões normais segundo y se alteram ligeiramente ao aumentar a espessura do remendo. De facto, o pico de tensões na extremidade mais afastada do centro da reparação diminui, enquanto que o pico de tensões na extremidade mais próxima do centro da reparação aumenta. Sabe-se por outro lado que é o pico de tensões na extremidade mais próxima do centro da reparação aquele que mais propicia a delaminação entre camadas com diferentes orientações. Como tal, conclui-se que o aumento da espessura do remendo, embora não diminua a tensão remota de colapso, não influenciando assim de forma directa a resistência da reparação, provoca um aumento nas tensões segundo a espessura nas placas, propiciando assim a delaminação (Fig 10). A tensão remota de colapso é idêntica e independente da espessura do remendo.

3.2 – Sobreposição dupla

A Fig 11 mostra a distribuição de tensões normais segundo x para a reparação por sobreposição dupla. Observa-se um aumento da tensão remota de cedência notoriamente superior ao dobro (razão de áreas de corte entre reparações por sobreposição simples e dupla). A diminuição significativa do fenómeno de flexão observado em sobreposi-

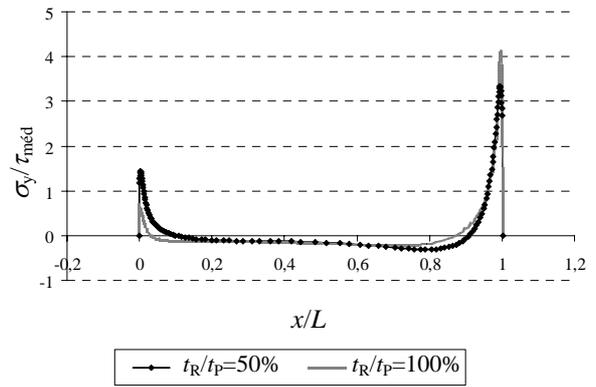


Fig 10 – Tensões normais segundo y a meio da espessura do adesivo em função da espessura do remendo.

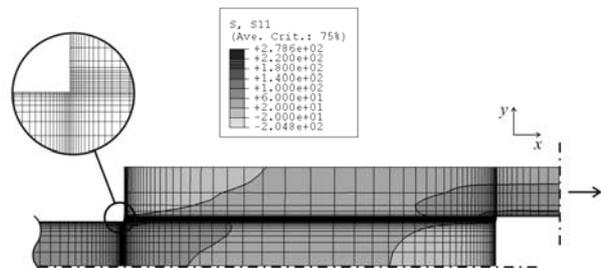


Fig 11 – Distribuição de tensões normais segundo x para solicitação de tracção.

ção simples justifica a diferença observada (Fig 11).

As figuras seguintes evidenciam as distribuições de tensões normais segundo y e de corte em cinco localizações distintas na reparação (Fig 5). A Fig 12 mostra as distribuições de tensões normais segundo y , normalizadas pela tensão de corte média a meio da espessura do adesivo ($\tau_{méd}$). Em todos os casos pode ser observado que existem dois picos destas tensões nas extremidades do comprimento de sobreposição

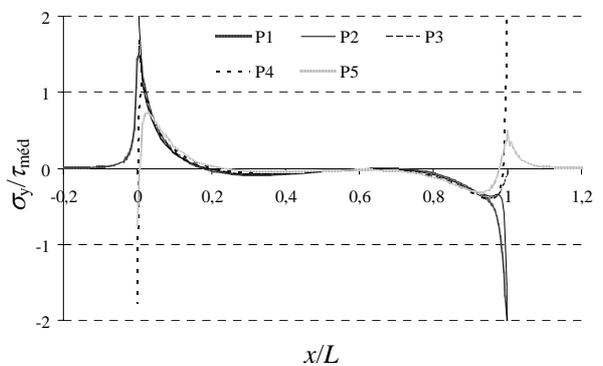


Fig 12 – Distribuições das tensões normais segundo y em diferentes localizações.

entre placas e remendo. Comparando estas distribuições de tensões, observa-se que os picos tractivos apresentam a sua magnitude máxima nas interfaces entre placas/adetivo e adesivo/remendo. Para propriedades idênticas entre todas estas regiões, a rotura provavelmente tem lugar nas ou próximo das interfaces acima mencionadas.

Comparando as distribuições de tensões de corte normalizadas pela tensão de corte média a meio da espessura do adesivo ($\tau_{méd}$), nas mesmas localizações acima mencionadas (Fig 13), observa-se igualmente dois picos nas extremidades do comprimento de sobreposição. Também nesta situação os valores mais elevados da referida tensão são superiores nas interfaces entre placas/adetivo e adesivo/remendo, reforçando a ideia já apresentada atrás relativamente à rotura da reparação.

Na Fig 14 são representados a tensão remota de cedência (σ_C), o aumento percentual de tensão de colapso ($\Delta\sigma_C$) e o rendimento da reparação (η), todos em função do comprimento de sobreposição entre placas e remendo. O rendimento apresentado pressupõe um laminado unidireccional com as fibras orientadas segundo a direcção da solicitação e as propriedades descritas na Tabela 1. O resultado é de extrema importância, pois constata-se que, até um determinado valor deste parâmetro, o aumento de resistência mecânica da reparação com o comprimento de sobreposição é praticamente proporcional, diminuindo a partir deste valor, mantendo-se deste comprimento. Na Fig 15 são traçadas as tensões de corte no adesivo ao longo do comprimento de sobreposição entre placas e remendo em regime elástico, ou seja, não admitindo plastificação em nenhum ponto do adesivo. Apresentam-se nove casos, correspondentes a variação de L entre 5 e 45 mm. A Fig 16 permite comparar os processos de plastificação no adesivo para reparações com sobreposição de 15 e 45 mm, desde o início da plastificação (curvas apresentadas na Fig 15), incrementando em ambos os casos o deslocamento aplicado em 5 μ m em cada curva suplementar.

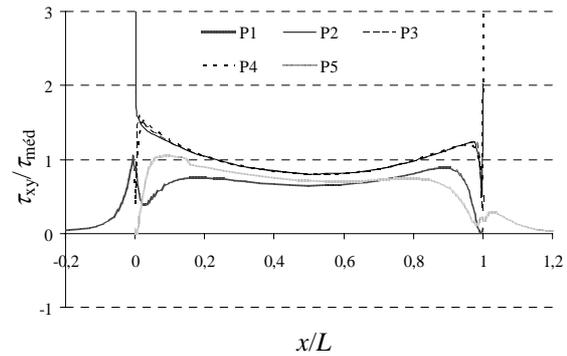


Fig 13 – Distribuições das tensões de corte em diferentes localizações.

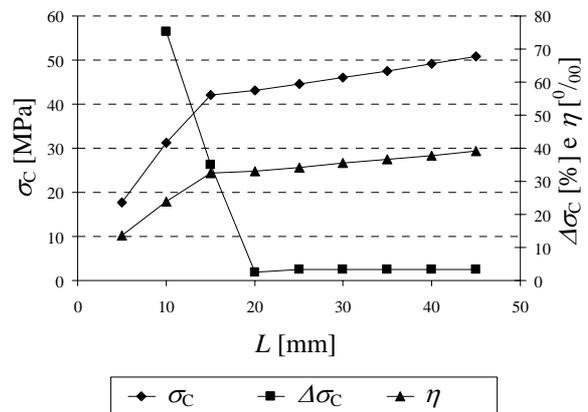


Fig 14 – Tensão remota de cedência em função do comprimento de sobreposição.

Facilmente se observa que, considerando aceitável o comportamento plástico, já existe uma diferença notória entre os dois comprimentos de sobreposição analisados. Assim, para um incremento de deslocamento desde o início da plastificação correspondente a 25 μ m a reparação com $L=15$ mm já se encontra completamente plastificada e sem capacidade de transmitir a força aplicada, enquanto que a reparação com $L=45$ mm apenas apresenta plastificação ligeira nas extremidades. Conclui-se assim que, admitindo comportamento plástico do adesivo, existe uma diferença significativa para os diferentes comprimentos de sobreposição.

A Fig 17 representa a tensão remota de colapso plástico (σ_{CP}), sua variação percentual ($\Delta\sigma_C$) e rendimento (η) em função do comprimento de sobreposição.

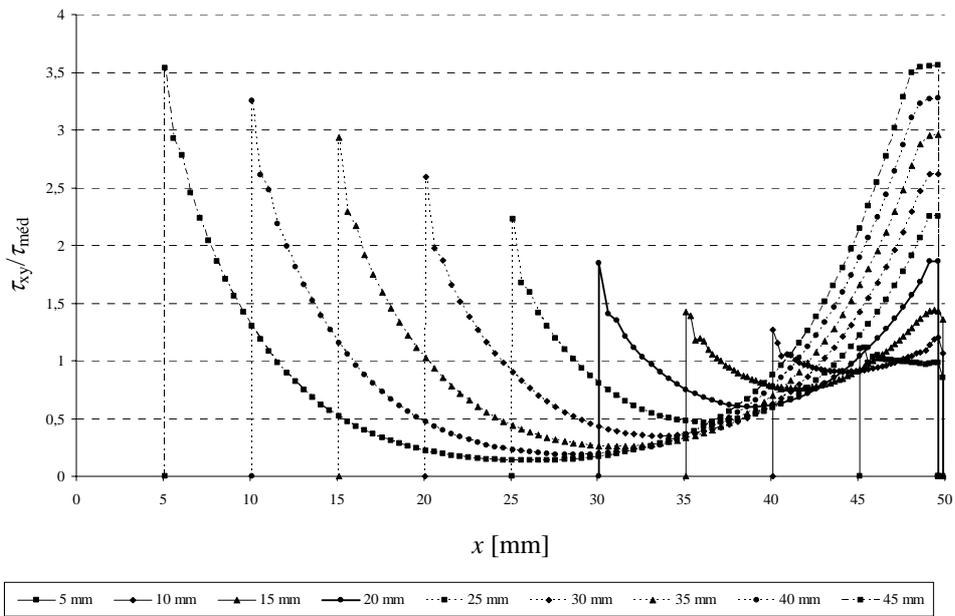


Fig 15 – Distribuição de tensões de corte no adesivo para vários comprimentos de sobreposição.

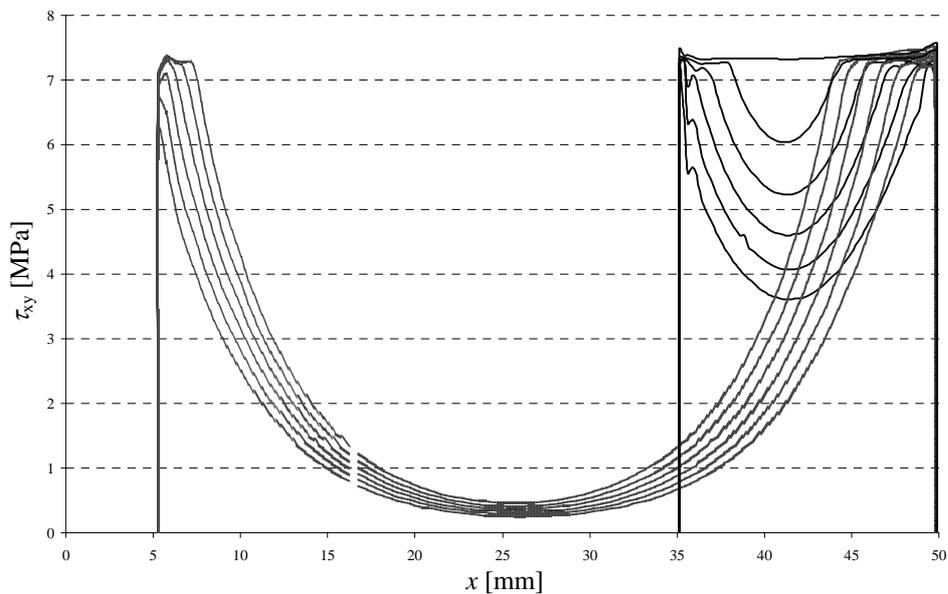


Fig 16 – Distribuição de tensões de corte para comprimentos de sobreposição de 15mm e 45mm.

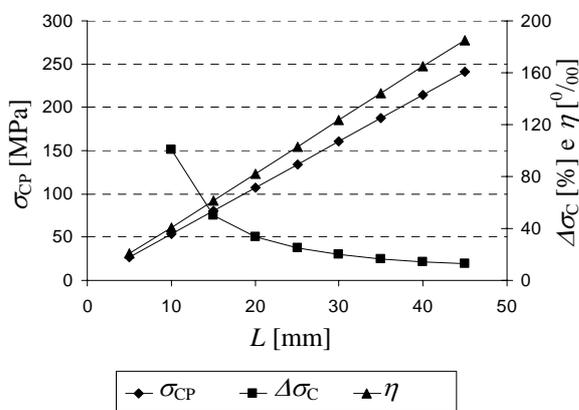


Fig 17 – Tensão remota de colapso plástico em função do comprimento de sobreposição.

Neste caso a tensão remota de colapso plástico é aproximadamente proporcional ao comprimento de sobreposição.

Ao analisar as tensões normais segundo y em sobreposição dupla, verificam-se conclusões semelhantes ao caso anteriormente abordado, tendo-se constatado em primeiro lugar que, relativamente à sobreposição simples, há uma diferença relevante que pode induzir delaminagens. No caso de sobreposição dupla, e devido à diminuição significativa do fenómeno de flexão que se observa na sobreposição simples, o pico de tensões normais segundo y de tracção na extre-

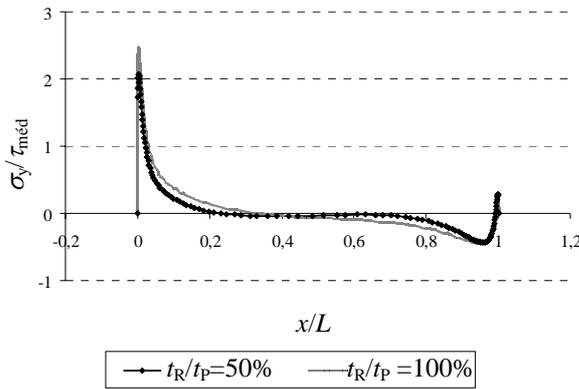


Fig 18 – Tensões normais segundo y no adesivo em função da espessura do remendo.

midade mais próxima do centro da reparação deixa de ser tractiva, passando a ser compressiva. Este facto é importante na medida em que as tensões normais compressivas não propiciam a delaminação entre camadas diferentemente orientadas, o que constitui uma vantagem das reparações com sobreposição dupla (Fig 18).

O efeito da rigidez do remendo na tensão remota de colapso evidencia resultados de alguma forma semelhantes àqueles obtidos para sobreposição simples. De uma forma geral, a resistência da reparação é sempre idêntica e independente da espessura do remendo, pois como já foi visto, a rotura da reparação ocorre por corte no adesivo. No entanto, para valores de espessura do remendo extremamente elevados (da ordem de grandeza da espessura das placas) as tensões normais segundo y nas placas aumentam de tal forma que a rotura pode deixar de ocorrer por corte no adesivo e pode passar a verificar-se por delaminação entre camadas diferentemente orientadas. Se tal suceder, observa-se uma redução efectiva da resistência da reparação para espessuras de remendo extremamente elevadas, devido à alteração no mecanismo de rotura. Para espessuras do remendo extremamente reduzidas (quando a tensão axial no remendo excede o seu valor limite (Tabela 1)), a rotura na reparação deixa de ocorrer por corte no adesivo e passa a ter lugar por colapso axial do remendo, devido à espessura extremamente reduzida deste (Fig 19). O resultado obtido é comparado com o apresentado em [1], onde foi estudada a mesma situação em compósito vidro-epóxico.

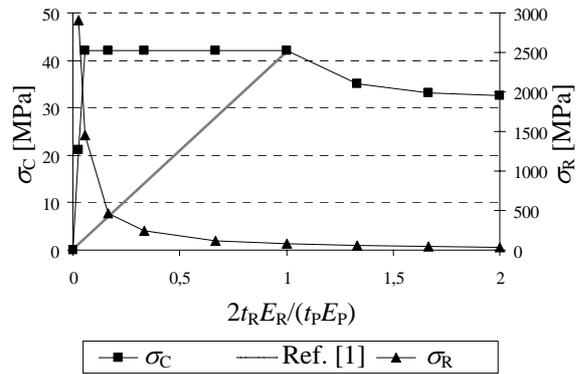


Fig 19 – Tensão remota de cedência em função da espessura do remendo.

É também avaliada a influência da tensão de cedência ao corte do adesivo. Constata-se a existência de uma relação de proporcionalidade entre a tensão de cedência ao corte do adesivo e a tensão remota de colapso da reparação (Fig 20).

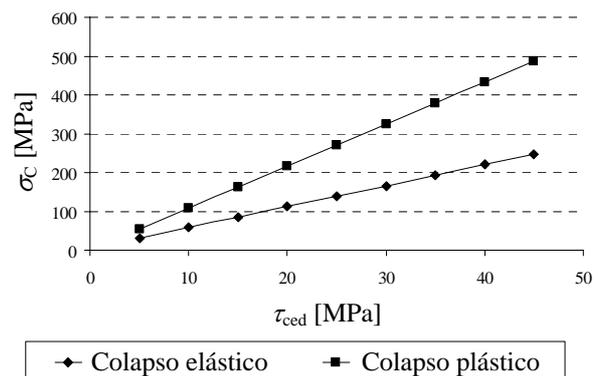


Fig 20 – Tensão remota de cedência em função da tensão de cedência ao corte do adesivo.

3.3 Comparação entre sobreposição simples e sobreposição dupla

A primeira comparação efectuada entre a sobreposição simples e dupla diz respeito à tensão remota de cedência e rendimento em função do comprimento de sobreposição (Fig 21).

A diferença entre os dois casos considerados é notória e superior à razão de áreas de sobreposição entre os dois tipos de reparações (em sobreposição dupla a área resistente é o dobro da existente em sobreposição simples). No entanto, em sobreposição simples, e devido ao

fenómeno de flexão acentuada (Fig 2) observa-se a existência de concentração de tensões de corte altamente localizada na extremidade do comprimento de sobreposição mais próximo do centro da reparação (Fig 4), que condiciona bastante a resistência da reparação. Em ambos os casos verifica-se uma certa dependência da resistência da reparação com o comprimento de sobreposição, nomeadamente até um comprimento de sobreposição de 15mm. Para as propriedades do adesivo consideradas, o rendimento máximo obtido é de cerca de 4% para sobreposição dupla e 1% para sobreposição simples. A utilização posterior de um adesivo de alta resistência e sequências de empilhamento com propriedades inferiores segundo a direcção da solicitação (nomeadamente laminados quase isotrópicos) permitirá obter rendimentos bastante superiores.

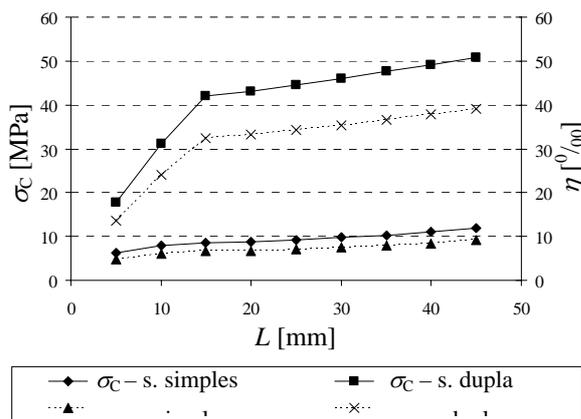


Fig 21 – Comparação entre sobreposição simples e dupla – tensão remota de cedência.

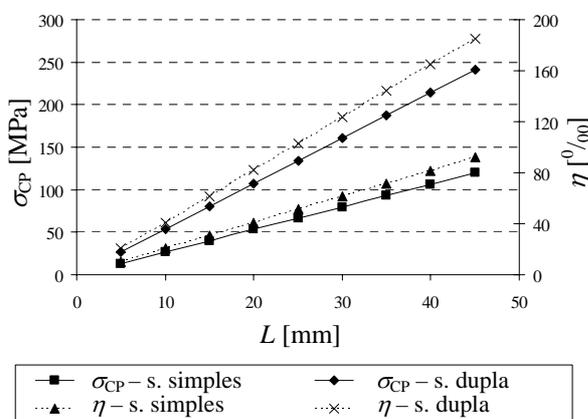


Fig 22 – Comparação entre sobreposição simples e dupla – tensão de colapso plástica.

A Fig 22 representa a mesma comparação, mas considerando a tensão de colapso plástica da reparação. Neste caso a tensão remota de colapso é o dobro em sobreposição dupla, quando comparada com a sobreposição simples, devido ao facto da área resistente do adesivo também o ser.

Comparando as tensões de corte ao longo do adesivo, em sobreposição simples (Fig 4) e dupla (Fig 15), comprova-se que no primeiro caso há uma concentração destas tensões numa das extremidades do comprimento de sobreposição, enquanto que no segundo caso esta concentração ocorre em ambas as extremidades. Observa-se também que, para o mesmo comprimento de sobreposição (15mm) os picos de tensão na reparação de sobreposição dupla são inferiores ao pico de tensão na reparação de sobreposição simples. Esta diferença faz com que, em sobreposição simples, a tensão remota de cedência da reparação seja penalizada por uma concentração de tensões mais pronunciada que a reduz significativamente.

As tensões normais segundo y constituem outra diferença de relevo nestas duas configurações de reparação, pois enquanto que em sobreposição simples (Fig 10) se observam dois picos de tracção em ambas as extremidades, em sobreposição dupla (Fig 18), e devido à diminuição significativa do fenómeno de flexão que se observa na sobreposição simples, o pico de tensões normais segundo y de tracção na extremidade mais próxima do centro da reparação deixa de ser de tracção, passando a ser de compressão. Este facto justifica a menor probabilidade de ocorrência de delaminagens em reparações por sobreposição dupla, comparando com reparações por sobreposição simples.

A influência da rigidez do remendo na resistência da reparação provou ser similar para os dois tipos de reparação. Em sobreposição simples (Fig 10) o aumento da rigidez do remendo, induzido pelo aumento de espessura t_R , provoca um acréscimo do pico de tensões mais próximo do centro da reparação, propiciando assim a

delaminação. Em sobreposição dupla (Fig 18) o mesmo aumento provoca um acréscimo do pico de tensões de tracção na extremidade do comprimento de sobreposição mais afastada do centro da reparação, aumentando assim o risco de delaminação. Assim, em ambos os casos, o aumento da espessura do remendo é prejudicial a partir de determinado valor.

4 – RENDIMENTO DA REPARAÇÃO

Para o estudo do rendimento da reparação é utilizado um adesivo de alta resistência, diferente do utilizado inicialmente, no sentido de obter valores de rendimento mais elevados. A Fig 23 representa o rendimento da reparação em sobreposição dupla para várias sequências de empilhamento das placas (Tabela 2), sequência de empilhamento do remendo de (0₁₆) e reparação otimizada (utilizando as indicações obtidas pelos gráficos anteriores). O critério de rotura utilizado para a definição dos valores de resistência dos laminados é o critério de Tsai-Hill. São considerados cedência (CE, correspondente ao início da

plastificação) e colapso elasto-plástico (CEP, correspondente ao valor máximo da carga sustentada). É apresentado também, para cada caso, o comprimento de sobreposição entre placas e adesivo necessário para a obtenção do rendimento máximo da reparação.

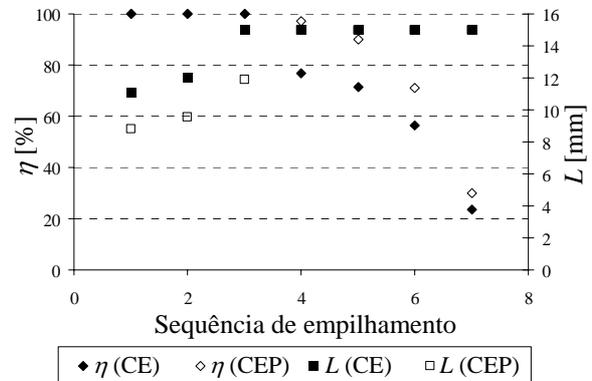


Fig 23 – Rendimento da reparação colada em sobreposição dupla.

A Tabela 2 representa as propriedades do adesivo de alta resistência utilizado neste estudo (Araldite 2011), bem como as sequências de empilhamento utilizadas. As propriedades geométricas e elásticas para as placas e remendo são idênticas às apresentadas na Tabela 1.

Tabela 2 – Propriedades geométricas e sequências de empilhamento [13].

Adesivo	Sequências de empilhamento	
$E=3,4\text{GPa}$	1 - (0 ₂ /75 ₂ /-75 ₂ /90 ₂) _{2S}	5 - (0 ₂ /30 ₂ /-30 ₂ /90 ₂) _{2S}
$\nu=0,35$	2 - (0 ₂ /60 ₂ /-60 ₂ /90 ₂) _{2S}	6 - (0 ₂ /15 ₂ /-15 ₂ /90 ₂) _{2S}
$\tau_{\text{ced}}=40\text{MPa}$	3 - (0 ₂ /45 ₂ /-45 ₂ /90 ₂) _{2S}	7 - (0 ₃₂)
$\tau_{\text{rot}}=52\text{MPa}$	4 - (0 ₂ /90 ₂) _{3S}	

Analisando o rendimento da reparação com sequências de empilhamento distintas constata-se que este é de 100%, ou seja, há restituição completa da resistência após danificação e reparação, para os laminados cujas sequências de empilhamento propiciam uma menor resistência segundo a direcção da sollicitação ou mesmo as quase-isotrópicas. Para as sequências de empilhamento que apresentam maior resistência segundo a direcção da sollicitação o rendimento não chega a 100%, sendo o valor mais baixo obtido para o laminado unidireccional (o laminado (0₃₂)), igual a cerca de 24% (cedência) ou 30%

(colapso plástico). Por outro lado, para estes últimos laminados é necessária a totalidade do comprimento de sobreposição inicial considerado (15 mm) para que o seu rendimento seja o indicado na Fig 23. Todavia, para aquelas sequências de empilhamento cujo rendimento é de 100%, o comprimento de sobreposição necessário para o obter é inferior a este valor limite, devido às propriedades inferiores das placas segundo a direcção da sollicitação, que fazem com que o mecanismo de rotura seja o colapso axial das placas e não o corte pelo adesivo.

A Fig 24 ilustra a influência da espessura das placas (t_p) no rendimento da reparação (considerando cedência), para as sete sequências de empilhamento apresentadas na Tabela 2. É notória a influência da espessura das placas no rendimento da reparação, uma vez que o aumento desta espessura provoca um acréscimo na resistência das placas antes da danificação.

Consequentemente, como a tensão remota aplicada que provoca o colapso do adesivo não é influenciada pela espessura das placas, o aumento da referida espessura provoca a diminuição da razão tensão remota de colapso após reparação/tensão remota de colapso antes da danificação. Conclui-se assim que o rendimento de placas de compósito reparadas por sobreposição (simples ou dupla) é bastante influenciado pela espessura das mesmas. Esta limitação observada neste tipo de reparações pode ser ultrapassada utilizando remendos embebidos no material a reparar.

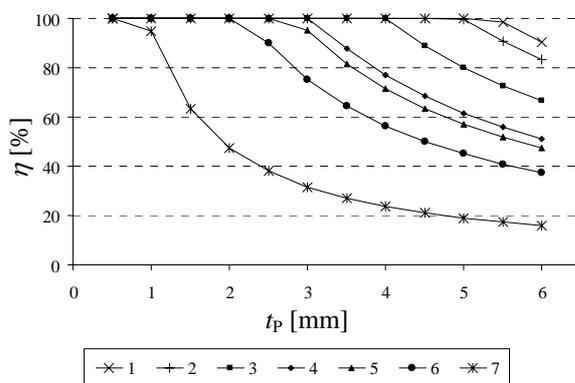


Fig 24 – Rendimento da reparação em função da espessura das placas.

5 – CONCLUSÕES

O objectivo deste trabalho consiste na avaliação da influência de parâmetros geométricos e materiais na resistência de placas de materiais compósitos reparadas por sobreposição simples e dupla, bem como na optimização destes mesmos parâmetros. Pretende-se assim obter a máxima resistência da reparação.

Para o caso de sobreposição simples constata-se que a distribuição de tensões

normais segundo y apresenta na zona de sobreposição dois picos de tracção que propiciam a ocorrência de delaminagens. Estes picos de tensões são superiores no adesivo relativamente às placas e remendo, o que significa que para propriedades idênticas do adesivo e do compósito segundo a direcção transversa, uma eventual rotura ocorrerá pelo adesivo. Analisando as tensões de corte na mesma zona, observam-se também dois picos destas tensões nas extremidades do adesivo, sendo a tensão de corte mais elevada no adesivo do que entre camadas das placas e remendo, justificando-se assim o colapso por corte no adesivo. Alterando o comprimento de sobreposição verifica-se a existência de um aumento não proporcional da tensão remota de cedência. Admitindo o colapso plástico da reparação, a resistência desta aumenta proporcionalmente ao comprimento de sobreposição.

Utilizando reparações de sobreposição dupla é possível incrementar significativamente a tensão remota de colapso da reparação, sendo este acréscimo superior ao aumento de área resistente no adesivo. Este facto observa-se devido à existência de um fenómeno de concentração de tensões de corte altamente localizado nas reparações de sobreposição simples, na extremidade do comprimento de sobreposição mais próximo do centro da reparação. Verificou-se que a tensão remota de cedência se mantém praticamente constante a partir de determinado valor de comprimento de sobreposição (15 mm). Conclui-se assim que é inútil a utilização de comprimentos de sobreposição superiores. Considerando a tensão de colapso plástico, a resistência da reparação aumenta proporcionalmente ao comprimento de sobreposição e é sensivelmente igual ao dobro da resistência obtida em sobreposição simples.

Comparando as reparações de sobreposição simples com as de sobreposição dupla verifica-se que a diminuição acentuada do fenómeno de flexão nestas últimas transforma as tensões normais de tracção segundo y , na extremidade mais próxima do centro da reparação, em tensões compressivas,

diminuindo assim a tendência para a delaminação. Observou-se, por outro lado, que a rigidez dos remendos deve ser idêntica à rigidez das placas, de forma a maximizar a resistência da reparação. Para valores de rigidez dos remendos superiores, verifica-se uma diminuição da resistência da reparação devido às elevadas tensões normais segundo y que se geram nas placas, propiciando assim situações de delaminação.

Finalmente, é abordada a questão do rendimento de várias reparações com sequências de empilhamento distintas, tendo-se constatado que este é mais elevado para os laminados cujas sequências de empilhamento propiciam uma menor resistência segundo a direcção da solicitação ou mesmo as quase-isotrópicas (o colapso ocorre por rotura axial das placas e não pelo adesivo). Para as sequências de empilhamento que apresentam maior resistência segundo a direcção da solicitação o rendimento é inferior. Observa-se também que o rendimento de placas de compósito reparadas por sobreposição (simples ou dupla) é bastante influenciado pela espessura da mesmas. De facto, o aumento da espessura das placas diminui o referido rendimento, devido ao acréscimo na tensão de colapso do material não reparado. Esta limitação pode ser ultrapassada pela utilização de remendos embebidos no material a reparar.

REFERÊNCIAS

- [1]. Hu FZ, Soutis C. Strength prediction of patch repaired CFRP laminates loaded in compression. *Composites Science and Technology* 2000;60:1103-1114.
- [2]. Davis M, Bond D. Principles and practices of adhesive bonded structural joints and repairs. *International Journal of Adhesion & Adhesives* 1999;19:91-105.
- [3]. Soutis C, Duan DM. Compressive behaviour of CFRP laminates repaired with adhesively bonded external repairs. *Composite structures* 1999;45:289-301.
- [4]. Ganesh VK, Choo TS. Modulus graded composite adherends for single-lap bonded joints. *Journal of Composite Materials* 2002;36(14):1757-1767
- [5]. Li G, Lee-Sullivan P, Thring RW. Nonlinear finite element analysis of stress and strain distributions across the adhesive thickness in composite single-lap joints. *Composite Structures* 1999;46:395-403.
- [6]. Tsai MY, Morton J. The effect of a spew fillet on adhesive stress distributions in laminated composite single-lap joints. *Composite Structures* 1995;32:123-131.
- [7]. Osnes H, Andersen A. Computational analysis of geometric nonlinear effects in adhesively bonded single lap joints. *Composites Part B* 2003;34:417-427.
- [8]. Ávila AF, Bueno PO. An experimental and numerical study on adhesive joints for composites. *Composite Structures* 2004;64:531-537.
- [9]. Chan WS, Vedhagiri S. Analysis of composite bonded/bolted joints used in repairing. *Journal of Composite Materials* 2001;35(12):1045-1061.
- [10]. Boss JN, Ganesh VK, Lim CT. Modulus grading versus geometrical grading of composite adherends in single-lap bonded joints. *Composite Structures* 2003;62:113-121.
- [11]. Gonçalves JPM, de Moura MFSF, Magalhães AG, de Castro PMST. Application of interface finite elements to three-dimensional progressive failure analysis of adhesive joints. *Fatigue Fract Engng Mater Struct* 2003;26:479-486.
- [12]. Magalhães AG, de Moura MFSF, Gonçalves JPM. Evaluation of stress concentration effects in single-lap bonded joints of laminate composite materials. *International Journal of Adhesion & Adhesives* 2005;25:313-319.
- [13]. Campilho RDSG. Modelação da execução de reparações em materiais compósitos. Tese de Mestrado. FEUP. 2006.
- [14]. da Silva LFM, Rodrigues TNSS, Figueiredo MV, de Moura MFSF, Chousal JAG. Effect of adhesive type and thickness on single-lap joint strength. *Proceedings of the 29th Annual Meeting of the Adhesion Society, Inc. Jacksonville, Florida, pp. 253-255, February 19-22, 2006.*