

ESTUDO DA DELAMINAÇÃO ASSOCIADA À FURAÇÃO DE COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS DE VIDRO E DE SISAL

L.M. Durão¹, Daniel J. S. Gonçalves¹, João Manuel R. S. Tavares², Victor Hugo C. de Albuquerque³, Túlio H. Panzera⁴, A. Aguiar Vieira² e António Monteiro Baptista²

- 1: Inst. Superior de Eng. do Porto (ISEP) / Centro de Invest. e Desenvolvimento em Eng. Mecânica (CIDEM), e-mail: lmd@eu.ipp.pt; daniel.j.s.goncalves@gmail.com
- 2: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) / Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial (INEGI), e-mail: {tavares, avieira, amb}@fe.up.pt
- 3: Universidade de Fortaleza (UNIFOR), Centro de Ciências Tecnológicas (CCT), Núcleo de Pesquisas Tecnológicas (NPT), Brasil, victor120585@yahoo.com.br
- 4: Universidade Federal de São João Del-Rei (UFSJ); Departamento de Eng. Mecânica (DEMEC), Brasil, e-mail: panzera@ufs.edu.br

Palavras-chave: Compósitos, Furação, Delaminação, Análise de imagem, Ensaio mecânicos

Resumo. *O crescente conhecimento das suas propriedades e o avanço nas técnicas do seu processamento têm permitido uma utilização cada vez mais variada dos materiais compósitos de matriz polimérica. Embora as aplicações mais frequentes estejam relacionadas com o uso de fibras de vidro ou de carbono como material de reforço, a utilização de fibras de reforço naturais tem vindo a merecer maior atenção. A utilização deste tipo de compósitos está limitada pela desconfiança que resulta da inconsistência das suas propriedades mecânicas e susceptibilidade a operações de maquinagem.*

Neste trabalho são comparadas placas laminadas com dois tipos de reforços: fibra de vidro e fibra de sisal, ambos obtidos por processamento manual. Para caracterização das principais propriedades de resistência, como a tensão de rotura ou o módulo de elasticidade, foram realizados ensaios mecânicos. De seguida, as placas foram furadas com dois tipos de broca – helicoidal e ‘Brad’ – e duas velocidades de avanço – baixa e alta – sendo a velocidade de corte constante. Após furação, as placas foram radiografadas com recurso a radiografia digital com contraste e as imagens obtidas foram sujeitas a técnicas de processamento e análise de imagem através da utilização de uma plataforma computacional que integra uma rede neuronal para segmentar as imagens. Desta forma foi possível obter resultados da extensão de dano associado à operação de furação – delaminação – que seguidamente foram correlacionados com os resultados dos ensaios mecânicos complementares.

As conclusões deste trabalho permitem contribuir para uma melhor compreensão das possíveis utilizações dos compósitos de fibra natural relativamente a compósitos mais tradicionais.

1. INTRODUÇÃO

O crescente conhecimento das suas propriedades e o avanço nas técnicas do seu processamento têm permitido uma utilização cada vez mais variada dos materiais compósitos de matriz polimérica. Embora as aplicações mais frequentes estejam relacionadas com o uso de fibras de vidro ou de carbono como material de reforço, a utilização de fibras de reforço naturais tem vindo a merecer maior atenção. Um dos materiais de reforço cujo interesse tem aumentado é a fibra de sisal. Segundo Silva [1], este interesse nas fibras de sisal como material de reforço surgiu com mais intensidade devido à busca crescente por materiais de baixo custo, provenientes de fontes renováveis de matérias-primas que não causem danos ao meio ambiente e que possam competir com os materiais de reforço mais frequentemente utilizados. O uso deste tipo de compósitos está limitado pela desconfiança que resulta da inconsistência das suas propriedades mecânicas e pela sua susceptibilidade a operações de maquinaria.

A melhoria do desempenho mecânico de compósitos poliméricos reforçados por fibras naturais tem sido o foco de inúmeras pesquisas que investigam a adição de partículas e minerais cerâmicos na matriz. Existem diversos estudos [2-11] envolvendo a adição de nano partículas em compósitos laminados, que demonstram uma melhoria das propriedades mecânicas tais como resistência ao impacto, tenacidade à fractura, resistência à tracção, resistência à flexão, módulo de elasticidade, amortecimento estrutural, temperatura de decomposição e temperatura de transição vítrea.

A comparação de diferentes tipos de compósitos, tendo em comum o material usado na matriz, permite avaliar de uma forma mais correcta as melhorias de desempenho mecânico obtidas. O material de reforço cujas propriedades apresentam menores diferenças para os compósitos reforçados com fibra de sisal é a fibra de vidro. As fibras de vidro do tipo E apresentam, quando combinadas com matrizes epóxicas, boa resistência à tracção e à compressão, bem como boa rigidez e um custo competitivo. A sua principal desvantagem está relacionada com uma menor resistência ao impacto.

Independentemente do material seleccionado para a produção das peças, existe quase sempre a necessidade de efectuar furos que possibilitem a sua posterior montagem em estruturas mais complexas ou apenas como consequência de operações de reparação. Muitas vezes são utilizadas nestas operações ferramentas normalmente empregues na furação de materiais metálicos, sem atender à especificidade da natureza dos materiais compósitos, normalmente produzidos como laminados. Assim, a operação de furação pode dar origem a diversos defeitos, cuja gravidade pode ser maior ou menor, face à possibilidade da sua detecção por inspecção visual e às consequências em termos de perda de propriedades mecânicas na zona de ligação.

Dos diversos defeitos que podem ocorrer na furação de materiais compósitos destacam-se as delaminações, arrancamento de fibras e danos térmicos [12]. A ocorrência destes defeitos depende dos parâmetros de corte, do material e geometria de ferramenta, da natureza das fibras e sua distribuição. De todos estes defeitos o mais grave é a delaminação. Este tipo de dano, caracterizado pelo descolamento de camadas adjacentes do laminado, ocorre principalmente nas camadas inferiores do material, à medida que a ferramenta se aproxima

da superfície de saída. A sua principal consequência é a perda de propriedades mecânicas, seja de resistência estática ou à fadiga [13].

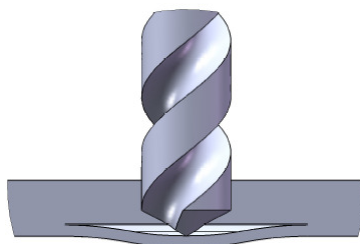


Figura 1 – Mecanismo de delaminação à saída.

A delaminação ocorre em consequência do efeito compressivo exercido pela extremidade da broca sobre as camadas inferiores do laminado, cuja espessura diminui à medida que o processo de furação vai avançando, Figura 1. Note-se que, embora a broca tenha um movimento de rotação, o seu centro é quase estacionário. Assim a zona central da broca exerce um esforço mais semelhante a uma extrusão do que a uma furação com arranque de aparas. As camadas inferiores tendem a ser empurradas para fora da placa provocando a rotura das ligações entre camadas [14]. Se a força de corte ultrapassa a resistência interlaminar da placa dá-se a separação de camadas adjacentes normalmente designada por delaminação. A resistência da placa à ocorrência deste tipo de dano caracteriza-se por um parâmetro designado como força crítica para o início da delaminação, cuja primeira formulação se deve a Hocheng e Dharan [15].

A diminuição da delaminação tem sido objecto de diversos estudos como, por exemplo, [16-20]. A redução da delaminação pode ser conseguida através de uma correcta selecção das condições de maquinaria envolvendo o avanço e a velocidade de corte [17-18], o material e a geometria de ferramenta [19] bem como o correcto controlo dos parâmetros durante a furação [20].

Para além da delaminação à saída da broca, pode ainda ocorrer um outro tipo de delaminação, no momento em que a broca entra em contacto com a peça, Figura 2.

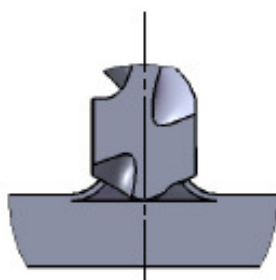


Figura 2 – Mecanismo de delaminação na entrada.

Em consequência do avanço da ferramenta o material tende a ser puxado para cima ao longo das espiras da broca em vez de ser cortado. Este efeito leva a que as camadas

superiores do material se separem do resto da placa. Este tipo de dano é mais facilmente controlável através de uma redução do avanço [15].

Este trabalho tem por objectivo comparar as consequências da operação de furação em placas com diferentes reforços – vidro e sisal – ambos obtidos por processamento manual. Para a caracterização das principais propriedades de resistência, como a tensão de rotura ou o módulo de elasticidade, foram realizados ensaios mecânicos adequados. De seguida, as placas foram furadas com dois tipos de broca – helicoidal e ‘Brad’ – e duas velocidades de avanço – baixa e alta – sendo a velocidade de corte constante. Após furação, as placas foram radiografadas com recurso a radiografia digital com contraste e as imagens obtidas foram analisadas através da utilização de uma plataforma computacional que integra uma rede neuronal para segmentar as imagens. Em paralelo, as mesmas imagens foram tratadas num software de CAD com o mesmo objectivo, através da limitação da zona delaminada num círculo. Desta forma foi possível obter resultados da extensão de dano associado à operação de furação – delaminação – que seguidamente foram correlacionados com os resultados dos ensaios mecânicos complementares.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Placas vidro/epóxico

As placas de vidro/epóxico foram fabricadas pelo processo de moldação manual. O material de reforço era de dois tipos: manta com orientação aleatória e tecido equilibrado. Para a espessura final pretendida, cerca de 2,5 mm, foram utilizadas sete camadas de reforço intercaladas – tecido/manta – tal como indicado na Figura 3.

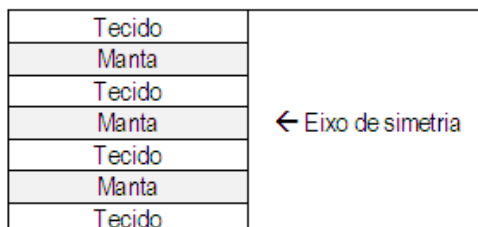


Figura 3 – Esquema do empilhamento das camadas nas placas vidro/epóxico.

A cura das placas foi realizada à temperatura ambiente, tendo sido medida regularmente a dureza superficial com um durómetro Barcol. Usualmente, considera-se que a placa pode ser desmoldada quando o valor de dureza Barcol é superior a 40, podendo então ser cortada. Das placas prontas foram cortados provetes, de acordo com as dimensões requeridas para a realização dos diversos ensaios, numa máquina de corte com disco diamantado. Como ponto de partida para dimensionar os provetes, foram consultadas as normas ASTM D 5766M-07 “Open Hole Tensile Strength of Polymer Matrix Composite Laminates” [21] e ASTM D 5961M-01 “Bearing Response of Polymer Matrix Composite Laminates” [22]. Foram cortados ao todo 32 provetes: 16 provetes com 100x36mm² e mais 16 provetes com 200x36mm².

2.2. Placas sisal/epóxico

Para as placas em sisal/epóxico foi igualmente utilizada a moldação manual. As fibras de sisal, originárias da empresa SisalSul (São Paulo, Brasil), foram utilizadas conforme recebidas, Figura 4.



Figura 4 – Mecha de fibras de sisal.

As principais propriedades da fibra de sisal são indicadas na Tabela 1.

| PROPRIEDADE | VALOR |
|---|-----------------------|
| Diâmetro (μm) | 192,5 (155 – 230) |
| Densidade Aparente (g/cm^3) | 1,41 |
| Porosidade Aparente (%) | 76,21 |
| Resistência à tracção (MPa) | 887 (676,5 – 1060,96) |
| Módulo de Elasticidade (GPa) | 16,4 (7,94 - 19,12) |

Tabela 1: Propriedades físicas e mecânicas das fibras de sisal.

Para executar as placas foi necessário garantir o alinhamento das fibras de sisal através de um acessório específico. Após o processo de moldação completo, as placas foram curadas à temperatura ambiente por 24 horas. Foram produzidos dois lotes de placas, um com 2 mm de espessura e outro com 3 mm de espessura. No final, as placas foram cortadas nas dimensões necessárias à realização dos ensaios mecânicos previstos, tal como descrito em 3.1.

Na Tabela 2 são indicadas as principais propriedades mecânicas das placas de vidro/epóxico e de sisal/epóxico.

| PROPRIEDADE | VIDRO/EPÓXIDO | SISAL/EPÓXIDO |
|--|---------------|---------------|
| Peso específico (g/cm^3) | 1,7 | 1,14 |
| Resistência à tracção (MPa) | 223 | 156,9 |
| Módulo de elasticidade em tracção (GPa) | 11,8 | 5,72 |
| Resistência à flexão (MPa) | 176 | 62,5 |
| Módulo de flexão (GPa) | 4,13 | 2,26 |

Tabela 2: Propriedades das placas de vidro/epóxico e sisal/epóxico.

2.3. Furação das placas

Os ensaios de furação foram realizados numa máquina CNC DENFORD Triac Centre (UK) com 3.7 kW de potência, velocidade de rotação máxima de 7500 rpm e velocidades de avanço de 0 a 2000 mm/min, Figura 5.

Durante a furação, a força axial (F_z) foi monitorizada através de um dinamómetro Kistler 9257B (Suíça) associado a um computador para recolha de dados. As placas foram furadas sem utilização de placa sacrificial colocada por baixo da zona de saída da broca.



Figura 5 – Montagem experimental usada nos ensaios de furação.

Considerando os objectivos deste trabalho, foram utilizadas apenas duas geometrias de broca – helicoidal e tipo ‘Brad’ – ambas de 6 mm de diâmetro, Figura 6. Nos dois casos o material da broca é o carboneto de tungsténio, grau K20.



Figura 6 – Brocas: a) helicoidal; b) tipo ‘Brad’.

A broca helicoidal (Figura 6a) tem uma geometria padrão, comum em qualquer fabricante deste tipo de ferramentas, é normalmente considerada a broca com mais vasto campo de aplicação. A broca tipo ‘Brad’ (Figura 6b) apresenta uma geometria de ponta específica, em forma de foice, que provoca o tensionamento das fibras antes do seu corte, proporcionando um “corte limpo” destas.

Os parâmetros de corte seleccionados foram os seguintes: velocidade de corte constante e igual a 53 m/min (2800 rpm); dois avanços 0.05 mm/rot e 0.2 mm/rot, isto é, um avanço baixo e um avanço alto. De acordo com resultados anteriores [17, 18, 23], o avanço é o factor mais influente na extensão da delaminação devido à furação.

2.4. Obtenção de imagens do dano

Na obtenção de imagens para avaliação do dano devido à furação foram utilizados dois métodos: digitalização das placas num scanner ligado a um computador e radiografia

digital com líquidos contrastantes.

A Figura 7 apresenta o processo utilizado para a obtenção de imagens digitalizadas dos provetes. Após regulação dos parâmetros do scanner, os provetes foram colocados com o lado de saída da broca apoiado sobre o vidro e procedeu-se à digitalização em tons de cinza, para facilitar o processamento posterior das imagens digitalizadas.

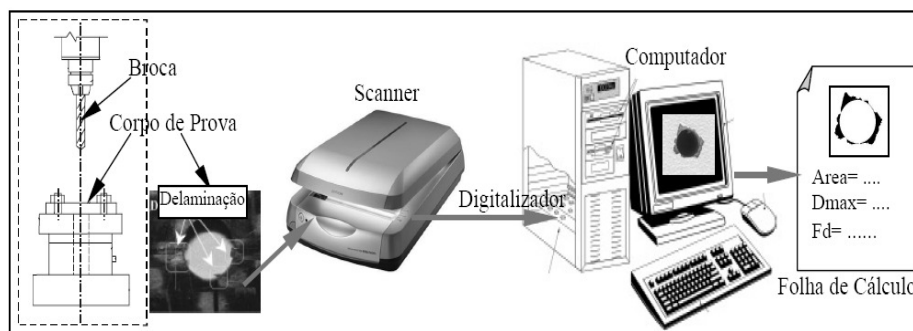


Figura 7 – Procedimento utilizado para obtenção de imagens de dano usando um scanner.

As imagens obtidas por este método foram de seguida tratadas para realçar os contrastes, sendo assim possível obter uma separação mais nítida das diferentes zonas dos provetes, correspondendo a orla mais clara à volta do furo à zona de delaminação, Figura 8. Este processo permitiu obter melhores resultados a nível dos contrastes com as placas de vidro/epóxico.

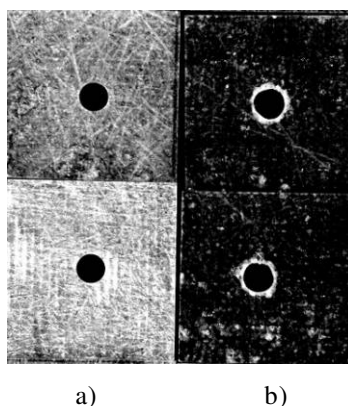


Figura 8 – Imagens obtidas por scanner: a) originais; b) após melhoria de contraste.

O segundo processo de obtenção de imagens foi a utilização da radiografia digital após imersão durante 10 minutos em líquido contrastante para as placas de vidro/epóxico e de cerca de 10 segundos para as placas de sisal/epóxico. Dado o carácter fortemente higroscópico das fibras de sisal, tempos de imersão mais longos levaram a resultados sem qualquer utilidade, como se mostra na Figura 9. O aparelho utilizado tinha uma voltagem no tubo de raio-X de 60 kV e um comprimento de onda de 300 kHz. Como resultado, obtiveram-se imagens em tons de cinzento, em que as zonas mais escuras correspondem

às áreas de dano e as zonas mais claras às áreas restantes (Figura 9a). As regiões de dano localizam-se em zonas aproximadamente circulares à volta dos furos respectivos.



Figura 9 – Imagens de placas sisal/epóxico obtidas por radiografia: a) tempo de imersão adequado; b) tempo de imersão demasiado longo.

Às imagens obtidas por radiografia foram posteriormente aplicadas técnicas de análise e processamento de imagem. Assim, para o pré-processamento das imagens adquiridas por radiografia foi utilizado um filtro de média para diminuir o ruído presente [24]. De seguida, as imagens foram segmentadas usando uma rede neuronal artificial treinada [23]. Finalmente, das regiões obtidas pela segmentação, referentes ao furo e à zona de delaminação, foram obtidas automaticamente as medidas necessárias para as caracterizar: diâmetros e áreas. Detalhes do processo podem ser encontrados em [23].

2.5. Ensaios mecânicos

A execução de furos em placas advém da necessidade de garantir a ligação de diversas peças num conjunto mais complexo. Uma das possíveis formas de ligação é a ligação aparafusada, tornando-se importante a informação relativa à capacidade de suportar cargas na zona de ligação. A execução de furos pode causar delaminações na placa e a consequência prática é a diminuição dos esforços admissíveis nessa zona. Para avaliar a capacidade de suportar esforços devem ser realizados ensaios mecânicos. Um dos ensaios é o “Bearing Response of Polymer Matrix Composite Laminates”, ASTM D 5961-01 [22]. Este ensaio destina-se a avaliar a resposta em esforço de uma placa em material compósito, devidamente ligada a um suporte em aço por intermédio de um parafuso. De acordo com a norma do ensaio, a preparação do furo pode ter consequências nos resultados obtidos. Os ensaios foram realizados numa máquina universal Shimadzu (Japão) de 100 kN de capacidade, com uma velocidade de 2 mm/min.

Outros ensaios permitem avaliar a resistência à tracção ou à compressão de placas com um furo central. É o caso dos ensaios “Open-hole tensile strength of polymer matrix composite laminates”, ASTM D 5766M-07, [21] e o “Open-hole compressive strength of polymer matrix composite laminates”, ASTM D 6484M-04, [25]. Nestes ensaios pretende-se avaliar o efeito da presença do furo na resistência mecânica da placa. No entanto, é recomendável uma preparação adequada do furo, sem danos, pois estes podem afectar os resultados. De realçar que as delaminações podem afectar os valores obtidos no sentido contrário ao esperado, uma vez que a existência de dano pode resultar num efeito de

redução das tensões localizadas à volta do furo. Com o objectivo de avaliar esse efeito, foram realizados ensaios do tipo “Open-Hole Tensile Strength”, na mesma máquina de ensaios, com uma velocidade de 5 mm/min.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Forças durante a furação

Os resultados relativos ao valor máximo da força axial durante a furação representam a média de quatro furos realizados em condições experimentais idênticas. Tendo em conta que o início da delaminação depende da força axial, foi considerado para efeitos de comparação o valor máximo atingido durante a furação. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 3.

| BROCA | AVANÇO [mm/rot] | Força Max Vidro/Ep [N] | Força Max Sisal/Ep [N] |
|------------|--------------------|---------------------------|---------------------------|
| Tipo BRAD | 0.05 | 13.9 | 9.8 |
| | 0.20 | 26.3 | 13.7 |
| HELICOIDAL | 0.05 | 26.2 | 11.9 |
| | 0.20 | 79.5 | 15.9 |

Tabela 3. Comparação de resultados da força axial máxima durante a furação.

A análise dos resultados mostra que para avanços mais elevados a força axial é sempre maior, independentemente da geometria de broca utilizada. Este resultado era esperado e confirma os resultados mostrados em trabalhos anteriores. As diferenças entre os diversos valores obtidos relacionam-se essencialmente com a geometria da broca e, naturalmente, com o tipo de material a furar. Assim, é possível afirmar que há uma correspondência entre a geometria da ferramenta e o valor máximo atingido pela força axial durante a furação. Também se observa uma correlação entre as características mecânicas dos materiais e as forças que se desenvolvem durante a furação. As placas em sisal/epóxico apresentam menor resistência mecânica e as forças axiais que se desenvolvem durante a furação são mais baixas.

Independentemente do material a furar, os valores de força axial mais baixa corresponderam sempre aos furos efectuados com a broca tipo ‘Brad’. Este resultado parece indicar que esta broca é particularmente indicada para a execução de furos em compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras de vidro ou de sisal. De notar o significativo aumento desta força nos furos efectuados com a broca helicoidal no avanço mais elevado. Nas placas vidro/epóxico o valor médio triplica enquanto nas placas sisal/epóxico há um aumento da força de cerca de 33%. Estes resultados reforçam a recomendação da utilização de avanços baixos ou moderados na furação deste tipo de materiais.

Os valores de força máxima aqui apresentados e suas variações servem de comparação com os valores de extensão da delaminação e ensaios mecânicos descritos de seguida.

3.2. Extensão da delaminação

O passo seguinte neste estudo foi a avaliação da extensão da zona delaminada, através da sequência explicada na secção 2.4. Para a avaliação e comparação do dano à volta do furo, foi utilizado o factor de delaminação [26], definido como o quociente entre o máximo diâmetro delaminado e o diâmetro nominal do furo. Este critério, de aplicação simples, mostra-se adequado em casos em que a delaminação tem a forma de uma orla à volta da periferia do furo. Neste caso os resultados dividem-se em dois conjuntos, de acordo com o processo de medição utilizado. Assim, na Tabela 4 são apresentados os resultados relativos ao factor de delaminação para os provetes em vidro/epóxico e na Tabela 5 os resultados para os provetes em sisal/epóxico. Face à dificuldade de obtenção de imagens satisfatórias por scanner no caso destes provetes, são apenas apresentados os resultados obtidos com o método da radiografia digital.

| BROCA | AVANÇO [mm/rot] | Factor de delaminação | |
|------------|--------------------|-----------------------|-------------|
| | | Scanner | Radiografia |
| Tipo BRAD | 0.05 | 1.46 | 1.13 |
| | 0.20 | 1.50 | 1.23 |
| HELICOIDAL | 0.05 | 1.71 | 1.16 |
| | 0.20 | 1.73 | 1.22 |

Tabela 4. Comparação do factor de delaminação nos provetes vidro/epóxico.

| BROCA | AVANÇO [mm/rot] | Factor de delaminação | |
|------------|--------------------|-----------------------|-------------|
| | | Scanner | Radiografia |
| Tipo BRAD | 0.05 | Não efectuado | 1.54 |
| | 0.20 | | 1.55 |
| HELICOIDAL | 0.05 | | 1.34 |
| | 0.20 | | 1.66 |

Tabela 5. Comparação do factor de delaminação nos provetes sisal/epóxico.

A partir dos valores das Tabelas 4 e 5 é possível afirmar que, tal como esperado, a um aumento do avanço corresponde um agravamento da delaminação, tal como já acontecia com a força axial. Este efeito pode ser explicado pela indentação provocada pela ponta da broca que, com avanços maiores, resulta numa força axial mais elevada. Ao exercer uma força maior sobre a mesma área e espessura de placa não cortada, a delaminação tende a ocorrer mais cedo, pois a sua ocorrência depende essencialmente de propriedades características do laminado tal como o seu módulo de elasticidade ou resistência interlaminar [15].

Outro aspecto a referir é a diferença de resultados entre os dois métodos. O processamento de imagem permite um recorte mais preciso do contorno da zona delaminada em vez de uma região circular. Assim, os valores de extensão da delaminação não só são menores como, certamente, mais realistas. No entanto, a simplicidade do método de aquisição de imagem por intermédio de um scanner, associado ao facto de a relação de resultados ser idêntica, mostra que este processo pode ser utilizado em situações em que a rapidez de obtenção de resultados

e sua ordenação relativa em termos da extensão do dano é mais relevante. A comparação dos resultados obtidos para as diferentes geometrias de broca mostra uma relação diversa da obtida nas forças. Assim, a menor delaminação foi obtida, nas condições experimentais descritas, com a broca helicoidal e a maior delaminação com a broca ‘Brad’. Note-se que a diferença nos valores é muito reduzida, o que leva a supor que, face à heterogeneidade típica destes materiais, poderão ser obtidos resultados que levem a uma relação diferente se utilizado outro lote de peças.

Mais uma vez se verifica que a menor resistência mecânica das placas de sisal/epóxico resulta numa maior extensão de dano, traduzido em valores mais elevados do factor de delaminação.

3.3. Ensaio mecânicos

A comparação de características mecânicas das placas para classificação dos métodos de furação não é ainda um assunto encerrado. De uma maneira geral, é considerado que nos ensaios existentes têm mais relevância as propriedades do material do que a execução do furo. Dos ensaios normalizados foram escolhidos o “Open-hole tensile strength” (ASTM D5766) e o “Bearing test” (ASTM D5961) para tentar avaliar o efeito da delaminação nos valores de resistência mecânica das placas na zona dos furos. Tratando-se de ensaios destrutivos, o seu custo torna-se mais elevado e não permite a avaliação de peças em serviço. Os resultados das Tabelas 6 e 7 representam a média de quatro ensaios em cada condição de corte (broca/avanço/material placa).

| BROCA | AVANÇO [mm/rot] | Tensão “Open Hole”[MPa] | |
|------------|--------------------|-------------------------|----------|
| | | Vidro/Ep | Sisal/Ep |
| Tipo BRAD | 0.05 | 124.8 | 92.9 |
| | 0.20 | 110.7 | 105.1 |
| HELICOIDAL | 0.05 | 122.4 | 84.7 |
| | 0.20 | 124.5 | 100.4 |

Tabela 6. Comparação de resultados do ensaio “Open-Hole tensile strength”.

| BROCA | AVANÇO [mm/rot] | Tensão Esmagamento [MPa] | |
|------------|--------------------|--------------------------|----------|
| | | Vidro/Ep | Sisal/Ep |
| Tipo BRAD | 0.05 | 58.8 | 8.2 |
| | 0.20 | 55.1 | 10.7 |
| HELICOIDAL | 0.05 | 58.9 | 11.9 |
| | 0.20 | 58.8 | 11.9 |

Tabela 7. Comparação de resultados do ensaio “Bearing test”.

Da análise dos resultados, pode-se afirmar que não há uma relação evidente entre a extensão da delaminação e os valores de resistência mecânica da placa, nem entre os parâmetros de corte, neste caso o avanço, e a alteração desses mesmos valores. Todas as correlações apresentavam coeficientes baixos, evidenciando a dificuldade de estabelecer uma relação entre os resultados dos ensaios e os anteriores passos experimentais. A

realização de ensaios com um maior número de amostras permitirá obter mais certezas sobre a existência, ou não, de tais correlações. Nas placas vidro/epóxico o aumento do avanço não provoca uma diminuição clara da tensão de rotura no ensaio “Open Hole” nos furos efectuados com broca helicoidal, apenas nos furos com broca ‘Brad’. A tensão de esmagamento mantém-se praticamente inalterada em qualquer situação de furação.

Nas placas sisal/epóxico verifica-se uma tendência contrária na correlação entre a tensão “Open Hole” e a delaminação. Para furos com avanço mais elevado há um aumento do valor da tensão de rotura. Este facto parece confirmar o efeito de redução da concentração de tensões à volta do furo provocado por uma maior extensão da zona delaminada. Por último, note-se os valores extremamente baixos da tensão de esmagamento em todas as placas sisal/epóxico. Este resultado indica que a utilização deste tipo de material em ligações com furos ou rebites não será a mais aconselhável.

Os resultados aqui apresentados confirmam estudos anteriores que afirmam que este ensaio é mais afectado pelo tipo de material do laminado do que pela preparação dos provetes [27].

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentada uma comparação de dois materiais compósitos e duas geometrias de broca para a furação de placas. Foram comparadas placas em vidro/epóxico e sisal/epóxico, ambas obtidas por moldação manual e as brocas utilizadas foram do tipo ‘Brad’ e helicoidal. Durante a furação foram monitorizadas as forças axiais e de seguida foi avaliada a delaminação à volta dos furos e realizados dois ensaios mecânicos – “Open-hole tensile strength” e “Bearing test”.

Do trabalho apresentado é possível obter algumas conclusões:

- os valores de força máxima durante a furação dependem do material das placas, da geometria da broca e do avanço escolhido;
- os valores de delaminação dependem igualmente dos mesmos factores;
- o aumento do avanço faz aumentar quer o valor da força máxima durante a furação quer a extensão da delaminação;
- para qualquer dos materiais as forças de corte e a extensão do dano são mais elevadas nos furos executados com broca helicoidal;
- os valores de resistência mecânica nos dois ensaios realizados mostram uma maior influência do material do que das condições de corte;
- as placas sisal/epóxico revelaram uma grande perda de resistência no ensaio de esmagamento.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às Oficinas Mecânicas do Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Superior de Engenharia do Porto pela cedência do equipamento de furação e ao Eng. Victor Manuel da Costa Ribeiro por todo o apoio prestado.

Os autores agradecem ainda ao aluno Leandro José Silva pelo trabalho desenvolvido no âmbito das placas de sisal.

Os dois primeiros autores agradecem aos alunos João Silva, David Silva e Pedro Pereira pelo trabalho desenvolvido no apoio à realização deste artigo.

O quarto autor gostaria de agradecer a FUNCAP/CNPq pelo suporte financeiro através da bolsa DCR número 35.0053/2011.1 para UNIFOR.

REFERÊNCIAS

- [1] R. V. Silva, *Compósito de resina poliuretana derivada de óleo de mamona e fibras vegetais*, 139p.Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos (2003);
- [2] Y. Cao; J. Cameron, “*Impact properties of silica particle modified glass fiber reinforced epoxy composite*”, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, v. 25, n. 7 (2006);
- [3] I. Isik; U. Yilmazer; G. Bayram, “*Impact modified epoxy/montmorillonite nanocomposites: synthesis and characterization*”, *Polymer* 44, 6371-6377 (2003);
- [4] A. Yasmin; J. L. Abot; I. M. Daniel, “*Processing of clay/epoxy nanocomposites by shear mixing*”, *Scripta Materialia* 49, 81-86 (2003);
- [5] A. Haque; M. Shamsuzzoha; F. Hussain; D. Dean, “*S2-Glass/Epoxy Polymer Nanocomposites: Manufacturing, Structures, Thermal and Mechanical Properties*”, *Journal of Composite Materials*, Vol. 37, n. 20 (2003);
- [6] P. Rosso; L. Ye; K. Friedrich; S. A. Sprenger, “*Toughened Epoxy Resin by Silica Nanoparticle Reinforcement*”, *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 100, 1849-1855 (2006);
- [7] A. Ávila; H. V. Duarte; M. I. Soares, “*The nanoclay influence on impact response of laminated plates*”, *Latin American Journal of Solids and Structures* 3, 3-20 (2006);
- [8] A. Ávila; M. I. Soares; A. S. Neto, “*A study on nanostructured laminated plates behavior under low-velocity impact loadings*” *International J. of Impact Engineering* 34, 28-41 (2007);
- [9] A. K. Subramaniam; C.T. Sun, “*Enhancing compressive strength of unidirectional polymeric composites using nanoclay*”, *Composites: Part A* 37, 2257-2268 (2006);
- [10] Jia-Lin Tsai and Yi-Lieh Cheng, “*Investigating Silica Nanoparticle Effect on Dynamic and Quasi-static Compressive Strengths of Glass Fiber/Epoxy Nanocomposites*”, *Journal of Composite Materials*, Vol. 43, n. 25 (2009);
- [11] T. Mahrholz; J. Stängle; M. Sinapius, “*Quantification of the reinforcement effect of silica nanoparticles in epoxy resins used in liquid composite moulding processes*”, *Composites: Part A*, v. 40, 235-243 (2009);
- [12] C.W. Wern; M. Ramulu; A. Schukla, “*Investigation of Stresses in the Orthogonal Cutting of Fiber-Reinforced Plastics*”, *Experimental Mechanics*, 33-41 (1994);
- [13] E. Persson; I. Eriksson; L. Zackrisson, L., “*Effects of Hole Machining Defects on Strength and Fatigue Life of Composite Laminates*”, *Composites A*, 28, 141-151 (1997);
- [14] M. L. Stuart, *International Encyclopaedia of Composites*, vol 2, 297 (1991);
- [15] H. Hocheng; C.K.H. Dharan, “*Delamination during Drilling in Composite Laminates*”, *J. of Engineering for Industry*, 112, 236-239 (1990);
- [16] H. Hocheng; C.C. Tsao, “*The path towards delamination-free drilling of composite materials*”, *J. of Materials Processing Technology*, 167, 251-264 (2005);

- [17] J.P. Davim; P. Reis, “*Drilling Carbon Fibre Reinforced Plastics Manufactured By Autoclave – Experimental and Statistical Study*”, *Materials & Design*, 24, 315-324 (2003);
- [18] L.M.P. Durão; A.G. Magalhães; A.T. Marques; J.M.R.S. Tavares, “*Influência dos parâmetros de maquinação no dano de placas compósitas*”, *Mecânica Experimental*, 16, 45-54, ISSN 1646-7078 (2008);
- [19] R. Piquet; B. Ferret, F. Lachaud, P. Swider, “*Experimental analysis of drilling damage in thin carbon/epoxy plate using special drills*”, *Composites A*, 31, 1107-1115 (2000);
- [20] R. Stone; K.A. Krishnamurthy, “*Neural Network Thrust Force Controller to Minimize Delamination During Drilling of Graphite-Epoxy Composites*”, *Int. J. Machine Tools & Manufacture*, 36, 985-1003 (1996);
- [21] ASTM D 5766M-07, 2007, *Standard Test Method for Open-Hole Tensile Strength of Polymer Matrix Composite laminates*, USA, ASTM International;
- [22] ASTM D 5961M-01, 2001, *Standard Test method for Bearing Response of Polymer Matrix Composite laminates*, USA, ASTM International;
- [23] V.H.C. de Albuquerque; J.M.R.S. Tavares; L.M.P. Durão, “*Evaluation of Delamination Damage on Composite Plates using an Artificial Neural Network for the Radiographic Image Analysis*”, *Journal of Composite Materials*, 44, 1139-1159 (2010);
- [24] Schalkoff, R.J., *Digital Image Processing and Computer Vision*, John Willey & Sons, Inc, (1989);
- [25] ASTM D 6484M-04, 2004, *Standard Test Method for Open-Hole Compressive Strength of Polymer Matrix Composite laminates*, USA, ASTM International;
- [26] W. C. Chen, “*Some experimental investigations in the drilling of carbon fibre-reinforced plastic (CFRP) composite laminates*”, *Int. J. of Machine Tools & Manufacture*, 37, 1097-1108 (1997);
- [27] S. D. Thoppul; J. Finegan; R. F. Gibson, “*Mechanics of mechanically fastened joints in polymer–matrix composite structures – A review*”, *Composites Science and Technology*, 69, pp. 301-329, (2009)