



## MAQUINAGEM DE COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIMÉRICA

LUÍS MIGUEL PEREIRA DURÃO<sup>1</sup>, ANTÓNIO TORRES MARQUES<sup>2</sup>, ANTÓNIO GONÇALVES MAGALHÃES<sup>1</sup>, ANTÓNIO MONTEIRO BAPTISTA<sup>2</sup>

<sup>1</sup> CIDEM / ISEP

R. Dr. António Bernardino de Almeida, 431, Porto, Portugal

<sup>2</sup> FEUP / INEGI

R.- Dr. Roberto Frias, Porto, Portugal

*(Recibido 2 de abril de 2004, para publicación 6 de julio de 2005)*

**Resumo** – A maquinagem de PRF's – plásticos reforçados com fibras –, embora possa ser executada por métodos e técnicas tradicionais, levanta problemas diversos dos conhecidos na maquinagem de metais, devido à heterogeneidade do material. Neste texto é estudada a furação de PRF's em vidro/epóxico obtidos por RTM – Resin Transfer Molding – e de carbono/ epóxico a partir de pré-impregnado, com o objectivo de obter furos tão perfeitos quanto possível, isto é, sem delaminação ou outros defeitos típicos. Na furação são utilizados diferentes parâmetros de corte, recorre-se à pré-furação e ao arrefecimento por azoto líquido, sendo monitorizada a força axial durante a furação. No caso do carbono/ epóxico, são igualmente ensaiadas brocas de dois materiais diferentes. A avaliação dos furos é levada a cabo através de radiografias, como método de controlo não-destrutivo, e ensaio de esmagamento como ensaio destrutivo. No final são retiradas conclusões a partir dos resultados experimentais e apontadas próximas etapas do estudo.

**Palavras-chave** – Materiais compósitos, processos de fabricação, ensaios e verificações.

### 1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, os materiais compósitos têm vindo a revelar-se como um dos grupos de materiais tecnológicos mais interessantes. As razões da sua crescente utilização estão ligadas às suas propriedades características, tais como o seu baixo peso, a elevada resistência mecânica e rigidez. Entre as desvantagens na sua utilização podemos citar o seu elevado custo de produção e a necessidade de protecção específica dos trabalhadores, para além de potenciais custos associados à sua reciclagem. Embora o desenvolvimento destes materiais tenha sido efectuado pelas indústrias de defesa e aeroespacial, assiste-se recentemente ao alargamento do seu uso noutras áreas em consequência da sua crescente competitividade numa relação custo/benefício.

A maquinagem de materiais compósitos surge da necessidade de efectuar montagens de diversas peças num conjunto – na qual também se pode recorrer à colagem – ou pela necessidade de cumprimento de tolerâncias apertadas. De entre as diversas técnicas de maquinagem, a furação surge como um método de uso bastante alargado, para a posterior ligação a outras peças através de parafusos ou rebites. A maquinagem de materiais compósitos é complexa devido à sua heterogeneidade, que resulta em propriedades dependentes dos materiais usados como reforço e matriz, da fracção volúmica de fibras, da sequência de empilhamento, da orientação das fibras, da sensibilidade ao calor e abrasividade das fibras. Em consequência, resultados válidos para um determinado PRF podem não ser válidos se a natureza ou orientação das fibras é alterada. Os métodos mais tradicionais de maquinagem, embora possam ser utilizados, devem ser convenientemente adaptados a nível de parâmetros e ferramentas com o objectivo de reduzir a geração de danos por meios térmicos ou mecânicos.

De acordo com Tagliaferri et al. [1] não é possível obter um acabamento comparável ao das peças metálicas devido à não homogeneidade e anisotropia própria dos compósitos. Por outro lado, a operação de furação causa diversos defeitos nas peças, tais como delaminação, fissuras intralaminares, descolamento fibra/matriz e danos térmicos [2]. Estes defeitos provocam uma deterioração das propriedades mecânicas das peças, podendo mesmo afectar a sua fiabilidade, razão pela qual o seu uso em

componentes considerados críticos, do ponto de vista da segurança das estruturas tem vindo a ser feito com extremas cautelas. Outro aspecto que deve ser levado em conta é o desgaste das ferramentas utilizadas, que contribui também para a extensão dos defeitos encontrados nas peças, ou substituição prematura da ferramenta.

A furação de PRF's tem sido estudada por outros investigadores, tais como Caprino e Tagliaferri [3] que analisaram o desenvolvimento do dano a diferentes profundidades de furação, tendo concluído que o dano depende fundamentalmente do avanço  $f$ . A utilização de pré-furação para reduzir o dano é proposta por Dharan [4], e igualmente referida por R. Piquet et al. [5].

A extensão da zona delaminada, aspecto considerado como o mais crítico, pode ser avaliada através de um parâmetro sugerido por Chen [6] designado como factor de delaminação  $F_d$ , definido através da expressão

$$F_d = \frac{D_{max}}{D} \quad (1)$$

em que  $D_{max}$  é o máximo diâmetro delaminado e  $D$  é o diâmetro nominal do furo.

Lachaud et al. [7] apresentam um modelo para placas em carbono/epóxico no qual a força axial necessária para provocar delaminação é dependente da rigidez do material e da taxa crítica de libertação de energia em Modo I,  $G_{Ic}$ ,

$$F_C = 8\pi \left( \frac{G_{Ic}D}{(1/3) - (D'/8D)} \right)^{1/2} \quad (2)$$

em que  $F_C$  é o valor crítico da força axial para início da delaminação,  $D$  e  $D'$  são obtidos a partir de propriedades à flexão do material.

Um outro modelo é apresentado por Zhang et al. [8] segundo o qual se pode controlar o avanço da ferramenta de forma a evitar atingir a força axial crítica,

$$F_C = \frac{3\pi}{\xi} \sqrt{2G_{Ic}D^*} \quad (3)$$

em que  $F_C$  é a força axial crítica,  $\xi$  é o rácio de excentricidade da delaminação e  $D^*$  é obtido a partir de propriedades à flexão do material.

Persson et al. [9] analisaram as consequências dos defeitos originados na furação na vida à fadiga dos compósitos laminados. No estudo publicado foram utilizadas diversas geometrias de ferramenta – uma broca diamantada, uma broca Dagger e o método de furação orbital. Os autores concluíram que a resistência à fadiga diminui com o aumento da zona afectada à volta do furo.

As velocidades e avanços referidos nos diversos artigos consultados são variados. Na furação de compósitos com fibra de vidro, utilizam-se velocidades de corte entre os 1,5 e os 40 m/min e avanços entre os 0.0057 e os 2.63 mm/rot. Nos compósitos com fibra de carbono as velocidades referidas são mais elevadas, da ordem dos 50 a 100 m/min e avanços inferiores a 0.1 mm/rot. Piquet et al. [5] e Zhang et al. [8] apontam vantagens no uso de avanço variável, em função da profundidade de corte, o que permite limitar o esforço axial ao longo da furação e diminuir o risco de delaminação, principalmente nas últimas camadas.

O arrefecimento por azoto líquido, também designado por maquinagem criogénica, tem vindo a ser desenvolvido na maquinagem de metais por Hong et al. [10], sendo considerado uma alternativa ecológica ao uso de emulsões. Como vantagem tecnológica apresenta o aumento da vida da ferramenta pela diminuição do coeficiente de atrito.

Tendo em vista a optimização do número de diferentes experiências a realizar, foi utilizado o método Taguchi [11], para definir o plano de ensaios.

Tabela 1. Características dos materiais utilizados nos ensaios.

	Disp. Camadas	Esp.	Resina	Fibra	R <sub>M</sub> [MPa]	E [GPa]	Teor fibras
<b>C -Ep</b>	[(0/-45/90/45)] <sub>5s</sub>	5 mm	EE24	HS 160	845	46.6	65 %
<b>RTM</b>	Manta	5 mm	FS799	ROVICORE®	85	5.6	25 %

## 2. ENSAIOS REALIZADOS

### 2.1. Materiais

As placas utilizadas nos ensaios foram obtidas por diferentes processos de fabrico. Assim, foi executada uma placa em resina epóxida reforçada com fibra de carbono, obtida a partir de pré-impregnado e com a sequência de empilhamento indicada na Tabela 1. O laminado foi posteriormente curado numa prensa de pratos quentes a uma pressão de 3 daN/cm<sup>2</sup>, com um ciclo de aquecimento até aos 130°C, estágio durante uma hora e arrefecimento. Para as placas em resina epóxida com fibra de vidro utilizou-se o método de fabrico RTM, com duas camadas de ROVICORE® e resina Aropol FS799 da Ashland. Após arrefecimento e permanência no molde por 24 horas, as placas curaram à temperatura ambiente.

Em todos os materiais foram realizados ensaios de tracção para obtenção das principais características mecânicas, de acordo com a Norma ISO NP-EN 527 e analisado o teor mássico de fibras, de acordo com a norma NP 2216 1988.

As placas foram cortadas com disco abrasivo em provetes de 135 x 36 mm<sup>2</sup> para posterior furação e ensaio.

### 2.2. Meios

Para a realização dos ensaios de furação foi utilizada uma furadora de coluna EFI FGR204b com 1,4 kW e uma broca HSS de 6mm de diâmetro e 120° de ângulo de ponta. Nas placas em carbono/ epóxido foi igualmente usada uma broca Guhring 2464FIRE®, do mesmo diâmetro, em carboneto de tungsténio, grau K10, com revestimento TiAlN, recomendado para trabalho a seco. Nos ensaios com pré-furação, foi utilizada uma broca HSS com 3,5 mm de diâmetro. A força axial (F<sub>z</sub>) durante a furação foi monitorizada através de um dinamómetro Kistler 4782 associado a um computador para recolha dos dados. Todas as placas foram furadas sem utilização de suporte inferior ou placa sacrificial colocada por baixo da zona de saída da broca, o que constitui uma situação desfavorável para a ocorrência de delaminação, ao não proporcionar apoio nas camadas inferiores da placa.

A extensão da zona delaminada foi avaliada através de radiografia. Para tal, as placas foram mergulhadas em di-iodometano, um líquido contrastante, durante cerca de 1h30m e posteriormente radiografadas com um aparelho Toshiba DG-073B. As películas assim obtidas serviram para a medição do diâmetro delaminado, através de um projector de perfis Mitutoyo PJN322, com ampliação de 20x.

A avaliação da qualidade do furo foi efectuada por recurso a um ensaio, destrutivo, de esmagamento, de acordo com a Norma ASTM D5961-01 [12]. Este ensaio foi realizado numa máquina INSTRON 4208.

### 2.3. Ensaios de furação

Os ensaios foram realizados de acordo com as tabelas Taguchi adequadas a cada caso, L9 condensada para as placas RTM com o objectivo de minimizar o número de experiências e L4 nas de carbono/epóxido – Tabela 2. No caso destas placas foi acrescentado um ensaio correspondente à recomendação do fabricante da broca em carboneto revestido. Os diferentes parâmetros ensaiados podem ser vistos na Tabela 3, para os dois materiais. O arrefecimento por azoto líquido era um dos factores a analisar nestes

Tabela 2. Níveis seleccionados para os diferentes factores em análise.

<b>a) RTM</b>				<b>b) Carbono/epóxico</b>		
<b>Factor</b>	<b>Nível 1</b>	<b>Nível 2</b>	<b>Nível 3</b>	<b>Factor</b>	<b>Nível 1</b>	<b>Nível 2</b>
<b>Vel. corte (V<sub>c</sub>) [m/min]</b>	19	26	53	Arref.	SIM	NÃO
<b>Avanço [mm/rot]</b>	0.1	0.15	-----	Pré-furo	SIM	NÃO
<b>Arref</b>	SIM	NÃO	-----			
<b>Pré-furo</b>	SIM	NÃO	-----			

Tabela 3. Valores dos parâmetros de corte utilizados – a) RTM; b) carbono/ epóxico.

<b>a) RTM (Resin Transfer Molding)</b>					
<b>Nº ensaio</b>	<b>Broca</b>	<b>V<sub>c</sub></b>	<b>Avanço</b>	<b>Arref</b>	<b>Pré-furo</b>
<b>(unidades)</b>	<b>(d = 6mm)</b>	<b>[m/min]</b>	<b>[mm/rot]</b>		<b>(HSS 3.5mm)</b>
<b>1</b>	HSS 6mm de diâmetro	19	0.1	S	S
<b>2</b>		19	0.15	N	N
<b>3</b>		26	0.1	S	N
<b>4</b>		26	0.15	N	S
<b>5</b>		53	0.1	N	S
<b>6</b>		53	0.15	S	N
<b>7</b>		26	0.1	N	N
<b>8</b>		26	0.15	S	S

<b>b) Carbono/ epóxico</b>					
<b>Nº ensaio</b>	<b>Broca</b>	<b>V<sub>c</sub></b>	<b>Avanço</b>	<b>Arref</b>	<b>Pré-furo</b>
<b>(unidades)</b>	<b>(d = 6mm)</b>	<b>[m/min]</b>	<b>[mm/rot]</b>		<b>(HSS 3.5mm)</b>
<b>1</b>	2464 FIRE®	53	0.1	S	S
<b>2</b>	2464 FIRE®	53	0.1	N	N
<b>3</b>	HSS	53	0.1	S	N
<b>4</b>	HSS	53	0.1	N	S
<b>5 (extra)</b>	2464 FIRE®	100	0.1	N	S

ensaios. A escolha pela execução de pré-furo foi determinada pelos resultados apresentados por Dharan [5]. Não foi considerado o efeito de possíveis interações.

Os PRF's são sensíveis ao uso de líquidos de arrefecimento, geralmente desaconselhados, mas também sensíveis a danos térmicos, tanto maiores quanto mais lento o avanço e o ritmo de furação. Decidiu-se, então, verificar quais os resultados que se poderiam obter com o recurso a um meio alternativo de arrefecimento da zona maquinada, no caso concreto o azoto líquido, cuja temperatura é de cerca de 77°K (-196°C). Este meio de arrefecimento tem vindo a ser experimentado por Hong et al. [10] na maquinagem de materiais metálicos, como já atrás foi referido. Havia o interesse de verificar se a redução de atrito ferramenta-placa também se verificava na maquinagem de PRF's e se as baixas temperaturas a que

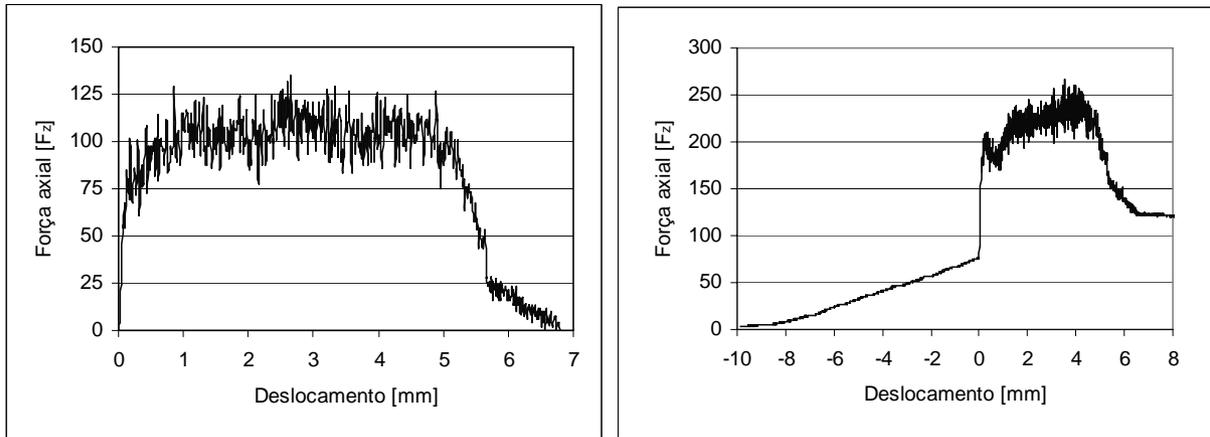


Fig. 1. Curvas típicas da Força axial: a) sem arrefecimento; b) com arrefecimento por azoto líquido.

Tabela 4. Valores máximos de  $F_z$ .

Força axial máxima [N]			
Nº ensaio	RTM	Nº ensaio	C / Ep
1	48.65	1	160.07
2	101.56	2	351.71
3	94.51	3	506.75
4	22.49	4	225.86
5	50.24	5	115.20
6	141.14		
7	83.26		
8	48.64		

localmente o material seria sujeito não teriam efeitos prejudiciais nas propriedades mecânicas e danos induzidos pela maquinagem.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1. Força de corte

A evolução da força axial ao longo da furação segue uma curva típica, conforme se pode ver na Figura 1. Há uma subida inicial do valor da força, que corresponde ao início do contacto entre a broca e a placa. De seguida mantém-se razoavelmente estável, durante um certo período. Segue-se um decréscimo rápido da força, à medida que a broca deixa de estar em contacto com a placa, altura em que a força se reduz a zero. Ao ser utilizado o arrefecimento das placas com azoto líquido, verifica-se a existência de forças não nulas, devidas ao desenvolvimento de tensões térmicas na placa. O seu valor teve de ser subtraído no cálculo das forças durante a furação.

Na Tabela 4 podem ser vistas as médias dos valores da força axial máxima obtidos nas furações – quatro medições em cada condição.

Pode-se dizer que a pré-furação permite reduzir a força axial em cerca de 60%, para os dois materiais, concordando com resultados conhecidos [4]. Este efeito deverá ser confirmado com uma menor tendência para o dano à volta do furo, tal como uma redução da delaminação.

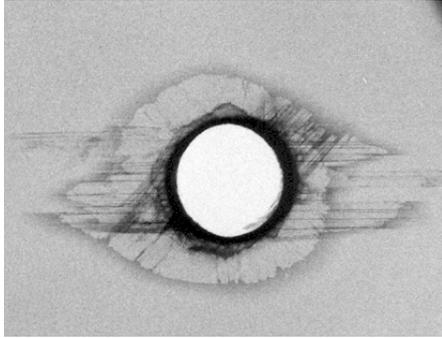
Tabela 5. Valores de  $F_d$ .

Fig. 2. Placa radiografada.

Factor de delaminação [ $F_d$ ]			
Nº ensaio	RTM	Nº ensaio	C / Ep
1	1.077	1	1.213
2	1.080	2	1.291
3	1.073	3	1.556
4	1.056	4	1.348
5	1.072	5	1.067
6	1.125		
7	1.080		
8	1.101		

Nas placas em RTM verifica-se que os melhores resultados são obtidos com uma velocidade de corte de 26 m/min, avanço igual a 0,10 mm/rot e sem recurso a arrefecimento. A redução na força axial ao escolher este conjunto de parâmetros é de cerca de 20%.

No caso das placas em carbono/ epóxico, a utilização da ferramenta adequada, diminui a força axial. Os parâmetros aconselhados pelo fabricante reduzem  $F_z$  em aproximadamente 30%. O efeito do arrefecimento é pouco nítido.

Não foi analisado o efeito do avanço para o carbono/epóxico, pois a furadora utilizada não tinha possibilidade de regulação de avanços inferiores a 0,10 mm/rot.

### 3.2. Diâmetro delaminado

O aspecto normal de uma radiografia pode ser visto na Figura 2. O procedimento de medição do diâmetro danificado foi explicado atrás. O resultado final é a média da medição de três diâmetros a partir de nove pontos diferentes da orla da região danificada.

Os resultados do diâmetro delaminado, permitiram calcular o factor de delaminação –  $F_d$  – de acordo com a equação (1). Os valores obtidos para os dois materiais podem ser vistos na Tabela 5.

Observando os valores de  $F_d$ , podemos verificar que o recurso à pré-furação, diminuindo os valores das forças axiais durante a maquinagem, permite uma redução da área danificada em qualquer dos materiais. Esta redução é mais pronunciada no caso das placas em carbono/epóxico, cerca de 11%. Tal como acontecia nas forças axiais, os melhores parâmetros para as placas em RTM são uma velocidade de corte de 26 m/min, e um avanço de 0,1mm/rot, sem utilização de arrefecimento. De notar que a variação de valores não é tão acentuada como se verificou no estudo das forças axiais. A escolha dos parâmetros adequados permite uma redução de apenas 2% em  $F_d$ .

Para as placas em carbono/ epóxico os melhores valores para o factor de delaminação correspondem aos parâmetros recomendados pelo fabricante, reduzindo a delaminação em cerca de 14 %. A utilização de ferramentas em HSS apresentou os piores resultados, tal como previsto, confirmando que este tipo de ferramentas não é o adequado no corte de placas em que o carbono é utilizado como reforço. As variações observadas neste factor são superiores a 10%, em qualquer dos factores analisados. A excepção é o efeito do arrefecimento, com uma redução de cerca de 5%.

Tabela 6. Tensão de esmagamento.

		Tensão de esmagamento - $\sigma_{bear}$ - [MPa]	
Nº ensaio	RTM	Nº ensaio	C/ Ep
1	194.2	1	537.3
2	231.7	2	519.4
3	212.1	3	533.0
4	218.6	4	548.4
5	188.2	5	543.3
6	188.2		
7	239.6		
8	185.9		

### 3.3. Ensaio de esmagamento

O ensaio de esmagamento foi realizado de acordo com a norma ASTM D5961, para os dois materiais em estudo. A espessura escolhida para as placas – 5mm – levou a que o elemento de ligação, em aço, suportasse tensões de corte elevadas, pelo que se optou por substituir este elemento no final de cada ensaio. Apenas foi considerado o valor da tensão de esmagamento, do qual são dadas as médias dos ensaios válidos. De lembrar que, de acordo com a Norma, devem ser ignorados os ensaios em que o modo de rotura seja por tensão pura, isto é, com propagação da fractura perpendicular à direcção de solicitação. Este modo ocorreu em alguns dos ensaios com as placas em RTM.

Analisando os resultados obtidos, pode-se concluir que os melhores valores surgem com a velocidade média – 26 m/min – e o menor avanço – 0.10 mm/rot - nas placas em RTM. Continua a não ser vantajosa a utilização do arrefecimento, que faz baixar a resistência mecânica da placa durante o ensaio, em cerca de 12%.

De notar que no caso das placas RTM, os valores de resistência de esmagamento obtidos nas placas com pré-furação são inferiores aos verificados nas placas furadas de uma só vez. Isto parece indicar ser preferível não recorrer à pré-furação o que contradiz a análise das áreas delaminadas. Estes resultados podem ter sido influenciados pelo facto de, em alguns ensaios, se ter verificado um modo de rotura em tensão pura, não sendo esses valores considerados nas médias apresentadas.

Esta situação de contradição também se encontra nos valores obtidos para as placas em carbono/epóxico, em que o melhor valor do ensaio é obtido para a condição de corte que apresentava valores de dano mais alargados, ou seja, quando eram utilizadas brocas em HSS. A utilização da estratégia de pré-furação permitiu uma melhoria de cerca de 3% na tensão de esmagamento. O uso dos parâmetros aconselhados pelo fabricante das brocas permitiu um aumento de apenas 1.6 %.

Estes resultados parecem concordar com as observações de Tagliaferri et al.[1], quando afirma que o teste de esmagamento só proporciona diferenças significativas para danos no furo consideravelmente extensos, sendo aproximadamente constante, a menos da dispersão de resultados, para valores de dano menores. Em [1] não foi possível estabelecer correlações. Outra conclusão possível é de que este ensaio poderá não ser o melhor indicador da qualidade da furação.

## 4. CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

Foram estudados alguns aspectos práticos da furação de PRF's, monitorizada a força axial durante a furação e analisadas as placas por meio de um ensaio não-destrutivo e um ensaio destrutivo. Os resultados obtidos permitem algumas conclusões.

- O recurso à pré-furação na placa permite um abaixamento das forças axiais e do factor de delaminação, o que significa a obtenção de furos com menos dano à sua volta.
- A utilização do arrefecimento com azoto líquido não apresenta vantagens, quer em termos da diminuição do atrito durante a furação, quer na melhoria da qualidade dos furos obtidos, nas condições de realização dos ensaios.
- Em compósitos com fibra de vidro fabricados por RTM são mais adequadas velocidades da ordem dos 26 m/min, dentro dos valores referidos. Em relação ao avanço, o valor de 0,10 mm/rot parece ser o mais adequado. Será um aspecto a merecer alguma atenção em próximos estudos, incluindo avanços menores.
- Nas placas em carbono/ epóxido, verificou-se que a utilização de uma ferramenta em carboneto revestido com TiAlN e parâmetros recomendados – 100 m/min e 0,10 mm/rot – apresentou os melhores resultados quanto à força axial e ao factor de delaminação. Não foi possível estabelecer correlações entre este factor e os resultados obtidos no ensaio de esmagamento das placas furadas.
- O ensaio de esmagamento mostra poder avaliar a qualidade da furação, embora os métodos não-destrutivos utilizados – monitorização de forças e raios X – possam dar indicações adequadas, sem necessidade de inutilização de placas. No entanto, este ensaio parece não ser o mais indicado para quantificar a qualidade da furação, quando a gama de danos não é muito extensa.

A nível de trabalhos futuros destaca-se o alargamento do estudo ao vidro/ epóxido obtido a partir de pré-impregnado e por moldação manual. Está igualmente prevista a realização de ensaios de C-Scan e o estudo da influência da rugosidade das paredes do furo.

## AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho não teria sido possível sem a colaboração do CEMACOM – INEGI e das Oficinas Mecânicas da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

## REFERÊNCIAS

- [1] V. Tagliaferri, G. Caprino, A. Ditterlizzi – Effect of drilling parameters on the finish and mechanical properties of GFRP composites - *Int. Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol.30, pp. 77-84, (1990)
- [2] A.Bongiorno, E. Capello, G. Copani, V. Tagliaferri – Drilled hole damage and residual fatigue behaviour of GFRP – Vol.II – pp. 525-532 – ECCM-8, (1998)
- [3] G. Caprino, V. Tagliaferri – Damage development in drilling glass fibre reinforced plastics - *Int. Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol.35, pp. 817-829, (1995)
- [4] Dharan, H. – Conferência sobre maquinação de compósitos – INEGI – Outubro 2000
- [5] R. Piquet, B. Ferret, F. Lachaud, P. Swider, Experimental analysis of drilling damage in thin carbon/epoxy plate using special drills, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 31 (10), pp. 1107-1115, (2000)
- [6] W.C. Chen – Some experimental investigations in the drilling of carbon fiber-reinforced plastic (CFRP) composite laminates, *Int. Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol.37, N°8, pp. 1097-1108, (1997)
- [7] F. Lachaud, R. Piquet, F. Collombet, L. Surcin – Drilling of composite structures – *Composite Structures*, 52, pp. 511-516, (2001)
- [8] L-B Zhang, L-J Wang, X-Y Liu – A mechanical model for predicting critical thrust forces in drilling composite laminates, *Proc Instn Mech Engrs Vol. 215 Part B*, pp 135-146, (2001)
- [9] E. Persson, I. Eriksson, L. Zackrisson, Effects of hole machining defects on strength and fatigue life of composite laminates, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 28 (2), pp. 141-151, (1997)
- [10] Hong, S. ; Ding, Y. ; Jeong, J. - Experimental evaluation of friction coefficient and liquid nitrogen lubrication effect in cryogenic machining, *Machining Science & Technology*, Vol. 6 Issue 2, pp 235-250, (2002)

- [11] Phillip J. Ross – Aplicações das Técnicas Taguchi na Engenharia da Qualidade, McGraw Hill, (1991)
- [12] ASTM D5961/ D 5961M – 01 – Standard Test Method for Bearing Response of Polymer Matrix Composite Laminates, (2001)

## **MACHINING OF POLIMERIC MATRIX COMPOSITES**

**Abstract** - Machining of FRP – fiber reinforced plastics – although possible to be performed by conventional machinery, arises specific problems that are different from those known in metal machining, due to material heterogeneity. This paper handles with the drilling of glass/epoxy RTM – Resin Transfer Molding - and carbon/epoxy composites made from prepreg, with the purpose to achieve holes without delamination or other typical defects. The holes are made with different cutting parameters, pre-drilling is used in some cases and liquid nitrogen as coolant is also tried. During drilling, thrust force is continuously monitored. For carbon/epoxy plates, two drills with different materials are also compared. Hole evaluation is made by non-destructive radiographic photographs and by bearing test, as destructive technique. In the end, some conclusions are presented as well as next steps for drilling study.

**Keywords** - Composite materials, machining processes, tests and examinations.

