



FURAÇÃO DE LAMINADOS EPÓXIDOS REFORÇADOS

J. PAULO DAVIM, PEDRO REIS

Universidade de Aveiro
Departamento de Engenharia Mecânica,
Campus Santiago, 3810 -193 Aveiro, Portugal

(Recibido 5 de abril de 2004, para publicación 24 de mayo de 2004)

Resumo – Neste artigo pretende-se apresentar um estudo experimental sobre a relação entre as forças de corte e o factor de delaminação durante a furação de laminados epóxicos reforçados a fibras de carbono. Pretende-se relacionar a pressão específica de corte (K_s) e a força de avanço (F_a) com o factor de delaminação (F_d). Os ensaios foram realizados em laminados de resina epóxida reforçados com 55% de fibras de carbono, utilizando brocas “Brad & Spur” de carbonetos sinterizados (K10) com diâmetro 5 mm, de acordo com a norma DIN 6539. Através de um dinamómetro piezoeléctrico e o seu respectivo sistema de aquisição de dados foram adquiridas as forças de corte, nomeadamente o momento (M) e a força de avanço (F_a). Posteriormente efectuaram-se medições do dano (delaminação) causado pela broca nos laminados através do microscópio de oficina. Foi efectuada a análise de variância com o objectivo de avaliar a influência dos parâmetros processuais (velocidade de corte (V_c) e avanço(a)) na força de avanço (F_a), pressão específica de corte (K_s) e no factor de delaminação (F_d). Finalmente foram obtidas as correlações do factor de delaminação com a força de avanço e com a pressão específica de corte. Os resultados obtidos demonstraram que o factor de delaminação diminui com a pressão específica de corte e aumenta com a força de avanço.

1. INTRODUÇÃO

Os materiais compósitos de matriz polimérica são formados por uma matriz, reforçada por fibras, que se agregam física e quimicamente por um processo de cura. As fibras mais usadas são as fibras de carbono, vidro ou aramida dependendo da aplicação final a que se destinam os compósitos.

Os compósitos de matriz polimérica, mais concretamente os plásticos reforçados a fibras de carbono (PRFC), são materiais caracterizados por uma elevada resistência mecânica, rigidez, baixa densidade e baixo peso. Devido às excelentes propriedades que possuem, estes apresentam, em algumas situações, melhor desempenho que os materiais metálicos. Contudo, eles podem facilmente ser danificados durante a sua maquinaria, a menos que o processo seja executado com parâmetros processuais e ferramentas adequadas. O dano típico sofrido pelos compósitos laminados durante os processos de maquinaria denomina-se delaminação.

A furação é o processo mais usado na maquinaria de materiais compósitos devido à necessidade de integração estrutural, sendo assim um tópico de investigação muito actual devido à necessidade de resolver problemas relacionados com a delaminação.

Recentemente, vários investigadores, [1-8] dedicaram-se ao estudo de compósitos laminados reforçados a fibras de carbono e concluíram que o aparecimento da delaminação nos laminados ocorre em função dos parâmetros processuais e da geometria da ferramenta empregue.

Chambers and Bishop [1] efectuaram ensaios de furação em dois compósitos reforçados com fibra de carbono utilizando duas brocas (K10 e PCD). Analisaram o desgaste da ferramenta, a qualidade superficial do compósito e a eficiência de corte e concluíram que a broca helicoidal de PCD apresentava melhores resultados em ambos os compósitos.

Chen [2], introduziu o conceito de delaminação, F_d (razão entre o diâmetro máximo na zona do dano, D_{max} , e o diâmetro nominal do furo, D) para analisar e comparar o grau de delaminação da zona furada em compósitos laminados reforçados a fibras de carbono. Os efeitos da geometria da broca e parâmetros processuais foram testados no mesmo tipo de compósito, concluindo-se que a furação com ausência de

delaminação pode ocorrer com uma selecção correcta dos parâmetros processuais e uma adequada geometria da broca.

Piquet et al.[3], efectuaram um estudo de furação com dois tipos de brocas, uma helicoidal e outra de geometria especial, em compósitos laminados de matriz epóxida reforçada a fibras de carbono. Os resultados mostram que a ferramenta de geometria especial origina o mesmo tipo de dano do que a broca helicoidal, mas em menor grau.

Zhang et al.[4] realizaram um estudo sobre os defeitos à saída de compósitos laminados reforçados a fibras de carbono causados pela furação e concluíram que a delaminação é o defeito mais problemático que existe na furação de compósitos laminados.

Lin and Chen [5], realizaram ensaios a velocidades de corte elevadas (210 a 850 m/min) em compósitos laminados reforçados por fibras de carbono usando brocas helicoidais e concluíram que o aumento da velocidade de corte conduz a um aumento do desgaste da broca, o que origina maior dano no material.

Lachaud et al.[6], propuseram um modelo que relaciona a força de avanço com a delaminação das últimas camadas do compósito. O estudo apresenta uma correlação entre os resultados experimentais e os resultados obtidos através de um modelo matemático que relaciona a geometria da broca com o tipo de compósito laminado.

Enemuoh et al. [7], para seleccionarem parâmetros processuais que permitiam a ausência de dano na furação de compósitos de matriz epóxida reforçada com carbono utilizaram a metodologia de Taguchi. Um modelo matemático baseado nos resultados experimentais é usado para relacionar os parâmetros processuais com as condições de corte óptimas.

Mathew et al. [8] avaliaram a força de avanço e o binário em duas ferramentas de corte de diferente geometria durante a furação de plásticos reforçados a fibra de vidro. As investigações revelaram que o desempenho da ferramenta de corte com geometria especial (trepanning tool) é superior à ferramenta convencional (helicoidal) em termos de força de avanço, binário e qualidade obtida no furo.

Caprino e Tagliaferri [9] investigaram os mecanismos de interacção entre as ferramentas de corte (brocas) e os materiais a furar e verificaram que é necessário desenvolver geometrias adequadas para a furação de materiais compósitos de matriz polimérica.

Ogawa et al. [10], descreveram a relação entre a força de corte e a rugosidade da superfície da parede de um furo de pequeno diâmetro numa placa de matriz polimérica reforçada com fibra de vidro para circuitos integrados (“boards”). Verificaram que as arestas de corte principais apresentam maior influência na qualidade da parede do furo do que a aresta transversal.

O presente estudo tem como objectivo avaliar a influência dos parâmetros processuais (V_c e a) no processo de corte (pressão específica de corte e força de avanço) e no factor de delaminação durante a furação de laminados epóxidos reforçados a fibras de carbono. Usando análise estatística pretende-se avaliar a contribuição dos parâmetros de processuais (V_c e a) na pressão específica de corte, na força de avanço e no factor de delaminação. Finalmente pretende-se relacionar a pressão específica de corte e a força de avanço com o factor de delaminação.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

2.1. Materiais e equipamento

Os ensaios foram realizados em laminados de resina epóxida reforçada com 55% de fibra de carbono, com 3 mm de espessura. Os laminados obtidos através do processo Autoclave, possuem 13 camadas de fibras alternadas com uma orientação de 0 e 90°, como se observa na Fig. 1.

Na furação foi utilizada uma broca “Brad & Spur” de carbonetos sinterizados (K10), R20719680, como se observa na Fig.2, com 5 mm diâmetro e 25.5 mm de comprimento de hélice segundo a norma DIN 6539.

Para a realização dos ensaios foi utilizado o centro de maquinagem “VCE MIKRON 500”, com uma potência de 11kW e uma velocidade de rotação máxima de 7500 r.p.m. Através de um dinamómetro piezoeléctrico 9272 Kistler® e seu respectivo sistema de aquisição de dados foram medidas as forças de corte, nomeadamente o momento (M) e a força de avanço (F_a), conforme se observa na Fig.3.

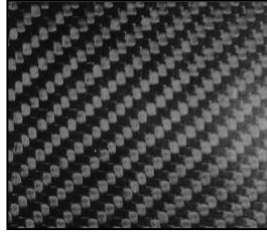


Fig. 1. Laminado de matriz polimérica utilizado nos ensaios.



Fig. 2. Broca “Brad & Spur” de carbonetos sinterizados (K10) utilizada nos ensaios de furação.

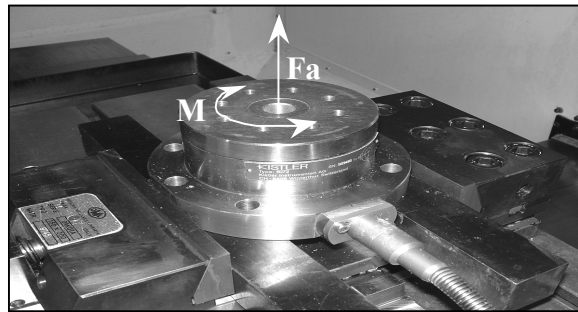


Fig. 3. Dinamómetro piezoeléctrico 9272 Kistler[®] utilizado nos ensaios.

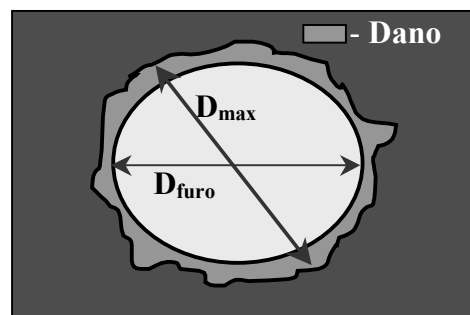


Fig. 4. Medição do diâmetro máximo da região com dano à entrada do furo através do microscópio óptico.

A medição do dano foi efectuada, à entrada do furo, através do Microscópio Óptico Mitutoyo TM – 500, com uma ampliação de 30x e uma resolução de 1 μm , conforme se observa na Fig. 4.

Após a medição do dano sofrido pelo material, efectuou-se o cálculo do factor de delaminação (Fd). Este factor, é determinado pela razão entre o diâmetro máximo, D_{max} , e o diâmetro nominal do furo, D_{furo} , sendo calculado pela seguinte expressão:

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

Posteriormente efectuou-se o cálculo do valor da pressão específica de corte (K_s), através da seguinte expressão:

$$K_s = \frac{8 \times M}{a \times d^2} \quad (2)$$

sendo, M o momento em N.mm, a o avanço em mm/rot e d o diâmetro do furo em mm.

2.2. Planeamento experimental

Para a elaboração do plano de experiências foram utilizadas matrizes ortogonais para dois factores a três níveis, entendendo-se por níveis os valores tomados pelos factores.

A matriz seleccionada foi a L9 (24) tem 9 linhas que correspondem ao número de ensaios (8 graus de liberdade) com 2 colunas a três níveis. Os factores e as interacções são atribuídas às colunas.

O plano de experiências é constituído por 9 ensaios em que a primeira coluna foi atribuída à velocidade de corte, e a segunda coluna ao avanço e, as restantes, atribuídas às interacções. As respostas a estudar são: o factor de delaminação, a força de avanço e a pressão específica de corte. Cada ensaio foi repetido 2 vezes, a que corresponde um total de 36 ensaios, para permitir a análise de variância dos resultados.

O tratamento dos resultados experimentais foi realizado baseando-se na análise de variância (ANOVA-analysis of variance) [11-13].

Efectuou-se a análise de variância dos resultados com o objectivo de avaliar a influência da velocidade de corte e avanço no factor de delaminação, na força de avanço e na pressão específica de corte no laminado de resina epóxida reforçada com 55% de fibra de carbono.

3. RESULTADOS OBTIDOS E SUA DISCUSSÃO

O programa de ensaios efectuado contempla três objectivos. O primeiro objectivo visa relacionar a influência dos parâmetros processuais (V_c e a) com o factor de delaminação, a força de avanço e a pressão específica de corte. O segundo em avaliar a influência de contribuição de cada factor (V_c e a), aplicando a ANOVA, nos parâmetros anteriormente referidos (F_d , F_a e K_s). O terceiro, em relacionar a pressão específica de corte e a força de avanço com o factor de delaminação.

Tab. 1. Valores experimentais do factor de delaminação e pressão específica de corte em função dos parâmetros processuais.

Ensaio	V_c [m/min]	a [mm/rot]	Momento médio [N.cm]	Força de avanço média [N]	Pressão Esp. Corte [N/mm ²]	Factor de Delaminação (F_d)*
1	30	0.05	7.3	12.13	467.2	1.011
2	30	0.1	8.3	18.25	265.6	1.017
3	30	0.2	10.0	24.37	160.0	1.022
4	40	0.05	6.5	17.20	416.0	1.012
5	40	0.1	7.2	22.67	230.4	1.021
6	40	0.2	9.3	27.70	148.8	1.030
7	50	0.05	7.0	21.39	448.0	1.019
8	50	0.1	7.1	25.75	227.2	1.023
9	50	0.2	9.3	30.51	148.8	1.035

* média de 2 ensaios

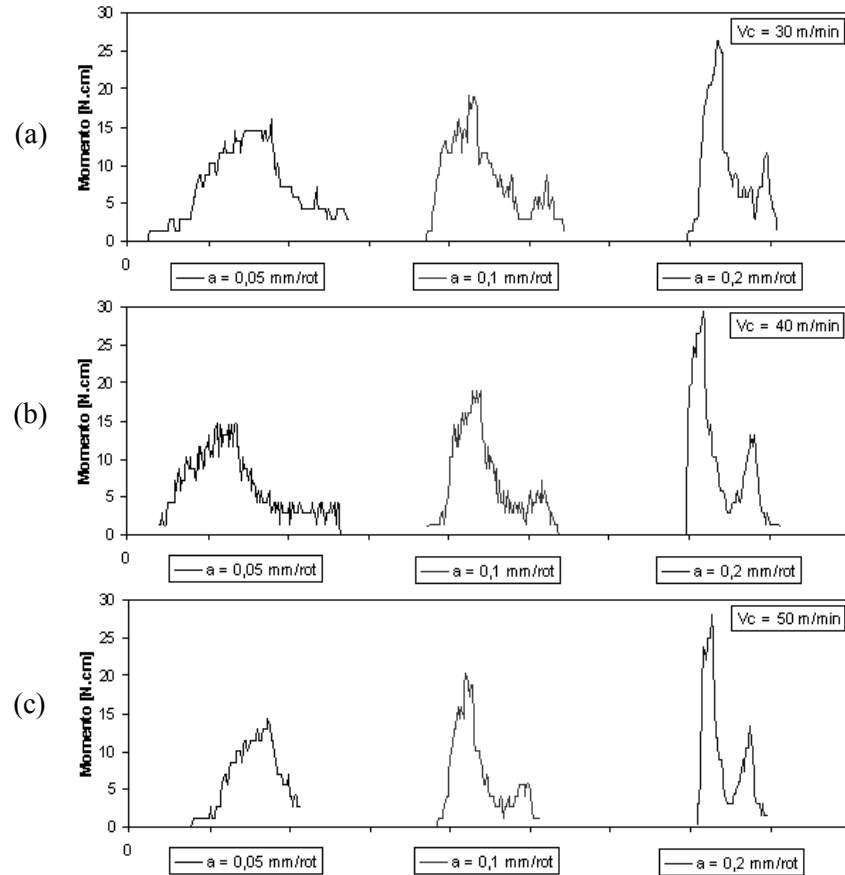


Fig. 5. Momento em função do avanço para as diferentes velocidades de corte (a) $V_c = 30$ m/min, (b) $V_c = 40$ m/min e (c) $V_c = 50$ m/min.

3.1. Influência dos parâmetros processuais

Na Tabela 1, é possível observar os resultados experimentais obtidos através das expressões (1) e (2) para o factor de delaminação específica de corte respectivamente, em função dos parâmetros processuais.

Nas Figuras 5 e 6 é possível observar a influência dos parâmetros processuais (V_c e a) na evolução do momento e da força de avanço, ao longo dos diferentes ensaios.

No que respeita ao primeiro objectivo, na Fig. 7 observa-se a evolução do factor de delaminação, força de avanço e pressão específica de corte em função do avanço, para as diferentes velocidades de corte.

Na Fig.7 (a) e (b), verifica-se que o aumento dos parâmetros processuais (V_c e a) em especial o avanço, conduz a um aumento do factor de delaminação e da força de avanço.

Na Fig. 7 (c), verifica-se que o aumento dos parâmetros processuais (V_c e a) em especial o avanço, implica uma diminuição da pressão específica de corte.

3.2. Análise de variância

Relativamente ao segundo objectivo, a Tabela 2 apresenta os resultados obtidos da ANOVA efectuada para o factor de delaminação, força de avanço e pressão específica de corte respectivamente.

O tratamento estatístico dos dados contemplou a ANOVA e os efeitos dos factores.

Os resultados obtidos foram efectuados para um nível de significância de 5%, ou seja, para um intervalo de confiança de 95%. A última coluna da tabela apresenta a percentagem de contribuição (P) de cada factor na variação total, indicando assim o grau de influência na resposta.

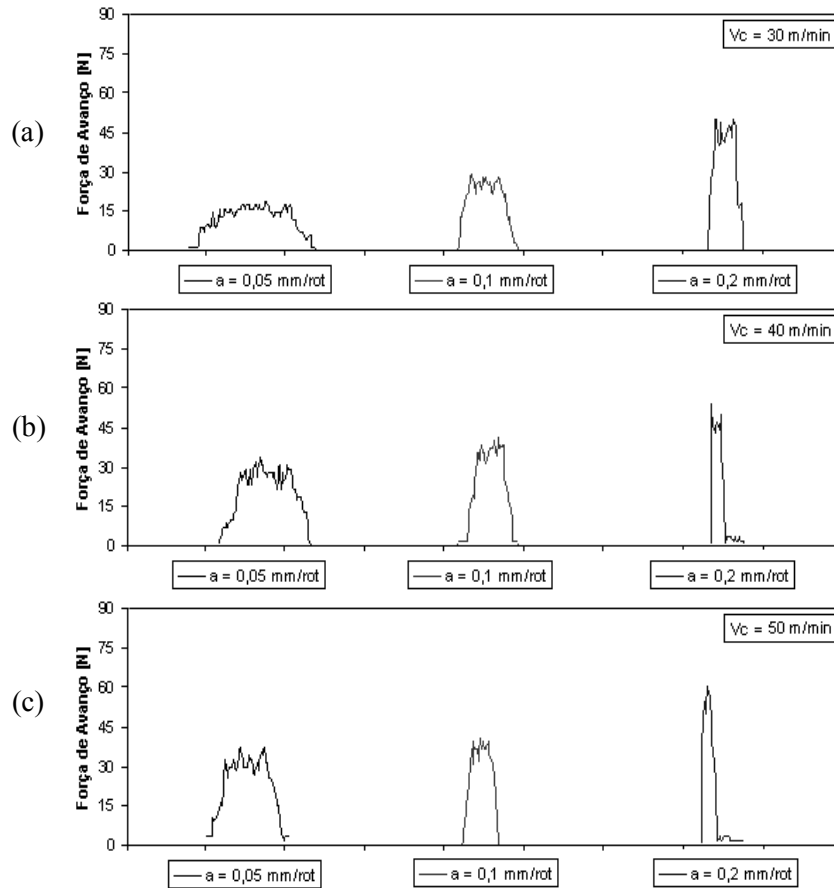


Fig. 6. Força de avanço em função do avanço para as diferentes velocidades de corte: (a) $V_c = 30$ m/min, (b) $V_c = 40$ m/min e (c) $V_c = 50$ m/min.

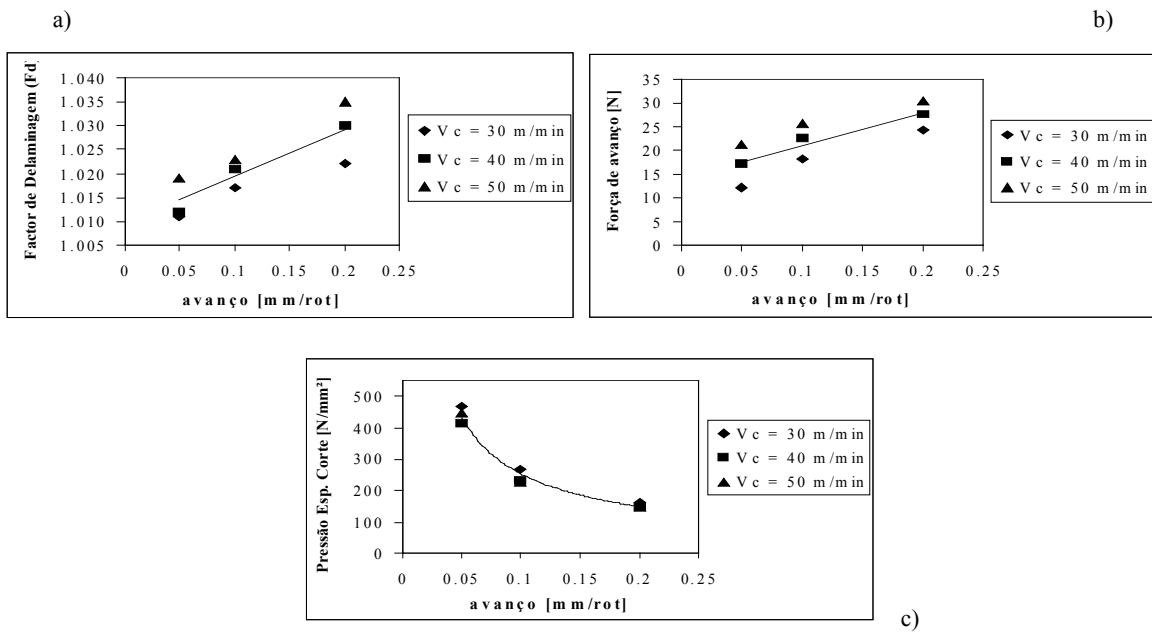


Fig. 7. Evolução da (a) factor de delaminação, (b) força de avanço, e (c) pressão específica de corte em função do avanço para as diferentes velocidades de corte.

Tab. 2. Tabela ANOVA para o factor de delaminação, força de avanço e pressão específica de corte.

Factor de delaminação						
Fontes de Variação	SDQ	gl	DQM	Test F	F 5%	Percentagem de contribuição (%)
Vc [m/min]	1.30E-04	2	6.50E-05	14.06	6.94	25.2
a [mm/rot]	3.30E-04	2	1.65E-04	35.70	6.94	67.0
Erro	1.80E-04	4	5.00E-06	/	/	7.7
Total	4.78E-04	8	/	/	/	100
Força de avanço						
Fontes de Variação	SDQ	gl	DQM	Test F	F 5%	Percentagem de contribuição (%)
Vc [m/min]	87.82	2	43.91	70.16	6.94	33.4
a [mm/rot]	169.18	2	84.59	135.17	6.94	64.7
Erro	2.50	4	0.64	/	/	1.9
Total	259.50	8	/	/	/	100
Pressão Específica de Corte						
Fontes de Variação	SDQ	gl	DQM	Test F	F 5%	Percentagem de contribuição (%)
Vc [m/min]	1.68E+03	2	8.38E+02	5.13	6.94	1.0
a [mm/rot]	1.34E+05	2	6.69E+04	409.47	6.94	98.0
Erro	6.53E+02	4	1.63E+02	/	/	1.0
Total	1.36E+05	8	/	/	/	100

SDQ -Soma dos quadrados, gl -Graus de liberdade, DQM- desvio quadrático médio, P- Percentagem de contribuição

Da análise da Tabela 2, observa-se que o factor avanço (P=67%) e a velocidade de corte (P=25.2%) apresentam contribuição estatística e física no factor de delaminação obtido para a entrada do furo, no entanto o avanço é o factor que tem maior influência.

Ambos os factores (Vc e a) apresentam contribuição estatística e física porque Teste F > F 5% e a percentagem de contribuição (P) > Erro associado. O erro associado da tabela ANOVA para o factor de delaminação à entrada do furo foi de 7.7%.

Igualmente, da Tabela 2 observa-se que ambos os factores, avanço (P=64.7%) e a velocidade de corte (P=33.4%), apresentam contribuição estatística e física na força de avanço obtida, contudo o avanço é o factor que apresenta maior influência. Ambos os factores (Vc e a) apresentam contribuição estatística e física pelas razões apontadas anteriormente. O erro associado da tabela ANOVA para a força de avanço foi de 1.9%.

Finalmente da Tabela 2, observa-se que para a pressão específica de corte apenas o factor avanço (98%) apresenta contribuição estatística e física. O erro associado da tabela ANOVA para a pressão específica de corte foi de 1%.

3.3. Relação entre a Ks e Fa com o factor de delaminação

No que respeita ao terceiro e último objectivo, na Fig. 8, é possível observar o factor de delaminação em função da força de avanço e da pressão específica de corte. Na Fig. 8 (a), verifica-se que o aumento da força de avanço conduz a um aumento do factor de delaminação. Na Fig. 8(b) verifica-se que o aumento da pressão específica de corte conduz a uma diminuição do factor de delaminação. Também é possível verificar que existe uma melhor correlação entre o factor de delaminação com força de avanço (R= 0.91) do que com a pressão específica de corte (R= 0.67).

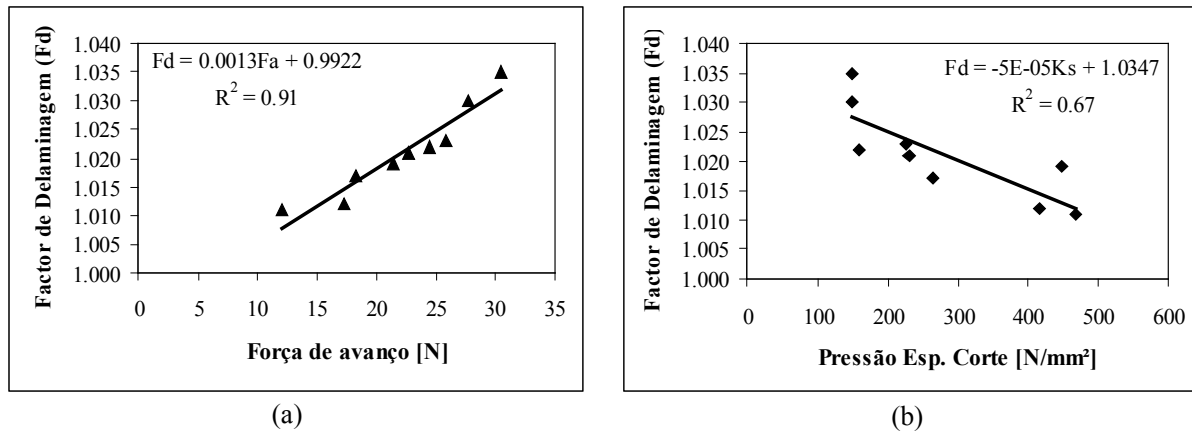


Fig. 8. Variação do factor de delaminação em função da (a) força de avanço e (b) pressão específica de corte.

4. CONCLUSÕES

- (i) O aumento dos parâmetros processuais implica um aumento do factor de delaminação e força de avanço e uma diminuição da pressão específica de corte.
- (ii) O avanço apresenta grande influência (estatística e física) na variação do factor de delaminação, na força de avanço e pressão específica de corte.
- (iii) A velocidade de corte apresenta baixa influência na variação do factor de delaminação e na força de avanço e praticamente não influencia a pressão específica de corte.
- (iv) O factor de delaminação aumenta com a força de avanço e diminui tendencialmente com o aumento da pressão específica de corte.
- (v) O factor de delaminação apresenta uma melhor correlação com a força de avanço do que com a pressão específica de corte.
- (vi) Para obtenção de furos em compósitos laminados reforçados a fibras de carbono, com baixo factor de delaminação associado, ou seja, dano no material compósito, devem ser utilizadas elevadas velocidades de corte e baixos avanços, que conduzem a uma menor força de avanço e a uma maior pressão específica de corte.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Prof. A. Torres Marques do INEGI/FEUP a cedência do material para teste. Agradecem igualmente a colaboração prestada na experimentação pelos Eng.ºs António Festas, Rui Nery e Acácio Patrício.

REFERÊNCIAS

- [1] A. Chambers and G. Bishop, "The Drilling of Carbon Fiber Polymer Matrix Composites", ICCM-10, Processing and manufacturing III Whistler, B.C., 565-572, (1995)
- [2] W. Chen, "Some Experimental Investigations in the Drilling of Carbon Fiber-Reinforced Plastic (CFRP) Composite Laminates", International Journal of Machine Tools and Manufacture, 37(8), 1097-1108 (1997)
- [3] R. Piquet, B. Ferret, F. Lachaud, P. Swider, "Experimental Analysis of Drilling Damage in Thin Carbon/Epoxy Laminate Using Special Drills", Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 31(10), 1107-1115 (2000)

- [4] H. Zhang, W. Chen, D. Chen, L. Zhang, “Assessment of the Exit Defects in Carbon Fibre-Reinforced Plastic Plates caused by Drilling”, *Precision Machining of Advanced Materials*, 196, 43-52 (2001)
- [5] S.C. Lin, and I. K. Chen, “Drilling of Carbon Fiber-Reinforced Composite Material at High Speed”, *Wear*, 194(1-2), 156-162 (1996)
- [6] F. Lachaud, R. Piquet, F. Collombet, L. Surcin, “Drilling of Composite Structures”, *Composite Structures*, 52(3-4), 511-516 (2001)
- [7] E. Enemuoh, U., Sherif El-Gizawy, A. and Chukwujekwu Okafor, A., “An Approach for Development of Damage-Free Drilling of Carbon Fiber Reinforced Thermosets”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 41(12), 1795-1814 (2001)
- [8] J. Mathew, N. Ramakrishnan, and N.K. Naik, “Investigations into the effect of geometry of a trepanning tool on thrust and torque during drilling of GFRP composites”, *Journal of Materials Processing Technology*, 91(1), 1-11 (1999)
- [9] G. Caprino, V. Tagliaferri, “Damage Development in Drilling Glass Fibre Reinforced Plastics”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 35 (6), 817-829 (1995)
- [10] K. Ogawa, M. Gunjima, E. Aoyama, T. Katayama, H. Inoue, T. Hirogaki, H. Nobe, and y. Kitahara, “Investigation on cutting mechanism in small diameter drilling for GFRP (thrust force and surface roughness at drilled hole wall)”, *Composite Structures*, 38(1-4), 343-350 (1997)
- [11] P. Ross, “Taguchi Techniques for Quality Engineering- Loss Function, Orthogonal Experiments, Parameter and Tolerance Design”, McGraw-Hill, New York (1988)
- [12] G. Taguchi, and Konishi, S., “Taguchi Methods, Orthogonal Arrays and Linear Graphs, Tools for Quality Engineering”, American Supplier Institute (1987)
- [13] G. Taguchi, “Taguchi on robust technology development methods”, NY: ASME Press, New York (1993)

RELATION BETWEEN CUTTING FORCES AND DELAMINATION FACTOR ON DRILLING CARBON FIBER REINFORCED PLASTICS

Abstract – This paper presents an experimental study with the objective of relate cutting forces and delamination factor on drilling Carbon Fiber Reinforced Plastics. It is intended to relate the specific cutting pressure (Ks) and thrust force (Fz) with delamination factor (Fd). The experiments have been carried out in laminates made of epoxy matrix reinforced with 55% of carbon fiber, using a 5 mm diameter K10 drill, “Brad & Spur”, according to DIN 6539. A Kistler® piezoelectric dynamometer 9272 with a load amplifier was used to acquire the torque (B) and the thrust force (Fz). The damage around the holes was measured with a shop microscope. The analysis of variance of the data with the Fz, Ks and Fd in CFRP composite laminate, was done with the objective of analyzing the influence of the cutting velocity (V), and the feed rate (f) on the total variance of the results. Finally, correlations between delamination factor with specific cutting pressure and thrust force were established. The overall conclusions show that delamination factor decrease with the specific cutting pressure and increase with the thrust force.

