

FURAÇÃO DE POLIAMIDA REFORÇADA (PA66 GF30) COM ALTA VELOCIDADE DE CORTE

Juan Campos Rubio, juan@ufmg.br¹
Marco Aurílio Pereira da Silva Jr.¹
Alexandre Mendes Abrão, abrao@ufmg.br¹
Leonardo Roberto da Silva, lrsilva@deii.cefetmg.br²
Antônio Esteves Correia, aec@portugalmail.pt³
João Paulo Davim, pdavim@ua.pt⁴

¹ Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica, Laboratório de Usinagem e Automação, Av. Antônio Carlos, 6627, Pampulha, Belo Horizonte, MG.

² Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Departamento de Mecânica, Av. Amazonas, 5253 - Nova Suíça - Belo Horizonte, MG, CEP: 30.410-000

³ Instituto Politécnico de Viseu, Escola de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, Campus de Refeses, Viseu 3504 – 510 – Portugal

⁴ Universidade de Aveiro, Departamento de Engenharia Mecânica, Campus Santiago, 3810-193 Aveiro, Portugal

Resumo: *As poliamidas reforçadas com fibras de vidro se apresentam como materiais de grande futuro em aplicações automotivas. Desta forma, torna-se importante o estudo do comportamento deste tipo de material quando submetidos a processos de usinagem. Dentre os processos de usinagem o processo de furação é um dos mais utilizados nos componentes de material compósito. Em este trabalho será analisada a influência do avanço, da velocidade de corte e da geometria da ferramenta no acabamento superficial utilizando parâmetros de furação em alta velocidade. Os testes foram realizados em poliamida reforçada com 30 % fibra de vidro (PA66-GF30) utilizando brocas de carbonetos sintetizados (K10) com ângulos de ponta diferente. Os resultados apontam para um nível intermediário de velocidades onde é obtida uma taxa de remoção elevada sem não entanto prejudicar o acabamento.*

Palavras-chave: *Compositos, Poliamidas, Furação, HSM.*

1. INTRODUÇÃO

São diversos os exemplos de compósitos usados ao longo da história. Desde os simples muros de barro reforçados com bambu ou argila reforçada com palha (usada pelos israelitas), compensados de madeira usados pelos egípcios 1500 AC, entre outros, até os modernos materiais compostos de resinas plásticas reforçadas com fibras de vidro, aramida e carbono entre outros.

Materiais compósitos de plásticos reforçados com fibras apresentam uma excelente relação peso rigidez quando comparados com diversos materiais metálicos. Em função disto estes materiais vem sendo utilizados largamente na construção de componentes aeronáuticos, automotivos e náuticos, assim como estruturas marítimas, tubulações, componentes eletrônicos e ainda equipamentos militares e esportivos, particularmente em situações onde elevada relação entre resistência mecânica (ou rigidez) e massa é desejada. (Callister, 2002) (Lee et al., 2004) (Campos Rubio et al, 2008).

Este trabalho estuda o uso da tecnologia de usinagem com alta velocidade (HSM - *High Speed Machining*) na furação de um material compósito de matriz poliamida reforçado com fibras de vidro, com o objetivo de avaliar a influência dos parâmetros de usinagem em medias e altas rotações.

2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA

Entre os polímeros industrialmente utilizados, as poliamidas (PA) ou náilons, como são mais conhecidos, bem sendo muito utilizados em soluções de engenharia, devido à versatilidade de compor inúmeras formulações com excelentes balanços de propriedades. A figura (1) mostra alguns componentes produzidos em poliamida.



Figura 1. Aplicações de poliamidas em componentes industrializados.

Estas resinas semicristalinas, da família dos termoplásticos, são resultado da combinação de uma diamina e um diácido, como no caso do náilon 6.6 (PA 66), ou derivada de um aminoácido de lactama, como no náilon 6 (PA 6). Os números de átomos de carbono presentes no diácido e diamina, ou no aminoácido, determinam o tipo de PA, sendo a PA 6.6 (polímero de adipato de hexametilenodiamina, ou sal N, com seis carbonos no diácido original – ácido adípico – e seis carbonos na diamina) e a PA 6 (com seis carbonos na lactama) as mais tradicionais e com maior aplicação no mercado mundial. Extensa, a família ainda agrega as especialidades PA 4.6, PA 10, PA 11, PA 12, entre outras, diferenciadas pelo melhor desempenho em algumas de suas propriedades. a poliamida (PA) faz parte de uma família numerosa. De modo geral, todas as poliamidas apresentam boa combinação entre tenacidade e rigidez, com baixo coeficiente de atrito e alta resistência térmica (temperaturas de fusão acima dos 200°C e as de deflexão térmica (em carga baixa), além dos 160°C) e química: são inertes a quase todos os tipos de óleos e solventes (Sino Reto, 2008).

Versatilidade, boa aparência e facilidade de processamento constituem outros atrativos. Entre as resinas termoplásticas, a poliamida aceita maior número de modificações e combinações entre polímeros, permitindo compor extensa variedade de formulações, podendo se combinar com vários outros materiais, aditivos e reforços, possibilitando aplicações diversas. A Figura (2) mostra algumas aplicações de componentes automotivos de alta rigidez fabricados em poliamida reforçada com fibra de vidro (PA-RFV).

Por sua maior área cristalina, o náilon 6.6 tem, de modo geral, propriedades mecânicas, físicas e químicas mais elevadas. Ainda graças ao elevado grau de cristalinidade, a resina solidifica rapidamente no molde, diminuindo o ciclo de injeção. Além disso, o náilon 6.6 absorve menos umidade em relação ao tipo 6. Considerando 50% de umidade relativa do ar, o náilon 6.6 fica estável com teor de 2,5% de umidade e o náilon 6, com teor de 3,5%. Com temperatura de uso contínuo da ordem de 135°C, o náilon 6.6 leva vantagem em aplicações de temperaturas mais elevadas. Seu ponto de fusão é 263°C, contra 225°C do náilon 6. Desta forma, as propriedades superiores da resina ficam mais evidentes sob altas temperaturas. Já sob temperatura ambiente, o náilon 6 apresenta maior alongamento e resistência ao impacto superior quando comparado ao PA66. Também propicia melhor acabamento superficial do que o PA66. Sob temperaturas baixas, a PA 6 apresenta boa tenacidade e boas propriedades mecânicas, ainda que inferiores às da PA66 (Sino Reto, 2008).

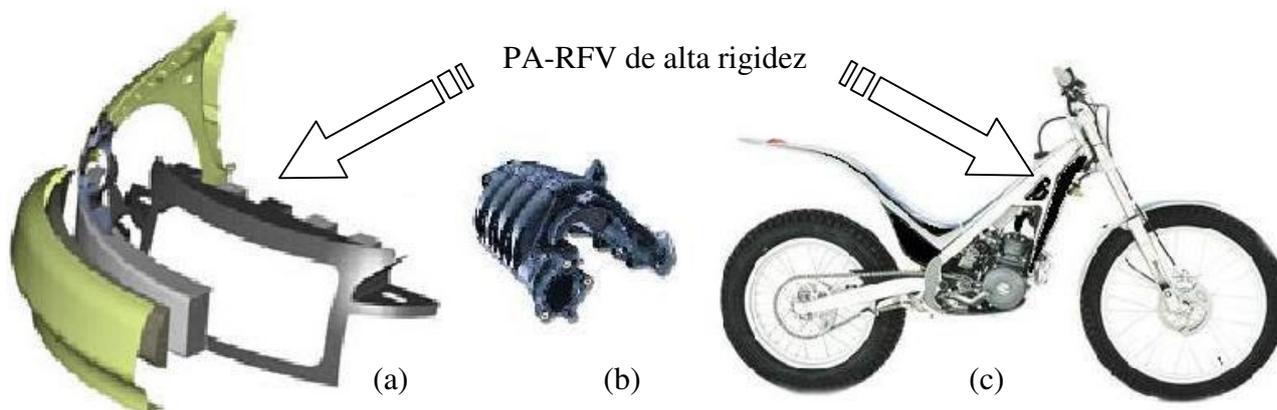


Figura 2. Exemplo de aplicação de poliamidas reforçadas com fibras de vidro (PA-RFV). (a) Sistemas de amortecimento de impactos em pára-choques automotivos (b) Sistemas de admissão de gases e (c) componentes estruturais de veículos (<http://www.omnexus.com>).

Diante deste crescente campo de aplicações fica evidente, portanto, a necessidade de se gerar conhecimento acerca do comportamento dessa categoria de materiais durante operações de usinagem de modo a se obter um desempenho satisfatório durante o corte, além de produzir componentes que atendam aos requisitos estabelecidos. O fato de o

material ser composto por constituintes tão distintos entre si (matriz e fibras) por vezes torna sua usinagem bastante complexa, dificultando a obtenção de superfícies de boa qualidade e de tolerâncias dimensionais e geométricas estreitas.

O processo de furação é um dos processos de usinagem mais utilizados na indústria manufatureira. A operação de furação de compósitos tem recebido a atenção de alguns pesquisadores, principalmente devido aos danos causados na entrada e saída da ferramenta, e caracterizados principalmente pela presença de trincas, delaminação da peça ou ainda descolamento das fibras da matriz (Davim e Mata, 2007).

No estudo de projeto de fuselagem de helicópteros realizado por Kassapoglou (1999), mostra-se que dentre as diversas atividades necessárias para completar a manufatura de um componente estrutural, operações de furação representam cerca de 8,3 % do custo final do componente. Dessa forma, a possibilidade de reduzir custos através da utilização da tecnologia da usinagem com alta velocidade (HSM - *High Speed Machining*) surge como uma importante alternativa para aumentar a produtividade.

Com o desenvolvimento dos eixos-árvore de alta rotação nas últimas décadas, foi possível atingir altas velocidades, permitindo o estudo aprofundado e a disseminação da tecnologia HSM. Muitas vantagens de HSM têm sido citadas, as mais comumente reivindicadas são altas taxas de remoção, baixas forças de corte, redução do tempo de produção, permitindo produzir peças com melhor qualidade superficial e dimensional (Dewes e Aspinwall, 1997)

Enderle e Knuszynski (1998) afirmam que as definições da faixa de velocidade de HSM variam substancialmente conforme se muda de um tipo de usinagem para outro. Por exemplo, se no caso de fresamento uma aplicação de HSM envolve uma velocidade de corte da ordem de cinco a dez vezes maior que a velocidade convencional, o dobro da velocidade convencional já é suficiente para que os processos de furação e roscamento sejam considerados como HSM.

A Figura (3) apresenta um gráfico mostrando as velocidades de corte e avanço utilizados em diversos trabalhos científicos nos últimos anos. Conforme se pode observar, de maneira geral a faixa de velocidades de corte comumente utilizada na furação de compósitos reforçados com fibras situa-se próxima de 40 m/min (Abrão et al., 2007). Desta forma, pode-se afirmar que uma velocidade de corte acima de 100 m/min seria caracterizada como furação com alta velocidade de corte.

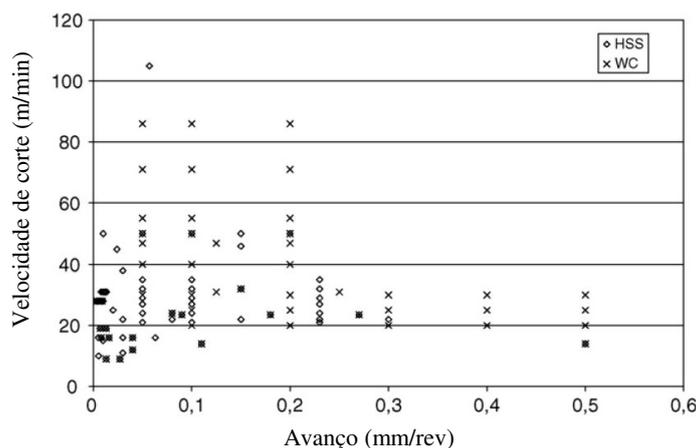


Figura 3. Faixas de velocidade de corte e avanço para furação de CPRF utilizando ferramentas de aço rápido (HSS) e carboneto de tungstênio (WC) (Abrão et al., 2007).

As características mais relevantes do emprego e utilização das altas velocidades de corte dizem respeito aos aspectos econômicos e técnicos. Altas taxas de remoção de material e reduzido tempo de usinagem são de importância decisiva para o aspecto econômico do processo de corte (Andrae, 1999).

A comparação entre os resultados do modelo e aqueles obtidos experimentalmente dentro de uma faixa de rotação de 4.000 a 18.000 rpm mostrou que a influência da velocidade sobre torque e força de avanço é praticamente desprezível, o que não ocorre com o avanço, cuja relação é linear com torque e força de avanço (Elhachimi et al., 1999).

Enemuoh et al. (2001) realizaram um estudo com o objetivo de identificar condições de operação que garantissem furos livres de defeitos. Para tanto foi elaborado um planejamento experimental de ensaios. Os mapas produzidos para a furação de compósitos de reforçados com fibras de carbono indicaram que o emprego de altas velocidades de rotação (3.200 rpm) associadas a baixos valores de avanço assegura a produção de furos sem delaminação e com baixa rugosidade.

A furação de compósitos poliméricos reforçados com fibras de aramida é normalmente recomendada empregando-se ferramentas de carboneto de tungstênio combinadas com altas velocidades rotacionais (entre 8.000 e 20.000 rpm) de modo a garantir furos com baixa rugosidade e sem delaminação. Entretanto, para Bhattacharyya e Horrigan (1998) a utilização de brocas de aço rápido com geometria modificada (ângulo de ponta negativo e ângulos de folga e de hélice elevado) aliada ao uso de nitrogênio líquido como fluido de corte propicia acabamento e qualidade dimensionais satisfatórios.

Um estudo realizado por Lin e Chen (1996) avaliou a utilização da usinagem com alta velocidade (faixa de rotação de 9.550 a 38.650 rpm, ou seja, velocidades de corte de 210 a 850 m/min) na furação de compósitos poliméricos

reforçados com fibras de carbono. Os autores concluíram que a elevação da velocidade de corte resulta em aumento da taxa de desgaste da ferramenta de corte e, por consequência, em aumento da força de avanço. Assim, a utilização de baixos valores de avanço (inferiores a 0,07 mm/rev) é imperativa visando a produção de furos de qualidade aceitável. Além disso, ferramentas de carboneto de tungstênio com ângulo de ponta negativo apresentaram desempenho superior às brocas helicoidais de aço rápido.

Verifica-se, portanto, que a usinagem de materiais compósitos a altas velocidades de corte é um tema muito pouco explorado, e que em algumas situações os resultados de pesquisas mostram-se contraditórios.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Os testes de furação aqui apresentados foram realizados num centro de usinagem com potência no eixo árvore de 7.5 kW e velocidade de rotação máxima de 8000 rpm. Um cabeçote específico, tipo turbina, foi utilizado para os ensaios a 40.000 rpm. A Figura (4) mostra o sistema de fixação dos corpos de prova na máquina.

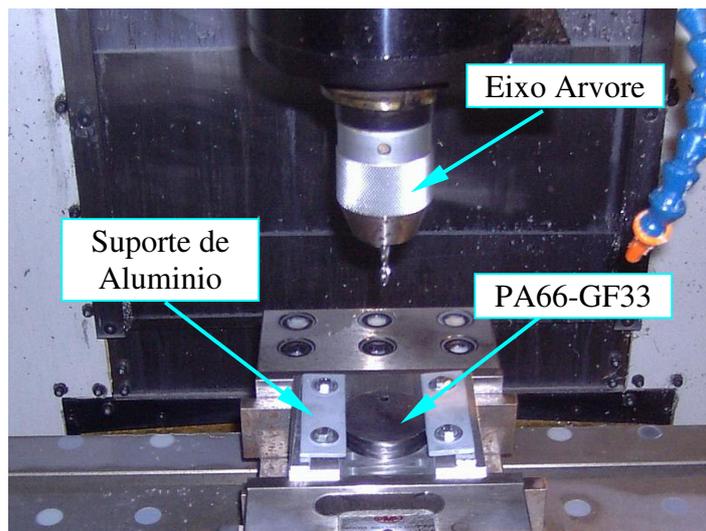


Figura 4. Sistema de fixação dos corpos de prova de PA-RFV no processo de furação com cabeçote convencional (< 10000 rpm).

O material dos corpos de prova utilizados foi um compósito de poliamida (náilon) PA66 reforçado com 30% fibra de vidro (5 μm de diâmetro e 50 μm de comprimento aproximadamente), denominado comercialmente de PA66-GF30. O material trata-se de um compósito comercial produzido por extrusão utilizado para fabricação de peças estruturais na indústria automobilística cujas características principais são apresentadas na Tabela (1). Os corpos de prova têm diâmetro de 50,8 mm e espessura média de 10 mm e foram fixados na máquina através de um suporte de alumínio com furos de 10 mm de diâmetro na parte inferior para garantir furos passantes sem provocar deflexões consideráveis no corpo de prova.

Tabela 1. Características do material compósito PA66-GF33.

<i>Material</i>	<i>Tipo</i>
Matriz	Poliamida 66
Reforço	Fibras de vidro (diâmetro 5 μm e 50 μm comprimento)
Modulo de elasticidade	2,15GPa
Tensão de ruptura	82,55MPa

As ferramentas utilizada foram brocas helicoidais de carboneto de tungstênio (classe ISO K20) com diâmetro de 5 mm, 2 arestas de corte, ângulo de hélice de 25° e ângulo de ponta de 85°, 115° e 130°. As três brocas utilizadas tem como código do fabricante (Guhring oHG) as seguintes designações: WN11RN, DIN 6539RN e DIN 8038RN para 130°, 115° e 85° de ângulo de ponta, respectivamente.

A rugosidade no interior do furo foi medida por meio de um perfilômetro Hommel Tester T1000[®]. A Figura (5) mostra o equipamento utilizado para medição do acabamento superficial dos furos usinados. O cut-off utilizado nas medições foi 0,8 mm.



Figura 5. Perfilmetro Hommel Tester T1000[®].utilizado para medição de rugosidade.

4. RESULTADOS E ANALISE

A Tabela (2) mostra os parâmetros de corte empregados no ensaio, assim como os resultados de rugosidade média (R_a) obtidos para 3 velocidades de corte e 4 avanços distintos. Cada teste foi feito duas vezes e a rugosidade de cada furo foi medida no mínimo em três pontos diferentes da parede interna do furo, com uma defasagem entre medições de 120° , medida na parte central do furo descartando-se a região de entrada e saída da broca.

Tabela 2. Parâmetros de corte testados e valor de rugosidade média (R_a) obtida para cada broca.

Teste	Velocidade de rotação (rpm)	Velocidade de avanço (mm/min)	Rugosidade média * R_a (μm) (média de 2 testes)		
			WN 11 RN 135°	DIN 6539 115°	DIN 8038 85°
1	4000	1000	1,04	1,3	0,93
2		3000	1,34	1,94	1,02
3		6000	1,3	1,65	1,14
4		9000	1,56	2,03	1,37
5	8000	1000	0,96	0,99	0,99
6		3000	0,99	1,11	1,03
7		6000	1,14	1,63	1,05
8		9000	1,18	1,76	1,08
9	40000	1000	4,08	2,28	1,17
10		3000	2,81	4,16	1,54
11		6000	1,32	1,88	2,52
12		9000	1,53	1,81	2,56

A Figura (4), (5) e (6) apresentam a evolução da rugosidade média (R_a) com o aumento dos parâmetros de corte para as brocas WN11RN, DIN 6539RN e DIN 8038RN com 130° , 115° e 85° de ângulo de ponta, respectivamente. Nota-se que o aumento do avanço provoca uma evidente elevação de R_a quando velocidades de rotação de 4000 rpm (Figura (4)) e 8000 rpm (Figura (5)) são utilizadas.

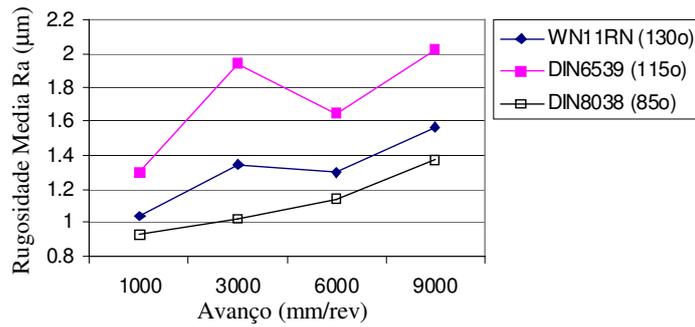


Figura 4. Rugosidade média (R_a) em função do avanço e do ângulo de ponta da broca para uma rotação de 4.000 rpm.

Entretanto, a Figura (6) mostra que ao utilizar altas velocidades de corte (40000 rpm), uma redução do valor de Ra para o maior avanço pode ser observada. Este efeito pode ser atribuído ao curto período de contato da aresta de corte com o material compósito, o que impede que o calor gerado seja conduzido e danifique a superfície do furo.

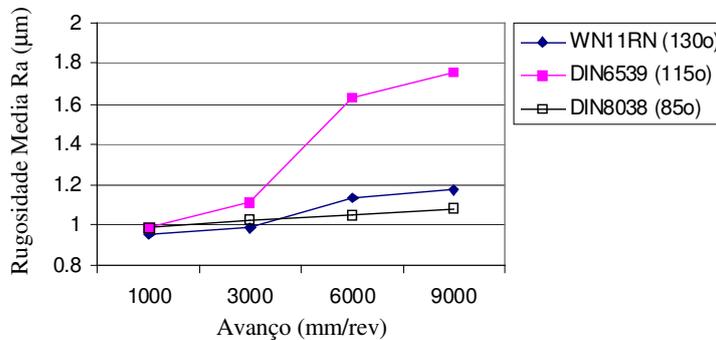


Figura 5. Rugosidade média (R_a) em função do avanço e do ângulo de ponta da broca para uma rotação de 8.000 rpm.

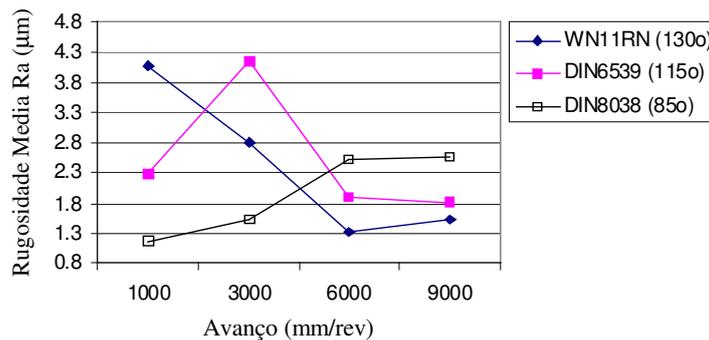


Figura 6. Rugosidade média (R_a) em função do avanço e do ângulo de ponta da broca para uma rotação de 40.000 rpm.

Uma análise das Figuras (4), (5) e (6) mostra que de maneira geral a broca com menor ângulo de ponta (DIN8038) obteve melhor desempenho quanto a rugosidade R_a da parede do furo. Desta forma a Figura 7 apresenta o comportamento desta broca de 85° de ângulo de ponta em para as diferentes velocidades.

Na Figura (7), pode-se verificar que o aumento da velocidade de rotação de 4000 rpm para 8000 rpm provocou uma sensível redução da rugosidade média na parede do furo. Entretanto, para a mudança de 8000 rpm para 40000 rpm, provocou um aumento significativo de R_a , o que pode ser atribuído ao aumento da temperatura de usinagem em altas velocidades de corte.

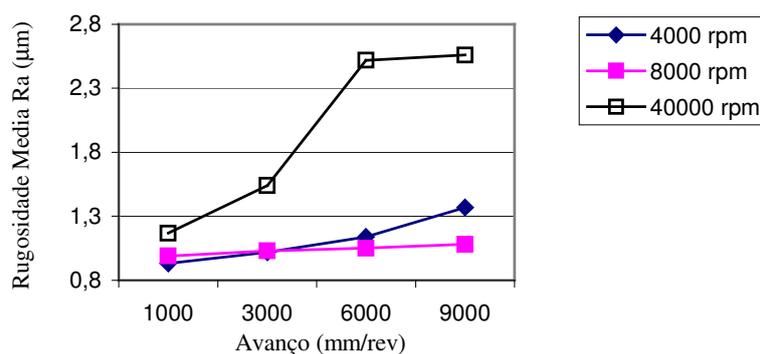


Figura 7. Rugosidade média (R_a) para a broca de 85° de ângulo de ponta (DIN8038) em função do avanço e da velocidade de rotação.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou um estudo do comportamento da Rugosidade média (R_a) na furação com alta velocidade de corte de placas de poliamida reforçada com fibra de vidro (PA66 GF33).

O estudo permitiu constatar que o aumento da velocidade de corte na furação de compósitos de fibra de vidro permite uma redução da rugosidade na parede do furo. Além disso, empregando-se uma velocidade de 8000 rpm observam-se resultados similares e mais estáveis aos obtidos com 40000 rpm.

Da mesma forma pode-se concluir que ferramentas com menor ângulo de ponta apresentam em geral melhor desempenho na furação deste tipo de material e nestas condições de corte.

Finalmente, pode-se afirmar que na velocidade intermediária de 8000 rpm apresentam um bom acabamento superficial associado a uma taxa de remoção de material superior.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer às entidades de apoio a pesquisa de Portugal (GRICES) e do Brasil (CAPES) pelo suporte financeiro a este trabalho.

7. REFERÊNCIAS

- Abrão, A.M., Faria P.E., Campos Rubio J.C., Reis P., Davim J. P. (2007). Drilling of fiber reinforced plastics: A review. *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 186; p. 1-7.
- Andrae, P. (1999). Chip formation in high speed cutting HSC. In: *3rd Internacional Machining & Grinding Conference*, Cincinnati, Ohio. 107-120.
- Bhattacharyya, D., Horrigan, D.P.W. (1998). A study of hole drilling in Kevlar composites - *Composites Science and Technology*. 58; 267-283.
- Callister W.D. (2002). *Materials Science and Engineering: An Introduction*. John Wiley & Sons Canada, Ltd.
- Campos Rubio, J. Abrão, A.M., Faria, P.E., Davim, J.P. (2007). Análise digital de dano na furação de materiais compósitos laminados. *Ciência e Tecnologia dos Materiais*. (SPMateriais) Vol. 19, N.1/2, p. 19-24.
- Davim JP, Mata FJ. (2007). A comparative evaluation of the turning of reinforced and unreinforced polyamide. *Int J Adv Manuf Technol*. 33: 911-914.
- Dewes, R. C.; Aspinwall, D. K. (1997). A review of ultra high speed milling of hardened steels. *Journal of Materials Processing Technology*. 69; 1-17.
- Elhachimi, M., Torbat, S., Joyot, P. (1999). Mechanical modelling of high speed drilling. 2: predicted and experimental results, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 39; 569-581
- Enemuoh, E.U., El-Gizawi, A.S. and Okafor, A.C. (2001). An approach for development of damage-free drilling of carbon fiber reinforced thermosets, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 41; 1795-1814.
- Enderle, K.D.; Knuszynski, J. (1998). A tecnologia de corte a alta velocidade produz furos de melhor qualidade. *Máquinas e Metais*. 386; 16-20.

- Kassapoglou C. (1999). Minimum cost and weight design of fuselage frames Part B: cost considerations, optimization and results. *Composites: Part A.*: 30; 895–904
- Lee DG, Lee CS, Lee HG, Hwang HY and Kim JW. (2004). Novel applications of composite structures to robots, machine tools and automobiles. *Composite Structures*: 66 (1-4): 17-39.
- Lin, S.C., Chen, C.K. (2007). Drilling carbon-fiber reinforced composite material at high speed, *Wear*. 1996: 196; 156-162.
- Omnexus Inc. Solution datasheets (<http://www.omnexus.com>).
- Sino Reto, M. A (2008). Náilon beira os setenta anos no auge do sucesso. *Plástico Moderno* (online),(<http://www.plastico.com.br/revista/pm352/poliamiadas1.htm>)N. 405, Julho.

8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

DRILLING POLYAMIDE COMPOSITE (PA66 GF30) WITH HIGH SPEED MACHINING (HSM)

Juan Campos Rubio, juan@ufmg.br¹
Marco Aurílio Pereira da Silva Jr.¹
Alexandre Mendes Abrão, abrao@ufmg.br¹
Leonardo Roberto da Silva, lrsilva@deii.cefetmg.br²
Antônio Esteves Correia, aec@portugalmail.pt³
João Paulo Davim, pdavim@ua.pt⁴

¹ Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica, Laboratório de Usinagem e Automação, Av. Antônio Carlos, 6627, Pampulha, Belo Horizonte, MG.

² Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Departamento de Mecânica, Av. Amazonas, 5253 - Nova Suíça - Belo Horizonte, MG, CEP: 30.410-000

³ Instituto Politécnico de Viseu, Escola de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, Campus de Refeses, Viseu 3504 – 510 – Portugal

⁴ Universidade de Aveiro, Departamento de Engenharia Mecânica, Campus Santiago, 3810-193 Aveiro, Portugal

Abstract. *The glass fibre reinforced polyamides are promising materials for the automotive applications. In order to achieve the desired tolerance and surface quality, these materials should be machined. Drilling is one of the machining processes most widely in composite materials. The effects of the experimental factors, feed rate, spindle speed and the drill angle on the surface roughness (R_a) responses are analysed. The tests were performed on reinforced polyamides with 30% of glass fibre (PA66-GF30) using cemented carbide (K10) drills with three different point angle. The results show that there are intermediary parameters where roughness average (R_a) is minimized and material rate remove is increase.*

Keywords: *Composite; Polyamide, Drilling; HSM.*