Comparação entre ferramentas para furação de polímeros reforçados por fibra de vidro

Para obter furos de boa qualidade em matrizes termofixas reforçadas com fibra de vidro, deve-se reduzir a força axial e o torque durante a furação. O estudo experimental relatado neste artigo avalia o desempenho e aponta a influência de quatro tipos de ferramenta (brocas helicoidais de aço rápido, serra de copo comum, serra de copo diamantada e trepanadora com insertos de metal duro) sobre estes parâmetros. Com base em um planejamento estatístico dos experimentos e na análise de variância, é possível avaliar esses fatores individualmente, seus efeitos de interação e os respectivos níveis de significância.

G. F. Batalha, M. Stipkovic Filho, S. Delijaicov Filho e E. C. Bordinassi

Fig. 1 – Pás de compósito laminado para geradores eólicos, fixadas ao rotor por junções parafusadas

Gilmar Ferreira Batalha (gfbatalh@usp.br) e Marco Stipkovic Filho (kovic@osite.com.br) são professores do Laboratório de Engenharia de Fabricação da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (Poli/USP). Sérgio Delijaicov Filho (sergiode@fei.edu.br) é professor do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia Industrial (FEI), de São Bernardo do Campo (SP), e Éd Claudio Bordinassi (ecb@maua.br) é do Instituto Mauá de Tecnologia, em São Caetano do Sul (SP). Publicação autorizada pelos autores.

O processo de furação de laminados de compósitos poliméricos reforçados por fibra de vidro exerce uma complexa influência sobre o processo de junção e montagem das pás do rotor de dínamos ou geradores eólicos. Como ilustrado na figura 1, as pás têm comprimento de 25 a 50 metros e as condições da sua junção com o rotor são muito importantes, pois mesmo pequenos desvios na condição de fixação podem gerar grandes sobrecargas em todo o conjunto durante a rotação.

Este trabalho apresenta os resultados de uma investigação preliminar, visando à obtenção de melhorias do processo com o uso de recursos estatísticos para decidir pela melhor ferramenta para furação de compósitos, bem como analisar as condições de usinagem em que ela opera.

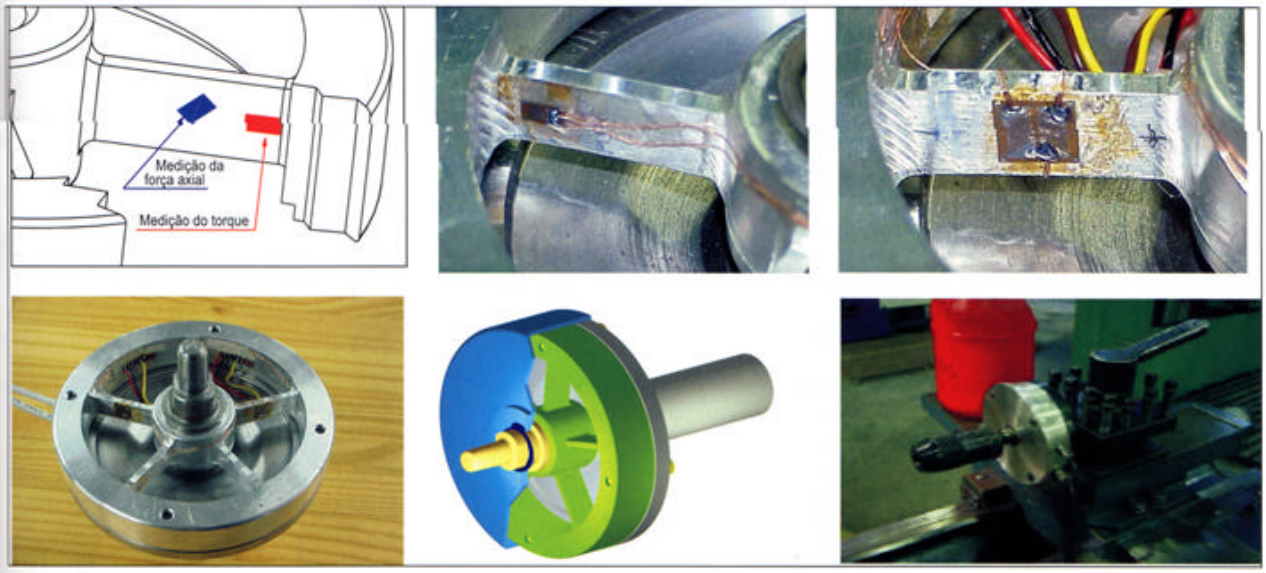


Fig. 2 – Dinamômetro de furação com extensômetros de resistência dispostos em ponte de Wheatstone, com quatro extensômetros medindo o torque e dois extensômetros duplos a 45° medindo a força axial

Compósitos e pás de geradores eólicos

Materiais poliméricos reforçados por fibras de vidro, carbono ou aramida são caracterizados por possuírem boas propriedades mecânicas, tais como razão peso/resistência e peso/rigidez, boa resistência à corrosão e poderem ser facilmente moldados em formatos próximos ao do produto final, propiciando uma combinação de propriedades e condições de moldagem adequadas.

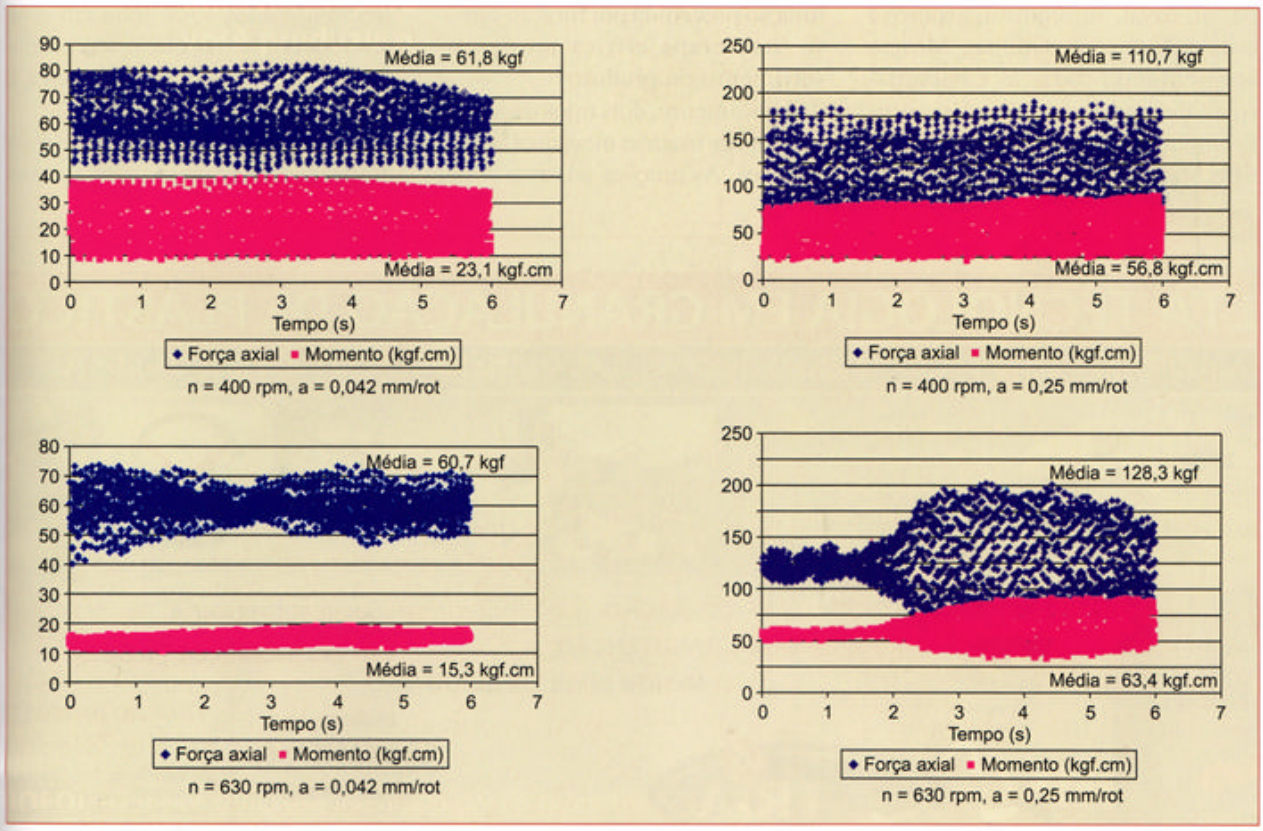


Fig. 3 – Furação com broca helicoidal sem fluido com diferentes velocidades de corte e taxas de avanço

Tab. 1 – Propriedades das amostras do laminado de polímero reforçado com fibra de vidro

Relacionadas com os componentes	
Características do reforço	Fibra de vidro
• Tamanho	Contínua
• Material	Vidro
• Tipo	E
• Diâmetro do filamento	17 µm
Quantidade de reforço	64%
Orientação das fibras	0/+45/-45/ 90
Composição química da matriz	Epóxi (bisfenol A + epicloridrina + poliamina)
Relacionadas ao material consolidado	
Propriedades físicas	Temperatura de transição vítrea (T_g) = 80°C
Tratamentos térmicos	Pós-cura sob 60°C por 3 h
Método de obtenção	Polimerização com cura a vácuo
Distribuição do reforço (homogêneo ou não)	Ortotrópico
Propriedades mecânicas	Módulo de elasticidade (E) = 14.415 MPa
	Módulo de rigidez (G) = 5.065 MPa
	Alongamento = 2,12 %

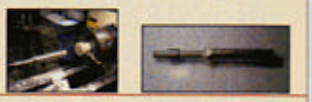
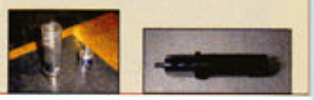
Neste sentido, a aplicação de materiais poliméricos reforçados com fibras de vidro se torna especialmente importante para aplicações que demandam elevado desempenho, como nas indústrias aeroespacial, naval, automotiva, esportiva e de defesa civil e militar. Mesmo apresentando todas as características de moldagem citadas anteriormente, as peças reforçadas com fibra de vidro necessitam de processos de junção e montagem, já que, na maioria das vezes, elas são conformadas em uma operação única de moldagem. Em tais casos, a junção se torna o elo mais fraco da estrutura, e a rebitagem ou a parafusação precedida por furação torna-se uma etapa crítica no desenvolvimento do produto[7].

Tipicamente, dois tipos de junção podem ser usados: mecânica ou por adesivos. As junções adesivas – por colagem – necessitam de uma limpeza cuidadosa antes da aplicação dos adesivos, que pode ser afetada pelas condições ambientais, e são difíceis de serem desmontadas para trabalhos de manutenção e reparo. Por outro lado, elas possibilitam uma distribuição melhor da carga por uma área maior, quando comparadas à junção mecânica por parafusos, a qual demanda uma boa qualidade dos furos mediante processos de furação e/ou trepanação para a colocação de parafusos, pinos e rebites. Portanto, a eficiência das junções mecânicas depende fortemente da qualidade do processo de furação.

Verifica-se que, na furação de polímeros laminados reforçados com fibra de vidro, o ponto mais fraco é a sua suscetibilidade ao dano por usinagem quando submetidos a inadequados parâmetros de corte ou geometrias de ferramentas. Tais fatores caracterizam esses laminados como materiais difíceis de serem usinados e resultam em uma tendência a evitar que o seu acabamento inclua usinagem durante a manufatura e a montagem.

Entre os diversos processos empregados na usinagem desses

Tab. 2 – Ferramentas utilizadas nos ensaios

Broca helicoidal de aço rápido, com diâmetro de 25,4 mm	
Serra de copo comum (aço rápido), diâmetro de 25,4 mm	
Serra de copo diamantada (corpo de aço rápido e ponta revestida com diamante), diâmetro de 25,4 mm	
Trepanadora com insertos de metal duro, diâmetro externo de 50,8 mm	

compósitos, a furação e a trepanação são, provavelmente, os mais usados no acabamento da peça moldada. Nas junções rebitadas e/ou parafusadas, surge a necessidade de furos precisos e isentos de danos, visando assegurar uma maior resistência e uma junção mais precisa.

Tab. 4 – Análise de variância

Efeito dos fatores	Força axial	Torque
A	- 24,069	- 4,267
B	- 18,980	- 0,910
C	30,824	12,443
AB	22,399	1,856
AC	- 2,776	0,746
BC	- 5,283	0,543
ABC	6,574	- 1,801

Usinabilidade de laminados de plásticos reforçados com fibra de vidro

A usinagem de laminados compósitos tem algumas características que contrastam com a usinagem tradicional dos metais, como por exemplo[2]:

- elevada anisotropia: a disposição das fibras tem uma importância essencial na qualidade da superfície obtida. Portanto, durante a usinagem, a direção de corte deve ser escolhida levando em conta as direções das fibras;
- relativa complexidade para obter uma superfície de alta qualidade: é especialmente relevante quando surgem temperaturas elevadas durante a operação de usinagem, já que trincas podem ser iniciadas devido à estrutura laminada e à baixa aderência entre o material da matriz ligante e o reforço de fibra, resultando em delaminação, fratura e, portanto, em dano térmico e mecânico;
- baixa condutividade do polímero reforçado com fibra de vidro: é uma centena de vezes inferior à dos metais e resulta em baixa transferência de calor através do cavaco e da peça usinada para o meio ambiente, sendo que a maior parte do calor gerado é dissipado através da ferramenta. Esta dissipação é distribuída da seguinte maneira: 90% através da ferramenta, 5% pelo cavaco e 5% pela peça usinada, enquanto em um processo de usinagem convencional

Tab. 3 – Valores para os fatores de avaliação

Nível	A	B	C
	Lubrificação	Velocidade de corte (m/min)	Avanço (mm/rot)
- 1	Sem	31,9	0,042
1	Com	50,3	0,25

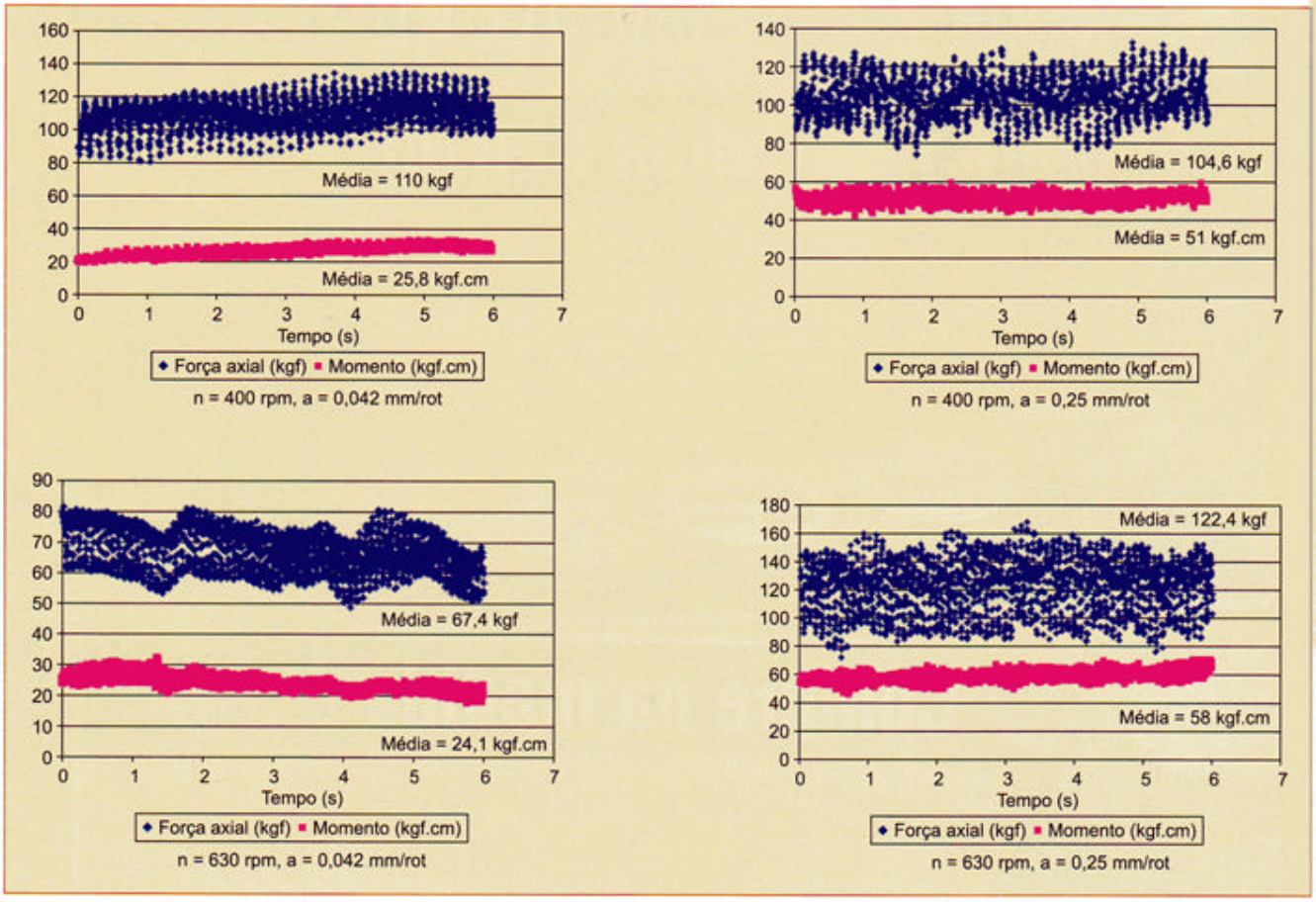


Fig. 4 – Furação com broca helicoidal com fluido de corte: diferentes velocidades de corte e taxas de avanço

quase 90% do calor é dissipado pelo cavaco[10];

- ação abrasiva da fibra: entre diversas opções de materiais, as fibras mais comuns usadas como reforço em compósitos são de vidro, carbono, aramida ou materiais similares, de alta dureza e resistência à abrasão;
- dano da matriz polimérica pelo processo de usinagem: pode ocorrer devido às altas temperaturas e tensões locais, fazendo com que o polímero se torne viscoso ou pastoso, ou seja, forma-se uma substância ou uma superfície ativa (SAS). A migração da SAS sobre a superfície de saída da ferramenta sob tensão reduz a energia de superfície sobre o metal (efeito Rehbinder), favorecendo rupturas a partir da superfície, o que resulta em desgaste por adsorção químico-mecânica;
- baixa resistência térmica do laminado polimérico reforçado com fibra de vidro, da ordem de 100 a 300°C: nesta faixa de temperatura ocorre a queima da matriz polimérica e a superfície queimada aparece sobre a área usinada. A baixa resistência térmica do material pode ser intensificada pelo fato de que em alguns casos não é possível utilizar fluido de corte para refrigeração, já que o compósito absorveria o líqüido refrigerante.

Tab. 5 – Modelo de regressão estatística para a furação com broca helicoidal de laminados poliméricos reforçados com fibra de vidro

Modelo para a força axial:	$y = 95{,}73 + 20{,}75x_3$, em que x_2 = velocidade de corte e x_3 = avanço
Modelo para o torque:	$y = 39{,}71 + 17{,}63x_2 - 2{,}82x_2x_3 + 2{,}88x_2x_3$, em que x_2 = velocidade de corte e x_3 = avanço

Materiais e procedimento experimental

Um dinamômetro baseado em extensômetros de resistência foi desenvolvido, construído, calibrado

Tab. 6 – Valores utilizados para os fatores

Nível	A	B	C
	Fluido	Velocidade de corte (m/min)	Avanço (mm/rot)
- 1	Sem	30,9	0,042
1	Com	50,3	0,119

Tab. 7 – Efeitos dos fatores

	Força	Momento
A	- 24,07	- 4,27
B	- 18,98	- 0,91
C	30,82	12,44
AB	22,40	1,86
AC	- 2,78	0,75
BC	- 5,28	0,54
ABC	6,57	- 1,80

e usado durante todo este estudo[1]. Ele se baseia em um modelo construído por Daar[3], mas teve seus sistemas de instrumentação e aquisição de sinais melhorados.

Tab. 9 – Valores de entrada para os fatores

Nível	B Velocidade de corte (m/min)	C Avanço (mm/rot)
- 1	39,9	0,057
1	50,3	0,104

Tab. 8 – Modelo de regressão estatística para a furação com serra de copo de laminados poliméricos reforçados com fibra de vidro

Modelo para a força axial:	$y = 64,99 - 12,03x_1 - 9,49x_2 + 15,41x3 + 11,20x1x_2$, em que x_1 = fluido de corte (sem = - 1 e com = 1), x_2 = velocidade de corte e x_3 = avanço
Modelo para o torque:	$y = 16,2 - 2,13x_1 + 6,22x_3$, em que x_1 = fluido de corte (sem = - 1 e com = 1), x_2 = velocidade de corte e x_3 = avanço

Como meta operacional, o dinamômetro de furação foi projetado para permitir a medição dos componentes de força axial e de torque. Detalhes do dinamômetro e de seus sensores podem ser observados na figura 2. Ele é formado por um eixo, para ser fixado na máquina-ferramenta, na qual o transdutor é montado com hastes radiais instrumentadas e por um pino para suportar o mandril porta-ferramenta. Por sobre o pino está montada uma capa para a proteção do dispositivo. As hastes radiais estão instrumentadas com extensômetros de resistência formando uma ponte de Wheatstone completa, na qual a leitura de um canal não afeta a leitura do outro durante a aquisição. O instrumento foi calibrado, obtendo-se duas curvas usadas para transformar os valores medidos durante o processo de unidades de microdeformação para valores de força e torque.

Tab. 10 – Efeitos de fatores

	Força	Torque
B	- 49,77	- 24,33
C	193,43	65,86
BC	- 67,996	- 27,836

Tab. 11 – Modelo de regressão estatística para a serra de copo diamantada

Modelo para a força axial:	$y = 165,45 + 96,71x_2$, na qual x_2 = avanço
Modelo para o torque:	$y = 91,14 + 32,93x_2$, na qual x_2 = avanço

O sistema de aquisição de dados foi baseado no *hardware* Spider 8, da HBM (Alemanha). Ele consiste em quatro amplificadores digitais operando em uma freqüência de 4,8 kHz (cada canal trabalha com um conversor analógico-digital, A/D), permitindo medições em uma faixa de freqüência de 1 a 9.600 Hz. Os conversores A/D foram sincronizados para permitir medições simultâneas em todos os canais.

O *software* empregado para a aquisição de dados é o Catman, versão 2.2, também da HBM. Ele permite receber e processar os dados medidos pelo Spider, bem como configurar os canais, o tempo de aquisição e a freqüência de amostragem. O dinamômetro de furação construído foi fixado em um torno modelo 20 TX-8, série Tormax, fabricado pela Romi (Santa Bárbara do Oeste, SP), para a execução dos experimentos (figura 2).

Um planejamento experimental estatístico foi desenvolvido, almejando uma melhoria da qualidade do processo de furação industrial de polímeros laminados reforçados com fibra de vidro. As propriedades características das amostras do laminado estão listadas na tabela 1. Os experimentos realizados permitiram uma avaliação estatística das diferentes ferramentas, bem como dos parâmetros de furação empregados. Foram testados quatro diferentes tipos de ferramentas: brocas helicoidais de aço rápido, serra de copo de aço rápido, serra de copo diamantada e ferramenta trepanadora com insertos de metal duro, como descrito na tabela 2.

Tab. 12 – Valores utilizados para os fatores

Nível	B Velocidade de corte (m/min)	C Avanço (mm/rot)
- 1	19,9	0,042
1	31,9	0,119

Enfoque estatístico para planejamento experimental

Antes de realizar os ensaios de furação, foi elaborado um planejamento

Tab. 13 – Efeitos de fatores

	Força	Momento
A	1,56	- 5,88
B	9,25	25,71
AB	- 1,48	- 4,30

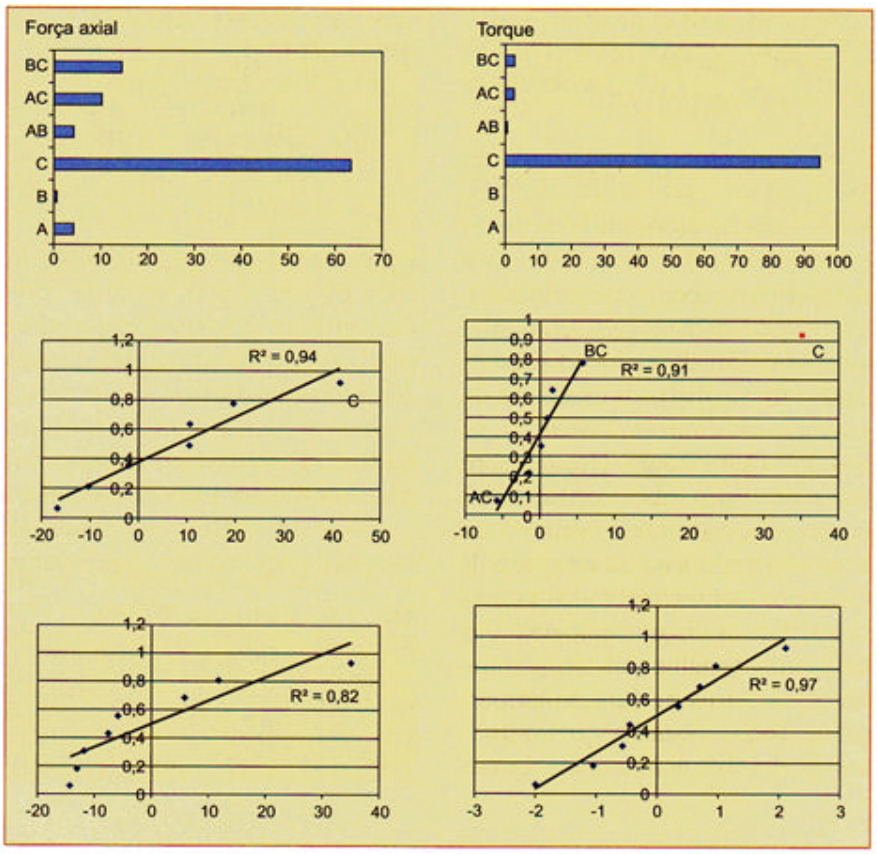


Fig. 5 – Avaliação da interação entre força axial e o torque no processo de furação de polímeros reforçados com fibra de vidro: diagrama de Pareto (a), probabilidade normal dos efeitos (b) e probabilidade normal para os resíduos (c)

estatístico almejando aprimorar a resposta a ser obtida com os resultados, para que fosse possível mostrar a relação entre as saídas (variáveis de respostas) e as entradas (variáveis de controle). Foi definido que os fatores de controle deviam ser analisados e suas respectivas faixas deveriam ser assumidas. Considera-se que a qualidade dos furos dependeria diretamente do torque e da força axial, os dois fatores escolhidos como variáveis de resposta[5].

Resultados experimentais e análises

Brocas helicoidais

Nos ensaios com brocas helicoidais foram selecionados os fatores de avaliação com seus respectivos valores mostrados na tabela 3, como lubrificação (A), velocidade de corte (B) e avanço (C). As tabelas 4 e 5 mostram a análise de variância (Anova) e o modelo de regressão, respectivamente. As figuras 3, 4 e 5 ilustram os valores encontrados para este ensaio.

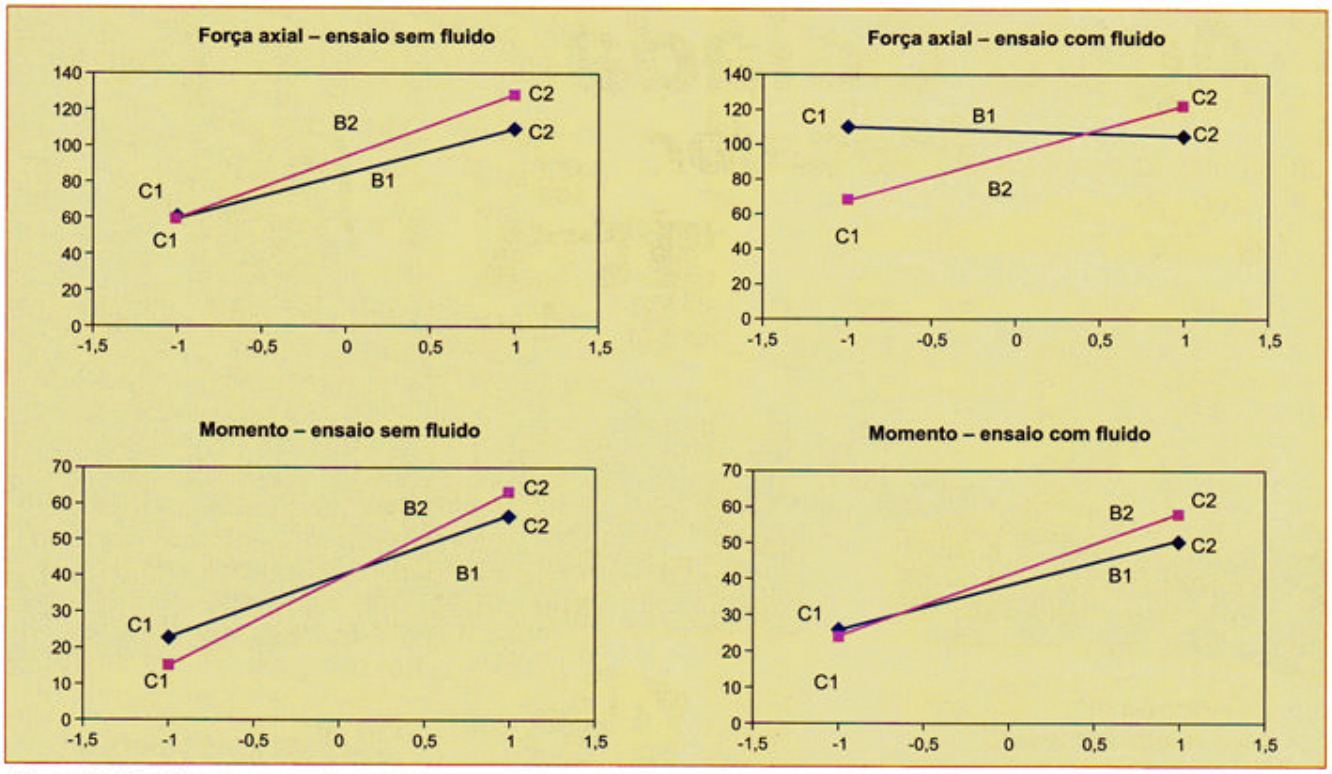


Fig. 6 – Gráficos de interação para força axial e momento na furação

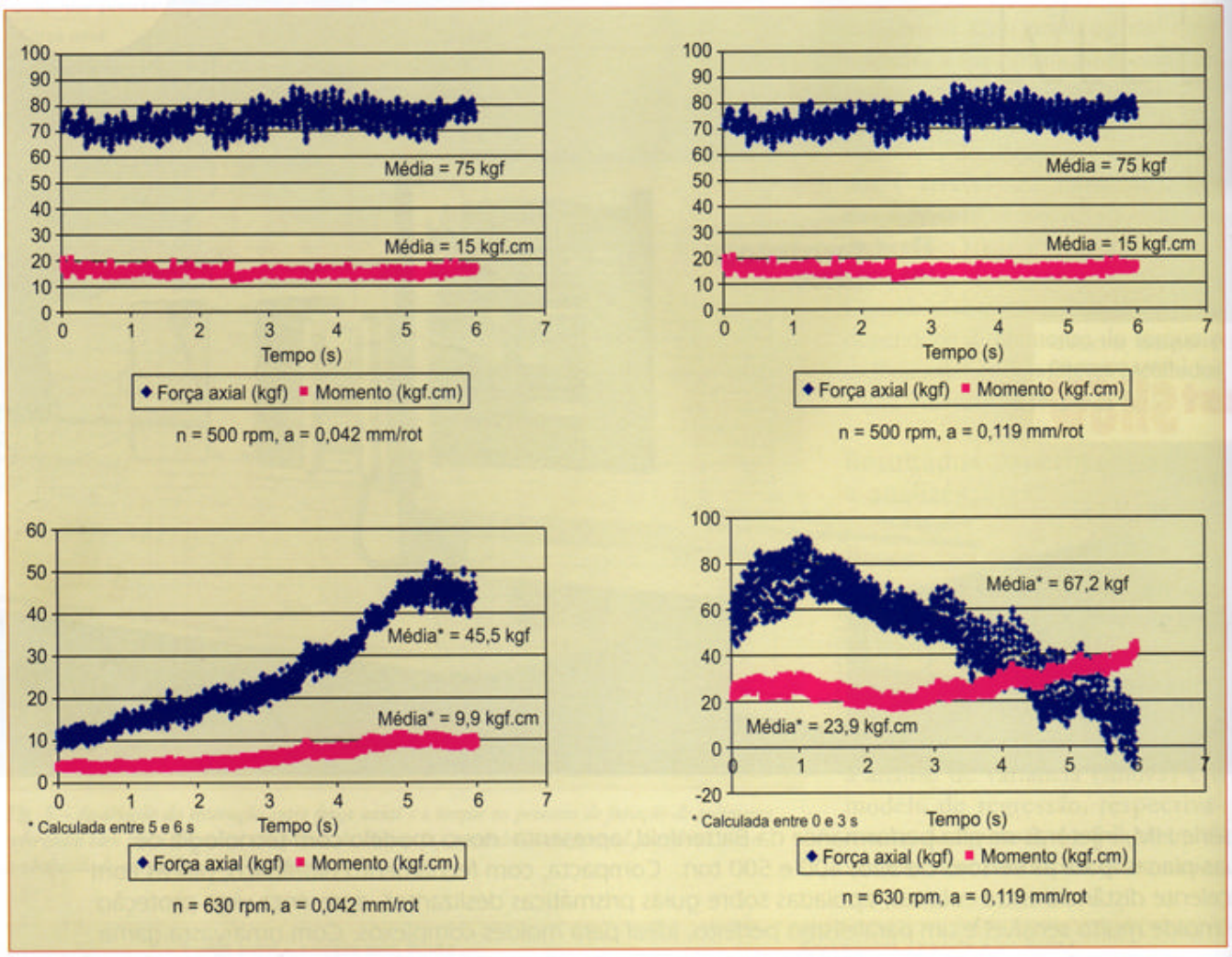


Fig. 7 – Ensaio da serra de copo comum (sem fluido), com diferentes velocidades de corte e taxas de avanço

A figura 6 mostra a interação entre o avanço e a velocidade de corte nas respostas, para um ensaio com e sem fluido de corte. B1 e B2 são as velocidades de corte no nível baixo (31,9 m/min) e alto (50,3 m/min), respectivamente. C1 e C2 são os avanços no nível baixo (0,042 mm/rot) e alto (0,25 mm/rot), respectivamente.

Serra de copo de aço rápido

Os resultados para a serra de copo comum de aço rápido estão apresentados nas figuras 7 e 8. Os fatores de avaliação estão apresentados na tabela 6, o efeito dos fatores está mostrado na tabela 7 e o modelo de regressão na tabela 8.

Serra de copo revestida com diamante

Os resultados para a furação com a serra de copo diamantada estão apresentados na figura 9. Os fatores de avaliação estão apresentados na tabela 9, os efeitos dos fatores na tabela 10 e o modelo de regressão estatística entre os fatores na tabela 11.

Tab. 14 – Modelo de regressão estatística para a ferramenta trepanadora com insertos

Modelo para a força axial:	$y = 31{,}86 + 4{,}62x_2$, em que x_2 = avanço
Modelo para o torque:	$y = 38{,}40 + 12{,}86x_2$, em que x_2 = avanço

Tab. 15 – Valores dos parâmetros selecionados

Ferramenta	Parâmetros de furação selecionados			Respostas		
	Fluido de corte	Velocidade de corte (m/min)	Avanço (mm/rot)	Força axial (kgf)	Momento (kgf.cm)	Tempo de furação (s)
Broca helicoidal	Sem	31,9	0,25	110,662	56,813	60
Serra de copo comum	Com	50,3	0,119	69,334	20,505	80
Serra de copo diamantada	Com	50,3	0,057	77,849	59,966	167
Trepanadora	Sem	31,9	0,119	36,522	46,163	126

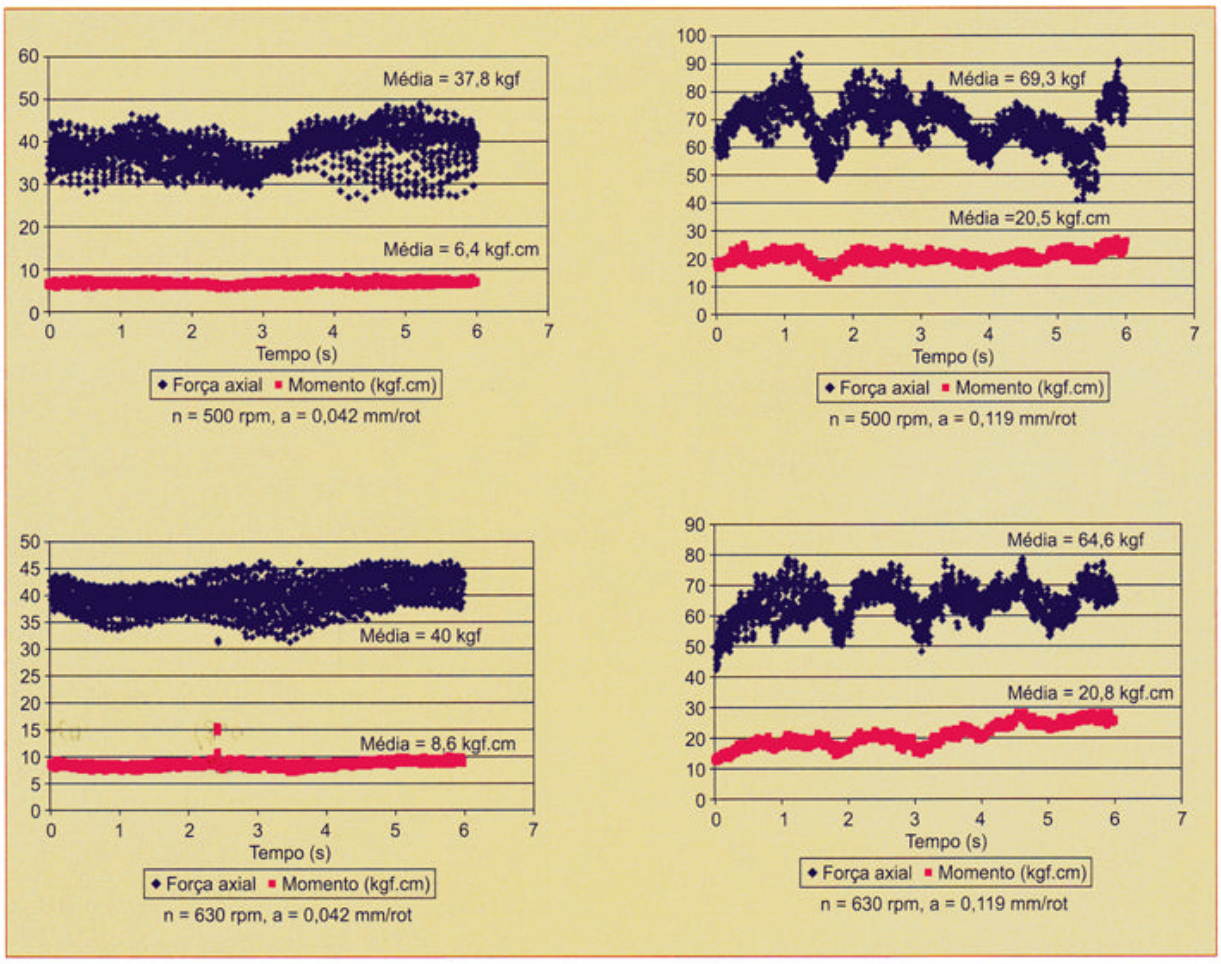


Fig. 8 – Ensaio com serra de copo comum (com fluido), sob diferentes velocidades de corte e taxas de avanço

Tab. 16 – Considerações sobre o desempenho das ferramentas

Broca helicoidal	Apesar de possibilitar a furação a seco, foram geradas forças axiais maiores. Após a furação de cerca de 500 mm do material compósito, fez-se necessária uma reafiação da broca. A falta de durabilidade poderia ser contornada com o emprego de brocas de metal duro.
Serra de copo comum	Apresentou bom desempenho (baixas forças e momentos). No entanto, seu grande problema é a dificuldade de remoção do cavaco, principalmente a seco. O acúmulo de cavaco provoca o superaquecimento da ferramenta e a aceleração do seu desgaste.
Serra de copo diamantada	Seu desempenho foi bastante prejudicado pela ausência de fluido de corte, como ocorre no processo simulado. A presença de fluido sob pressão auxiliaria a remoção de cavaco e evitaria o superaquecimento da ferramenta.
Ferramenta trepanadora	Apesar da grande desproporção entre dimensão e peso em relação à fixação na máquina, a ferramenta trepanadora foi a que gerou menos forças axiais.

Ferramenta trepanadora com insertos de metal duro

Os resultados para a furação com ferramenta trepanadora com insertos de metal duro estão apresentados na figura 10. Os fatores de avaliação estão apresentados na tabela 12, os efeitos dos fatores na tabela 13 e o modelo de regressão estatística entre os fatores na tabela 14.

Discussão

O fator C (avanço) foi identificado como o principal, junto com os outros dois fatores de interação AB (lubrificação *versus* fluido de corte) e BC (velocidade de corte *versus* avanço), que exibem um valor F_o da distribuição F de Snedecor maior do que 5,32 na análise de variância. Conclui-se que estes fatores afetam o torque e a força axial conforme mostrado no diagrama de Pareto (figura 5). A significância destes fatores pode ser avaliada também pela construção de gráficos de probabilidade normal para os efeitos (figura 5).

Os efeitos mais afastados da linha normal são aqueles que têm uma influência mais pronunciada sobre as

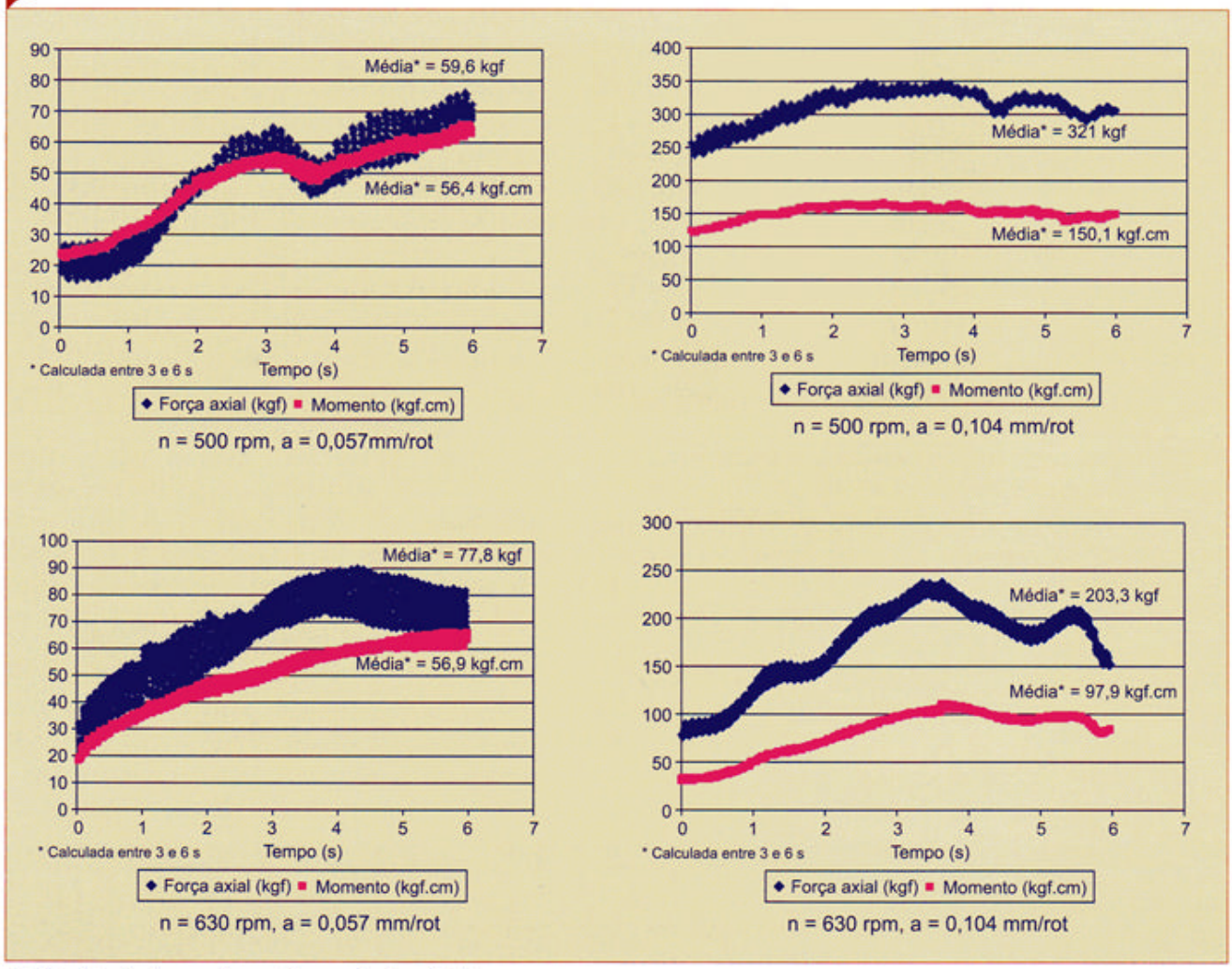


Fig. 9 – Ensaio da serra de copo diamantada (com fluido)

respostas. A partir dos valores dos efeitos, torna-se possível calcular os coeficientes de regressão. As equações de regressão escritas relacionam as variáveis de resposta com os fatores e com a significância da variação. Calculando a média ponderada das respostas nas regiões estáveis, são obtidos os valores da resposta. Apenas o fator C apresenta um valor maior do que 5,32 (valor de referência da distribuição F). Isto indica que ele é o fator de influência principal, demarcando nitidamente a influência sobre a força axial sob um nível de significância de 95%.

Os cálculos dos resíduos pelas diferenças entre os valores medidos experimentalmente e os previstos pela equação de regressão tornaram possível a construção dos gráficos de probabilidade normal para os resíduos. De acordo com os gráficos de probabilidade normal, os resíduos estão próximos de uma relação linear, confirmando a hipótese de um erro normal ou gaussiano.

A partir das análises realizadas, procurou-se, para cada ferramenta, encontrar as melhores condições de usinagem (furação com ou sem fluido de corte e valores para velocidade de corte e avanço), de modo a reduzir a força axial e o momento de torção aos menores valores possíveis. Também foi tomado como critério para essa seleção o tempo de usinagem e, no caso das ferramentas que permitiram ensaios sem fluido, procurou-se encontrar uma combinação entre velocidade de corte e avanço que permitisse executar o processo a seco, sem que fossem atingidos patamares elevados de força axial e momento de torção. Desse modo, foram selecionadas as condições de usinagem apresentadas na tabela 15.

Ainda em uma discussão sobre o desempenho das quatro ferramentas usadas nos ensaios de usinagem de laminados reforçados com fibra de vidro, podem ser feitas as considerações descritas na tabela 16.

Conclusões

O dinamômetro desenvolvido apresentou um desempenho favorável no sentido de avaliar o comportamento da força axial e do torque na usinagem de compósitos laminados reforçados com fibras de vidro em operações de furação e trepanação utilizando quatro ferramentas distintas.

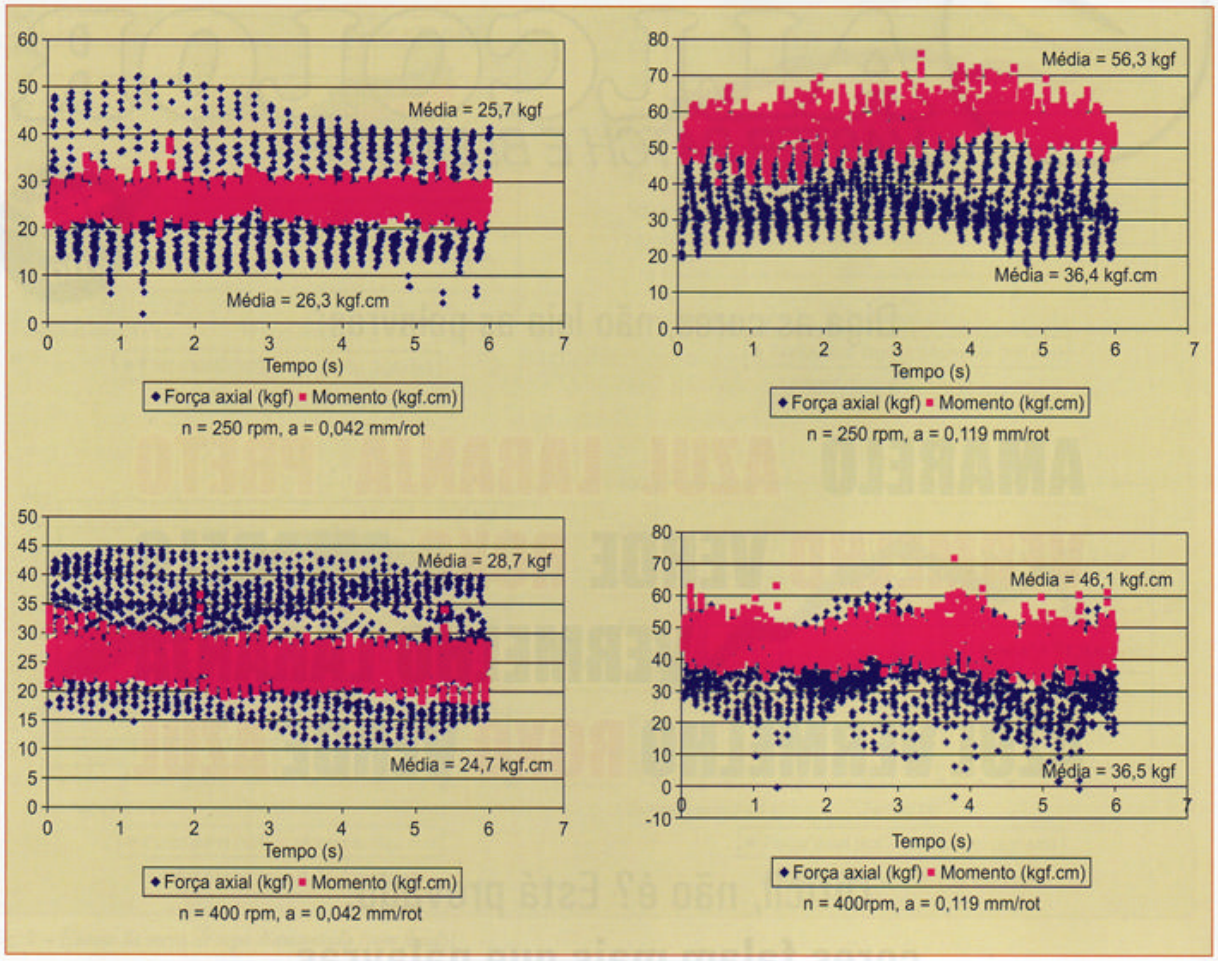


Fig. 10 – Ensaio da trepanadora (sem fluido de corte)

Para avanços mais elevados, usando brocas helicoidais de aço rápido, a força axial não variou significativamente com a presença de fluido de corte. Já para a serra de copo comum, as forças de corte aumentaram significativamente sem fluido de corte. A serra de copo diamantada apresentou valores elevados das forças de corte, o que quase impossibilitou o seu uso sem fluido de corte.

Já a ferramenta trepanadora com inserto de metal duro apresentou os menores valores de forças de corte nas operações sem fluido de corte.

O sinal de medição registrado experimentalmente para as variáveis de resposta (torque e força axial) permitiram uma investigação dos efeitos de lubrificação, velocidade de corte e avanço seguindo um planejamento estatístico dos experimentos.

REFERÊNCIAS

1) BORDINASSI, E. C. 2002, Dissertação (Mestrado). *Estudo do processo de furação em aço com brocas helicoidais de aço rápido*. EPUSP.

2) BRATUKHIN, A. G., V. S. *Composite Manufacturing Technology*. Londres: Chapman & Hall, 1995.

3) DAAR, H. A. 1967, Tese (Doutorado), 233 p. *Uma contribuição ao conhecimento do processo de furação dos aços com brocas helicoidais*. EESC, USP, São Carlos.

4) DINIZ, A. E. ; MARCONDES, F. C. ; COPPINI, N. L. *Tecnologia da usinagem dos materiais*. 3. ed. São Paulo: Artliber, 2001.

5) KAWANO, E.; BASSI, D. 2003, Monografia (TCC de graduação em Engenharia Mecânica). *Desenvolvimento do processo de furação de pás de turbinas eólicas*. EPUSP, São Paulo.

6) LEE, B. Y. ; LIU, H. S. ; TARNG, Y. S. Modeling and optimization of drilling process. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 74, p. 149-157, 1998.

7) MATHEW, J., RAMAKRISHNAN, N.; NAIK, N. K. Investigations into the effect of a trepanning tool on thrust and torque during drilling of GFRP composites, *J. Mat. Proc. Tech.*, 91, 1-11, 1999.

8) NOVASKI, O. 1996, Tese (Livre Docência), 131p. *Contribuições ao processo de furação com brocas helicoidais*. Faculdade de Engenharia Mecânica, FEM-Unicamp, Campinas.

9) TÖNSHOFF, H. K.; KÖNIG, W. Machining of holes, developments in drilling technology. In: *CIRP*, 1994, v. 43, p. 551-61.

10) TRENT, E. M., *Metal cutting*, 3ª ed. Butterworth-Heinemann, 1996.