

INVESTIGAÇÕES SOBRE O PROCESSO DE FURAÇÃO

Éd Claudio Bordinassi

Laboratório de Engenharia de Fabricação – Dept. de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Av. Prof. Mello Moraes, 2231 – 05508.900 - São Paulo – SP.
ed.bordinassi@poli.usp.br

Carlos Oscar Corrêa de Almeida Filho e Sergio Delijaicov

Laboratório de Engenharia de Fabricação – Dept. de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Av. Prof. Mello Moraes, 2231 – 05508.900 - São Paulo – SP.

Marco Stipkovic Filho

Laboratório de Engenharia de Fabricação – Dept. de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Av. Prof. Mello Moraes, 2231 – 05508.900 - São Paulo – SP.
kovic@osite.com.br

Gilmar Ferreira Batalha

Laboratório de Engenharia de Fabricação – Dept. de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Av. Prof. Mello Moraes, 2231 – 05508.900 - São Paulo – SP.
gfbatalh@usp.br

***Resumo.** Este trabalho teve por objetivo mostrar os principais estudos relativos ao processo de furação desenvolvidos pelos autores na Escola Politécnica da USP, nos anos de 2003 e 2004. Diversos ensaios foram realizados e os esforços de usinagem foram medidos através de um dinamômetro instrumentado com extensômetros. São apresentados três estudos de caso: furação em aço com brocas helicoidais de aço rápido, estudo da formação de rebarbas durante a furação de alumínio e aço e por fim, furação de compósitos utilizando diversas ferramentas de furação.*

***Palavras-chave:** Broca helicoidal, furação, furo, dinamômetro, extensômetro, usinagem, aço rápido.*

1. INTRODUÇÃO

O processo de furação é um dos processos de usinagem mais utilizados na indústria manufatureira [Halewi, 1995 e Diniz, 2001]. A grande maioria das peças de qualquer tipo de indústria, tem pelo menos um furo e, somente uma parte muito pequena destas, já vem com o furo pronto do processo de obtenção da peça bruta. O processo de furação, a princípio, parece bastante simples. No entanto, existem muitas ferramentas e opções de processo disponíveis para esta operação. Conforme descrito por Halewi, 1995, deve-se considerar as especificações técnicas para os furos a serem executados, como dureza do material, usinabilidade, furo passante/cego, comprimento do furo e diâmetro, tolerância dimensional e geométrica do furo, acabamento superficial, precisão de localização, e detalhes especiais (rebaixo, rosca, chanfro, raio, etc). Com relação às ferramentas empregadas na furação, para algumas o processo é dominado pela dimensão da ferramenta (Ex.: broca helicoidal, broca com inserto ou trepanadoras) e para outras é dominado pela capacidade da máquina (Ex.: ferramentas para mandriladoras e fresadoras). Cada uma destas ferramentas possui suas características e limitações. Alguns destes processos podem ser utilizados para abrir um furo passante, alargar um furo existente ou apenas melhorar sua qualidade. Neste sentido, os furos devem ser executados ou aumentados pelo processo de furação e, esta operação em geral, é feita como uma das últimas a serem executadas nas peças, quando uma grande quantidade de tempo e dinheiro já foi gasta na execução destas [Tönshoff, 1994], devendo portanto oferecer grande confiabilidade. O processo de furação corresponde à 25% do tempo de usinagem dos principais processos e 33% do número total de operações utilizados na indústria [Tönshoff, 1994], daí a necessidade de estudá-lo.

Apesar de vários materiais e coberturas disponíveis para brocas helicoidais, o uso do aço rápido para brocas de pequeno diâmetro ainda representa uma parcela significativa das ferramentas utilizadas na indústria devido a pequena capacidade de altas velocidades das máquinas ainda utilizadas.

O objetivo deste trabalho é apresentar alguns estudos de caso realizados nos últimos 2 anos (2002-2004), sobre o processo de furação. O casos estão divididos em 3 etapas, sendo elas: I - furação em aço ABNT 1020, 1040, 4340 e 5140, II - formação de rebarbas durante a furação de aço ABNT 1040 e alumínio ABNT 6063 e III - Furação de compósitos. Todos os ensaios foram realizados com o auxílio de medições de força através de um dinamômetro instrumentado com extensômetros.

2. ESFORÇOS NO PROCESSO DE FURAÇÃO

A fig. (1), ilustra as forças de usinagem e suas projeções nos diversos planos.

A força de usinagem " P_u ": é a força total que atua sobre uma cunha cortante durante o processo de furação e as outras forças, ilustradas na fig. (1), são suas projeções no plano de trabalho e no plano efetivo de referência.

No plano de trabalho, estão contidas as projeções das forças de usinagem que contribuem para a potência de usinagem, e são elas:

- força ativa " P_{at} ": é a projeção da força de usinagem sobre o plano de trabalho;
- força de corte " P_c ": é a projeção da força de usinagem sobre a direção de corte;
- força de avanço " P_a ": é a projeção da força de usinagem sobre a direção de avanço;
- força de apoio " P_{ap} ": é a projeção da força de usinagem sobre uma direção perpendicular à direção de avanço, situada no plano de trabalho, e no caso, em especial das brocas helicoidais, esta coincide com a direção da força de corte, sendo igual à P_c ;
- força efetiva de corte " P_{ce} ": é a projeção da força de usinagem sobre a direção efetiva de corte.

No plano de referência, estão contidas as projeções da força de usinagem que não contribuem com a potência de usinagem, e são elas:

- força passiva " P_p ": é a projeção da força de usinagem sobre uma direção perpendicular ao plano de trabalho, e também pode ser chamada de componente radial, devido à sua direção;
- força de compressão " P_N ": é a projeção da força de usinagem P_u sobre uma direção perpendicular à superfície de corte;

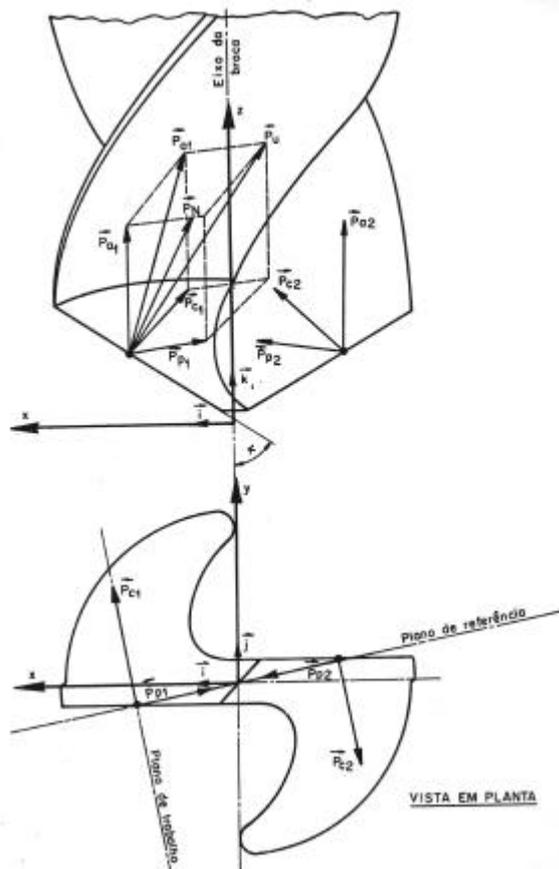


Figura 1 - [Daar, 1967] – Esforços no processo de furação

Com o dinamômetro utilizado para medições de força neste trabalho é possível monitorar a força axial e o momento de torção durante o processo. Diversos autores apresentam modelos com constantes empíricas para a determinação destes esforços de corte, como Spur, Kronenberg, Daar, Kienzle e Oxford e Shaw [Daar, 1967]. Altintas (2000), apresenta um modelo para a força axial (que é bastante importante para a formação de rebarbas), baseado nos conceitos de medição de dureza, que consideram a dureza do material e a entadação provocada pela aresta transversal de corte.

3. DINAMÔMETRO UTILIZADO NOS ENSAIOS

Os principais elementos de uma aquisição de dados e sistema de processamento são ilustrados no diagrama de blocos na fig. 2.

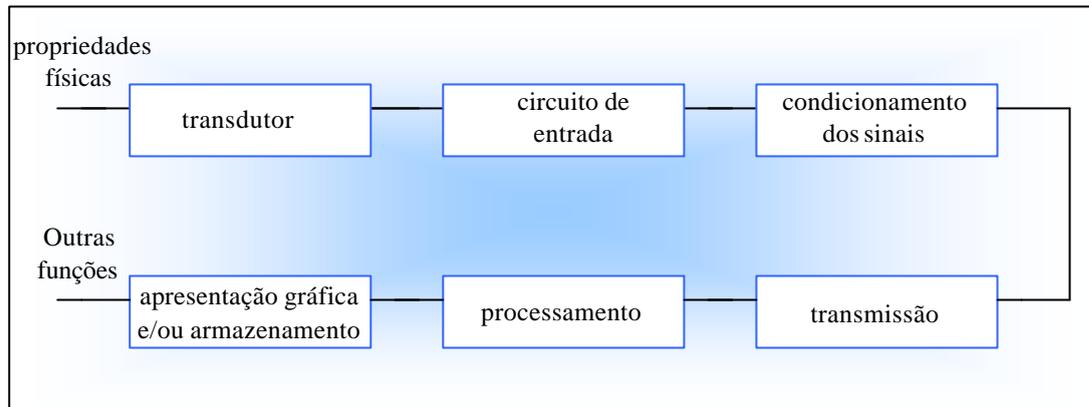


Figura 2 - Sistema básico de aquisição de dados [Hollman, 1994].

O transdutor (fig. 2), foi construído, instrumentado com extensômetros, calibrado e utilizado durante todos os ensaios. A construção foi baseada em um dos modelos construídos por Daar, 1967, com mudanças na instrumentação e aquisição dos sinais. Este possibilita a medição do momento de torção e da força axial a que a broca é submetida durante o processo de furação.

Na fig. 3, observa-se o conjunto do dinamômetro, que consiste em uma haste para fixação na máquina, onde é montado o transdutor com as nervuras instrumentadas, com um pino para alojar o mandril. Neste pino é colocada uma tampa para proteção do equipamento. As nervuras foram instrumentadas formando ponte completa de “Wheatstone”, de tal forma que a leitura de um canal não afete o outro, durante a aquisição.

O instrumento foi calibrado, obtendo-se duas curvas de calibração que serviram para transformar os valores de micro-deformações obtidos durante o processo de furação em força axial e momento de torção.

Foram utilizados um hardware (Sistema ST5000, com condicionador e amplificador de sinais) e um software (AQUISI Mi – V0.26) da empresa Spectra Tecnologia, para as tarefas posteriores ao transdutor (fig. 2), obtendo-se assim um gráfico com as variações de esforços ao longo do tempo. Através de ferramentas estatísticas disponíveis no Software foi possível estabelecer valores para cada trecho do sinal, e um valor médio das solicitações ao longo do tempo. Na fig. 4, pode-se observar um exemplo de sinal obtido durante a furação do aço ABNT 1020.

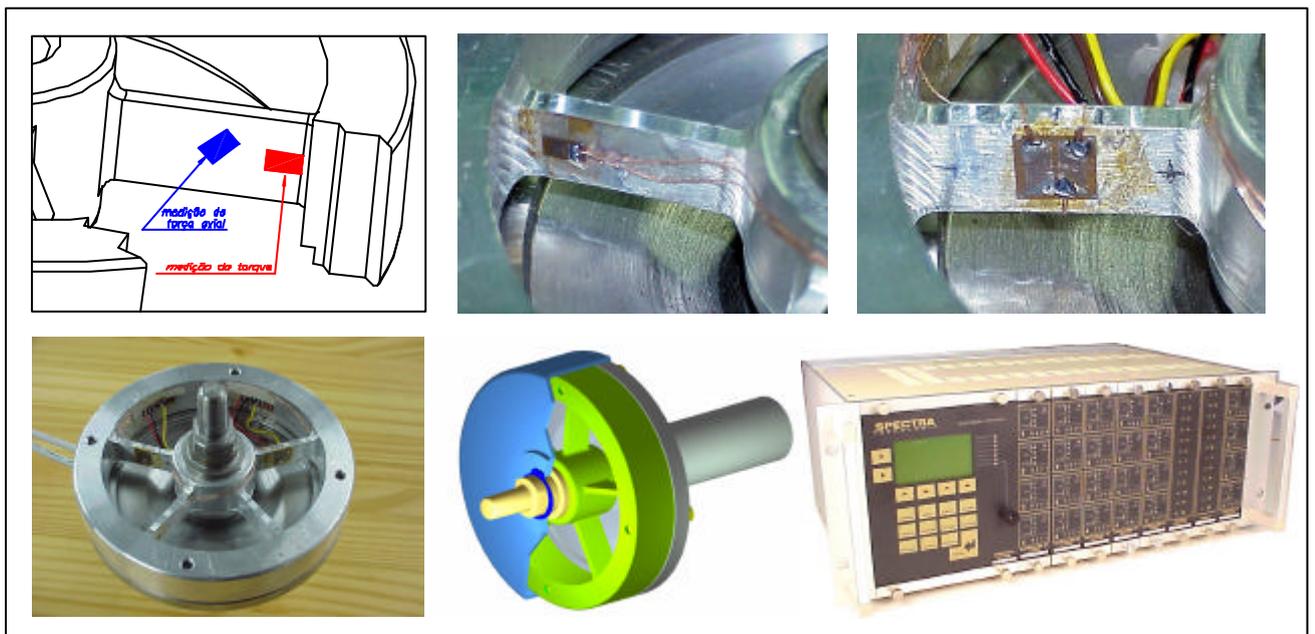


Figura 3 - Conjunto do dinamômetro e sistema de aquisição.

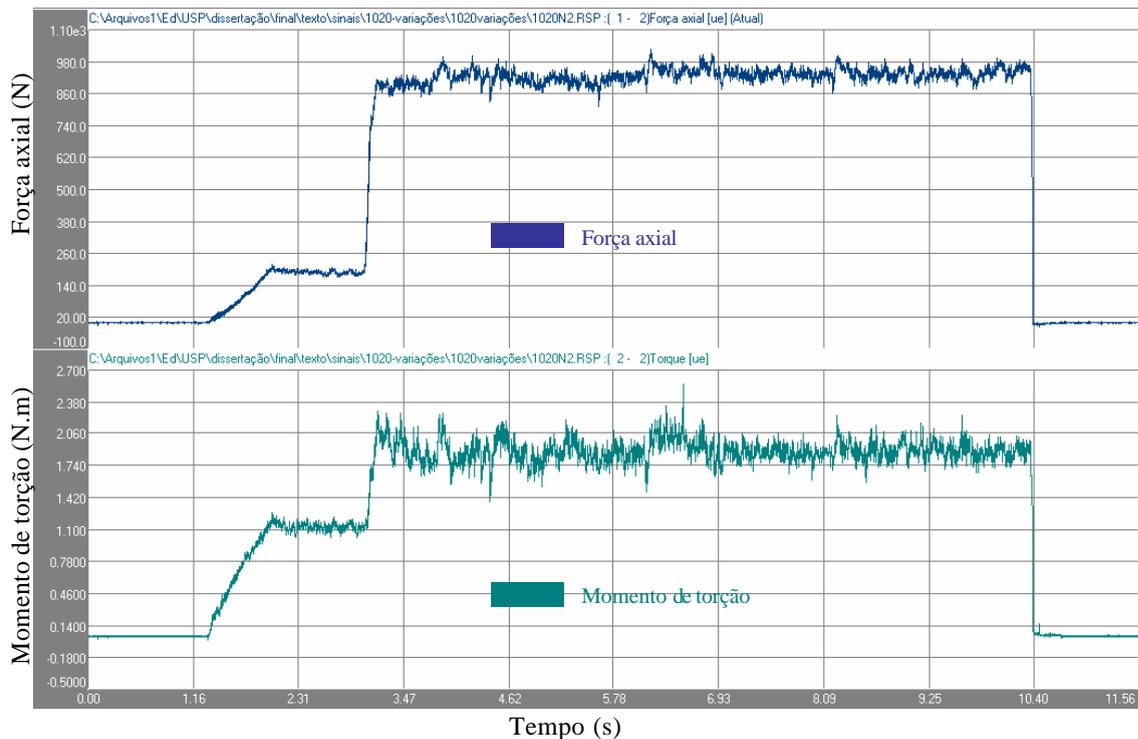


Figura 4 - Sinal obtido durante a furação do aço ABNT 1020.

4. ESTUDO DE CASO 1 – FURAÇÃO EM AÇO ABNT 1020, 1040, 4340 E 5140

4.1 - Procedimento experimental

O dinamômetro foi fixado em um torno com comando numérico computadorizado, marca Traub, modelo TND 360 com comando TX-8 para a execução dos ensaios.

Um procedimento experimental foi desenvolvido para verificar os resultados das variações nos esforços de corte. Nos experimentos foram utilizados diferentes materiais para os corpos de prova, com diferentes geometrias de corte para as brocas, assim como variações no avanço e velocidade de corte. Todas as brocas utilizadas são do tipo N, P-5, aço rápido ASTM A -600 M2.

4.1.1 - Evolução dos esforços de corte vs. diferentes afiações e parâmetros de corte

Corpo de prova : Aço ABNT 1020, trefilado, 196 HB

Ferramenta : Broca helicoidal de aço rápido, $f\ 6\text{mm}$, afiação cônica DIN 338, e afiação cruzada NAS 907

Parâmetros de corte:

Com avanço de 0.109 mm/volta: _____ Velocidades de corte: 10, 15, 20, 25, 30 e 35 m/min;

Com velocidade de corte de 25 m/min: _____ Avanços: 0.05, 0.1, 0.15, 0.2 e 0.25 mm/volta;

Corpo de prova : Aço ABNT 4320, laminado, 220 HB

Ferramenta : Broca helicoidal de aço rápido, $f\ 6\text{mm}$, afiação cônica DIN 338

Parâmetros de corte:

Com avanço de 0.109 mm/volta: _____ Velocidades de corte: 10, 15, 20, 25, 30 e 35 m/min;

Com velocidade de corte de 25 m/min: _____ Avanços: 0.05, 0.1, 0.15, 0.2 e 0.25 mm/volta;

4.1.2 - Evolução dos esforços de corte vs. evolução do desgaste

Também foram realizados ensaios com velocidade de corte e avanço constantes, para observar o desgaste nas arestas principais de corte da broca. Os parâmetros e materiais utilizados nos ensaios foram:

Corpo de prova : Aço ABNT 1040, trefilado, 177 HB
Ferramenta : Broca helicoidal de aço rápido, f 6mm , afiação cônica DIN 338
Parâmetros de corte: $V_c = 25$ m/min; $f = 0.109$ mm/volta

Corpo de prova : Aço ABNT 5140, laminado, temperado e revenido, retificado, 231 HB
Ferramenta : Broca helicoidal de aço rápido, f 6mm , afiação cônica DIN 338
Parâmetros de corte: $V_c = 20$ m/min; $f = 0.109$ mm/volta

Mais de 700 furos foram executados durante os ensaios, e foi utilizado fluido de corte em abundância, composto por 5% óleo mineral e água. Os valores de desgaste foram medidos utilizando-se um microscópio JENA 3313, conforme fig. (5).



Figura 5 - Medição do desgaste da broca utilizando um microscópio JENA 3313.

4.2 - Resultados obtidos e comentários

Os resultados obtidos sob variações de avanço e velocidade de corte, utilizando-se brocas helicoidais com afiação cônica e cruzada, para o aço ABNT 1020, podem ser observados nas figs (6) e (7).

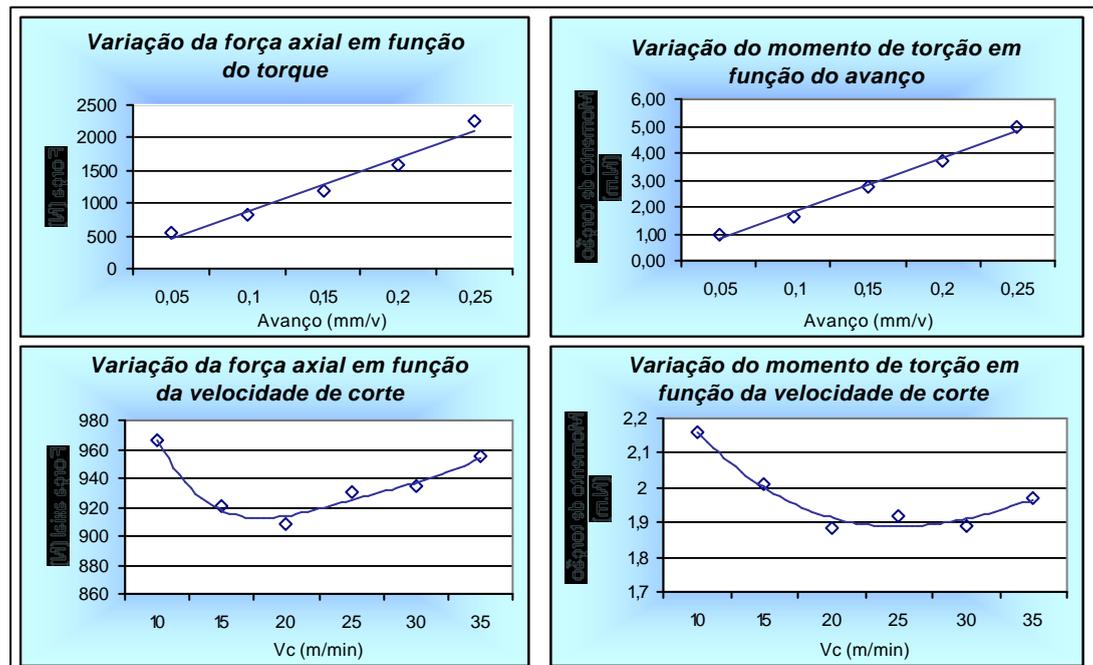


Figura 6 – Variações do momento de torção e força axial em função do avanço e da velocidade de corte para o aço ABNT 1020, com brocas helicoidais de aço rápido com afiação cônica.

Os valores encontrados na fig. (6), mostram que, com as variações no avanço e velocidade de corte, ocorrem mudanças nos esforços. A variação relacionada ao avanço pode ser justificada pela mudança na quantidade de material a ser removida pela broca, fazendo com que os esforços aumentem. Já as variações de esforços encontradas com as mudanças de velocidade de corte, sugerem que com o aumento ou diminuição desta, as condições do processo e conseqüentemente a temperatura e a pressão específica de corte variam, fazendo com que ocorram mudanças no par peça/ferramenta, onde os esforços começam com um certo valor e em seguida diminuem. Esta diminuição pode ser justificada pela mudança na dureza do material [Trent, 1996]. O menores valores encontrados foram para a velocidade de 20m/min. Também é importante ressaltar que as variações encontradas nos gráficos relacionados à velocidade de corte não foram maiores do que 10%.

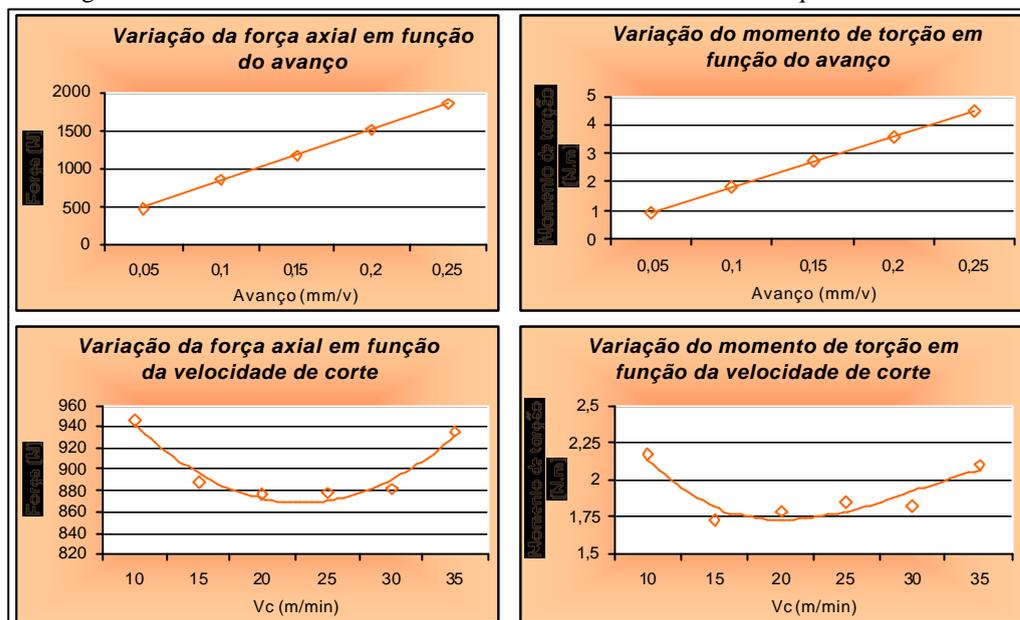


Figura 7 – Variações do momento de torção e força axial em função do avanço e velocidade de corte para o aço ABNT 1020 com brocas helicoidais de aço rápido com afiação em cruz.

As variações dos esforços para a broca com afiação cônica e para afiação em cruz, tiveram o mesmo comportamento, porém com valores diferentes. Em todas as medições, a broca com afiação em cruz apresentou solicitações menores em torno de 4 a 6%, e com o aumento do avanço, esta diferença chegou a 12% para o momento de torção e 20% para a força axial. Esta diferença mostra que a diminuição da aresta transversal de corte ocasiona menores esforços durante altos avanços, principalmente a força axial, onde a aresta transversal possui maior influência.

A refrigeração também se mostrou de extrema importância durante os ensaios, e com o aumento da profundidade dos furos em todos os materiais, notou-se um aumento nos esforços. Nos furos onde foram utilizados avanços altos (0.25mm/volta), ocorreu o “caldeamento” do cavaco nas superfícies de saída da broca, devido às altas temperaturas a que o processo se desenvolveu.

A fig. (8) mostra os valores encontrados durante a furação do aço ABNT 4320.

Para a furação do aço ABNT 4320, as observações quanto às variações dos esforços encontradas se assemelham ao aço ABNT 1020, porém foi constatado que com o aumento da profundidade do furo, os esforços tinham uma tendência maior de aumento, devido à maior resistência ao corte que o material ligado oferece, e neste caso, provavelmente, uma refrigeração mais eficiente, como por exemplo refrigeração através de canais internos na broca, poderia atenuar estes aumentos. Na furação executada no torno, tem-se uma refrigeração menos eficiente do que em outras máquinas, como um centro vertical de usinagem, por exemplo, onde a tendência do fluido de corte, é chegar ao final do furo devido à gravidade. No caso do torno, à medida que a profundidade do furo aumenta, a refrigeração torna-se cada vez mais deficiente, pois não existem muitos fatores favoráveis à sua penetração no furo, sendo que muitas vezes o fluido pode se dispersar antes de alcançar seu objetivo que é a interface entre o material e a ferramenta, fazendo com que a broca tenha uma durabilidade menor, e os desgastes ocorram de forma mais acentuada.

Na fig. (9), podem ser observados os dados coletados com referência à furação do aço ABNT 5140, e a foto da broca após executados 165 furos. Observa-se que os esforços também sofreram alterações ao longo da vida da broca, tanto para o momento de torção, como para a força axial. No primeiro trecho, nota-se o aumento das solicitações, e isto é justificado, pelo início da adesão de partículas na superfície de saída da broca [Novaski, 1996]. Após a adesão, ocorre um favorecimento da saída dos cavacos, devido ao aumento do ângulo de saída, fazendo com que os esforços diminuam. A seguir, ocorre a deterioração das arestas principais de corte, e juntamente, um aumento nos esforços, que continuaram a crescer até o final de vida da broca.

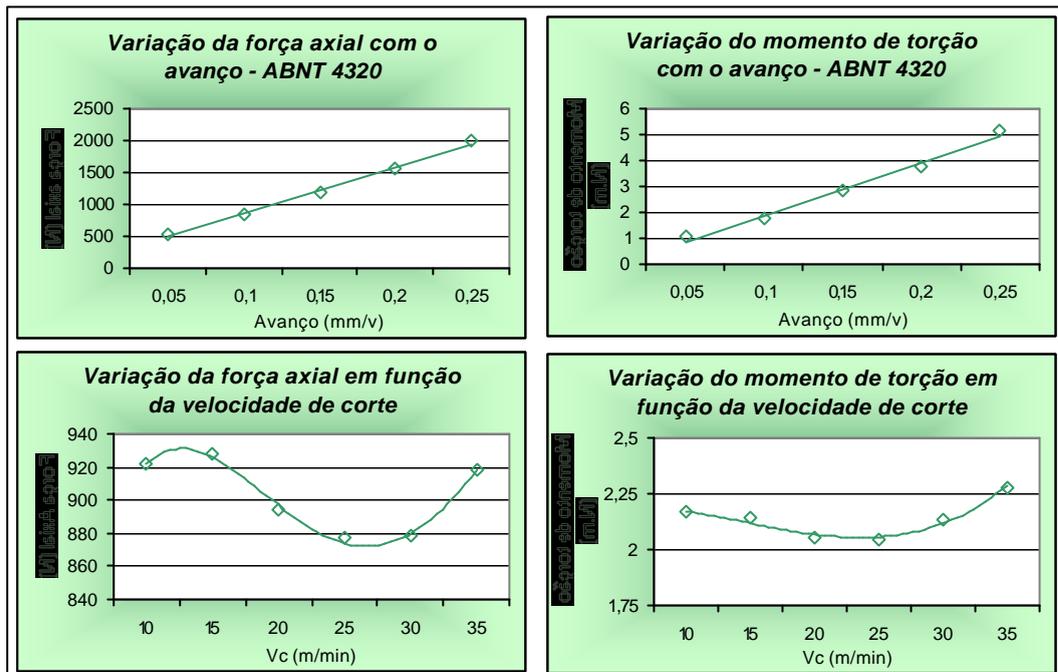


Figura 8 – Variações do momento de torção e força axial em função do avanço e velocidade de corte para o aço ABNT 4320 com brocas helicoidais de aço rápido com afiação cônica

Os valores de desgaste colocados no gráfico, referem-se à média do desgaste máximo entre as duas arestas principais de corte. O desgaste foi praticamente constante até o furo de número 70, onde a partir daí apresentou uma elevação acentuada, se comportando de forma semelhante aos ensaios realizados por Lee, 1998. Este fato precisa ser melhor analisado, porém, provavelmente deve-se à mudanças na microestrutura do material da broca, fazendo com que a deterioração ocorra de forma mais acentuada. Foi aceito que a broca teria chegado ao fim de vida, devido ao alto desgaste encontrado nas arestas e a instabilidade do processo, à medida que a profundidade de furação aumentava, evidenciando um breve colapso.

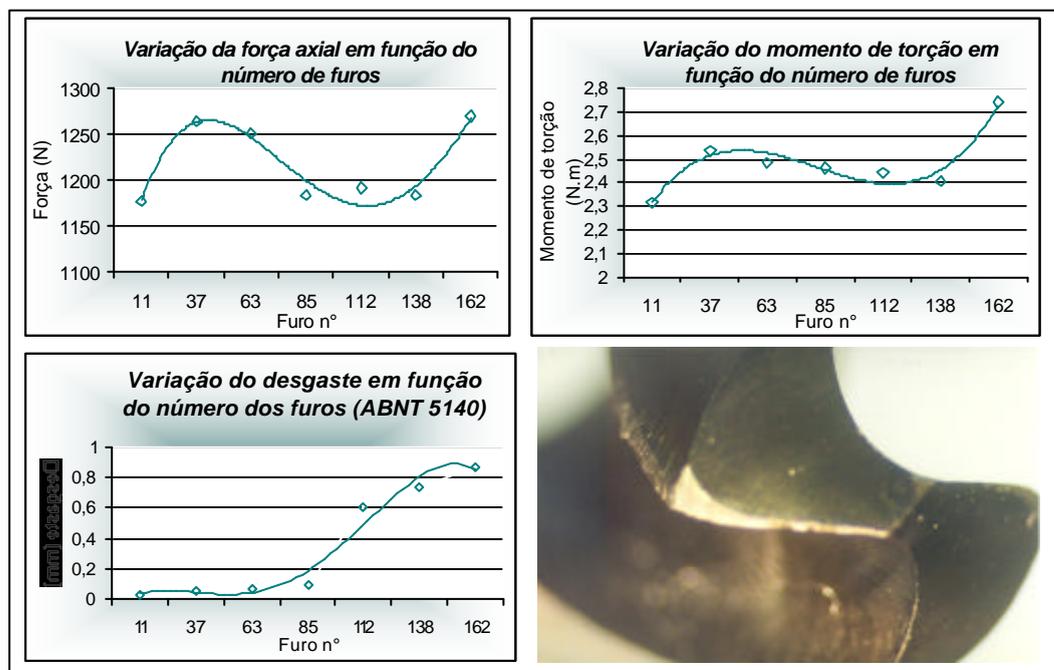


Figura 9 – Variação da força axial, momento de torção e desgaste para furação do aço ABNT 5140, com brocas de afiação cônica com relação ao número de furos.

Para a furação do aço ABNT 1040 (fig 10), o comportamento dos dados analisados foi semelhante ao aço ABNT 5140. Houve um aumento nos esforços, e a seguir uma diminuição que permaneceu praticamente “constante” durante os ensaios. Para este material optou-se em encerrar os ensaios quando a broca havia executado mais de 500 furos, e não houve indício de aumento nos valores encontrados para os desgastes, sendo que estes também não tiveram variações significativas ao longo da aresta principal de corte.

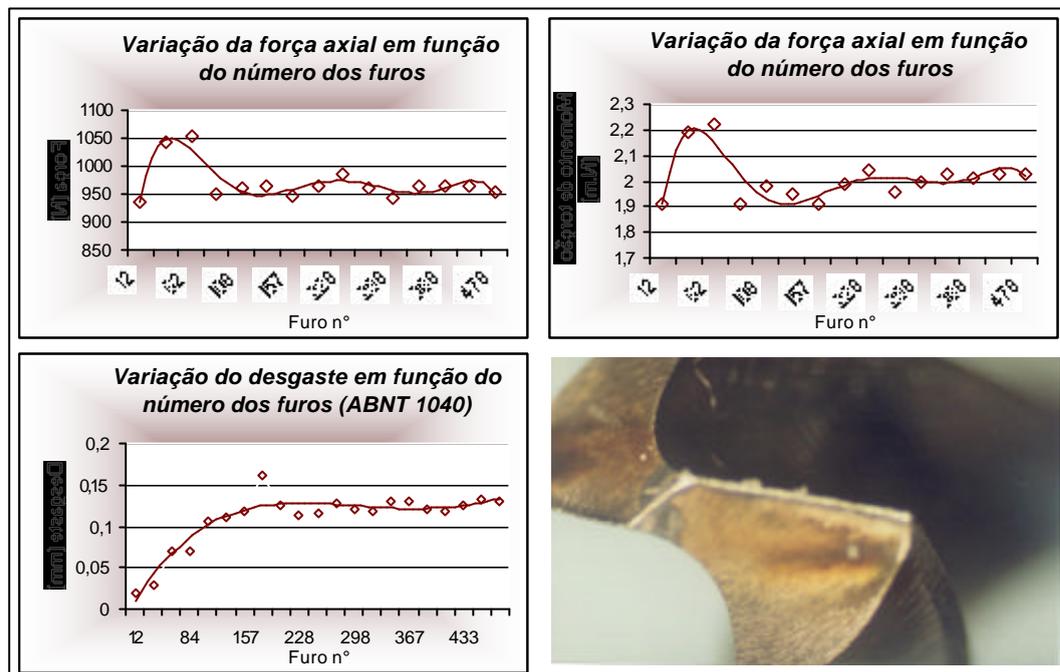


Figura 10 – Variação da força axial, momento de torção e desgaste para furação do aço ABNT 1040, com brocas de afiação cônica com relação ao número de furos.

4.3 - Conclusões

- ✓ Os sinais gravados das variações dos esforços de corte, permitiram uma investigação da vida de brocas helicoidais de aço rápido.
- ✓ Os esforços de corte medidos sofreram variações de acordo com o previsto com os parâmetros de corte considerados, seguindo resultados anteriores encontrados na literatura consultada.
- ✓ Os experimentos confirmaram que as brocas com afiação em cruz apresentam menores solicitações que as brocas com afiação cônica e esta diferença (para os ensaios realizados) é proporcional ao aumento do avanço.
- ✓ Embora não sistematicamente investigado, a temperatura foi observada como um importante fator durante a furação dos aços ensaiados. Seus efeitos podem ser aumentados devido à altas solicitações ou refrigeração insuficiente, e seu aumento pode causar redução de vida da ferramenta.
- ✓ Para estudar o mecanismo do aumento repentino do desgaste das brocas helicoidais de aço rápido, é necessária uma investigação mais aprofundada, da microestrutura do material da ferramenta durante o desenvolvimento do desgaste.

5. ESTUDO DE CASO II – FORMAÇÃO DE REBARBAS DURANTE A FURAÇÃO DE AÇO ABNT 1040 E ALUMÍNIO ABNT 6063

5.1 - Introdução

É necessário durante o processo de furação que as rebarbas formadas durante o processo sejam controladas e previstas de forma a minimizar os custos de fabricação de peças, sendo que estas devem apresentar os menores valores possíveis para minimização dos custos de rebarbação ou eliminação destes.

O processo de furação forma rebarbas no início do furo e no final deste [Min et al, 2001]. A rebarba na entrada é formada por escoamento plástico do material e a da saída pela conformação do material devido às altas taxas de compressão no centro do furo.

Os principais parâmetros que afetam a formação de rebarbas no processo de furação são [Min et al, 2001]:

- **geometria da broca:** ângulo de ponta, geometria da ponta, ângulo de hélice, alívio da aresta transversal;
- **propriedades do material:** dureza, rigidez, ductibilidade;
- **condições do processo:** velocidade de corte, avanço, uso de refrigeração, furação pica-pau;
- **outros:** desgaste da ferramenta, material da ferramenta, aresta postiça de corte.

À medida que a profundidade de corte aumenta, a deformação acumulada no fundo do furo também cresce [Ko et al, 2001]. Quando este valor é suficiente para atingir a tensão de ruptura do material, a fratura é iniciada no ponto de maior deformação e a distância em que a broca avança antes da fratura depende da ductibilidade do material. A fratura também depende da geometria da broca, pois brocas com grande aresta transversal tendem a aumentar a força axial no centro do furo

Estudos mostram que a execução de um pré-furo ou chanfros nas superfícies de saída e entrada, minimizam a formação de rebarbas [Mahdy, 2000]. Com isto, os custos para execução do furo aumentam, porém este é compensado com a minimização dos custos de rebarbação. A melhor solução porém, seria que a formação de rebarbas fosse minimizada com a execução de um único furo, principalmente quando da execução de furos com pequenos diâmetros.

Pode-se dividir as rebarbas em 3 tipos, chamadas de:

- **uniforme:** pequenas dimensões e altura uniforme ao redor de toda a periferia do furo. Geralmente é formado um “cap” que pode desprender-se da peça durante o processo ou pode ser removido facilmente após a execução do furo. O processo de formação geralmente ocorre através de uma primeira fratura no centro do furo, onde altas de tensão de compressão atuam no material, devido à aresta transversal de corte, e um “cap” secundário se adere ao “cap” principal. Com o avanço da broca, a zona de deformação plástica se expande do centro do furo para as arestas principais da broca e uma segunda fratura ocorre na periferia do furo fazendo com que o “cap” seja criado;
- **coroa:** possui altura grande e irregular na periferia do furo. Com o aumento do avanço, aumenta a força axial de furação que aumenta precocemente a deformação plástica no centro do furo, principalmente com brocas de afiação cônica com grande aresta transversal. Então, a fratura ocorre no centro do furo e a rebarba se forma com a deformação do material restante nas periferias do furo;
- **transição:** este mecanismo de formação de rebarbas se situa entre os tipos uniforme e coroa. As fraturas ocorrem quase que simultaneamente no centro do furo e na periferia deste, portanto as rebarbas se formam antes do tipo “coroa” e depois do tipo “uniforme”.

Os mecanismos propostos para estes tipos de rebarbas encontram-se na fig. (11).

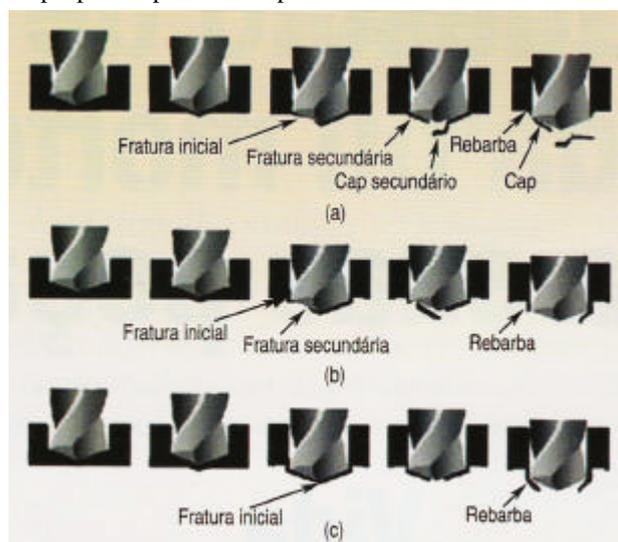


Figura 11 – Mecanismos de formação de rebarbas para os 3 tipos: (a) uniforme, (b) transição e (c) coroa [Kim et al, 2001]

A fig. (12) ilustra estes 3 tipos de rebarbas obtidas durante os ensaios neste trabalho.

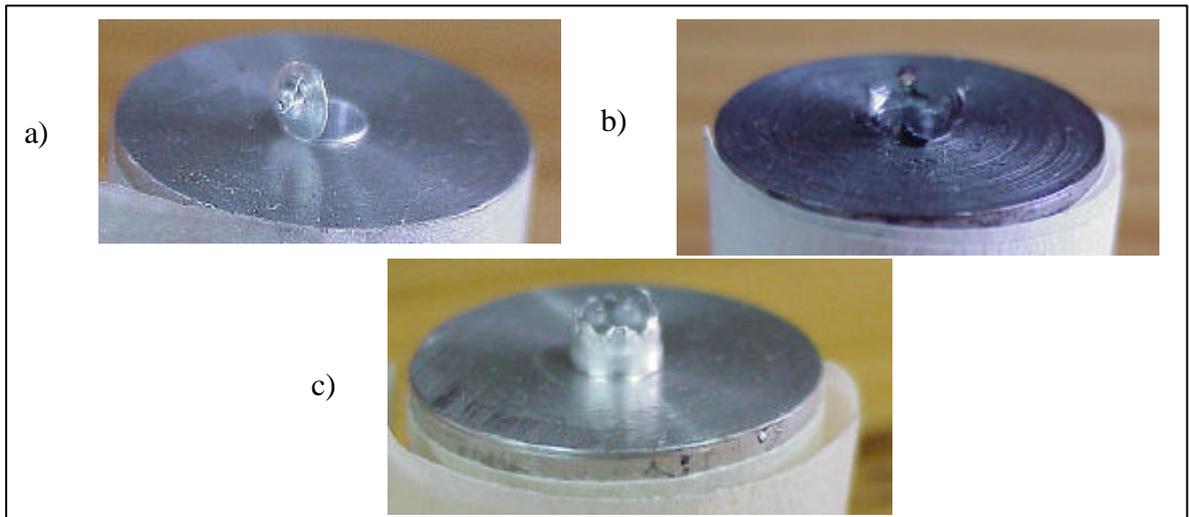


Figura 12 – Classificação de 3 tipos de rebarbas obtidas durante os ensaios: a) uniforme, b) transição, c) coroa

5.2 - Materiais e métodos

Foram ensaiados corpos de prova cilíndricos de 3/4"x22mm, desta forma não caracterizando furação profunda, em um torno convencional. Os equipamentos utilizados foram:

- Torno Romi Tormax 20;
- Alumínio ABNT 6063;
- Aço ABNT 1040;
- Broca helicoidal de aço rápido ASTM A-600 M2 – Din 338 – Tipo N – P5 – Afiação cônica - Ø 5mm (para ambos os materiais);
- dinamômetro instrumentado com extensômetros;
- sistema de aquisição (conversor A/D);
- fluido de corte (emulsão de água + 5% óleo mineral) para furação do aço (os corpos de prova de alumínio foram furados à seco);
- parâmetros de corte:

| | | |
|------------------|---------------------------------|---|
| Aço: | Vc: 15.6, 25 e 39 m/min; | f: 0.057, 0.073, 0.094, 0.166 e 0.229 mm/v |
| Alumínio: | Vc: 15.6, 25 e 39 m/min; | f: 0.094, 0.119, 0.166, 0.229 e 0.299 mm/v |

Para cada combinação dos parâmetros de corte foram utilizados 3 corpos de prova. Os esforços de corte foram monitorados pelo dinamômetro e o valor de esforço considerado para “plotagem” no gráfico consistiu da média dos esforços durante a furação. As rebarbas formadas apresentaram valores possíveis de serem medidos com paquímetro, e os valores “plotados” foram resultado da média das 3 medições de cada corpo de prova, sendo que em cada um, foram feitas 3 medições a 120°, já que as rebarbas formadas dificilmente são uniformes. As dimensões das rebarbas foram medidas perpendicularmente à face da peça.

5.3 - Resultados e discussões dos ensaios

A fig. (13) mostra os valores das alturas das rebarbas com relação aos esforços monitorados no processo, para os corpos de prova de aço. Nota-se que as alturas de rebarbas foram proporcionais aos valores de esforços, para os maiores valores. Porém para os menores valores de esforços nota-se que várias alturas de rebarbas foram geradas. Pode-se dizer que a refrigeração pode ser o fator mais influente quando os furos foram gerados com os menores valores de esforços, mostrando que existe uma linha tênue no processo que define as alturas de rebarbas geradas.

A figs. (14) e (15), mostram as alturas das rebarbas em função dos parâmetros de corte para os corpos de prova de aço. Estas mostram que com o aumento dos parâmetros de corte as alturas das rebarbas também aumentaram. Para as variações de velocidades de corte com avanços constantes, notou-se comportamentos variados para as diferentes taxas de avanço utilizados.

Para os menores avanços, as rebarbas tiveram tendência de aumento com o crescimento da velocidade de corte. Para faixas intermediárias de avanços, as rebarbas tenderam a diminuir para algumas velocidades de corte, depois voltaram a aumentar para avanços maiores e por fim praticamente foram constantes para a última faixa de avanços utilizada mostrando que a condição crítica foi atingida para a formação das rebarbas (considerado as faixas de avanço empregadas).

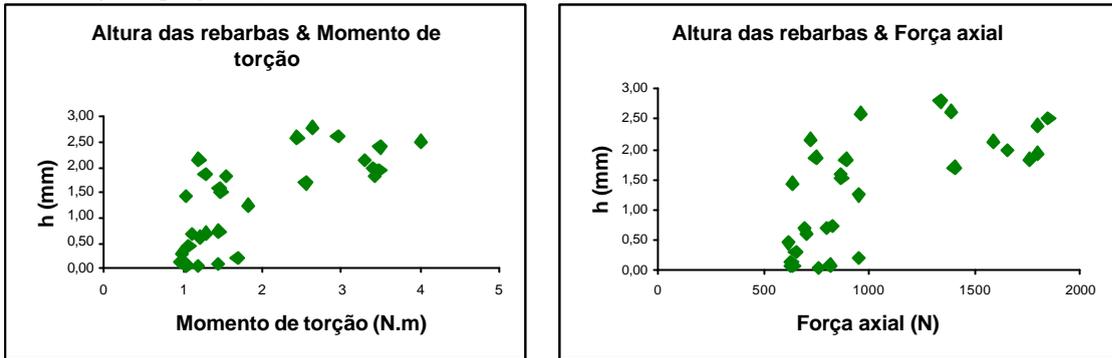


Figura 13 – Altura das rebarbas em função do momento de torção e força axial para o aço ABNT 1040

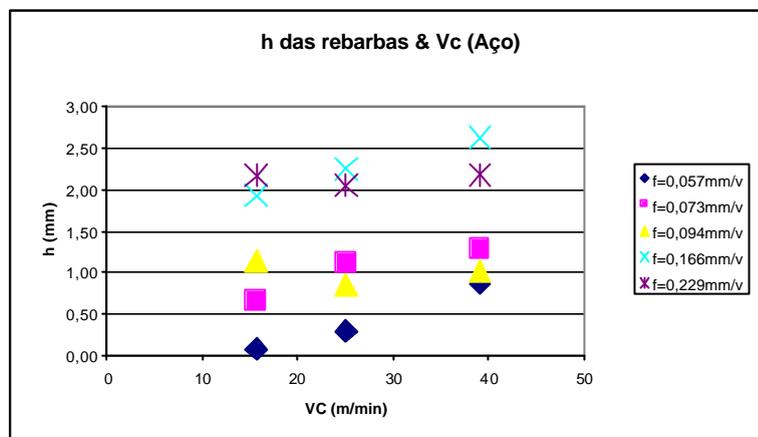


Figura 14 – Altura das rebarbas em função do avanço e da velocidade de corte para o aço ABNT 1040

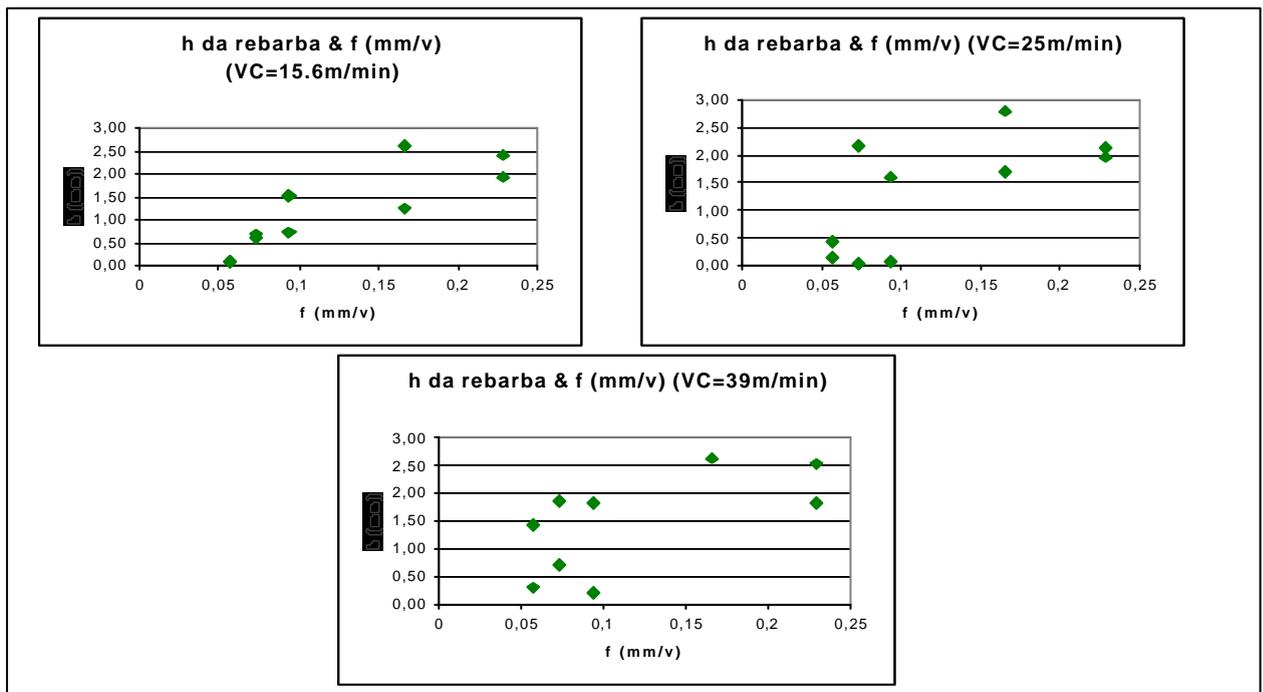


Figura 15 – Altura das rebarbas em função da velocidade de corte utilizada para vários avanços para o aço ABNT 1040

Para as mudanças no avanço utilizando as mesmas velocidades de corte, os valores de rebarbas foram mais pronunciados para os maiores avanços.

A fig. (16) mostra os valores das alturas das rebarbas com relação aos esforços monitorados no processo, para os corpos de prova de alumínio.

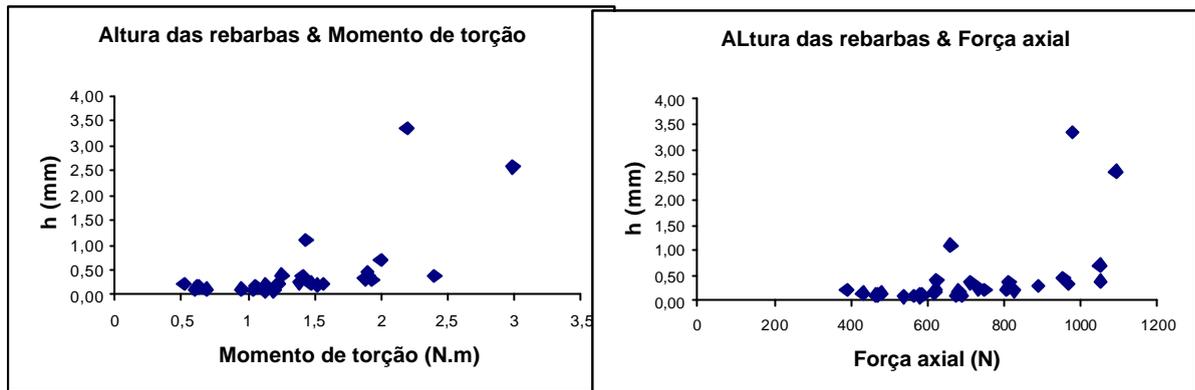


Figura 16 – Altura das rebarbas em função do momento de torção e força axial para o alumínio ABNT 6063

A figura anterior mostrou que as rebarbas aumentaram pouco com as variações de esforços para o alumínio, apresentando comportamento diferente dos valores do aço e mostrando aumentos significativos apenas para os maiores avanços.

O fato do comportamento diferente pode ser justificado pela diferente refrigeração executada para os dois materiais. Para o alumínio o corte foi efetuado a seco, fazendo com a temperatura aumentasse apenas pelas variações impostas pelo processo. Já para o aço foi utilizada refrigeração constante, e esta tem uma eficiência maior para menores valores de avanço e velocidade. A refrigeração é um ponto importante a ser considerado durante a furação no torno, conforme comentado no item 4.2. Durante o aumento da velocidade de corte ou avanço a refrigeração começa a se mostrar menos eficiente e os valores de esforços tendem a aumentar com a profundidade do furo [Bordinassi, 2002]. Desta forma as rebarbas foram maiores para furação do aço a partir de certos valores, enquanto que para o alumínio este aumento foi menos pronunciado.

As figs. (17) e (18), mostram as alturas das rebarbas em função dos parâmetros de corte para os corpos de prova de alumínio.

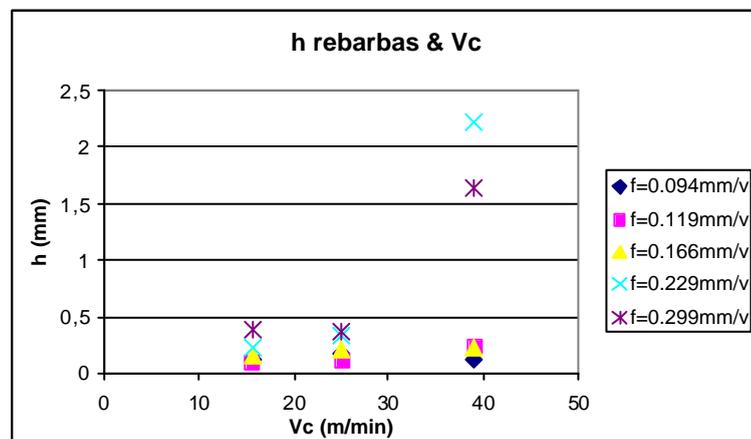


Figura 17 – Altura das rebarbas em função da velocidade de corte utilizada para vários avanços para o alumínio ABNT 6063

A fig. (17), mostra que os valores das alturas de rebarbas foram praticamente constantes para os 3 primeiros valores de avanço em função das variações de velocidades de corte. Para os 2 últimos valores de avanço, as rebarbas apresentaram maiores valores, enfatizando que as condições críticas para a formação de rebarbas foram atingidas quando altos avanços e altas velocidades de corte foram empregados. Já para as variações de avanço com velocidades de corte constantes ocorreram aumentos significativos. A temperatura do processo é uma variável importante também para a furação do alumínio, pois com o aumento da temperatura o material tende a aderir mais fortemente na saída da ferramenta, aumentando os esforços e fazendo com que a broca conforme o material sobressalente após a fratura deste no centro da broca ao invés de cortar. O resultado desta conformação pode ser visto na fig. (12c).

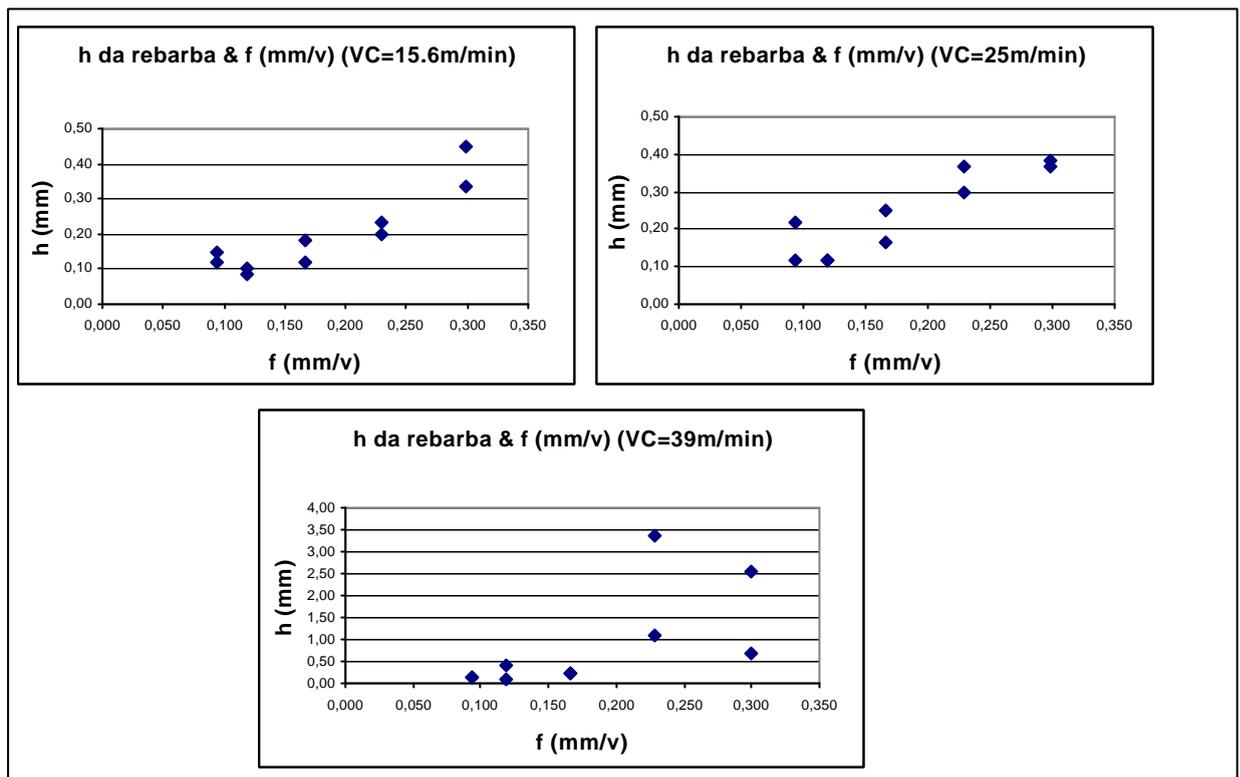


Figura 18 – Altura das rebarbas em função do avanço utilizado para várias velocidades de corte para o alumínio

A combinação entre o avanço e o diâmetro da broca é um dos fatores que também deve ser observado durante os ensaios, pois com o aumento do avanço, ocorre o aumento da força axial e com isto aumenta também a deformação plástica no fundo do furo, influenciando a formação das rebarbas. Com o aumento do diâmetro da broca, pode-se utilizar maiores avanços e portanto este estudo é válido somente para brocas de diâmetro 5mm.

Outro parâmetro bastante importante na formação de rebarbas é a velocidade de corte. Dependendo do valor desta a geração de calor nas arestas de corte da ferramenta pode aumentar influenciando as propriedades do material. Além disso também pode aumentar o desgaste da ferramenta, especialmente nas arestas principais, que influenciam grandemente a formação das rebarbas.

Considerando os parâmetros de corte, e separando as rebarbas em 2 tipos: rebarbas difíceis de se retirar e rebarbas fáceis de se retirar, foram obtidos os gráficos representados nas figs (19) e (20).

Para o alumínio foram consideradas rebarbas fáceis de se retirar, aquelas que apresentaram aspecto uniforme e altura máxima $\leq 0.5\text{mm}$.

A separação das rebarbas para o aço também seguiu o mesmo procedimento, porém com parâmetros diferentes, pois as alturas e o aspecto das rebarbas foram diferentes para os dois materiais. As peças com alturas de rebarbas $>1\text{mm}$, foram consideradas difíceis de se retirar.

Conforme fig. (19), observa-se que para o alumínio, foi possível delimitar uma determinada área onde ocorre a formação de rebarbas críticas. Para tal foram utilizadas as maiores velocidades de corte e os maiores avanços utilizados nos ensaios, mostrando que tal combinação formará rebarbas críticas. Porém percebe-se que apenas a combinação dos parâmetros com os maiores valores formarão estas rebarbas e o uso individual de um ou outro não atinge esta condição.

Já para o aço, conforme fig. (20), alguns pontos coincidiram e se procurou traçar uma reta média entre os pontos para delimitar uma região com formação de rebarbas fáceis de se remover. Notou-se uma influência maior do avanço. O avanço também é o parâmetro que mais influencia nos esforços (dentro dos parâmetros utilizados), não só pela imposição de maior remoção de material, como também na temperatura, influenciando desta forma enormemente a formação de rebarbas.

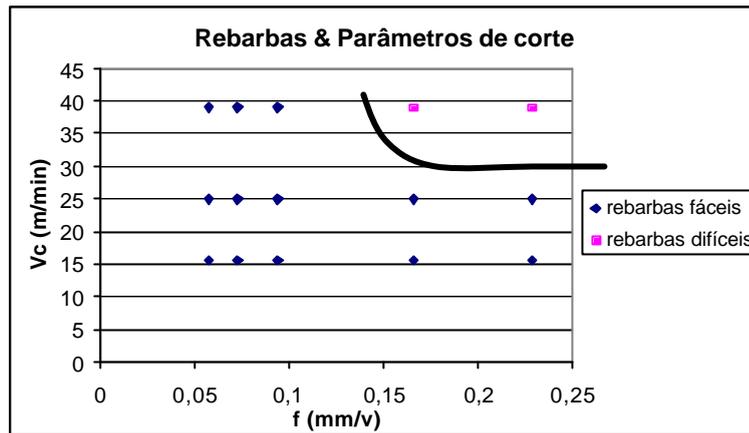


Figura 19 – Combinação dos parâmetros de corte & rebarbas

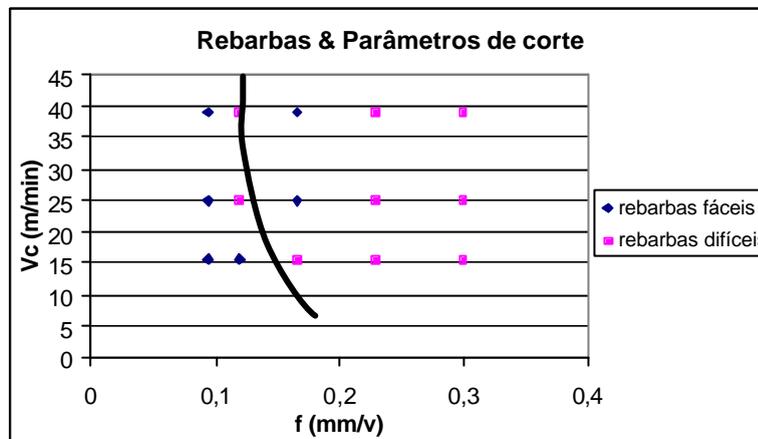


Figura 20 - Combinação dos parâmetros de corte & rebarbas

5.4 - Conclusões

- ✓ Com os ensaios realizados foi possível estabelecer correlações entre os parâmetros de corte, os esforços e as rebarbas formadas no processo de furação para o aço e alumínio empregados.
- ✓ Para o alumínio, foi possível delimitar uma região onde claramente as rebarbas críticas são formadas. Estas rebarbas foram formadas pela combinação das maiores velocidades de corte e os maiores avanços empregados nos ensaios.
- ✓ Já para o aço não foi possível delimitar uma região que identificasse claramente a correlação entre os parâmetros críticos de usinagem e as rebarbas formadas, porém percebeu-se que o avanço foi o fator mais influente na formação das rebarbas.

6. ESTUDO DE CASO III – FURAÇÃO DE COMPÓSITOS

6.1 - Introdução

Este trabalho foi motivado pela complexidade envolvida na influência do processo de furação de laminados de compósitos poliméricos reforçados por fibra de vidro (PRFV), sobre o processo de junção e montagem das pás do rotor de dínamos ou geradores eólicos. Como ilustrado na fig. (21) as pás tem um comprimento de 25 a 50 m. As condições de junção destas pás com o rotor são muito importantes, pois mesmo pequenos desvios na condição de fixação, podem gerar grandes sobrecargas sobre as pás, bem como sobre o rotor durante sua rotação.

Este estudo mostra uma investigação preliminar, visando uma otimização do processo através de ferramentas estatísticas para decidir por uma ferramenta ótima, bem como sobre as condições de usinagem em que ela opera.

6.2 - Materiais compósitos prfv e pás de geradores eolicos

Materiais compósitos poliméricos reforçados por fibras (PRF) tais como: fibra de vidro (PRFV), fibra de carbono (PRFC) ou fibra de aramida (PRFA) são caracterizados por ter melhores propriedades mecânicas tais como razões peso/resistência e peso/rigidez, uma boa resistência a corrosão e boa trabalhabilidade para serem fabricados próximos de sua forma final, propiciando uma combinação de propriedades e moldabilidade em formas adequadas.

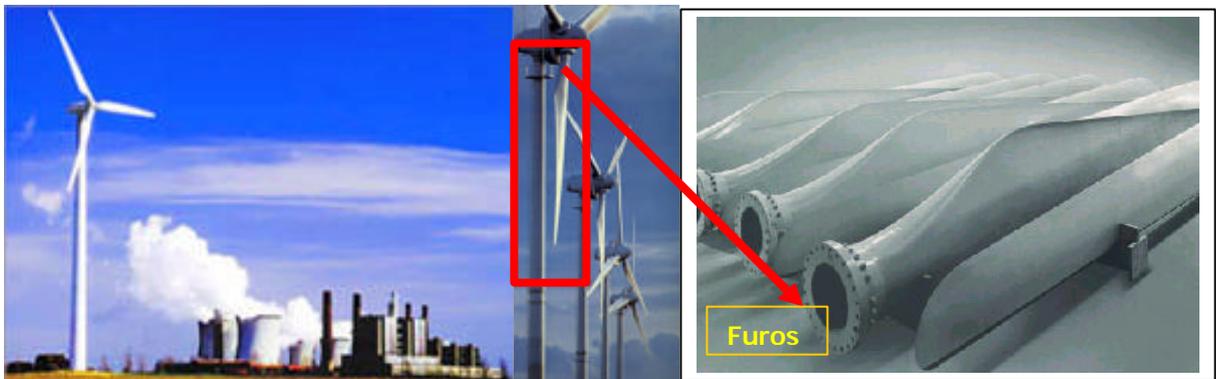


Figura 21- Pás de laminado PRFV para geradores eólicos, fixadas ao rotor por junções parafusadas

Neste sentido, a aplicação de materiais PRFV torna-se especialmente importante para aplicações que demandem elevado desempenho tais como as da área aeroespacial, naval, automotiva, esportiva e nas áreas de defesa civil e militar. Mesmo apresentando todas as características citadas de manufaturabilidade, ou seja, poder ser fabricada ou moldada já próxima da sua forma final, as peças de PRFV necessitam de processos de junção e montagem, já que na maioria das vezes elas são conformadas em uma operação de moldagem única. Em tais casos, o processo de junção torna-se o elo mais fraco da estrutura e o processo de rebtagem ou parafusamento precedido por um processo de furação torna-se uma etapa crítica no desenvolvimento do produto (Mathews et al, 1999). Tipicamente, dois tipos de junção podem ser usados: junção mecânica e 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 desmontados para trabalhos de manutenção e reparo, por outro lado, elas possibilitam uma melhor distribuição da carga através de uma área maior quando comparadas com a junção mecânica por parafusos. As junções mecânicas por parafusos demandam uma boa qualidade de 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 para a furação de laminados PRFV, o ponto mais fraco está na sua suscetibilidade ao dano por usinagem quando submetidos a parâmetros de corte ou geometrias de ferramentas não adequadas. Tais fatores caracterizam os laminados de PRFV como materiais difíceis de serem usinados e resultam em uma tendência de evitar que seu processo de acabamento inclua processos de usinagem durante sua manufatura e montagem.

Não obstante estes obstáculos, dentre os diversos processos empregados na usinagem de PRFV, a furação bem como os processos de trepanação são provavelmente os processos mais frequentemente usados nas operações de acabamentos da peça moldada. Nas junções rebtidas e nas parafusadas, surge a necessidade de furos precisos e isentos de danos visando assegurar uma maior resistência e uma junção mais precisa.

6.3 - Usinabilidade de laminados de PRFV

A usinagem de laminados de PRFV tem algumas características que contrastam com a usinagem tradicional dos metais, como por exemplo [Bratukhin, 1995]:

- **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 se 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 a estrutura laminada e a baixa aderência entre o material da matriz ligante e o reforço de fibra, resultando em delaminação e fratura, e portanto dano térmico e mecânico;
- **Baixa condutividade do PRFV:** é uma centena de vezes inferior aquela 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: 90% através da ferramenta, 5% através do cavaco e 5% através da peça usinada, enquanto em um processo de usinagem convencional quase 90% do calor é dissipado através do cavaco (Trent, 1996);
- **Ação abrasiva da fibra:** dentre diversas opções de materiais, as fibras usadas como reforço nos PRF mais comuns são: vidro, carbono, aramida, Kevlar, 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, isto é, forma uma substância ou 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 uma ruptura fácil micro e macro à partir da superfície, resultando em desgaste por adsorção químico-mecânica;
- **Baixa resistência térmica do laminado PRFV (100 to 300 °C):** nesta faixa de temperatura ocorre a queima da matriz polimérica e a superfície queimada aparece sobre a área usinada. Pode ser intensificado pelo fato de que em alguns casos não é possível utilizar fluido de corte para refrigeração, já que o compósito PRFV absorveria o fluido refrigerante.

6.4 - Materiais e método experimental

Um planejamento experimental estatístico foi desenvolvido, almejando uma melhoria da qualidade do processo de furação industrial de laminados de PRFV. As propriedades características das amostras do laminado de PRFV estão listadas na tab. (1). Os experimentos realizados permitiram uma avaliação estatística das diferentes ferramentas bem como dos parâmetros de furação empregados. Foram ensaiados 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 tab. (2).

6.5 - Enfoque estatístico para o planejamento experimental

Antes de realizar os ensaios de furação, foi elaborado um planejamento estatístico almejando aprimorar a resposta a ser obtida com os resultados, para que fosse possível mostrar a dependência 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, as duas variáveis escolhidas como variáveis de resposta (Kawano & Bassi, 2003).

Nas seções seguintes o planejamento experimental para cada uma das quatro ferramentas investigadas, será apresentado e discutido, visando uma conclusão da melhor escolha de ferramenta e dos parâmetros de operação para o objetivo de melhorar o desempenho da junção.

Tabela 1 - Propriedades das amostras do laminado PRFV

A – Relacionadas com os componentes:

| | |
|----------------------------------|-------------------------------|
| A.1 – características do reforço | Fibra de vidro |
| A.1.1 - tamanho | Fibra contínua |
| A.1.2 - material | Fibra de vidro |
| A.1.3 – tipo | Tipo "E" |
| A.1.3.1 - fibra | Diâmetro do filamento = 17 µm |

| | |
|--|--|
| A.2 – quantidade de reforço | 64 % |
| A.3 – orientação do reforço (fibras) | 0 / + 45 / - 45 / 90 |
| A.4 – características da matriz | |
| A.4.1 - composição química | Epoxi (Bisfenol "A" + Epicloridrine + Poliamine) |
| B – Relacionadas ao material consolidado | |
| B.1 – Propriedades físicas | $T_g = 80^\circ \text{C}$ (temperatura de transição vítrea) |
| B.2 – Tratamentos térmicos | Pós cura a 60°C por 3 horas |
| B.3 – Método de obtenção | Polimerização com cura sob vácuo |
| B.4 – Distribuição do reforço (homogêneo ou não) | Ortotrópico |
| B.5 - Propriedades mecânicas | E – Módulo de Elasticidade = 14415 MPa G – Modulo de Rigidez = 5065 MPa Alongamento = 2,12 % |

Tabela 2 – Ferramentas utilizadas nos ensaios

| | | |
|--|---|---|
| Broca helicoidal $\varnothing = 25,4 \text{ mm}$, aço rápido |  |  |
| Serra copo comum $\varnothing = 25,4 \text{ mm}$, aço rápido |  |  |
| Serra copo diamantada $\varnothing = 25,4 \text{ mm}$ Aço rápido, com ponta revestida de diamante |  |  |
| Trepanadora com insertos de metal duro $\varnothing_{\text{externo}} = 50,8 \text{ mm}$ |  |  |

6.6 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS E ANÁLISES

6.6.1 - BROCAS HELICOIDAIS

As figuras 22 e 23 ilustram os valores de esforços obtidos para a furação com broca helicoidal a seco e com fluido de corte.

A fig. (24) apresenta a avaliação da interação entre o avanço (C), a velocidade de corte (B) e a utilização do fluido de corte (C) nos ensaios com brocas helicoidais.

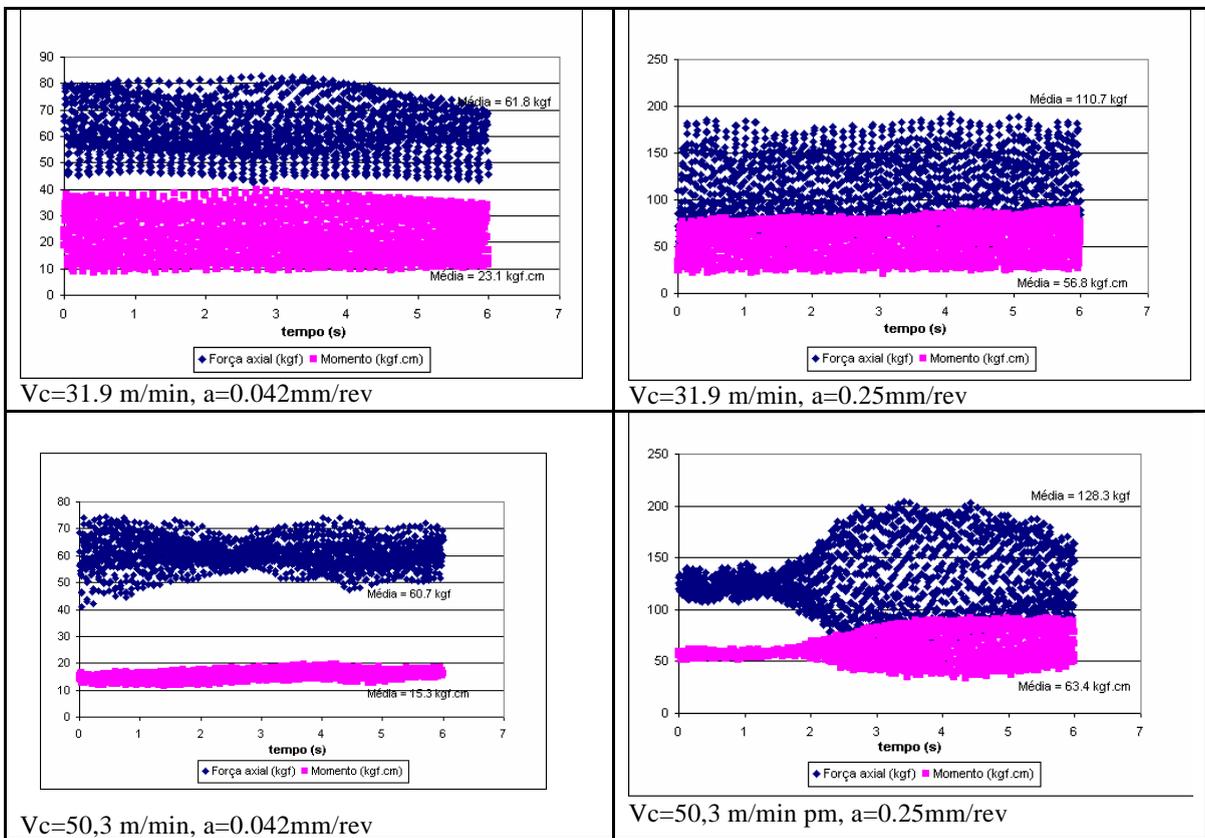


Figura 22 – Furação com broca helicoidal sem fluido com diferentes velocidades de corte e avanços

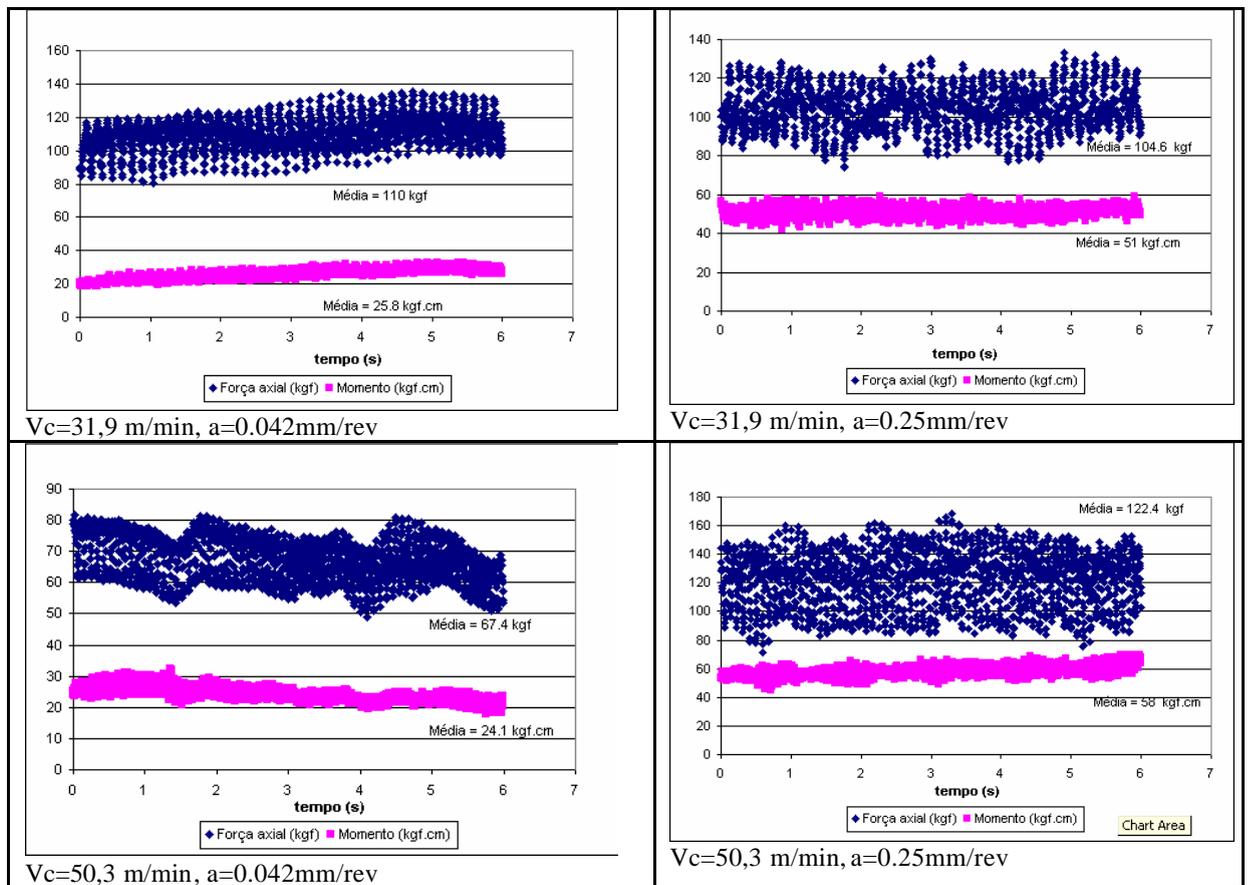


Figura 23 - Furação com broca helicoidal com fluido de corte – diferentes velocidades de corte e avanços

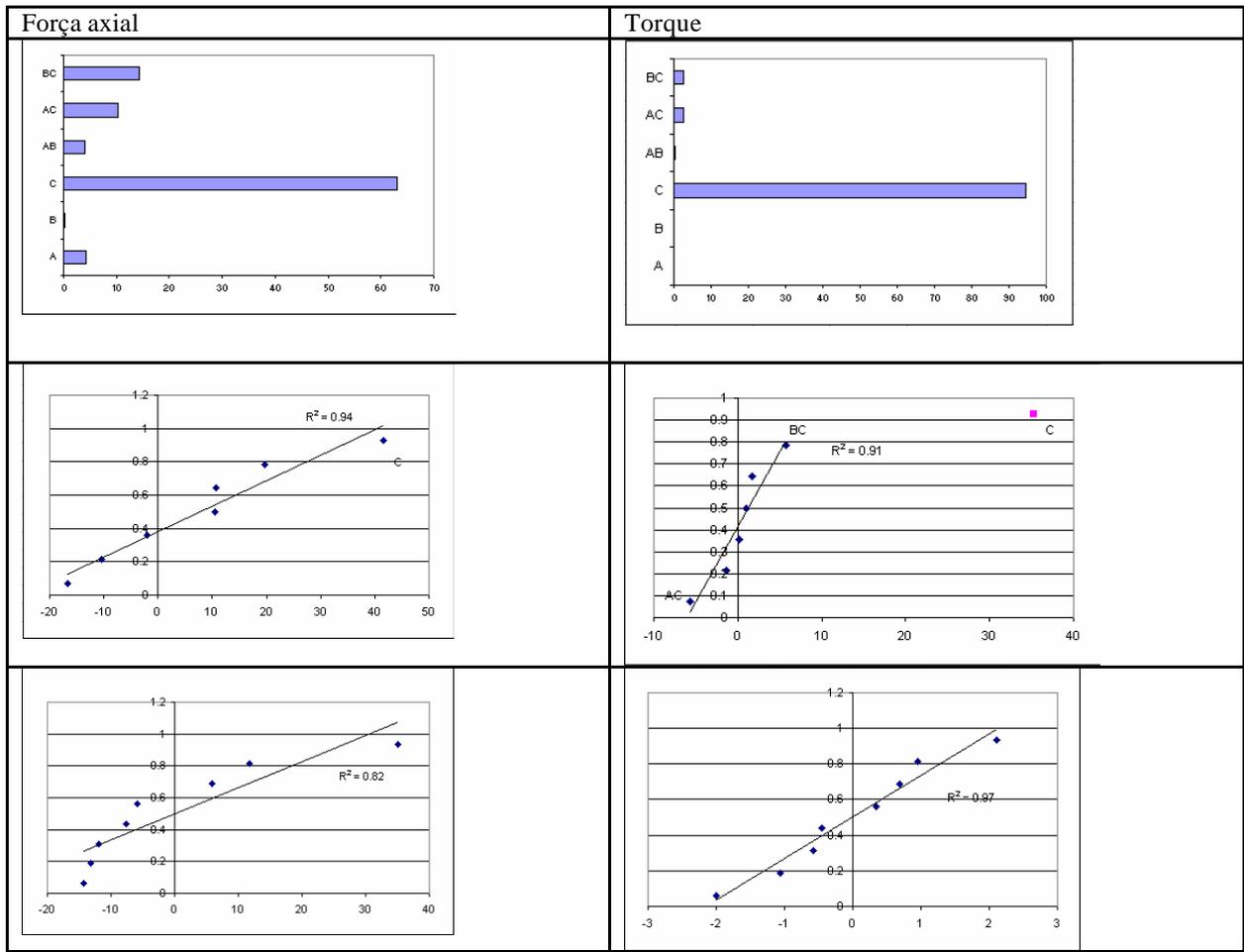


Figura 24– Avaliação da interação entre força axial e o torque no processo de furação de compósitos PRFV: (a) diagrama de Pareto, (b) probabilidade normal dos efeitos, (c) probabilidade normal para os resíduos

A fig. (25) 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/rev) e alto (0,25 mm/rev), respectivamente.

a)

b)

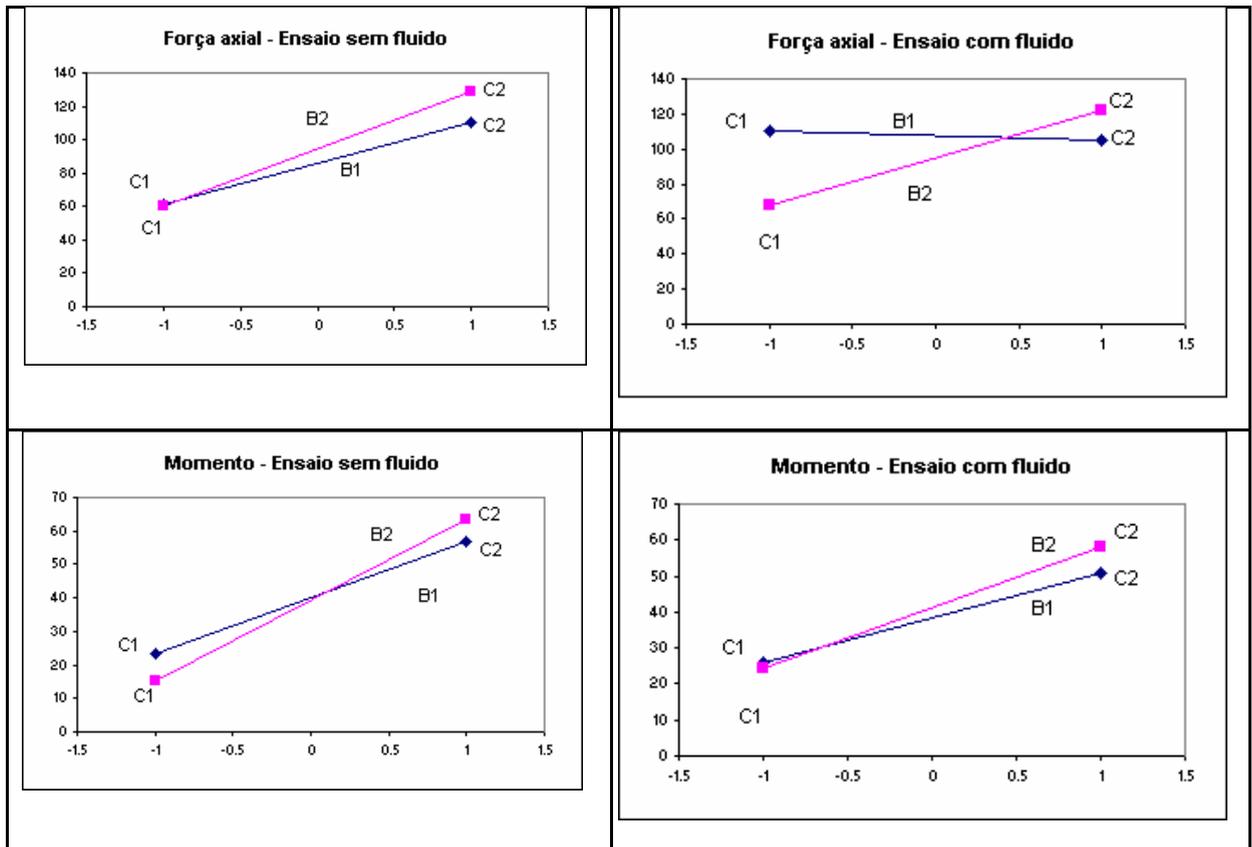


Figura 25 - Gráficos de interação para força axial e momento na furação

6.6.2 - Serra de copo de aço rápido

Os resultados para a serra de copo comum de aço rápido estão apresentados nas figs. (26) e (27).

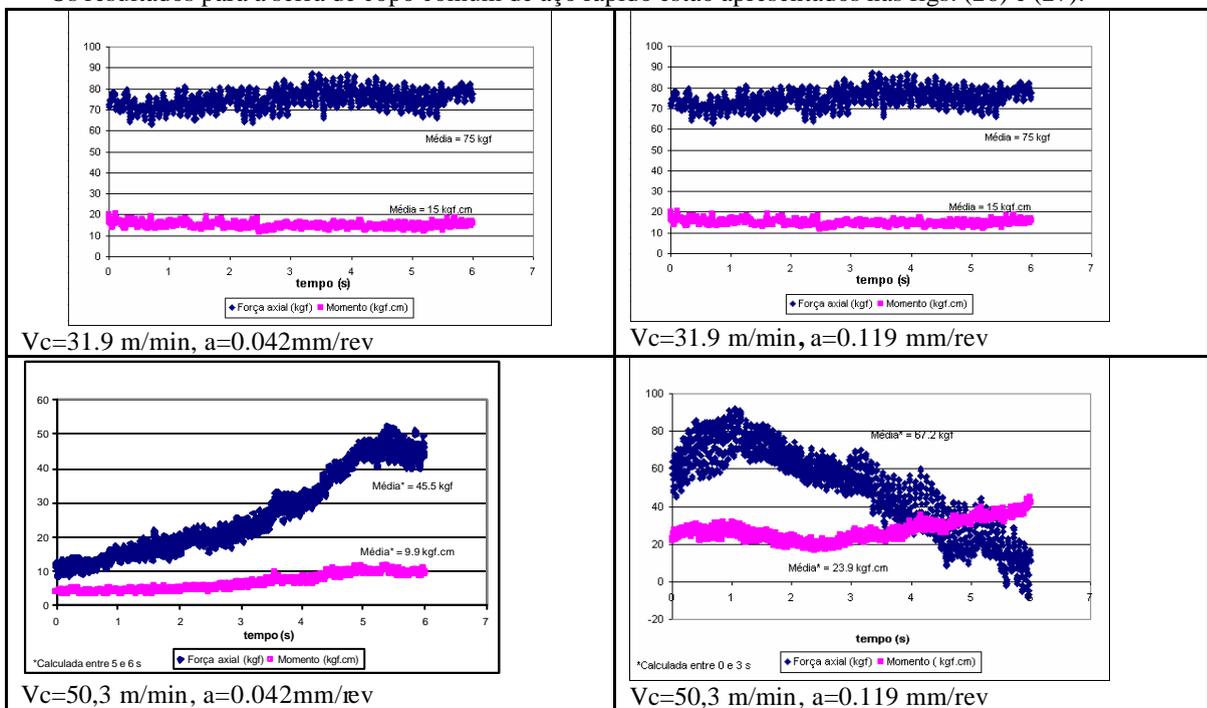


Figura 26 - Ensaio da serra copo comum sem fluido, com diferentes velocidades de corte e avanços

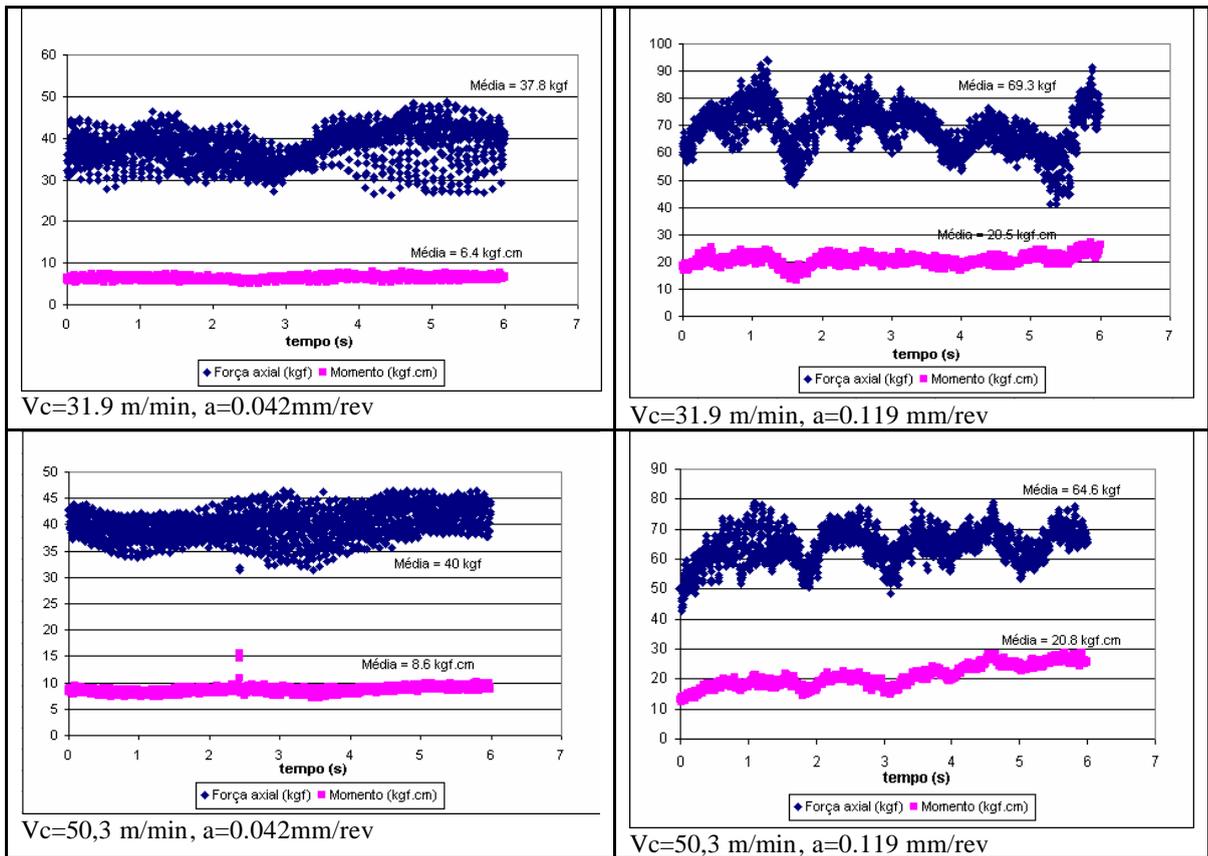


Figura 27 - Ensaio com serra copo comum com fluido, e diferentes velocidades de corte e avanços

6.7 - Serra de copo revestida com diamante

Os resultados para a furacão com a serra de copo diamantada estão apresentados na fig. (28).

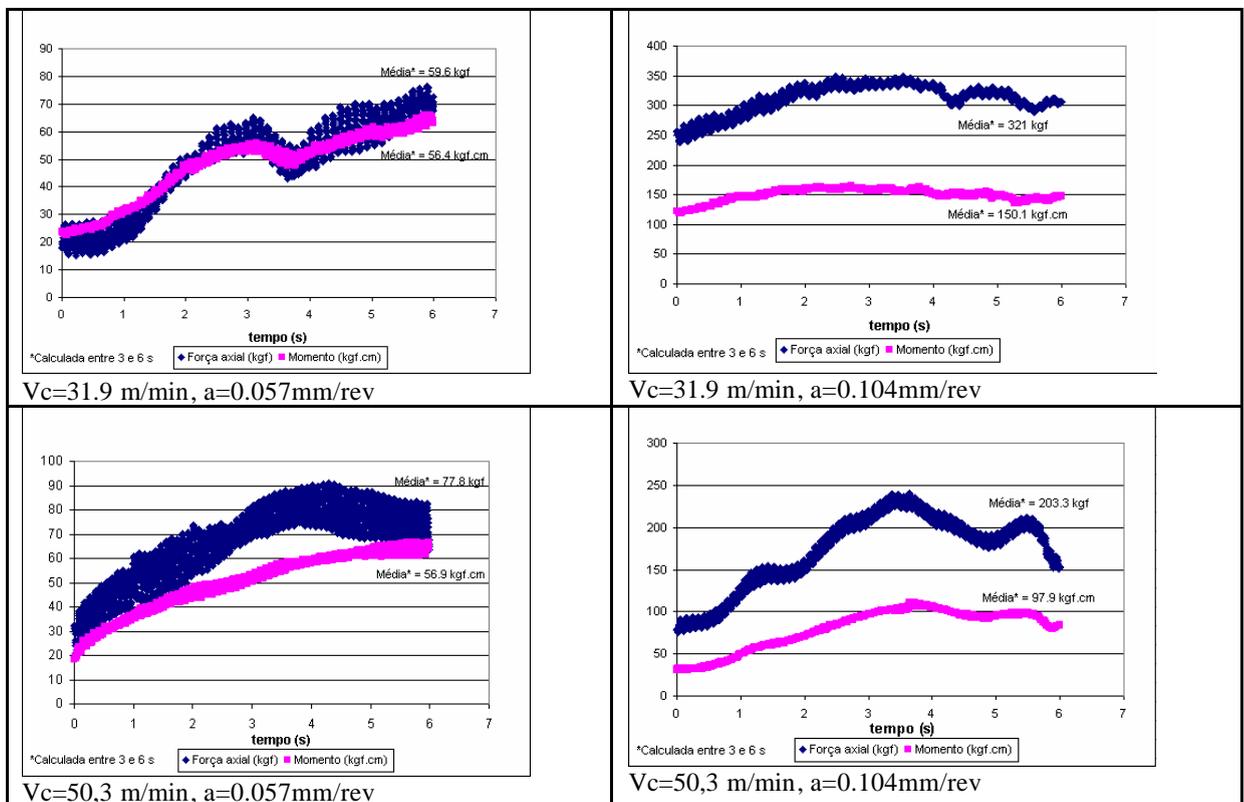


Figura 28 - Ensaio da serra copo diamantada com fluido

6.7.1 - Ferramenta Trepanadora com insertos de metal duro

Os resultados para a furação com ferramenta trepanadora com insertos de metal duro estão apresentados na fig. (29).

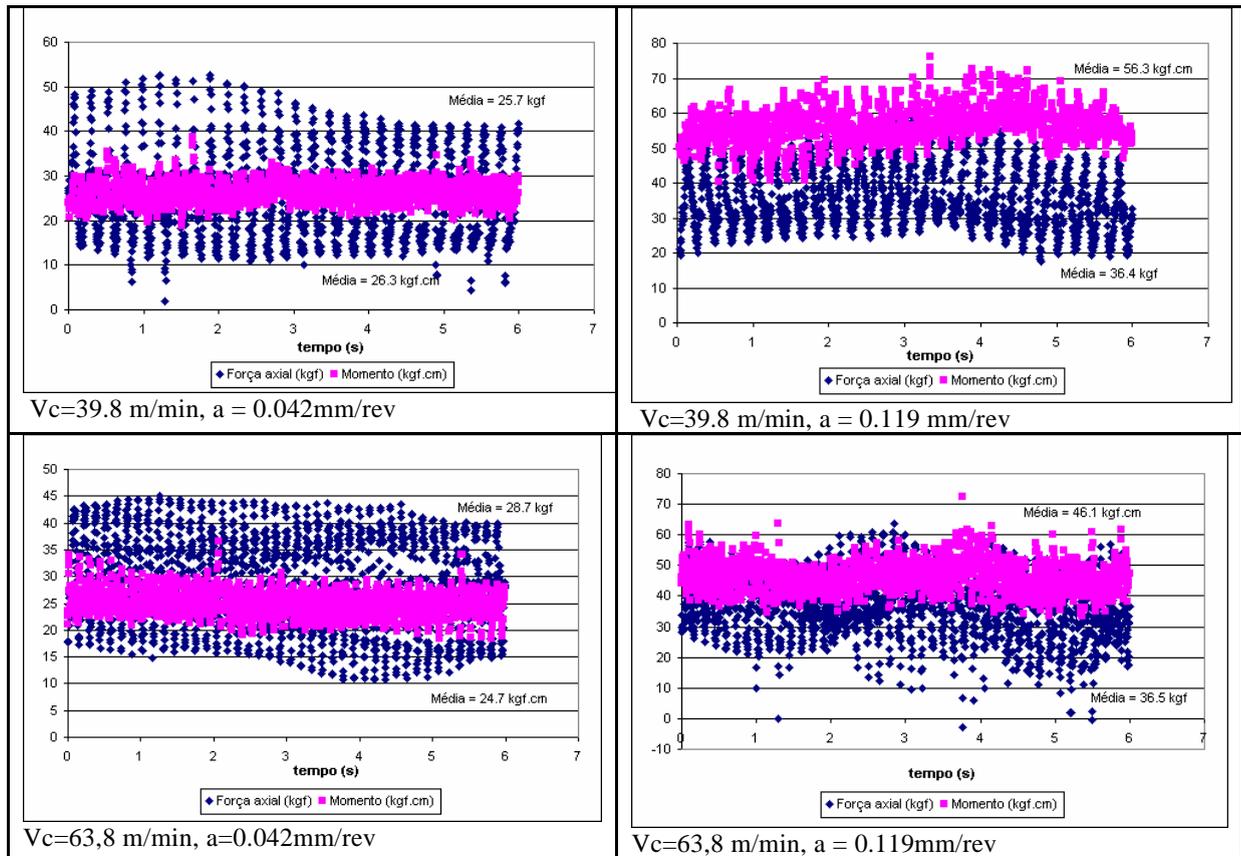


Figura 29- Ensaio da trepanadora sem fluido de corte

6.8 - DISCUSSÃO

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 minimizar a força axial e momento de torção. 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 o processo a seco sem que se atingissem patamares elevados de força axial e momento de torção. Desse modo, foram selecionadas as condições de usinagem ilustradas na tab. (3).

Tabela 3 - Valores dos parâmetros selecionados

| Ferramenta | Parâmetros de furação selecionados | | | Respostas | | |
|-----------------------|------------------------------------|-----------------------------|-----------------|-------------------|------------------|-----------------------|
| | Fluido de corte | Velocidade de Corte [m/min] | Avanço [mm/rev] | Força axial [kgf] | Momento [kgf.cm] | Tempo de furação [s]* |
| Broca helicoidal | sem | 31.9 | 0.25 | 110.662 | 56.813 | 60 |
| Serra copo comum | com | 50.3 | 0.119 | 69.334 | 20.505 | 80 |
| Serra copo diamantada | com | 50.3 | 0.057 | 77.849 | 59.966 | 167 |
| Trepanadora | sem | 31.9 | 0.119 | 36.522 | 46.163 | 126 |

Ainda em uma discussão contrastando o desempenho das quatro ferramentas nos ensaios de usinagem de laminados PRFV podem ser feitas as considerações descritas na tab. (4).

Tabela 4 – 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 necessário 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 consiste na 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 industrial simulado. A presença de fluido sob pressão auxiliaria a remoção de cavaco e evitaria o superaquecimento da ferramenta. |
| Ferramenta trepanadora | Apesar da grande desproporcionalidade entre dimensão e peso em relação à fixação na máquina, a ferramenta trepanadora foi a que gerou menos forças axiais. |

6.9 - Conclusões

- ✓ O dinamômetro utilizado demonstrou um desempenho favorável no sentido de avaliar o comportamento da força axial e do torque na usinagem de compósito de PRFV laminado, em operações de furação e trepanação, utilizando-se quatro ferramentas distintas.
- ✓ 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 com revestimento diamantado apresentou valores elevados das forças de corte, quase impossibilitando seu uso sem fluido de corte.
- ✓ 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.

7. BIBLIOGRAFIA

- Altintas, Y. Manufacturing automation. Cambridge Univ. Press, 2000.
- Bordinassi, E. C. Estudo do processo de furação em aço com brocas helicoidais de aço rápido. Dissertação Mestrado – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 126p., 2002;
- Bratukhin, A. G., V. S., 1995, Composite Manufacturing Technology, Chapman & Hall, London.
- Daar, H. A. Uma contribuição ao conhecimento do processo de furação dos aços com brocas helicoidais. São Carlos, 233p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1967.
- Diniz, A. E. ; Marcondes, F. C. ; Coppini, N. L. Tecnologia da usinagem dos materiais 3. ed. São Paulo, Artliver Editora, 2001.
- Enomoto, S. ; Ioi, T. ; Kato, K. ; Zhou, L. Liu, X. Burr reduction with a fine-scrape cutter. Journal of materials processing technology, v. 124, p. 225-258, 2002;
- Halevi, G. ; Weill, R. D. Principles of process planning – A logical approach. 1a ed. Ed. Chapman & Hall, 1995, pp. 262-99.
- Holman J. P. Experimental methods for engineers. 6.ed. Singapore, McGraw-Hill Company, 1994.
- Kawano, E. & Bassi, D., 2003, Desenvolvimento do Processo de Furação de pás de turbinas eólicas, Trabalho de Formatura em Engenharia Mecânica, EPUSP.
- Kim, J. ; Min, S. ; Dornfeld, D. A. Optimization and control of drilling burr formation of AISI 304L and AISI 4118 based on drilling burr control charts. International journal of machine tools & manufacture: design, research and application, v. 41, p.923-936, 2001;
- Ko, S. L. ; Lee, J. K. Analysis of burr formation in drilling with a new concept drill. Journal of materials processing technology, v.113, p.392-398, 2001;
- LEE, B. Y. ; IU, H. S. ; TARNG, Y. S. Modeling and optimization of drilling process. Journal of materials processing technology, v.74, p.149-157, 1998.
- Mahdy, M. A. M. Economic drilling conditions for a given deburring radius. Journal of materials processing technology, v.110, p.197-205, 2000;
- Mathew, J., Ramakrishnan, N. & Naik, N. K., 1999, Investigations into the effect of a trepanning tool on thrust and torque during drilling of GFRP composites, J. Mat. Proc. Tech. 91, 1-11.
- Min, S. ; Kim, J. ; Dornfeld, D. A. Development of a drilling burr control chart for low alloy steel, AISI 4118. Journal of materials processing technology, v. 113, p. 4-9, 2001;
- Nakayama, K. ; Arai, M. Burr formation on metal cutting. Annals of the CIRP, vol. 36, p.33-36, 1987;
- NOVASKI, O. Contribuições ao processo de furação com brocas helicoidais. Campinas, 1996. 131p. Tese (Livre Docência) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas.
- Pande, S. S. ; Relekar, H. P. Investigations on reducing burr formation in drilling. International journal of machine tools & manufacture, v. 26, p.339-348, 1985;
- Saunders, L. K. L. A finite element model of exit burrs for drilling of metals. Finite elements in analysis and design, article in press, 2002;
- Tönshoff, H.K. ; König, W. Machining of holes, developments in drilling technology. Annals of the CIRP, v.43, p.551-561, 1994;
- TRENT, E M. Metal cutting 3.ed. Butterworth-Heinemann, 1996.