

## **AVALIAÇÃO DAS FORÇAS (FX, FY, FZ) E DO TORQUE NO ROSQUEAMENTO COM MACHOS DE CORTE DE METAL DURO EM FERRO FUNDIDO VERMICULAR**

**Paulo Rosa da Mota, prm@ifg.edu.br<sup>1</sup>**  
**José Luiz Oliveira Pena, jlop@ifg.edu.br<sup>1</sup>**  
**Alexandre Martins Reis, amreis@ufv.br<sup>2</sup>**  
**Márcio Bacci da Silva, mbacci@mecanica.ufu.br<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Rua 75, N° 46, Centro, 74055110, Goiânia/Go

<sup>2</sup>Universidade Federal de Viçosa, Campus Universitário UFV, 36570000, Viçosa/MG

<sup>3</sup>Universidade Federal de Uberlândia, Bloco 1M, Campus Santa Mônica, 3840089, Uberlândia M/G

**Resumo:** *O ferro fundido vermicular tem obtido uma crescente aceitação na indústria automobilística, demonstrando possibilidades de utilização em diversos componentes, que tradicionalmente são fabricados em ferro fundido cinzento. Entretanto, a maior dificuldade para a fabricação de peças em ferro fundido vermicular a preços competitivos é a sua baixa usinabilidade quando comparada a do ferro fundido cinzento. Diversas pesquisas sobre a usinabilidade deste material já foram desenvolvidas, principalmente para os processos de torneamento, fresamento e furação. Contudo, pouco foi feito com relação ao processo de rosqueamento com macho de corte. Dessa forma, o objetivo desse trabalho consiste em investigar as forças e o torque gerados durante o processo de rosqueamento com machos de corte de metal duro (M13 x 1,5 mm), revestidos com TiAlN, em ferro fundido vermicular (CGI 450 - ASTM). Comparou-se as forças (Fx, Fy e Fz) e o torque gerados na usinagem com ferramentas novas e com diversos níveis de desgaste. Os resultados mostraram que os mecanismos de desgaste predominantes para as ferramentas foram adesão e abrasão e que as forças de corte e o torque dependem dos parâmetros de corte utilizados. O efeito do erro de sincronismo entre rotação e avanço nas forças e torque também foi analisado.*

**Palavras-chave:** *Rosqueamento, Ferro Fundido Vermicular, Desgaste, Torque.*

### **1. INTRODUÇÃO**

O ferro fundido vermicular, também denominado *Compacted Graphite Iron* – CGI é conhecido desde meados do século passado. Atualmente, existem diversas aplicações desse material nas indústrias automobilísticas, que vem gradativamente substituindo o ferro fundido cinzento, principalmente na fabricação de cabeçotes e blocos de motores a diesel. Porém, devido à sua maior resistência mecânica, o ferro fundido vermicular também apresenta uma maior dificuldade na usinagem, isto é, pior usinabilidade em relação ao ferro fundido cinzento (Mocellin, 2002; Xavier, 2003; De Andrade, 2005; Doré, 2007; Heck *et al*, 2007; Xavier, 2009 e Bagetti, 2009).

A usinabilidade refere-se à facilidade com a qual um material pode ser usinado e pode ser medida em termos de vida útil da ferramenta, velocidade de remoção de cavaco, acabamento superficial, facilidade de formação de cavaco, ou forças de corte. Não é uma propriedade intrínseca do material, mas resulta de uma complexa interação entre as propriedades mecânicas do material da peça, ferramentas de corte e condições de usinagem (Machado *et al*, 2009 e Da Mota, 2009).

O macho de corte é uma ferramenta de múltiplas arestas de corte que, através do movimento rotativo combinado com o axial, executa a usinagem na superfície interna de um furo, cujo diâmetro é um pouco menor que o diâmetro externo do macho de corte, para formar filetes de rosca após a remoção de cavacos. A usinagem com macho de corte é realizada pelas arestas de corte da entrada da ferramenta mais a aresta de corte do primeiro filete de rosca completa, que geralmente está na parte cilíndrica. Desta forma, a velocidade de corte é variável ao longo da entrada, sendo menor nos primeiros filetes e maior no filete da parte cilíndrica (Müller; Soto, 1999; Bezerra, 2003; Reis, 2004 e Da Mota, 2006).

Dentro deste contexto, o rosqueamento com machos de corte é um processo de usinagem que merece uma atenção especial, pois normalmente é um dos últimos realizados sobre a peça que está sendo fabricada, e que, portanto, já possui um alto valor agregado. Existem vários problemas frequentemente encontrados nos processos de rosqueamento com machos de corte, tais como a quebra do macho de corte, erro síncrono entre o movimento rotacional e de avanço, desgaste do macho de corte e desalinhamento entre a ferramenta e o pré-furo, dentre outros. Daí, a necessidade de

monitorar o processo de rosqueamento com machos de corte, sendo em tempo real (concomitantemente ao processo) ou independente do tempo de execução do processo. Para o rosqueamento interno com machos de corte o monitoramento pode ser feito de maneira direta, medindo-se o desgaste da ferramenta, muitas vezes com a ajuda de um microscópio, ou indireta, medindo-se alguns parâmetros relacionados com o desgaste, tais como força de usinagem, torque, vibrações mecânicas do sistema, potência e qualidade da rosca produzida (Da Mota, 2009). Dentre estes parâmetros, o torque necessário para gerar uma rosca interna se destaca, pois está diretamente relacionado com o material da peça, o tipo de macho, o sistema de fixação, a porcentagem da altura da rosca, a lubrificação, e também pelo fato de qualquer alteração na geometria da ferramenta e na velocidade de corte resultar em mudanças no torque (Agapiou, 1994; Da Mota, 2006).

Uma má escolha do macho de corte, uma lubrificação inadequada e/ou condições severas de corte podem ocasionar desde a produção de roscas fora da tolerância especificada até a quebra da ferramenta e ao refugo da peça, além do tempo gasto na remoção de um macho quebrado (Sha et al., 1990 e Fantin, 1992). Assim, o monitoramento do desgaste do macho de corte é de fundamental importância nas operações de rosqueamento, para a prevenção da quebra ou do próprio desgaste da mesma, da melhoria na produtividade e do aumento da qualidade das peças usinadas (Wilcox et al, 1997; Bezerra et al, 2000 e Duarte et al, 2003).

## 2. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Neste trabalho avaliou-se a influência do nível de desgaste apresentado por diversos machos de corte de metal duro com quatro canais (M13 X 1,5 mm), utilizados na fabricação de roscas em blocos de motores de uma linha de produção. As ferramentas são revestidas com TiAlN e foram retiradas da linha de produção com diversos estágios de desgaste. Foram obtidas ferramentas em final de vida (100% de desgaste) e com desgastes intermediários: 20%, 40%, 60% e 80%, como também ferramentas novas. As condições de corte empregadas na indústria para a furação dos pré-furos e do rosqueamento encontram-se descritas na Tab.(1). Nos ensaios em laboratório, mediu-se as forças axiais, radial e o torque.

**Tabela 1. Condições de corte empregadas na linha de produção.**

Tupy	Velocidade de Corte (Vc)	Velocidade em Z (avanço)	Fluido de Corte	Profundidade do Pré-Furo (cego)
Broca	63 m/min	670 mm/min	Hysol 6545	30 mm
Macho	50 m/min	1836 mm/min	Hysol 6545	25 mm

As condições de corte utilizadas em laboratório, tanto para a fabricação do pré-furo quanto para a fabricação da rosca, foram diferentes em relação às condições de corte utilizadas na linha de produção. Na fábrica utilizou-se o fluido de corte em alta pressão (Hysol 6545) em canais internos (pressão mínima de 30 bar), enquanto que em laboratório o fluido de corte foi em forma de jorro (Vasco 1000), ou MQF (Mínima Quantidade de Fluido), devido as características da máquina CNC que não permite usar fluido em alta pressão, além da restrição imposta pelo sistema de medição de força e torque (dinamômetro). Em ambos os casos, a concentração ficou entre 10 e 12%. A Tab. (2) apresenta as condições de corte empregadas em laboratório.

**Tabela 2. Condições de corte empregadas em laboratório.**

Laboratório	Velocidade de Corte (Vc)	Velocidade em Z (avanço)	Fluido de Corte	Profundidade do Furo (cego)
Broca	54 m/min	450 mm/min	Vasco 1000	30 mm
Macho	50 m/min	1836 mm/min	Vasco 1000	25 mm

Os ensaios foram realizados em um centro de usinagem vertical, CNC modelo Discovery 760, do fabricante ROMI, comando Siemens 810. Para a medição ou monitoramento das forças de corte ( $F_x$ ,  $F_y$  e  $F_z$ ) e momento torçor ( $M_z$ ) durante a usinagem, utilizou-se um dinamômetro modelo 9123C1211 (fabricado pela Kistler), próprio para medir esforços em ferramentas rotativas (telemetria). O dinamômetro foi acoplado ao eixo-árvore do centro de usinagem e conectado ao condicionador de sinais (modelo 5223B1), o qual foi conectado a uma placa de aquisição fabricada pela empresa National Instruments. Essa placa transmitiu os sinais das forças ( $F_x$ ,  $F_y$  e  $F_z$ ) e o torque para um microcomputador utilizando programa LabVIEW. A Tab (3) apresenta as principais características do dinamômetro.

Tabela 3. Dados técnicos do dinamômetro modelo 9123C1211 (Kistler).

Faixa de medição	$F_x, F_y, F_z$ e $M_z$	KN KN Nm	$\pm 5$ $\pm 20$ $\pm 200$
Rotação máxima		l/min	10 000 máx
Sensibilidade	$F_x, F_y, F_z$ e $M_z$	mV/N mV/N mV/Nm	$\approx 2$ $\approx 0,5$ $\approx 50$
Frequência natural $F_{nx}, F_{ny}, F_{nz}, F_n(M_z)$		kHz	$\approx 2$
Temperatura de operação		$^{\circ}\text{C}$	0..60
Diâmetro	D	Mm	115
Altura	H	Mm	52
Peso		Kg	3

A Figura (1) mostra detalhes do sistema de aquisição de forças e torque utilizado.

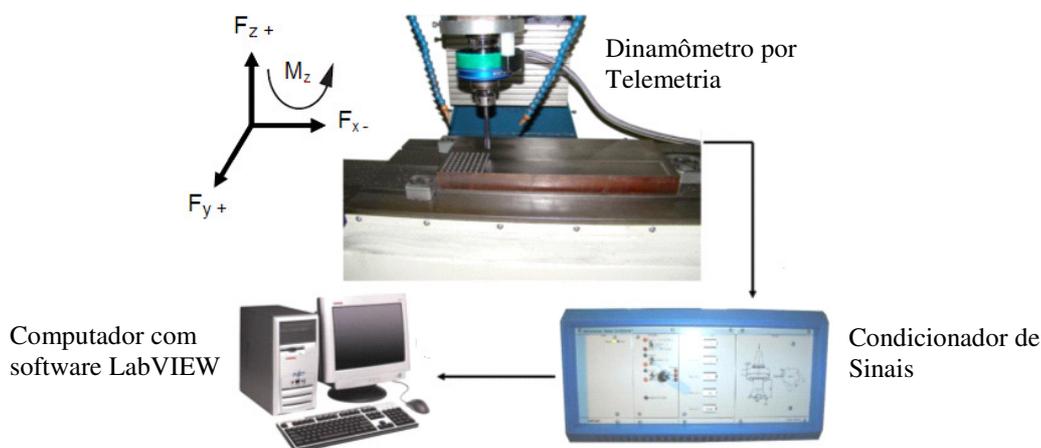


Figura 1. Dinamômetro Kistler modelo 9123C1211 (telemetria) e sistema de aquisição utilizado neste trabalho.

A Figura (2) mostra o modelo das brocas e dos machos de corte utilizados nesta pesquisa. As brocas utilizadas possuem escalonamentos dos diâmetros, 11,5 e 14,0 mm, para a abertura dos pré-furos e escareamento.

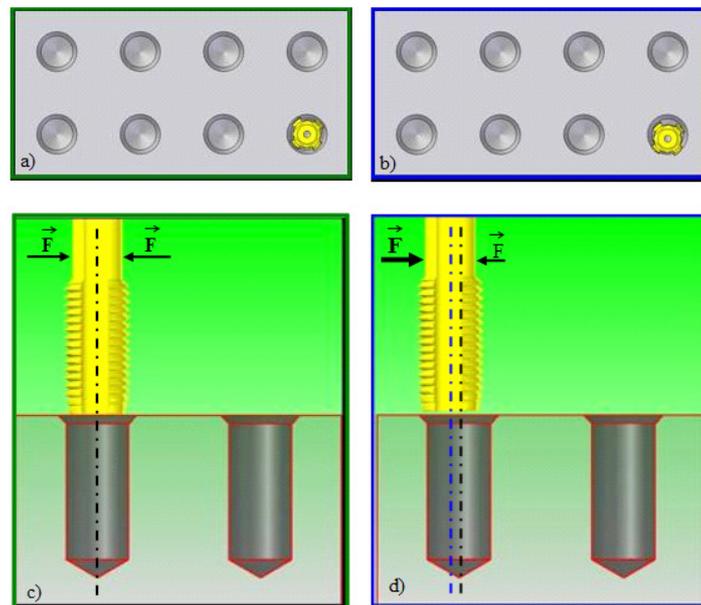


Figura 2. Ferramentas utilizadas nos ensaios de rosqueamento de ferro fundido vermicular; a) broca escalonada; b) macho de corte M13 X 1,5mm.

O monitoramento e a medição dos desgastes das ferramentas de corte (machos de corte) foram realizados por meio de um microscópio metalográfico (Olympus BX51M), acoplado com uma câmara digital que permite ampliação de até 1000 vezes, como também a digitalização da imagem para o computador. Também foi empregada a microscopia eletrônica de varredura para análise das ferramentas (topografia da superfície) a fim de identificar os principais mecanismos de desgaste. O microscópio eletrônico de varredura (MEV) utilizado é da marca Leica, modelo S440i – 1995, de alto vácuo, com EDS (Espectroscopia de Energia Dispersiva) da Oxford.

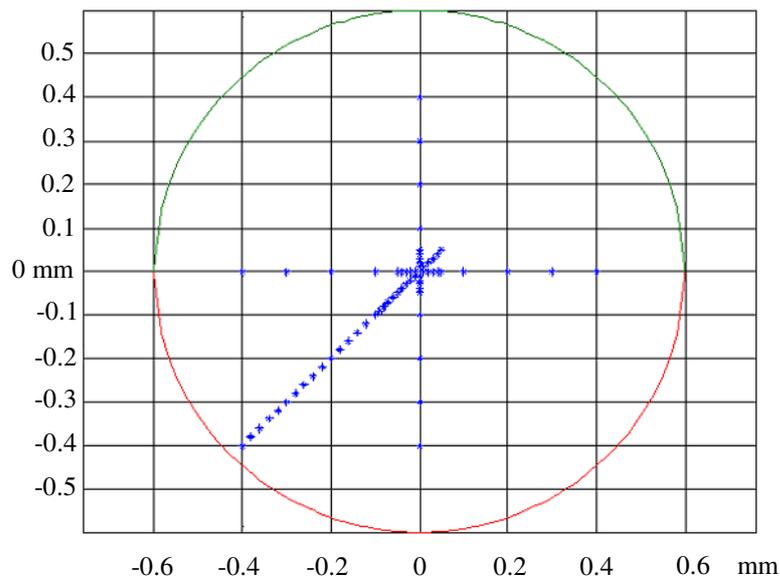
## 2.1 Variação do erro de concentricidade dos machos de corte em relação aos pré-furos

Nesta etapa do trabalho buscou-se relacionar a influência da falta de concentricidade da ferramenta em relação ao pré-furo, com os valores das forças e do torque medidos. A Fig. (3) ilustra de forma esquemática o deslocamento do macho de corte em relação ao pré-furo.



**Figura 3. Esquema ilustrativo da variação da concentricidade do macho de corte em relação ao pré-furo; a) vista superior de um macho concêntrico com o pré-furo; b) vista superior de um macho não concêntrico com o pré-furo; c) vista lateral de um macho com pré-furo concêntrico; d) vista lateral de um macho com pré-furo não concêntrico.**

A Figura (4) ilustra graficamente a posição do centro do macho em relação ao pré-furo, admitindo como referência os eixos X e Y da mesa da máquina-ferramenta. Observa-se que há pontos com valores de desvios de concentricidade iguais (distância do ponto até o centro da circunferência). Esses testes foram feitos porque buscou-se avaliar o efeito do deslocamento nos eixos X e Y (positivo e negativo). Como os valores das forças e do torque foram parecidos, optou-se por realizar somente o deslocamento nas direções de X e Y (negativos).



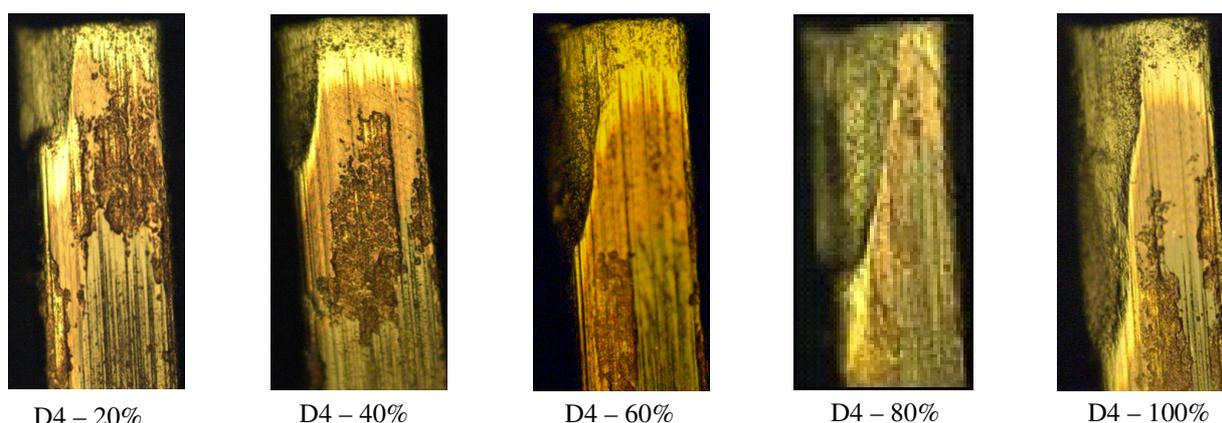
**Figura 4. Esquema ilustrativo da variação da concentricidade nos pré-furos (mm).**

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1. Análise dos Desgastes

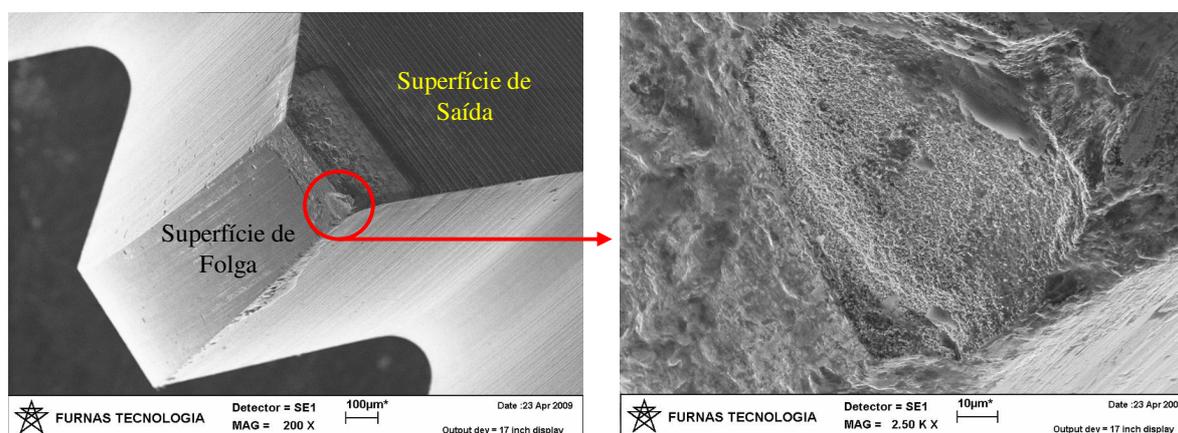
A forma do desgaste foi similar para todos os dentes dos machos de corte analisados, independente da quantidade de roscas fabricadas. Ocorreu aderência de material da peça nas superfícies de folga e também de saída, cobrindo grandes extensões do revestimento e também das áreas já desgastadas. Verificou-se que a adesão ocorreu para todos os machos de corte, independente da quantidade de roscas fabricadas na indústria automobilística (Tupy S.A.).

As análises mostram que ocorreram desgastes tanto na superfície de folga (principal e secundária), como na superfície de saída, principalmente, para os primeiros dentes dos machos de corte. Na superfície de folga o desgaste ocorreu tanto nos dentes cônicos, como nos dentes alisadores. A Fig. (5) mostra as superfícies de folga em dentes alisadores de cinco machos de corte com níveis de desgaste de 20, 40, 60, 80 e 100%, respectivamente. Estes dentes são da carreira 2, onde o desgaste foi maior. Observa-se que houve uma progressão do desgaste em função da quantidade de roscas fabricadas.



**Figura 5. Evolução do desgaste dos dentes alisadores em cinco ferramentas (macho de corte, 2ª carreira).**

Pela dificuldade em focar os dentes cônicos (D1, D2 e D3) em microscópio ótico, optou-se por não apresentá-los neste trabalho. Entretanto, ao analisar em microscópio eletrônico de varredura (MEV), constatou-se que o a literatura prediz, ou seja, o desgaste ocorreu nas superfícies de folga e saída. Os principais mecanismos de desgaste foram a abrasão e a adesão. Ambos os mecanismos iniciaram-se logo nas primeiras roscas usinadas, causando o destacamento do revestimento próximo à aresta de corte. Na Fig. (6) constata-se também que além do desgaste propriamente dito, causado pelos mecanismos de abrasão e adesão, houve uma forma de destacamento de material da ferramenta (delaminação), caracterizando uma espécie de fenda na superfície de saída de um macho de corte com 60% de desgaste (7200 roscas produzidas).



**Figura 6. Vista geral do desgaste nas superfícies de folga e saída do terceiro dente de um macho de corte após usinar 7.200 roscas (60% de desgaste) em ferro fundido vermicular.**

As análises químicas (microanálise feita com a técnica EDS) mostraram que o revestimento foi destacado, pois observou-se a presença de tungstênio (principal componente do substrato de metal duro) e cobalto (elemento ligante), como os principais elementos químicos dentro da cratera (região em destaque da Fig. (6)). Neste caso, a presença do

tungstênio permite afirmar que na aresta de corte o substrato da ferramenta encontra-se sem cobertura, propiciando o aumento do desgaste, já que o revestimento protege a ferramenta, pois o mesmo apresenta uma microdureza superior ao substrato.

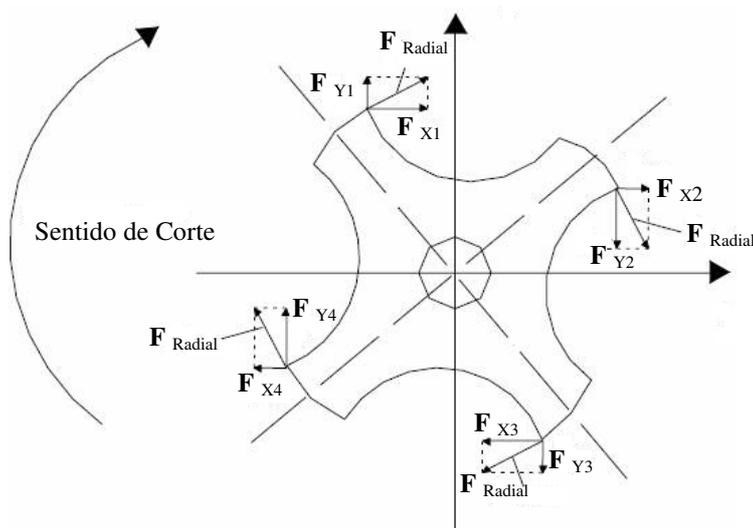
Verificou-se que tanto na superfície de folga, como na superfície de saída, há material aderido (ferro) e pequenas áreas onde aparece o deslocamento do revestimento. Assim, pode-se concluir que os principais mecanismos de desgaste que ocorreram nas ferramentas de metais duros, revestidos com TiAlN, quando usinaram ferro fundido vermicular (CGI 450), foram a adesão (mecanismo de desgaste por aderência e arrastamento), seguida pela abrasão. A presença de sulcos em algumas regiões indica a existência deste mecanismo. Em alguns casos houve a quebra ou ruptura de alguns dentes, causados por lascamentos ou por esforços muito acima dos necessários para a abertura de filetes (roscas) em ferro fundido vermicular. Na maioria dos machos de corte percebeu-se que a aresta de corte ficou destruída, alterando a área de contato ferramenta/peça e consequentemente gerando variações nos sinais de força e torque medidos.

### 3.2. Análises das forças de corte e do torque durante o rosqueamento

As forças de corte e o torque no rosqueamento foram afetadas pelo desgaste das ferramentas de corte e, portanto, podem ser utilizadas como forma de monitoramento e indicar a necessidade de troca ou re-afiação das ferramentas. As forças de corte e o torque no rosqueamento aumentam naturalmente quando a ferramenta trabalha desgastada. Entretanto, o desgaste não é o único fator que determina a oscilação das forças de corte e o torque. Fatores como o diâmetro do pré-furo, tipo de lubrificação, velocidade de corte, avanço, a não concentricidade da rosca em relação ao pré-furo, profundidade rosqueada e usinabilidade do material, podem influenciar diretamente os valores das forças de corte e o torque, dentre outros.

Para as ferramentas de corte utilizadas no processo de rosqueamento interno (machos de corte) com quatro canais, as forças axiais tendem a se anularem. Analisando o exemplo de uma ferramenta, Fig. (7), o resultado da força radial no eixo X ( $F_x$ ), medido pelo dinamômetro em um instante “t” qualquer, será igual à Eq. (1). Desta forma, para o caso particular do presente trabalho em que as ferramentas possuem quatro canais simetricamente distribuídos, a tendência é que a força resultante medida ( $F_x$ ) seja nula, o que justifica os resultados encontrados para esta variável.

Dessa forma, as forças radiais ( $F_x$  e  $F_y$ ) para o rosqueamento com um macho de corte com quatro canais, sem batimentos e alinhado com o pré-furo tiveram variação periódica e não foram muito úteis nas análises dos efeitos das variáveis, pois as forças médias possuem valores próximos de zero. Durante a usinagem com machos de corte com quatro canais, houve uma sobreposição das forças, pois as forças na direção X positivas se somam com as forças X negativas, de forma que quase se anularam. As forças axiais ( $F_z$ ) tiveram valores (sinal bruto) muito parecidos. Ou seja, os valores das forças praticamente são iguais quando comparados entre uma ferramenta nova e uma em fim de vida. Em ensaios a serem publicados posteriormente, percebeu-se que a força axial ( $F_z$ ) teve influência relacionada com a variação do avanço (deslocamento do macho de corte programado na máquina CNC e o passo do macho de corte). Quanto maior a diferença entre o valor programado e o passo da ferramenta de corte, maior foi a força axial.



**Figura 7. Esquema mostrando as direções e sentidos da força radial e de suas componentes  $F_x$  e  $F_y$ , nas arestas de corte de um macho de corte com quatro canais (REIS, 2004).**

$$F_x = F_{x1} + F_{x2} - F_{x3} - F_{x4} \quad (1)$$

A Figura (8) mostra o sinal do torque em função do nível de desgaste de seis ferramentas que usinaram com velocidade de corte de 50 m/min. O corte da rosca foi em um pré-furo sem saída (furo cego). Pode-se observar que a houve uma diferença entre o torque medido entre uma ferramenta nova e as demais ferramentas com desgaste.

Percebeu-se que o comportamento do sinal do torque das ferramentas que usinaram mais roscas difere do comportamento dos sinais para as ferramentas em início de vida. Para o macho novo, observa-se que ao atingir o torque máximo na região do corte, o valor do mesmo ficou praticamente constante. Entretanto, para os outros machos de corte (20, 40, 60, 80 e 100% de desgaste), há um aumento gradativo do sinal do torque. Acredita-se que o atrito entre os dentes da região cônica, somados com o atrito provocado pelos dentes alisadores com desgaste, foram os responsáveis pelo aumento do torque. Neste caso, quanto maior for o desgaste nas superfícies de folga e saída dos machos de corte, maior será a quantidade de dentes (cônicos e alisadores) que estarão contribuindo com o aumento do torque. Assim, à medida que o desgaste avançou na região cônica, os dentes alisadores passaram a cortar mais material. Por isso, o sinal do torque foi maior para as ferramentas com o volume maior de roscas fabricadas.

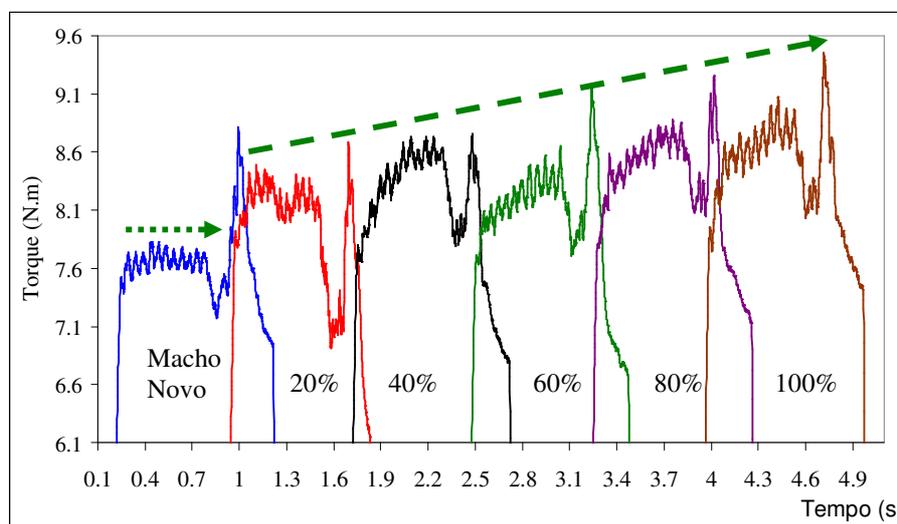


Figura 8. Evolução do torque para as roscas avaliadas na região do corte durante a usinagem.

### 3.3. Variação do erro de concentricidade dos machos em relação ao pré-furo

Ao deslocar o centro do macho de corte em relação ao pré-furo (rosqueamento sem concentricidade), os resultados permitiram fazer algumas análises que geralmente não são feitas propositadas nas indústrias. A Fig. (9) permite estimar a ordem de grandeza das forças de corte na direção X em função do desvio de concentricidade. Para as condições normais de rosqueamento (furo concêntrico), com macho de metal duro (M13 X 1,5 mm) em ferro fundido vermicular, com 50 m/min de velocidade de corte, utilizando fluido de corte em forma de jorro, as forças medidas ficaram em torno de 80 N (pico a pico). Para o rosqueamento com erro de concentricidade observou-se que houve grandes variações das forças na direção X (pico a pico).

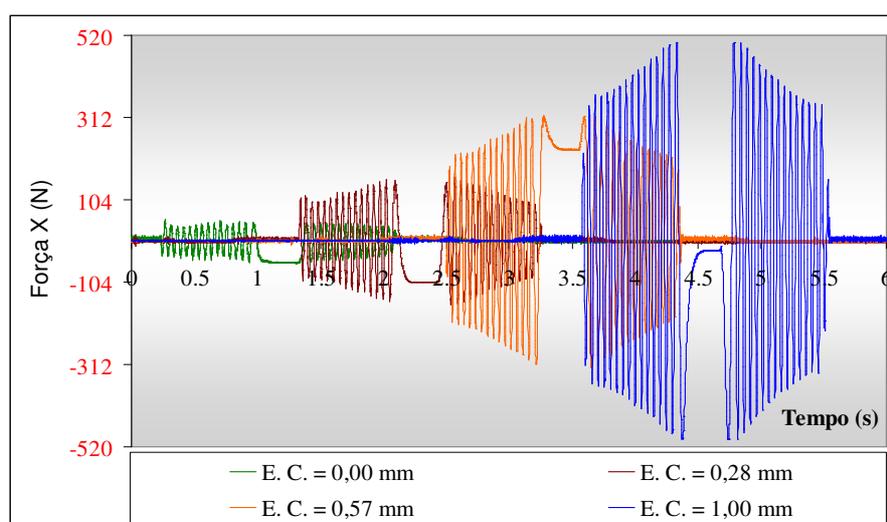
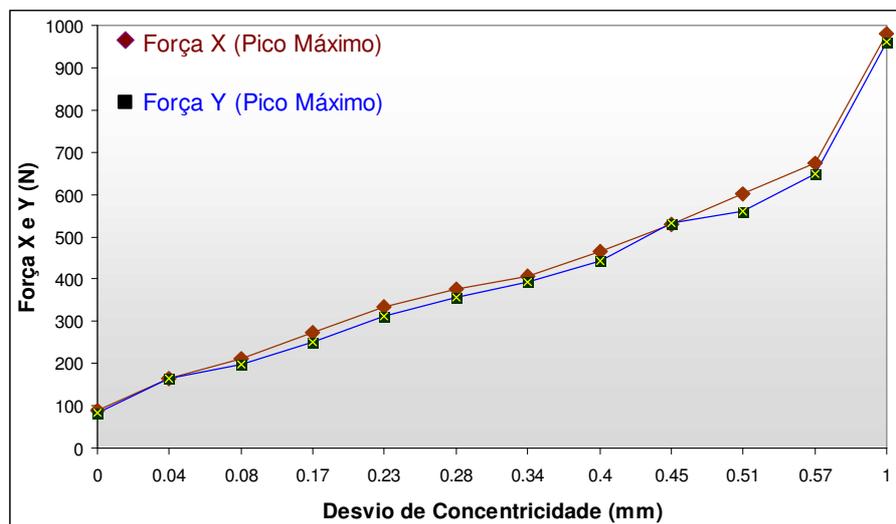


Figura 9. Variação da força X durante a usinagem em função do deslocamento do macho de corte (40% de desgaste) em relação aos pré-furos para diferentes desvios de concentricidade ( $V_c = 50$  m/min)

Todavia, quando deslocou-se o centro do macho de corte em relação ao pré-furo em 0,01 mm na direção X positivo (coordenada do programa CNC), verificou-se que houve um aumento de aproximadamente vinte e cinco por cento

(25%) da força X (a força aumentou para aproximadamente 100 N – pico a pico). Esse valor foi alterado novamente quando a variação da concentricidade do centro do macho de corte foi desviada para 0,28 mm em relação ao centro do pré-furo. Neste caso, a força mediu aproximadamente 320 N (pico a pico), equivalente a quatrocentos por cento (400%) em relação às roscas denominadas como normais (concêntricas). Os demais testes comprovaram que a variação da concentricidade alterou os valores das forças, proporcional à taxa de deslocamento. Para as coordenadas em que o valor do centro do macho foi deslocado para 0,57 e 1,00 mm, respectivamente, as forças X foram de 630 e 990 N (pico a pico, respectivamente). Esses valores representam 787,5% e 1237,5% simultaneamente em relação à rosca alinhada com o pré-furo. De forma semelhante, as forças radiais na direção Y, com a ferramenta desalinhada em relação ao centro dos pré-furos, também sofreram variações significativas, conforme pode-se constatar através da Fig. (10), onde fez-se a comparação entre as forças radiais  $F_x$  e  $F_y$ .



**Figura 10. Influência do desvio de concentricidade nas forças radiais ( $F_x$  e  $F_y$ ) para vários pontos adquiridos com um macho de corte com 40% de desgaste**

Enquanto as forças nas direções X e Y aumentaram com o acréscimo do desalinhamento dos pré-furos, quase que linearmente, com uma taxa bastante acentuada, as forças na direção Z e o torque pouco alteraram, principalmente para os desalinhamentos inferiores a 0,57 mm. Ao usar com macho de corte desalinhado com relação ao pré-furo, as maiores forças são nas direções X e Y, forçando a ferramenta a executar uma rosca concêntrica. Para os desalinhamentos de 0,28 e 0,57 mm, a área usinada ficou menor, devido ao afastamento do centro da ferramenta em relação ao centro do pré-furo e conseqüentemente a força na direção Z não sofreu grandes alterações, pelo fato do desalinhamento não ter sido tão intenso. Quando o desalinhamento foi maior (1,00 mm), as forças na direção Z aumentaram devido ao atrito na superfície de folga secundária da ferramenta de corte. O desalinhamento provocou um aumento da seção de corte num lado da ferramenta e um decréscimo do lado oposto. Visualmente não foi possível verificar a qualidade das roscas. Seria necessário utilizar um calibrador de roscas, do tipo passa-não-passa para a calibração das roscas.

#### 4. CONCLUSÕES

Os resultados desse trabalho permitem concluir que:

A forma do desgaste é similar para todos os dentes dos machos de corte analisados, independente da quantidade de roscas fabricadas. Ocorreu aderência de material da peça nas superfícies de folga e também de saída, cobrindo grandes extensões do revestimento e também das áreas já desgastadas. Verificou-se que a adesão ocorreu para todos os machos de corte, inclusive para as ferramentas que foram utilizadas em laboratório (novas). A adesão iniciou-se logo nas primeiras roscas usinadas, proporcionando o destacamento do revestimento e posteriormente parte do substrato próximo à aresta de corte. As análises químicas sugerem os mecanismos de desgaste abrasivo e adesivo. Em alguns casos houve a quebra ou ruptura de alguns dentes.

As forças de corte ( $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ ) não apresentaram variações significativas em função do nível de desgaste das ferramentas utilizadas nesta pesquisa. Entretanto, a usinagem de roscas com o centro do macho de corte desalinhado em relação ao pré-furo provocou o aumento das forças radiais, proporcionais à distância do deslocamento da ferramenta em relação ao pré-furo. As forças radiais para machos com quatro canais não contribuíram para o entendimento do processo, visto que há uma sobreposição das forças. O torque medido para ferramentas em estado novo e com desgaste teve diferentes formas e valores, comprovando que é possível monitorar o desgaste dos machos de corte em função do torque avaliado.

## 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro do CNPq, CAPES e FAPEMIG, sem os quais não seria possível a realização deste trabalho, ao IFM – Instituto Fábrica do Milênio, ao IFG (Instituto Federal de Goiás), em especial ao NUPEF (Núcleo de Pesquisa em Fabricação do IFG), a empresa Fundições Tupy e ao Laboratório de Mecânica das Rochas de FURNAS Centrais Elétricas S.A., pelo apoio durante as análises com MEV.

## 6. REFERÊNCIAS

- Agapiou, J.S., 1994, “Evaluation of the Effect of High Speed Machining on Tapping”, Journal of Engineering for Industry – Transactions of the ASME, v. 116, n.4, pp. 457-462.
- Bagetti, J. H. 2009. Análise da Usinabilidade, Deformação e Temperatura no Fresamento dos Ferros Fundidos Vermicular e Cinzento. 136 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Santa Catarina – Florianópolis.
- Bezerra, A. A., 2003, “Estudo do Desgaste no Roscamento com Alta Velocidade em Ferro Fundido”, Tese de Doutorado - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- Bezerra, A. A., Coelho, R.T. e Da Silva, L.R., 2000, “Monitoração dos Processos de Roscamento: Revisão da Literatura”, Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - CONEM. Natal, Rio Grande do Norte, Brasil. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Associação Brasileira de Ciências Mecânicas – Abcm, 10p.
- Da Mota, P. R., 2006, “Investigação do Comportamento de Ferramentas de Aço-Rápido no Processo de Rosqueamento Interno em Alta Velocidade de Corte”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia.
- Da Mota, P. R., 2009, “Estudo do Processo de Rosqueamento com Macho de Corte de Metal Duro em Ferro Fundido Vermicular”, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia.
- De Andrade, C. L. L., 2005, “Análise da Furação do ferro Fundido Vermicular com Brocas de Metal-Duro com Canais Retos com TiN e TiAlN”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC.
- Doré, C., 2007, “Influência da Variação da Nodularidade na Usinabilidade do Ferro Fundido Vermicular Classe 450”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina-Sc.
- Duarte, M. A. V., Meola, T., Reis, A. M., Da Silva, M. B. 2003. Monitoramento do Desgaste das Ferramentas Durante o Processo de Rosqueamento com Machos Máquina via Medições de Vibrações. Anais do II COBEF. Uberlândia,
- Fantin, J.P. 1992. Ensaio com Machos: em Busca de Bons Resultados na Usinagem. Revista Máquinas e Metais. n. 320, p. 58–60, set.
- Heck, M., Ortner, H. M., Flege, S., Reuter, U. e Ensigner, W., 2007, “Analytical Investigations Concerning the Wear Behaviour of Cutting Tools Used for the Machining of Compacted Graphite Iron and Grey Cast Iron”, International Journal of Refractory Metals and Hard Materials.
- Machado, A. R.; Abrão, A. M.; Coelho, R. T.; Da Silva, M. B. 2009. Teoria da Usinagem dos Metais. 1. ed. São Paulo: Blucher, 71 p.
- Mocellin, F., 2002, “Estudo da Usinabilidade do Ferro Fundido Vermicular em Ensaio de Furação”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina-SC.
- Müller, P.; Soto, M. 1999. Usinagem sem Refrigeração de Furos e Roscas. 4º Seminário Internacional de Alta Velocidade (CD). Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara d’Oeste, São Paulo, Brasil. p. 126-133.
- Reis, A. M., 2004, “Avaliação do Desempenho de Diferentes Materiais de Ferramenta no Processo de Rosqueamento Interno de Ferro Fundido Cinzento, através do Monitoramento do Desgaste”, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia.
- Sha, J.; Ni, J.; Wu, S.M. 1990. Development of a Tap Wear Monitoring Scheme. Proceedings of Manufacturing International 90. Part 4: Advances in Materials and Automation. Atlanta, GA, USA, Proceedings. New York, NY, USA, American Society of Mechanical Engineers (ASME), p.137-142.
- Wilcox, S. J., Reuben, R. L. e Souquet, P., 1997, “The use of Cutting Force and Acoustic Emission Signals for the Monitoring of Tool Insert Geometry During Rough Face Milling”, International Journal of Machine Tools Manufacture Design, Research and Application, v.37, n.4, p. 481-494.
- Xavier, F. A., 2003, “Aspectos Tecnológicos do Torneamento do Ferro Fundido Vermicular com Ferramentas de Metal-Duro, Cerâmica e CBN”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina-SC.
- Xavier, F. A. 2009. Estudo dos Mecanismos de Desgaste em Ferramentas de Nitreto de Silício Aplicadas Na Usinagem Dos Ferros Fundidos Vermicular e Cinzento. 267p. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

## 7. DIREITOS AUTORAIS

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

## INVESTIGATION OF FORCES AND TORQUE IN TAPPING OPERATION OF COMPACTED GRAPHITE IRO USING CEMENTED CARBIDE TOOLS

Paulo Rosa da Mota, prm@ifg.edu.br<sup>1</sup>  
José Luiz Oliveira Pena, jllop@ifg.edu.br<sup>1</sup>  
Alexandre Martins Reis, amreis@ufv.br<sup>2</sup>  
Márcio Bacci da Silva, mbacci@mecanica.ufu.br<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Federal Institution of Education, Science and Technology of Goiás, Rua 75, N° 46, Centro, 74055110, Goiânia/Go, Brazil

<sup>2</sup>Federal University of Viçosa, Campus Universitário UFV, 36570000, Viçosa/MG, Brazil

<sup>3</sup>Federal University of Uberlandia, Bloco 1M, Campus Santa Mônica, 3840089, Uberlândia M/G, Brazil

**Abstract:** *The use of compacted graphite iron - CGI is growing in the automobile industry, replacing several components that normally are manufactured in grey cast iron. However, due to its poor machinability when compared to grey cast iron, the production cost sometimes is not competitive. Several research about machinability of CGI has already been developed, mainly in turning, milling and drilling operations. Little has been done with regards to tapping process, which is a more complex operation. The main objective of this work is the investigation of forces and torque of cemented carbide taps when cutting CGI 450 – ASTM. It is used M13x1,5 taps with four straight flutes, TiAlN coated. Tool wear was measured and experiments were carried out to obtain cutting forces and torque. The results shown that the cutting forces and torque depend on the cutting parameters. Analyses in the scanning electron microscope and optical microscope to determine the wear mechanisms suggest that the main wear mechanisms are adhesion and abrasion. Experiments were also carried out to study the effect of some important aspects of the process like concentricity, feed rate, thread length and tool defects.*

**Palavras-chave:** *Tapping, compacted graphite iron , Wear, Torque.*

### 8. RESPONSIBILITY NOTICE

The author(s) is (are) the only responsible for the printed material included in this paper.