

CONTRIBUIÇÃO AO PROCESSO DE FURAÇÃO COM BROCAS DE METAL DURO REVESTIDAS

Gilberto W. A. Miranda

Universidade de Taubaté / UNITAU; Professor do Depto. de Engenharia Mecânica
gilware@iconet.com.br –Taubaté, SP, Brasil

Nivaldo L. Coppini,

Universidade Estadual de Campinas / UNICAMP; Professor Doutor do Depto. de Engenharia de Fabricação, coppini@fem.unicamp.br

Durval U. Braga

Fundação de Ensino Superior de São João del Rei (IFE) / FUNREI; Professor do Depto. de Mecânica, durval@fem.unicamp.br - São João del Rei MG, Brasil.

Anselmo E. Diniz

Universidade Estadual de Campinas / UNICAMP; Professor Doutor do Depto. de Engenharia de Fabricação, anselmo@fem.unicamp.br

Resumo. Na atualidade, a usinagem sem fluido de corte constitui um dos tópicos mais debatidos da indústria metal-mecânica. O elevado custo da refrigeração/lubrificação da ordem de 7 – 17% do custo total de fabricação de peças, problemas ecológicos ligados ao ambiente de trabalho e eliminação de resíduos, bem como a saúde do ser humano tem estimulado a realização de pesquisas visando a eliminação/restricção do uso de refrigerantes/lubrificantes. O processo de furação é um dos mais utilizados na usinagem, mas a evolução da geometria, material e revestimento das brocas sólidas teve o seu desenvolvimento acelerado somente nos últimos anos permitindo aumento considerável da velocidade de corte e conseqüentemente da produtividade. As pesquisas deste processo nos nossos dias estão focadas na procura de novas condições de corte e situações específicas para realização de usinagem sem fluido de corte, tendo-se conseguido um considerável aumento de vida da ferramenta através da modificação da geometria e adição de revestimentos. O trabalho apresentado relata o resultado de experiências de furação sem fluido de corte em aço ligado ABNT 4340, com broca inteiriça de metal duro de 10 mm de diâmetro, revestimento de TiNAl, e geometria especial. Diversas velocidades de corte foram utilizadas, mantendo-se o mesmo avanço, visando explorar os limites do processo. Durante a usinagem foram efetuadas medições da força de avanço e momento torsor através de dinamômetro piezoelétrico, assim como verificada a rugosidade (Ra) e realizado o controle dimensional dos diâmetros/circularidade dos furos através de equipamento eletrônico programável de coluna usando sensor LVDT.

Palavras-chave: Usinagem, Furação sem fluido de corte, Aço ABNT 4340, Otimização.

1. INTRODUÇÃO

Diversos trabalhos publicados nos últimos anos tem chamado a atenção a respeito da necessidade de restringir, na medida do possível, o uso dos fluídos refrigerantes/lubrificantes em razão do alto custo operacional, problemas ambientais, danos à saúde humana e exigências legais a respeito (Heisel et al, 1998; Kalhofer, 1997; Klocke et al, 1997).

Centros de pesquisa têm tido seus trabalhos voltados para procurar diminuir o uso destes fluídos, neste sentido para muitos casos específicos a utilização da mínima lubrificação por névoa é uma solução que pode ser implementada industrialmente como é o caso do processo de furação das ligas de alumínio-silício (Braga et al, 1999).

A utilização da usinagem sem fluído de corte, tem sido possível, em função do desenvolvimento de máquinas ferramentas com maior potência, rigidez maior, rotações mais elevadas e principalmente pelo grande desenvolvimento dos materiais, revestimentos, e geometria das ferramentas de corte, inclusive brocas.

A função principal dos fluídos refrigerantes/lubrificantes é reduzir a geração de calor pela redução do atrito, eliminar a influência do aumento da temperatura na estrutura do material e transportar / remover os cavacos gerados durante o processo. Na usinagem sem fluído de corte o atrito e adesão entre ferramenta e peça aumenta, sendo submetidos a uma grande carga térmica que propicia o desgaste da ferramenta, formação de crateras e cavacos alongados que trazem problemas especialmente em processos de furação, dificuldades minimizadas hoje com a utilização de ferramentas revestidas e com geometria modificada. (Klocke et al, 1997)

O objetivo deste trabalho é explorar os limites de utilização de brocas inteiriças de metal duro, visando analisar as condições econômicas e de produtividade destas condições limites.

2. METODOLOGIA DE OTIMIZAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE USINAGEM

Em trabalhos sobre otimização das condições de usinagem desenvolvidos por pesquisadores da UNICAMP, Pallerosi *et al.* (1991) e Coppini *et al.* (1988), foi utilizada metodologia par determinação dos valores (x) e (K) da equação de Taylor. Tal metodologia já comprovada experimentalmente em laboratório e em ambiente fabril calcula a partir de dados colhidos durante a evolução do processo os valores de:

$$x = 1 + \frac{\log\left[\frac{Z_t}{Z_{t+1}}\right]}{\log\left[\frac{V_{C_{i+1}}}{V_C}\right]} \quad (1)$$

$$K = Z_t \cdot t_{ci} \cdot (V_{C_i})^x \quad (2)$$

Onde: (x), (K) são os coeficientes da equação de Taylor;
(Z_t) é o número de furos usinados por vida da ferramenta (broca);
(V_c) é a velocidade de corte mantida constante (m/min);
(t_c) é o tempo de corte (min);
(i) é a condição inicial de corte adotada no início da aplicação do método.

Com os valores de (x) e (K) é possível calcular as velocidades de referência para as condições econômicas de corte, a saber:

$$V_{\text{mfp}} = \sqrt[x]{\frac{K}{(x-1)t_{\text{ft}}}} \quad (3)$$

$$V_0 = \sqrt[x]{\frac{K(S_h + S_m)}{60(x-1) + \left[K_{\text{ft}} \frac{(S_h + S_m)}{60} \right] t_{\text{ft}}}} \quad (4)$$

Onde: (x), (K) são os coeficientes da equação de Taylor;
 (S_h) custo horário da mão de obra(R\$)
 (S_m) custo horário da máquina(R\$)
 (K_{ft}) custo da ferramenta (R\$)
 (t_{ft}) tempo de troca da ferramenta (minutos)

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 Materiais

Peça. O material utilizado nos corpos de prova de furação foi o aço-liga ABNT 4340. Os furos foram feitos em dois tipos de corpos de prova. O primeiro tipo foi uma placa, com dimensões 310 x 430 x 32 mm, que recebeu a maioria dos furos. Depois de se realizar vários furos nesta placa (em média 16 furos) era feito um furo no segundo tipo de corpo de prova, de dimensões menores (41x41x32 mm) preso ao dinamômetro, onde era medida indiretamente a potência de corte e diretamente o momento torsor, força de avanço, diâmetro e rugosidade do furo.

Ferramenta. A ferramenta utilizada foi a broca inteiriça de metal duro P 40 de 10 mm de diâmetro, tipo ALPHA 2 versão direita, com revestimento TINAL (modelo A3265 TFL - Titek), conforme Norma DIN 6537K para a broca e DIN 6535HA para a haste. Os furos realizados tinham profundidade de 32 (mm).

3.2 Equipamentos e instrumentos

Os ensaios de furação foram realizados em um centro de usinagem vertical CNC modelo SV-40 (MORI-SEIKI), comando Fanuc, com variação contínua na rotação da árvore, podendo atingir um máximo de 12.000 rpm, extrema rigidez, potência do motor principal de 22 Kw (30hp) e três eixos acionados por servo-motores independentes.

As medições dos desgastes na superfície de folga da broca, assim como as fotos, foram obtidas em um analisador de imagem (Global Image Analyser) e software (Global Lab). O mesmo é constituído de um microscópio ótico com ampliação de 25 e 50 vezes, acoplado a uma câmara de vídeo e a um computador compatível.

As medidas de rugosidade das superfícies usinadas foram obtidas com rugosímetro portátil Mitutoyo SurfTest-211. O momento torsor (M_t) como a força de avanço (F_f) da broca foram obtidos durante a usinagem dos furos no corpo de prova fixo a um dinamômetro KISTLER, tipo 9272, acompanhado de software específico para este tipo de utilização. Assim sendo, pôde-se monitorar tais esforços em tempo real a uma taxa de amostragem de 2,56 KHz, durante 0,6 segundos em cada amostragem.

A potência de corte foi obtida indiretamente pelo monitoramento da corrente e tensão elétrica realizado através de um equipamento eletrônico projetado e construído pelo Departamento de Engenharia de Fabricação da UNICAMP. Utilizando-se uma placa de

conversão A/D, modelo Lab-PC+ e os softwares NI-DAQ (versão 4.8) e LABVIEW (versão 3.11), da National Instrument, o sinal resultante da tensão deste equipamento foi adquirido a uma taxa de amostragem de 50 Hz durante três segundos.

Um equipamento eletrônico e programável de medição (tipo coluna), para inspeção manual de uso em ambientes industriais, foi utilizado para a medição dos diâmetros dos furos. O mesmo possui as seguintes características: Coluna tipo E4N programável (MARPOSS), com resolução de 0,1 (μm) e Ogiva projetada para medir diâmetro do furo igual a 10 mm. Para a confiabilidade de medição dos diâmetros utilizou-se, para calibração do mesmo, um anel padrão (TESA) $\phi 10,000$ mm de diâmetro.

3.3 Tempo de troca da ferramenta

O tempo de troca da ferramenta (t_{ft}) no valor de 1,5 minutos foi obtido pela média aritmética de 3 operações cronometradas realizadas por operadores diferentes no Laboratório de usinagem da UNICAMP, este tempo inclui a retirada do porta-ferramenta e ferramenta usada, colocação da nova ferramenta com a regulagem do comprimento necessário da broca e finalmente a colocação do porta-ferramenta na máquina.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Ensaio preliminares.

O ponto de partida foi o catálogo do fabricante da ferramenta que recomenda como parâmetros de usinagem para o material escolhido: $V_c = 70$ m/min e $f = 0,18$ mm/volta (2230 rpm, $V_f = 401$ mm/min), para usinagem com lubrificação normal. No ensaio realizado sem fluido de corte após 153 furos de 32 mm de profundidade (4.896 mm), verificou-se não existir nenhum desgaste na broca (arestas de corte). A seguir foi aumentada a velocidade de corte para 140 m/min e mantido o avanço $f = 0,18$ mm/volta (4456 rpm, $V_f = 802$ mm/min), utilizando-se ainda a mesma broca foram realizados mais 612 furos de 32 mm de profundidade (19.584 mm) com os mesmos parâmetros. No fim do ensaio notou-se um ligeiro desgaste e arredondamento nas pontas das arestas de corte mas nenhum lascamento.

Usando-se brocas novas foram realizados ensaios sem fluido de corte com as velocidades de: 280 m/min e 210 m/min mantendo-se o avanço de 0,18 mm/volta. Em ambos ensaios a ferramenta não resistiu e após alguns furos quebrou-se.

Com a velocidade de 175 m/min e mantendo-se sempre o mesmo avanço $f = 0,18$ mm/volta (5570 rpm, $V_f = 1003$ mm/min) foi realizado ensaio sem fluido de corte e usinados 211 furos de 32 mm de profundidade (6.752 mm), até a quebra da ferramenta. Posteriormente utilizando-se a velocidade de 155 m/min, $f = 0,18$ mm/volta (4934 rpm, $V_f = 888$ mm/min) foram usinados 679 furos de 32 mm de profundidade (21.638 mm).

4.2 Determinação das velocidades de referência

Com os dados obtidos nos ensaios sem fluido de corte, efetuados com as velocidades de 175 m/min (211 furos) e 155 m/min (678 furos) foi calculada a $V_{mxp} = 163$ m/min (418 furos) através das " Eq. (1), (2) e (3)" e uso de um t_{ft} de 1,5 minutos. A V_{mxp} ficou situada dentro do intervalo das velocidades consideradas, não sendo necessária a realização de ensaios complementares de acordo com a metodologia de otimização utilizada e citada anteriormente. A velocidade de mínimo custo V_0 foi calculada através do uso das " Eq. (1), (2) e (4)" e uso dos valores R\$ 57 para ($S_n + S_m$), R\$ 146 para K_{ft} obtendo-se o resultado de $V_0 = 105$ m/min.

Como o objetivo deste trabalho é explorar as condições econômicas e de produtividade limites da furação em análise, será adotada a $V_{mxp} = 163$ m/min, pois esta, além de ser a referência de maior produtividade, está contida no intervalo de validade de x e K determinados na prática. Durante a usinagem com velocidades iguais ou maiores que 155 m/min, foi observado um aquecimento exagerado tanto da broca (aquecida ao rubro), quanto do furo ("queima" do material). Apesar destas condições não serem desejáveis, na prática as brocas mostraram excelente desempenho e vida relativamente adequadas, considerando-se que tais condições foram extremamente forçadas na busca dos limites das mesmas. Ensaios com velocidades menores que 155 m/min, exigiriam grande volume de material, inviabilizando a pesquisa em laboratório. A metodologia ficaria melhor empregada em ambiente fabril, com a determinação de x e K de Taylor diretamente na produção de furos.

4.3 Ensaios realizados na V_{mxp} .

Na velocidade de máxima produção foram realizados 13 ensaios cujos resultados são mostrados na "Fig. 1".

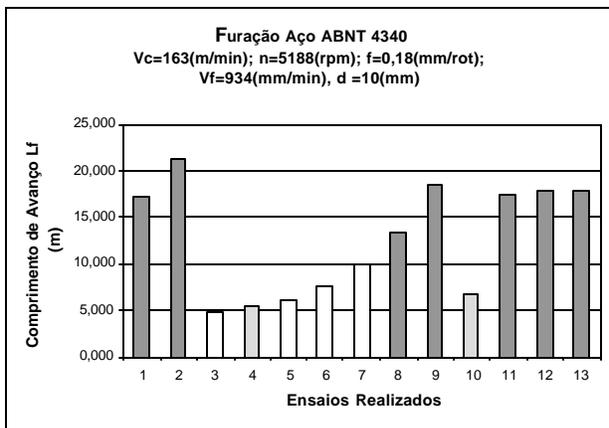


Figura 1 - Ensaios realizados na V_{mxp} e comprimento de avanço obtido

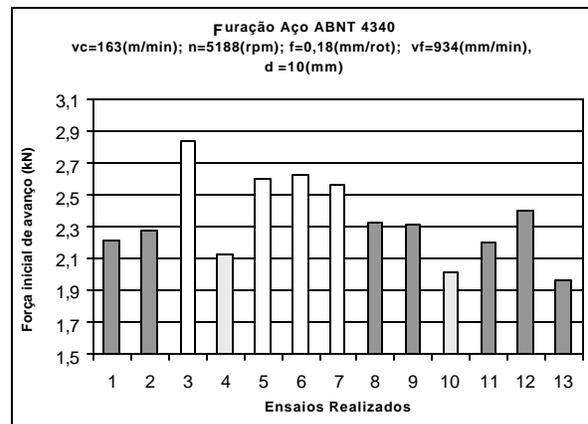


Figura 2 - Força inicial de avanço nos ensaios realizados com a V_{mxp}

Medidas da força de avanço. Nos ensaios realizados foi observada a existência de dois grupos de brocas, "Fig. 2". O primeiro formado por brocas com uma força de avanço inicial média da ordem de 2,70 kN e ~222 furos (ensaios 3,5,6, e 7) e um segundo grupo com uma força inicial média de 2,24 (kN) e ~550 furos (ensaios 1,2,8,9,11,12 e 13). Os ensaios 4 e 10 foram descartados da análise pelas seguintes razões: O ensaio 4 foi prejudicado por um erro humano o que levou à quebra da broca. O ensaio 10 por um comportamento completamente anormal e inesperado da broca que quebrou praticamente sem desgaste.

Como pode ser visto na amostragem de resultados apresentados na "Fig. 3", a força de avanço mostrou ser um bom parâmetro para a determinação do fim da vida da ferramenta, pois acompanha bem o aumento dos desgastes, tendo um crescimento estável comparado a potência de corte e ao momento torsor. Além disso, o método de otimização aqui empregado exige um mínimo de repetibilidade em termos de vida da ferramenta. Assim, os dois grupos de resultados encontrados, com as vidas das brocas bem diferenciadas, obrigou a busca dos motivos de tal ocorrência. Esta é uma vantagem adicional do método, pois o mesmo evidencia a necessidade de otimizar o processo, verificando-se a fonte da não estabilidade da vida da ferramenta, que pode estar associado ao material da peça, à ferramenta, aos parâmetros relativos ao processo, etc..

Momento torsor. A posição dos furos no corpo de prova utilizado para o monitoramento do momento torsor introduziu um erro sistemático na medição, trazendo como consequência uma maior dispersão das medidas. Não foram verificadas grandes diferenças nos valores encontrados. Notou-se uma tendência de crescimento similar à potência de corte “Fig.4”.

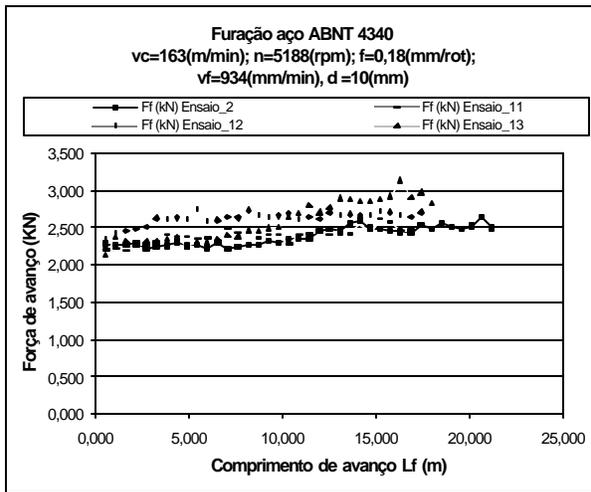


Figura 3 - Evolução da força de avanço em função do comprimento de avanço

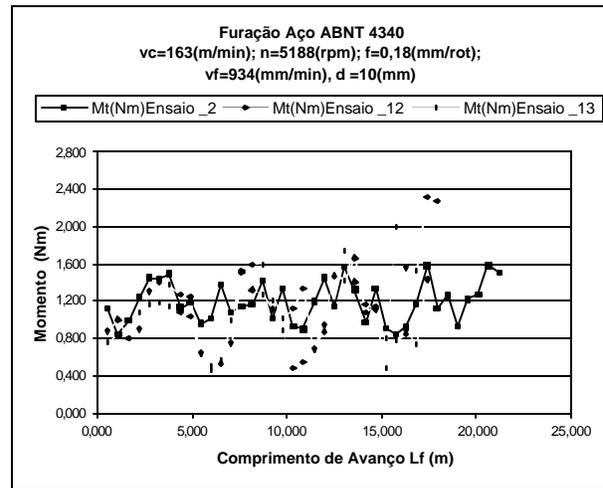


Figura 4 - Variação do momento torsor em função do comprimento de avanço

Potência de corte. Ficou evidenciado através de diversas fotos realizadas durante e em todos os ensaios, que o aumento da potência está diretamente ligado ao desgaste de flanco das arestas de corte da ferramenta (V_B). “Fig. 5” e “Fig. 6”

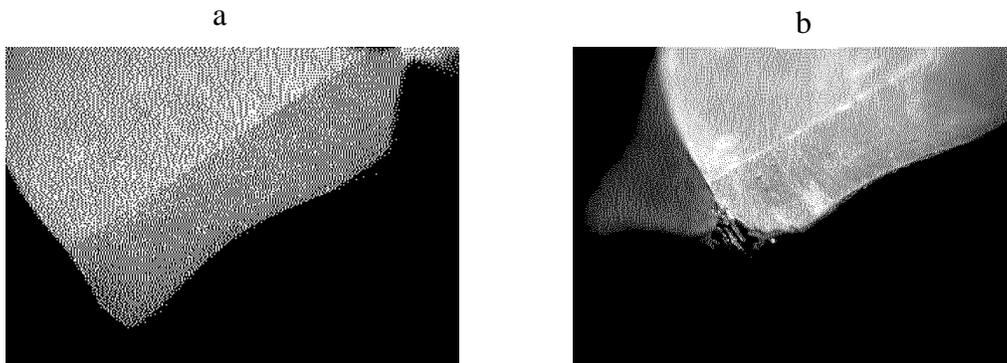


Figura 5 -a) aresta de corte na ferramenta nova e b) desgaste típico após 645 furos no ensaio 2

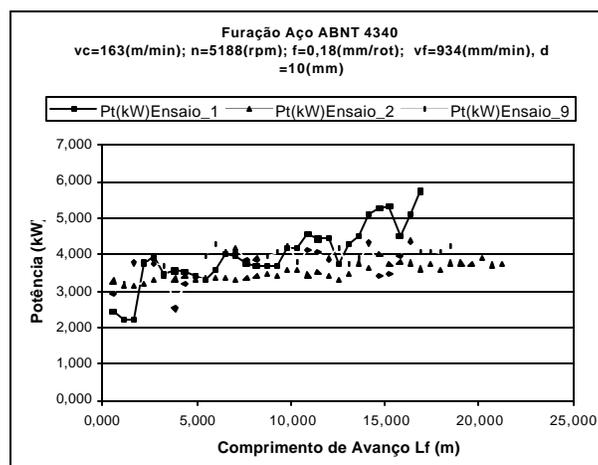


Figura 6 - Evolução da potência em relação ao comprimento de avanço

Rugosidade média (Ra). A rugosidade foi verificada através da média de três valores defasados de 90°. Tais medidas, para cada furo no corpo de prova, foram realizadas próximas do comprimento médio do furo. Os valores médios da rugosidade obtida se encontram na média de 1,45 µm, com uma faixa de variação de 0,50 µm até 3.0 µm. Tal qualidade de furo é típica de desbaste. Observa-se, entretanto, que mesmo nas condições de aquecimento ao rubro da broca e queima do material, estas condições não são descartáveis e eventualmente podem atender certas exigências de produção.

Diâmetros dos furos. Os diâmetros dos furos foram verificados na parte inicial e final dos mesmos, apresentando variações dentro da tolerância IT-10 e IT-11 da norma ISO, o que se encontra dentro das expectativas para este tipo de usinagem. O resultado das verificações realizadas mostra que o material teve uma contração após o processo de furação, isto devido a dilatação do material em função do aumento da temperatura provocado pela operação sem fluido de corte.

4.4 Análises de produtividade

Supondo x e K válidos para as velocidades de: 70 m/min. e vida (T) de 40.000 mm correspondentes a ~1250 furos de 32 mm de comprimento (fabricante da ferramenta) e 163 m/min (V_{mxp}) com vida média de 17.609 mm correspondentes a ~550 furos (ensaios realizados). É feita a seguir uma análise de tempos de usinagem para os dois enfoques. Para tanto, utiliza-se o modelo de tempos exclusivos de usinagem equação 5 (Ferraresi, D.,1977)

$$t_t = t_c + t_i + \left(\frac{t_c}{T} - \frac{1}{Z} \right) t_{ft} \quad (5)$$

Tabela 1 - Tempos, e produção horária para os dois enfoques

Item	Convencional	Metodologia Proposta
Tempo de corte t_c (min)	0,0798	0,0343
Tempos improdutivos t_i (min)	0,0200	0,0200
Tempo de troca ferramenta t_{ft} (min)	1,5	1,5
Vida da ferramenta T (min)	99,75	18,84
Número de furos envolvidos Z	20.000	20.000
Tempo de fabricação/peça t_t (min)	0,1010	0,0569
Produção horária Ph (furos/h)	594	1054

A “tabela 1” mostra a simulação de tempos considerando-se a execução de furos similares aos realizados em laboratório. O lote de 20.000 furos foi estimado. Como trata-se de uma operação simples com tempo de corte pequeno tem-se uma grande influência dos tempos improdutivos no tempo de fabricação do furo (t_t). Pode-se constatar que com a implementação da metodologia há um significativo aumento da produção horária da ordem de 77% que pode na atividade industrial resolver problemas de oscilações de carga e gargalos de produção. Com a utilização da metodologia proposta é possível o aumento de produtividade com reflexos econômicos evidentes.

5. CONCLUSÕES

⇒ A metodologia proposta para a obtenção da V_{mxp} e V_o foi adequada.

⇒ A ferramenta submetida às condições limites apresentou vida reduzida, embora não sendo esta uma condição adequada para prática do processo.

- ⇒ A força de avanço mostrou ser o melhor parâmetro para definição do fim de vida da ferramenta
- ⇒ Ficou demonstrado que as recomendações de catálogo do fabricante são bastante conservadoras e que através de ensaios prévios em chão de fábrica seria possível otimizar a produção, com o uso da $V_{m\text{xp}}$, objetivando o controle de gargalos de produção.

Agradecimentos

À FINEP e à Sandvik do Brasil S.A. Indústria e Comércio - São Paulo SP na pessoa do engenheiro Marcos Soto Ice (Gerente Regional Divisão Titex).

REFERÊNCIAS

- Braga, D.U., Diniz A.E., Coppini, N.L., Miranda, G.W.A., Furação de Liga de Alumínio Silício utilizando Lubrificação por Névoa, Máq. e Metais, v. 413, pp.104-115, junho 2000.
- Coppini, N.L. & Vilella, R.C., Cutting Conditions Optimization in Manufacturing Cells, Proceedings of the First Brazilian Symposium in Machining Technology, pp. 17/01 - 17/20, São Paulo, Brazil, March 1989.
- Heisel, U. & Lutz, M., Pesquisa de fluido de refrigeração e de lubrificação, Máquinas e Metais, pp. 40-49, maio, 1998.
- Ferraresi, D., Fundamentos da Usinagem dos Metais. Ed. Edgard Blücher, SP., 1977.
- Kalhöfer, E., Dry machining - principles and applications. 2º Seminário Internacional de Alta Tecnologia; UNIMEP, Santa Barbara D'Oeste – SP, julho, 1997.
- Klocke, F. & Eisenblätter, G., Presented at the Opening Session Dry Cutting, Annals of the CIRP, v. 46 (2), pp. 519-526, 1997.
- Pallerosi, C. A et al., Durability of Cutting Tools Under True Conditions, Proceedings of CANCAM 91 -Canadian Congress in Applied Mechanics, pp. 173-175, Canada, 1991.

DRILLING PROCESS CONTRIBUTION BY THE USE OF SOLID CARBIDE COATED DRILLS

Abstract. *At the present time the dry cutting, is one of the most debated topics of the metal-cutting industry. The cooling lubricants high cost in order of 7 - 17% of the workpieces manufacturing cost, ecological problems linked to the working environment and waste disposal, as well as the human health has been stimulating the accomplishment of researches seeking the elimination/limitation of the cooling lubricants use. The drilling process is one of the more used in the metal cutting industry, but the geometry, material and coating evolution of the solid drills had its accelerated development only in the last years, allowing considerable increase of the cutting speed and consequently of the productivity. The researches of this process are today in direction to pursuit new cutting conditions and specific situations for dry cutting, having gotten a considerable increase of tool life through the geometry modification and coatings addition. This work shows the dry drilling experiences in ABNT 4340 steel, with solid carbide coated (TiNAl) 10 mm diameter drill and special geometry. Several cutting speeds were used, with the same feed, looking the process optimization. During the machining the feed force and torsion moment were measured through piezoelectric dynamometer, as well as the surface roughness (Ra) and the diameter/roundness of the holes with programmable electronic column using LVDT sensor.*

keywords: *Metal machining, Dry drilling, ABNT 4340 steel, Optimization.*