

CONTRIBUIÇÕES À MODELAGEM DE FORÇAS NA FURAÇÃO COM BROCAS HELICOIDAIS

Angelo Marcos Gil Boeira, boeira@iwf.mavt.ethz.ch¹
Friedrich Kuster, kuster@iwf.mavt.ethz.ch¹
Konrad Wegener, wegener@iwf.mavt.ethz.ch¹
Ricardo Knoblauch, ricardo.knoblauch@iwf.mavt.ethz.ch¹
Roger Margot, margot@inspire.ethz.ch¹
Rolf Bertrand Schroeter, rolf@emc.ufsc.br²

¹Institute of Machine Tools and Manufacturing (IWF), ETH Zentrum, CLA, Tannenstrasse 3, CH-8092 Zürich

²Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP), UFSC, Caixa Postal-476 EMC, 88010-970 Florianópolis/SC

Resumo: A geometria dos gumes principais e do gume transversal de brocas helicoidais apresenta grandes variações ao longo dos mesmos, que se refletem nos valores dos ângulos de saída, de incidência e de inclinação, entre outros. Estas variações geométricas têm influência sobre as componentes da força de usinagem durante o processo de corte, como por exemplo nas forças de corte e de avanço. Neste trabalho é proposto um modelo de forças na furação baseado no modelo clássico de forças proposto por Kienzle, no qual os coeficientes da equação de Kienzle para este caso são obtidos através da aplicação de fatores de correção sobre resultados de ensaios de torneamento. São apresentados resultados de simulação de forças na furação através do emprego de coeficientes da equação de Kienzle obtidos em ensaios de torneamento, sendo verificada boa concordância entre os resultados das forças simuladas e medidas em ensaios de furação.

Palavras-chave: Furação, Modelagem de Forças, Brocas Helicoidais, Simulação da Furação.

1. INTRODUÇÃO

A furação é um dos processos mais comuns no trabalho de metais e uma das primeiras operações de usinagem executadas na história. Dentre todos os processos de usinagem, ocupa um lugar destacado, tanto pela sua enorme utilização quanto pela dificuldade das operações (Castillo, 2005).

Em operações de furação as brocas helicoidais são as ferramentas mais frequentemente empregadas, devido principalmente à sua aplicação universal. Apesar de este tipo de ferramenta ser empregado há praticamente 200 anos, e mesmo com todos os esforços realizados neste período no sentido de melhorar o rendimento desta operação, brocas helicoidais constituem normalmente o gargalo das operações de usinagem. Assim, é de suma importância um maior conhecimento deste processo, no sentido de permitir sua otimização (Bork, 1995).

Uma das possibilidades de melhorar o rendimento da furação é a modificação da geometria da broca, e até o momento muitas variações na geometria deste tipo de ferramenta foram propostas, visando reduzir as forças de usinagem, aumentar a vida da ferramenta, diminuir o tempo de usinagem e melhorar a qualidade dos furos, entre outros aspectos (Bork, 1995).

Enquanto as características de outros processos de usinagem podem ser analisadas em tempo real com relativa facilidade enquanto ocorrem, o acompanhamento da furação apresenta muitas dificuldades, pois o processo ocorre no interior da peça e o acesso é impedido pela ferramenta. Somente a força axial e o torque podem ser medidos através do eixo da ferramenta, e o fluxo de cavaco, bem como o amassamento produzido pelo gume secundário, dificultam a interpretação dos resultados. Além disso, a velocidade de corte é variável ao longo do gume principal (Castillo, 2005; König, 2002).

No sentido de melhorar o conhecimento da usinagem, são hoje cada vez mais empregadas ferramentas computacionais que permitem simular o processo de forma confiável e precisa e, assim, substituir dados empíricos utilizados no chão-de-fábrica por dados cientificamente comprovados. Especificamente no caso da furação, é importante o conhecimento dos comportamentos das forças na furação com brocas helicoidais, para diferentes geometrias de ferramenta, materiais de substrato, revestimento e estado de desgaste.

Na otimização da furação, as técnicas de modelagem e simulação são importantes, visto que há uma complexa relação entre as variáveis de entrada sobre os resultados obtidos, dificultando a avaliação de certos fenômenos do

processo. Para relacionar a influência destas variáveis de forma experimental seriam necessários inúmeros ensaios, levando-se em consideração a variação simultânea de vários parâmetros de corte.

O conhecimento da grandeza e da orientação das forças durante a usinagem é base para a determinação das condições de corte, para a avaliação da precisão de uma máquina-ferramenta, em certas condições de trabalho (deformação da peça e da máquina), para a determinação de procedimentos que ocorrem na região de formação de cavaco e para a explicação de mecanismos de desgaste (König, 2002). Diante disto, a modelagem e simulação de forças na usinagem fornece uma alternativa simplificada, permitindo a obtenção de dados com alto grau de aproximação, na predição de forças de corte (Kim e Ahn, 2005).

Neste trabalho é proposto um modelo de forças na furação que permite o emprego de coeficientes da equação de Kienzle obtidos através de ensaios de torneamento, processo no qual tais dificuldades são significativamente menores. Com estes modelos podem ser então simuladas as forças de furação para diferentes geometrias de ferramenta, visto que as relações entre as forças nos gumes de brocas e as grandezas geométricas das mesmas são parametrizadas.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Assim como em outras áreas da engenharia, nos últimos anos um grande esforço tem sido realizado na elaboração de modelos e na simulação de processos de usinagem. Os modelos são desenvolvidos considerando-se parâmetros específicos como geometria da ferramenta de corte, o material da peça, os parâmetros de corte, as características estáticas e dinâmicas da ferramenta, peça e máquina, entre outros. Na modelagem de forças, especificamente na furação, a maioria dos modelos até hoje desenvolvidos baseia-se em dados de força obtidos experimentalmente e na formulação de uma sistemática para previsão destas forças para casos gerais.

O estudo das forças de corte na furação tem sido realizado classicamente a partir das características do processo e da geometria da ferramenta, e apresenta dificuldades principalmente devido à geometria complexa da broca. Normalmente utilizam-se equações empíricas para calcular torque e força, e utilizam-se avanço e diâmetro da broca para os cálculos, que geram equações aproximadas, mas não levam em conta todos os parâmetros envolvidos no processo (Campos, 2004; Castillo, 2005).

A força de usinagem F que atua sobre os gumes de uma broca helicoidal pode ser decomposta em componentes como a força de corte F_c , força de avanço F_f , força passiva F_p , o momento torçor M_z e outras, conforme Fig. (1). A força de corte F_c é decorrente da resistência ao corte do material usinado, que é predominantemente a responsável pelo momento torçor gerado no processo (Castillo, 2005).

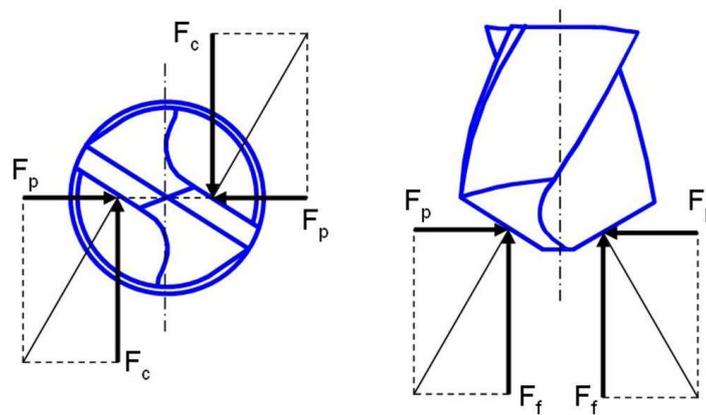


Figura 1. Componentes de Forças na Furação.

Segundo White (1980), para a determinação das componentes de força e momento na furação em cheio, pode-se utilizar as seguintes equações:

$$F_c = k_c \cdot \frac{f \cdot d}{4} \quad (1)$$

$$F_f = k_f \cdot \frac{f \cdot d \cdot \text{sen}\left(\frac{\sigma}{2}\right)}{2} \quad (2)$$

$$M_z = k_c \cdot \left(\frac{f \cdot d^2}{8000}\right) \quad (3)$$

Onde:

- k_c - Força específica de corte;
- k_f - Força específica de avanço;
- f - Avanço;
- d - Diâmetro da broca;
- σ - Ângulo de ponta da ferramenta.

As Equações (1), (2) e (3) anteriores são baseadas no modelo de Kienzle (1951) *apud* König (2002), que descreve o comportamento das forças na usinagem e adota uma função potencial, desenvolvida para processos de torneamento em geral, Eq. (4). Este modelo estabelece uma relação não-linear entre a força específica de corte e a espessura de usinagem, fornece embasamento para determinar as forças e a potência de usinagem, bem como para estimar os esforços que agem tanto na máquina-ferramenta quanto na peça e na ferramenta, em diversas condições de trabalho. Para isso, é necessário que sejam experimentalmente determinadas as constantes da equação de Kienzle $k_{c1.1}$ e $(1-m_c)$ (König, 2002; Rocha, 1984).

$$F_c = k_{c1.1} \cdot b \cdot h^{(1-m_c)} \quad (4)$$

Onde:

- $k_{c1.1}$ - Força específica de corte para um cavaco de $b \cdot h = 1 \text{ mm}^2$;
- b - Largura do cavaco;
- h - Espessura do cavaco;
- $1-m_c$ - Expoente de Kienzle.

Com base nos trabalhos de Kienzle, pesquisadores como Witte (1980), Rocha (1984), Bach *et al* (2004), entre outros, determinaram equações e propuseram métodos que possibilitam a utilização de valores conhecidos do torneamento para a furação usando fatores de correção que consideram a influência dos fatores dependentes e independentes do processo de furação. Entretanto, em função da complexidade do problema, os modelos até o momento desenvolvidos apresentam dificuldades de aplicação. Estas deficiências na modelagem das forças na furação podem ser imputadas às grandes deformações que ocorrem, principalmente no âmbito do gume transversal, devido às baixas velocidades de corte e geometrias de ferramenta fortemente negativas, assim como dificuldade de escoamento dos cavacos. Assim, esforços continuam sendo realizados nos sentido de melhorar a exatidão dos modelos e facilitar a simulação das forças de furação em diferentes condições de trabalho.

3. SISTEMÁTICA PARA MODELAGEM DAS FORÇAS NA FURAÇÃO COM BASE EM ENSAIOS DE TORNEAMENTO

O modelo de forças na furação proposto neste trabalho visa permitir a simulação dos esforços em brocas helicoidais, tanto no gume principal quanto no gume transversal, a partir de dados de força obtidos em ensaios simples de torneamento. As componentes da força de usinagem, mais especificamente a força de corte e de avanço, devem poder ser simuladas para diferentes condições de usinagem, geometrias da ferramenta e material usinado, entre outros aspectos.

A partir de ensaios de torneamento longitudinal ortogonal são determinadas as forças específicas de corte $k_{c1.1}$ e de avanço $k_{f1.1}$, respectivamente, e os coeficientes $(1-m_c)$ e $(1-m_f)$ da equação de Kienzle. Para ambas as forças, de corte e de avanço, é então desenvolvido um modelo que, por meio de fatores de correção relacionados às diferenças geométricas existentes entre os processos de torneamento e furação, permite o cálculo estimado das forças esperadas para uma determinada condição de corte no processo de furação.

A Figura (2) apresenta a correlação feita entre o processo de torneamento e de furação e que é empregada nesta proposta de modelagem de forças na furação. A segmentação proposta visa facilitar, na furação, uma melhor definição e conhecimento da geometria da broca ao longo da variação do seu raio e da influência que estas variações geométricas exercem sobre as componentes da força de usinagem, para posterior elaboração do modelo de Kienzle expandido, por meio de coeficientes de correção. O modelo de Kienzle expandido à furação proposto ajusta as forças específicas de corte e de avanço da furação com base nas provenientes do torneamento, possibilitando desta forma a simulação das forças de usinagem. No torneamento de segmentos foram utilizados insertos intercambiáveis de geometria constante, Fig. (2-b).

No gume principal da broca, Fig. (3-a), as forças de corte e de avanço são diretamente relacionadas para cada segmento (2, 3 e 4) para a usinagem com as respectivas velocidades de corte inerentes a cada região da ferramenta. Já no gume transversal, Fig. (3-b), procede-se à subtração da parte furada com pré-furo da furação em cheio e no torneamento é utilizado um segmento (3) da região do gume principal, utilizando-se a respectiva velocidade de corte correspondente ao gume transversal. Esta solução foi adotada pela impossibilidade de se torner o cilindro, que corresponderia ao gume transversal, com a quina da ferramenta.

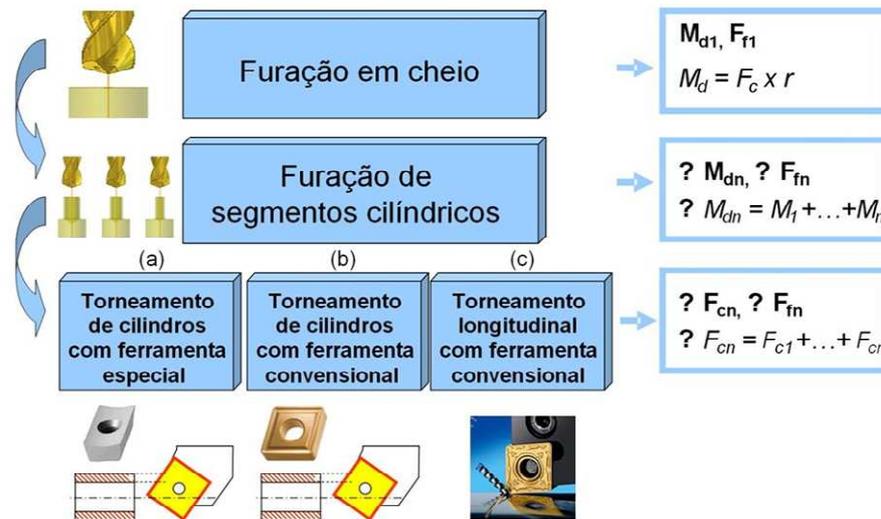


Figura 2. Métodos para análise e modelagem das forças e momentos de corte na furação com base em dados obtidos através de torneamento.

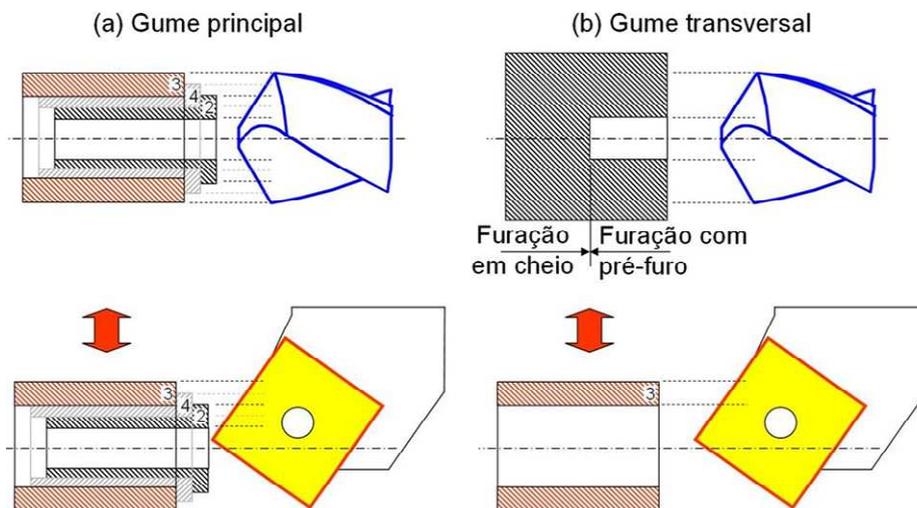


Figura 3. Segmentação das regiões de furação e torneamento para o gume principal (a) e transversal (b).

Como mencionado anteriormente, o modelo proposto baseia-se na observação das diferenças geométricas existentes entre o processo de torneamento e furação. No torneamento, pelo fato de se utilizarem inserts intercambiáveis com geometria constante, os ângulos permanecem fixos durante todo o experimento. Já na furação, existe uma interdependência entre grandezas geométricas e parâmetros de usinagem ao longo dos gumes, o que por sua vez traz consequências às componentes de forças, Fig. (4). No gume principal (GP), o ângulo de saída γ_n , que é medido no plano normal ao gume (P_n), e de inclinação lateral do gume λ_s , variam com a variação do raio da broca, e estão diretamente relacionados à velocidade de corte. Já no gume transversal (GT), pelo fato do mesmo estar alinhado com o centro da broca, o ângulo de inclinação lateral é nulo e os ângulos de saída e de incidência permanecem constantes e podem ser medidos facilmente na broca, havendo apenas variação na velocidade de corte.

Na Figura (5) estão mostrados o ângulo de saída γ_n , medido no plano normal ao gume principal (P_n), e o ângulo de inclinação lateral do gume λ_s , medido no plano do gume (P_s),

4. MODELO PROPOSTO DE FORÇAS NA FURAÇÃO

O modelo de Kienzle determina a força específica necessária para a remoção de uma determinada seção de material durante a usinagem. Para a furação, o modelo aqui proposto simula as forças de corte e de avanço na furação a partir da adequação da força específica do processo de torneamento.

Para o gume principal são realizados ensaios de furação e torneamento nos segmentos anteriormente definidos. No torneamento, os ensaios são executados apenas para um dos segmentos (normalmente o de maior diâmetro), utilizando-se a respectiva velocidade de corte, com variação de avanços para que os cálculos através da equação de Kienzle sejam possíveis. Os valores da força específica $k_{c1,1}$ e do coeficiente de Kienzle ($1-m_c$) assim determinados são tomados como referência para os demais segmentos que abrangem o gume principal.

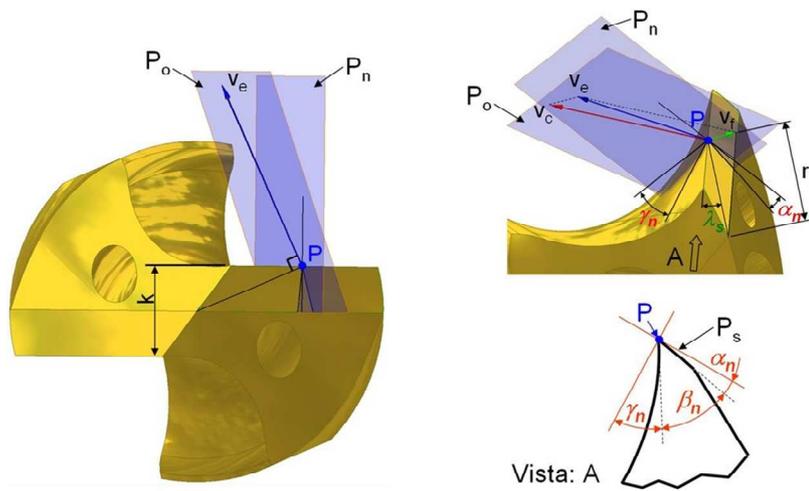


Figura 4. Correção do ângulo de saída em função do deslocamento “k/2”.

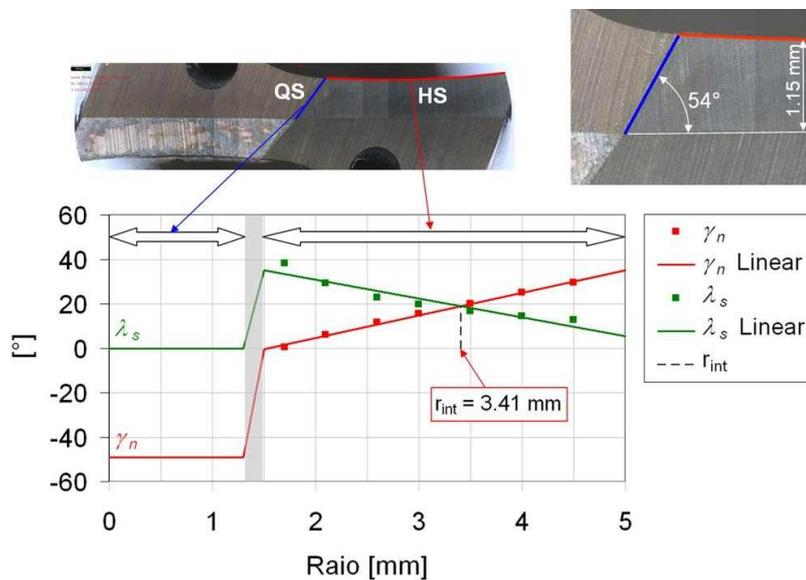


Figura 5. Variação dos ângulos para uma broca helicoidal sem alívio do gume transversal.

Na furação, devido às variações da geometria e da velocidade de corte em função do raio, são feitos ensaios em cada segmento com suas respectivas velocidades de corte. A Figura (6) mostra os resultados obtidos para a força específica de corte na usinagem de um aço Ck45, tanto na furação quanto no torneamento dos segmentos para o gume principal. No torneamento, o ensaio foi feito somente com a condição que representa o segmento D9, sendo o valor da força específica de corte obtida tomado como referência para os demais segmentos.

4.1. Modelagem das Forças no Gume Principal

A adequação da equação de Kienzle do torneamento à furação é feita a partir da aplicação de fatores de correção que levam em conta a variação geométrica das ferramentas de corte dos dois processos. Dependendo da região geométrica da broca (gume principal ou gume transversal), corrige-se a força específica para as variações no ângulo de saída γ_n e no ângulo de inclinação lateral do gume λ_s . A mesma adequação é feita nos coeficientes $(1-m_c)$ e $(1-m_f)$ usados no modelo.

Com base na variação do ângulo de saída normal γ_n , mostrado na Fig. (5), é feita uma rotação da reta ajustada que compreende os valores da força específica de corte para o torneamento, tornando-a paralela à reta ajustada aos pontos referentes à furação, em função do raio. Após esta rotação, é feita a translação da mesma, utilizando-se o valor do ângulo de inclinação do gume λ_s , fazendo com que a reta ajustada do torneamento coincida com a reta ajustada da furação. Para efetuar este deslocamento, foi determinado o valor do ângulo de inclinação do gume λ_s no ponto de intersecção r_{int} que corresponde ao raio onde os ângulos γ_n e λ_s apresentam o mesmo valor.

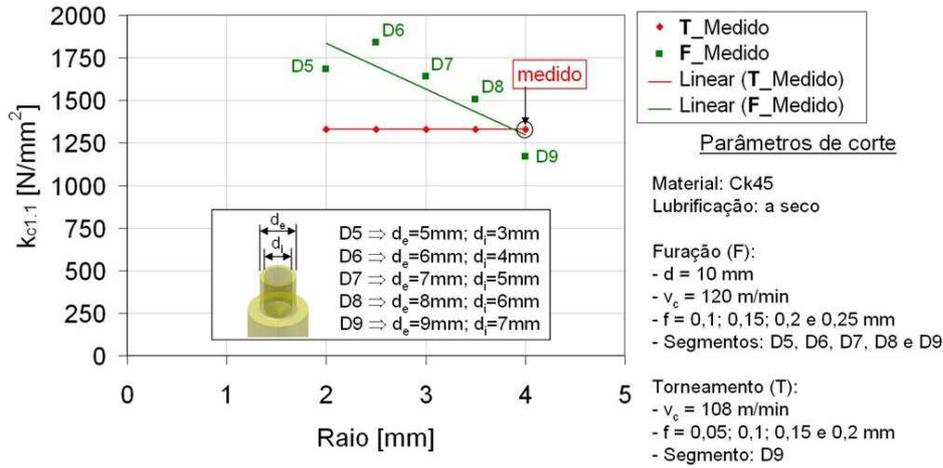


Figura 6. Força específica de corte para a furação (F) e para o torneamento (T).

Utilizando-se a Eq. (6) é possível então, por meio da aplicação dos coeficientes de correção $C_{c,GP(\gamma)}$ para γ_n e $C_{c,GP(\lambda)}$ para λ_s , a obtenção da força específica de corte de furação $k_{cl,1GP}$ a partir da de torneamento $k_{cl,1TGP}$, em função do raio da broca r_i .

$$k_{cl,1GP}(r) = k_{cl,1TGP} \cdot \left[\left(1 + \left((\gamma_{nT} - \gamma_n(r)) \cdot \frac{C_{c,GP(\gamma)}}{100} \right) \right) + \left(\frac{\lambda_{rInt} \cdot C_{c,GP(\lambda)}}{100} \right) \right] = A_c \cdot r + B_c \quad (6)$$

Onde:

- $k_{cl,1GP}(r)$ - Força específica de corte corrigida em função do raio para furação;
- $k_{cl,1TGP}$ - Força específica de corte proveniente do ensaio de torneamento ortogonal;
- γ_{nT} - Ângulo de saída normal utilizado no torneamento ortogonal;
- $\gamma_n(r)$ - Ângulo de saída normal determinado em função do raio da broca;
- $C_{c,GP(\gamma)}$ - Fator de correção do ângulo de saída para a força específica de corte;
- λ_{rInt} - Ângulo de inclinação lateral para o ponto de intersecção entre $\gamma_n(r)$ e $\lambda_{s(r)}$;
- $C_{c,GP(\lambda)}$ - Fator de correção do ângulo de inclinação lateral para a força específica de corte.

O mesmo é aplicado à força específica de avanço $k_{fl,1GP}$, Eq. (7), com os respectivos coeficientes $C_{f,GP(\gamma)}$ e $C_{f,GP(\lambda)}$.

$$k_{fl,1GP}(r) = k_{fl,1TGP} \cdot \left[\left(1 + \left((\gamma_{nT} - \gamma_n(r)) \cdot \frac{C_{f,GP(\gamma)}}{100} \right) \right) + \left(\frac{\lambda_{rInt} \cdot C_{f,GP(\lambda)}}{100} \right) \right] = A_f \cdot r + B_f \quad (7)$$

Os expoentes de Kienzle ($1-m_c$), para a força de corte, e ($1-m_f$), para a força de avanço são igualmente ajustados utilizando-se a mesma metodologia empregada nas Eq. (6) e (7), respectivamente. Para a direção de corte tem-se os coeficientes de correção $C_{mc,GP(\gamma)}$ e $C_{mc,GP(\lambda)}$ e para a direção de avanço tem-se $C_{fc,GP(\gamma)}$ e $C_{fc,GP(\lambda)}$.

Na Figura (7) é apresentado o ajuste, a partir dos ângulos γ_n e λ_s , que permite obter a força específica de corte da furação a partir de dados do torneamento. A equação da reta obtida para a furação (reta laranja) é então utilizada para o cálculo das forças ao longo do gume principal da broca.

Pelo fato da força específica ser uma função do raio da broca, o cálculo das forças de corte e de avanço é feito por meio da integração da equação de Kienzle ao longo do gume principal, como mostra esquematicamente a Fig. (8). Com a variação da força específica de corte, $k_{cl,1GP}(r)$, com o raio, conforme Eq. (8), e tomando-se uma largura de corte infinitesimal do gume principal db , Eq. (9), pode-se aplicar a equação de Kienzle para a força de corte na furação $F_{cGP}(r)$, em função do raio, como mostra a Eq. (10).

$$k_{cl,1GP}(r) = A_c \cdot r + B_c \quad (8)$$

$$db = \frac{\sqrt{r^2 - \left(\frac{k}{2}\right)^2}}{\sin(\kappa_r)} \cdot dr \quad (9)$$

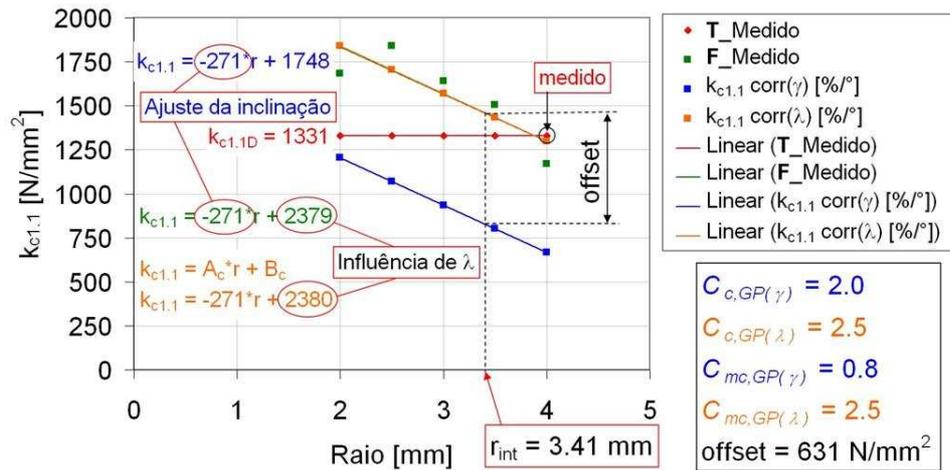


Figura 7. Determinação da força específica de corte na furação (F) a partir do torneamento (T).

$$F_{cGP} = \int_{r_{GT}}^r k_{c1,1GP}(r) \cdot db \cdot h^{(1-m_{cGP})(r)} \quad (10)$$

Onde:

- db - Largura de corte infinitesimal;
- dr - Largura de corte infinitesimal rebatida na direção radial;
- κ_r - Ângulo de direção do gume;
- F_{cGP} - Força de corte referente ao gume principal;
- r_{GT} - Raio do gume transversal.

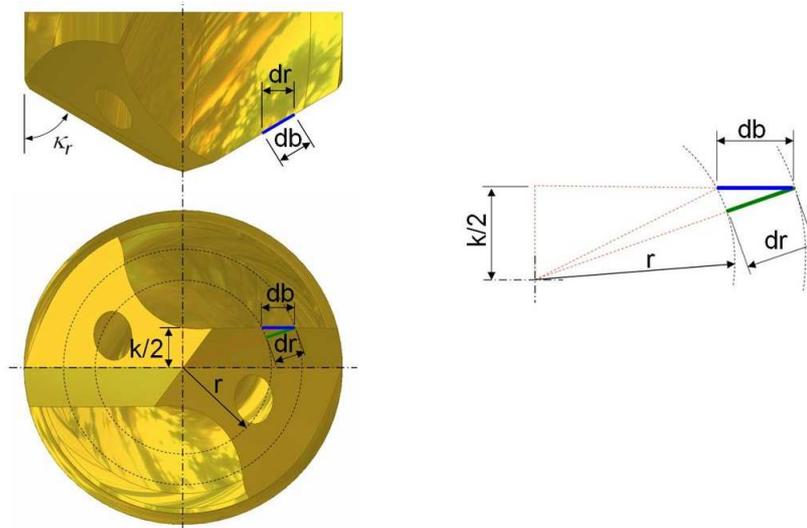


Figura 8. Integração das forças no gume principal da broca.

O mesmo procedimento é aplicado à força específica de avanço, resultando em um $C_{f,GP(\gamma)}$ de 2,0 e $C_{c,GP(\lambda)}$ de 2,7; e para o expoente de Kienzle na direção de avanço resultando em um $C_{fc,GP(\gamma)}$ de 3,9 e $C_{fc,GP(\lambda)}$ de 7,6.

4.2. Modelagem das Forças para o Gume Transversal

Por se tratar de uma região em que o corte ocorre com ângulos de saída extremamente negativos e a velocidade de corte tende a zero, o entendimento dos fenômenos que ocorrem no gume transversal se torna mais complexo. Segundo Risse (2006), entre outros, sabe-se que a contribuição do gume transversal na força de corte total da broca é pequena, mas para a força de avanço sua contribuição pode atingir patamares elevados. Estima-se que estes valores situem-se entre 65 a 75% da força de avanço total da broca, enquanto que o gume principal é responsável por 17 a 25% e as outras partes da broca por uma parcela de força inferior a 10%.

Existem diversos métodos que permitem o cálculo das forças no gume transversal. Dentre eles, destacam-se os que se baseiam em princípios de deformação, escoamento, atrito do material e cisalhamento, entre outros. Entretanto, como neste trabalho é explorada a possibilidade da modelagem das forças baseada no modelo de Kienzle, é assumido que o material deve ser efetivamente usinado, e não extrudado, havendo portanto uma efetiva formação de cavaco. Esta hipótese simplificativa é baseada em pesquisas onde é observada a formação de cavacos na usinagem de aços mesmo com ângulos de saída extremamente negativos, da ordem de -60° (Ohbuchi e Obikawa, 2003; Fang, 2004). No caso da furação, na região do gume transversal, a broca apresenta um ângulo de saída de na ordem de -50° . Desta forma, o procedimento adotado nesta proposta para a obtenção das forças específicas de corte e avanço na região do gume transversal é similar ao empregado no gume principal. No entanto, devido à impossibilidade de se usar mais de um segmento nesta região, os valores obtidos para a força específica de corte e de avanço, respectivamente, bem como os obtidos para os expoentes $(1-m_c)$ e $(1-m_f)$, para o torneamento e a furação, foram diretamente correlacionadas por meio da aplicação da correção do ângulo de saída, utilizando-se as Eq. (6) e (7).

4.3. Simulação das Forças na Furação

A partir dos valores das forças específicas de corte e avanço corrigidos para o processo de furação, é possível simular as forças de corte e avanço através do emprego da integral para o gume principal e a aplicação direta da equação de Kienzle para o gume transversal. Na direção de avanço, as componentes da força de avanço F_{fFC} podem ser somadas diretamente, Eq. (11), pois têm a mesma direção axial do avanço da broca, Fig. (9). Para a força de corte F_{cFC} , a soma das diferentes componentes não se dá diretamente, e sim pelo somatório dos momentos gerados por cada uma, de acordo com a Eq. (12). Assim, a força de corte pode ser obtida através do emprego da Eq. (13), utilizando-se os braços de alavanca r_{AGP} para o gume principal, r_{AGT} para o gume transversal, r_{AGS} para o gume secundário e r_{AFC} para a furação em cheio.

$$F_{fFC} = F_{fGP} + F_{fGT} + F_{fGS} \quad (11)$$

$$M_{zFC} = M_{zGP} + M_{zGT} + M_{zGS} \quad (12)$$

$$F_{cFC} = \frac{r_{AGP} \cdot F_{cGP} + r_{AGT} \cdot F_{cGT} + r_{AGS} \cdot F_{cGS}}{r_{AFC}} \quad (13)$$

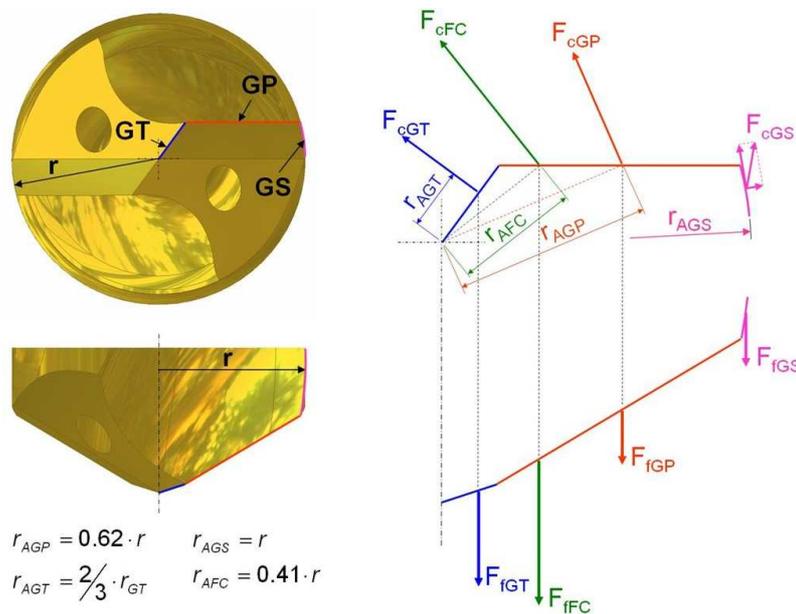


Figura 9. Modelagem das forças nos gumes principal e transversal.

Na Figura (10) é representada a simulação da força de corte correspondente ao gume principal (GP) e a soma dos gumes principal (GP), transversal (GT) e secundário (GS) que correspondem à furação em cheio para um aço Ck45. Os valores de força de corte simulados têm um intervalo de confiança de 95%. A força de corte simulada para o gume transversal (GT) corresponde a cerca de 54% da força total para a furação em cheio.

Da mesma forma, na Fig. (11), apresenta-se a simulação da força de avanço correspondente à furação em cheio para um aço Ck45. Pode-se verificar que a força de avanço simulada para o gume principal atinge valores na ordem de 18% do valor total da furação em cheio, conforme relatado na literatura, validando-se assim o modelo de Kienzle expandido.

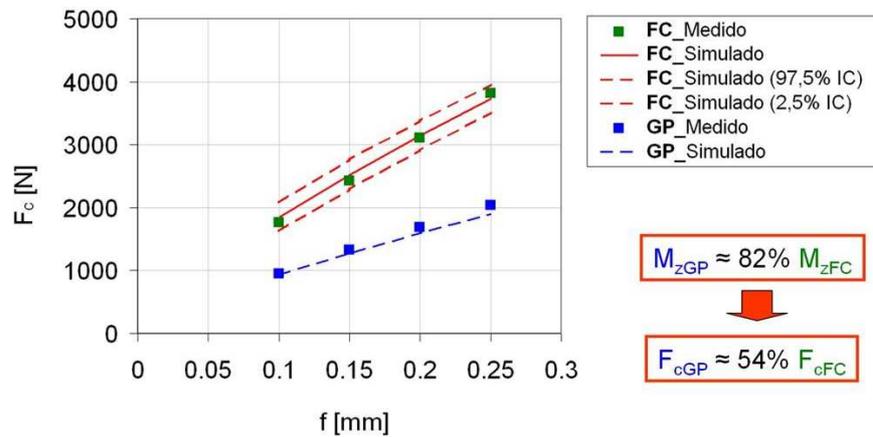


Figura 10. Força de corte para a furação do aço Ck45.

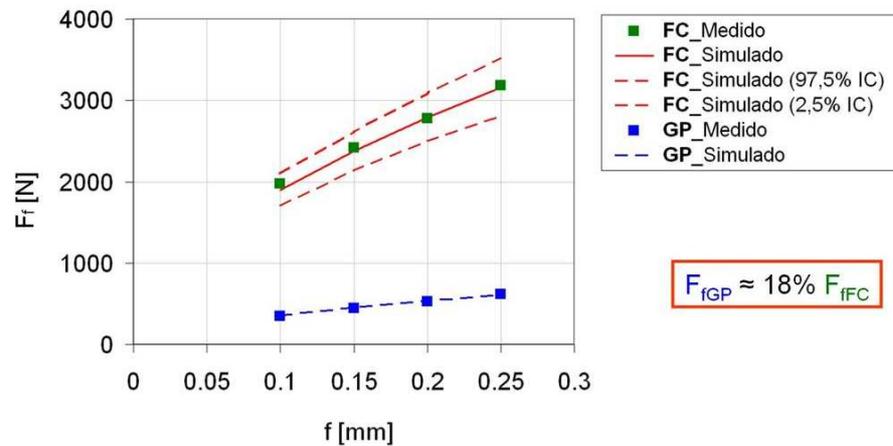


Figura 11. Força de avanço para a furação do aço Ck45.

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho objetivou a modelagem das forças na furação utilizando-se de dados experimentais obtidos a partir de ensaios de torneamento. Na região do gume principal o modelo de Kienzle adaptado mostrou-se satisfatório, sendo os valores das forças específicas de corte e de avanço, correspondentes ao torneamento, transformados em valores da furação, permitindo deste modo o cálculo da força de avanço e do momento torçor atuantes durante o processo de furação. Os valores obtidos, em termos percentuais, correspondem aos esperados e citados na literatura. Na região do gume transversal, com o emprego do modelo, os resultados também se mostraram satisfatórios, porém com uma discrepância maior dos valores simulados, se comparados com o gume principal. Tal fato resultou em uma faixa de intervalo de confiança em torno de $\pm 12\%$, tanto para força de corte como para a força de avanço. Faz-se necessária ainda uma melhor adaptação da correção geométrica do torneamento com ângulo da saída nulo em relação à furação com ângulo de saída extremamente negativo, além de um melhor entendimento dos mecanismos de formação de cavaco.

A utilização de segmentos cilíndricos apresentou-se como um método eficaz e de fácil aplicabilidade tanto nos ensaios de furação como nos de torneamento. Assim sendo, é possível, no futuro, uma padronização neste tipo de experimento, podendo o mesmo ser aplicado para diferentes geometrias de brocas, diâmetros, revestimentos e materiais de peça. Além disso, com a segmentação feita ao longo dos gumes transversal e principal, são identificadas as regiões que sofrem maiores solicitações mecânicas. Com essa informação é então possível a proposição de modificações geométricas na ponta da broca que minimizem esses esforços, como por exemplo, aplicação de afiações especiais para o alívio do gume transversal, bem como a aplicação de outros materiais à ferramenta de corte e novos revestimentos. Outra possibilidade que o modelo permite é a aplicação de dados retirados diretamente de livros e tabelas, dos quais podem ser obtidos os coeficientes da equação de Kienzle.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Schweizer Förderagentur für Innovation KTI e às indústrias Swiss Steel AG, Blaser Swisslube AG, Sphinx Werkzeuge AG, Laubscher Präzision AG, Äschlimann AG e Fiber Optic P&P AG pelo apoio financeiro, bem como à CAPES, pelo concessão de bolsa para estágio pós-doutoral.

7. REFERÊNCIAS

- Bach, Fr.-W., Koehler, W., Schäperkötter, M., Weinert, K., 2004, "Kontaktflächenanalyse beim Hochgeschwindigkeits-Bohren", VDI-Z - Integrierte Produktion, Springer VDI Verlag, pp. 30-32.
- Bork, C. A. S., 1995, "Otimização de Variáveis de Processo para a Furação do Aço Inoxidável Austenítico DIN 1.4541", Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.
- Campos, D.D.V., dezembro de 2004, "Análise Teórico-experimental da Deflexão de Ferramentas no Fresamento de Topo", Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.
- Castillo, W.J.G., 2005, "Furação Profunda do Ferro Fundido Cinzento GG25 com Brocas de Metal-duro com Canais Retos", Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 134 p.
- Fang, N., fevereiro de 2005, "Tool-chip friction in machining with a large negative rake angle tool", Wear, Vol. 258, Issues 5-6, pp. 890-897.
- Kim, K.W., Ahn, T.K., 2005, "Force Prediction and Stress Analysis of a Twist Drill from Tool Geometry and Cutting Conditions", International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol. 6, No.1.
- König, W., Klocke, F., 2002, "Fertigungsverfahren 1: Drehen, Fräsen, Bohren", 7., korrigierte Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Aachen, Alemanha, 471p.
- Ohbuchi, Y., Obikawa, T., julho de 2003, "Finite Element Modeling of Chip Formation in the Domain of Negative Rake Angle", Cutting Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 125, Issue 3, pp. 324-332.
- Paucksch, E., 1992, "Zerspantechnik 11., überarbeitete Auflage", Viewegs Fachbücher der Technik, Braunschweig, Alemanha, 404 p.
- Risse, K., maio de 2006, "Einflüsse von Werkzeugdurchmesser und Schneidkantenverrundung beim Bohren mit Wendelbohrern in Stahl", Dissertation, RWTH, Aachen, Alemanha, 137 p.
- Rocha, A. S., 1984, "Determinação de um Modelo de Força de Usinagem para a Furação a Partir do Modelo de Força de Usinagem no Torneamento", Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 117 p.
- Witte, L., 1980, "Spezifische Zerspankräfte beim Drehen und Bohren", Tese de Doutorado, RWTH, Aachen, Alemanha, 143 p.

8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluídos neste trabalho.

CONTRIBUTIONS TO THE FORCES MODELING IN DRILLING WITH TWIST DRILLS

Angelo Marcos Gil Boeira, boeira@iwf.mavt.ethz.ch¹
Friedrich Kuster, kuster@iwf.mavt.ethz.ch¹
Konrad Wegener, wegener@iwf.mavt.ethz.ch¹
Ricardo Knoblauch, ricardo.knoblauch@iwf.mavt.ethz.ch¹
Roger Margot, margot@inspire.ethz.ch¹
Rolf Bertrand Schroeter, rolf@emc.ufsc.br²

¹Institute of Machine Tools and Manufacturing (IWF), ETH Zentrum, CLA, Tannenstrasse 3, CH-8092 Zürich

²Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP), UFSC, Caixa Postal-476 EMC, 88010-970 Florianópolis/SC

Abstract: *Considering the geometry of the cutting edge of a twist drill for the major cutting edge and the chisel edge, angles like the working orthogonal rake angle, the tool orthogonal clearance angle and the working cutting edge inclination vary along the cutting edge. These variations influence the specific cutting force and also the specific thrust force. In this paper a model based on the Kienzle model is presented for the prediction of cutting forces in drilling using results obtained in turning operations and applying correcting factors for variations in the tool geometry. Examples of the forces simulation in drilling using the Kienzle constants obtained in turning experiments show good concordance with cutting and thrust forces measured during the drilling process.*

Keywords: *Drilling, Modeling of Forces, Twist Drills, Simulation of Drilling.*