



VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA  
VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING  
18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil  
August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil

## ANÁLISE DOS ESFORÇOS NO PROCESSO DE BROCHAMENTO ATRAVÉS DO EMPREGO DE DADOS OBTIDOS EM ENSAIOS DE TORNEAMENTO

Daniel Amoretti Gonçalves, daniagon@terra.com.br  
Henrique von Paraski, henrique@vonparaski.com  
Rolf Bertrand Schroeter, rolf@emc.ufsc.br

Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP), UFSC, Caixa Postal-476 EMC, 88.010-970 Florianópolis/SC, Brasil

**Resumo:** Diante das dificuldades impostas pela economia, as empresas vêm-se obrigadas a renovar constantemente seu conhecimento e apurar cada vez mais seu know-how, buscando sempre evoluir e racionalizar seus métodos produtivos. Assim, o processo de brochamento surge como opção para muitas situações, especialmente onde a produtividade é o fator primordial. A eficiência do processo pode ser vista com um aumento da qualidade através da redução de peças com anomalias, aumento da produtividade, redução de tempos operacionais e/ou redução de custos. O brochamento helicoidal utiliza uma única ferramenta que realiza as operações de desbaste, semi-acabamento e acabamento em um único passe. Devido a essa característica, a brocha é considerada uma ferramenta de custo elevado, comparada com outras ferramentas, como brocas e ferramentas de mandrilar. Nesse sentido, para que haja um dimensionamento correto da ferramenta no processo de brochamento, exige-se um conhecimento apurado sobre os esforços que agem sobre a ferramenta. Valores como tensão, força de tração e, no caso de brochamento helicoidal, o torque, orientam o projetista no dimensionamento de partes críticas da ferramenta. Visando obter estes valores sobre a brocha, ensaios de torneamento ortogonal foram realizados, simulando a usinagem de um único dente de uma brocha. Estes ensaios permitiram o conhecimento de características-chaves do processo, como a força específica de corte do material e a variação da força em relação à variação do ângulo de saída. Assim, coeficientes de correção para o ângulo de saída puderam ser obtidos. Esses coeficientes, juntamente com a força específica de corte e as características geométricas da ferramenta, foram utilizados como dados de entrada em algoritmos que simulam modelos de força. Desta maneira, obtiveram-se valores de tensão, tração e torque no corpo da brocha e, com isso, verificou-se se a ferramenta suportaria os esforços a que seria submetida durante o processo de brochamento.

**Palavras-chave:** Brochamento, forças, simulação

### 1. INTRODUÇÃO

O brochamento é um processo de usinagem destinado à alta produtividade e custo operacional baixo. Tem grande versatilidade, e permite produzir formas complexas com bom acabamento da superfície e tolerâncias estreitas. O brochamento foi originalmente desenvolvido para usinar rasgos de chaveta internos. No entanto, rapidamente as vantagens do processo ficaram óbvias e houve um rápido desenvolvimento e adaptação do processo para produções em larga escala de vários tipos de formas e superfícies, tais como superfícies planas, internas e externas, formas cilíndricas, canais helicoidais típicos de engrenagens e uma grande variedade de formas irregulares (ASM, 1997).

Quando o processo é aplicado de acordo com as especificações de projeto, utilizando-se máquinas e ferramentas bem dimensionadas e compatíveis com o uso, o brochamento tem a capacidade de remover material mais rapidamente do que outros métodos, proporcionando altas taxas de remoção. Desta forma, ele compete com outros processos de usinagem em relação a vários fatores, como acabamento da superfície e taxa de remoção de cavaco.

A ferramenta utilizada no processo recebe o nome de brocha. É sabido que historicamente as brochas têm sido projetadas e construídas com base na experiência, usualmente adquirida através da tentativa e erro (Sutherland *et al*, 1996). Mesmo que tal metodologia possa não atingir resultados otimizados, ou ainda, resultados satisfatórios, e aliado a um alto custo, tem-se mostrado aplicável e pode ser utilizada no decorrer da história industrial. No entanto, havendo a constante necessidade de ferramentas com maior precisão, tanto para a obtenção de peças com tolerâncias muito estreitas como no conhecimento das tensões atuantes sobre a ferramenta e potências requeridas, é necessário um estudo aprofundado sobre a situação. Nem sempre tal estudo é possível, seja pelos aspectos econômicos ou ainda pela falta de literatura especializada.

Uma das maneiras de se obter conhecimento de forma ágil e econômica tanto da geometria quanto das tensões atuantes sobre a ferramenta é através de simulações computacionais. Tais simulações são desenvolvidas com base em modelos matemáticos que descrevem a situação real. Estes modelos podem se originar de várias fontes, podendo ser simples equações trigonométricas, complexas deduções matemáticas, ou fórmulas totalmente empíricas, mas que no conjunto se ajustam da melhor maneira à situação real. Por serem ferramentas computacionais de relativa facilidade de emprego e agilidade operacional, possuem a característica de permitirem grandes alterações sobre o sistema em um espaço de tempo menor e com uma economia muito maior do que os processos reais, fornecendo dados importantes para o projetista, que finalizará o projeto em menos tempo e com menos erros, comuns nos tradicionais métodos de tentativa e erro.

O objetivo deste trabalho é, neste contexto, criar um algoritmo que simule os esforços de usinagem durante o processo de brochamento valendo-se, para isso, de modelos matemáticos. Para simular a geometria e a cinemática são utilizados modelos já desenvolvidos anteriormente por Gonçalves *et al* (2009). Os modelos de esforços baseiam-se em dados geométricos gerados no CAD 3D, nas condições de usinagem, nas características da ferramenta e nas propriedades do material usinado. Para isso, ensaios de torneamento ortogonal foram realizados com o objetivo de prover informações acerca das propriedades do material usinado e também verificar a influência do ângulo de saída da ferramenta sobre a variação da força de corte. Utilizaram-se ferramentas com geometrias compatíveis às utilizadas no brochamento da empresa parceira, sendo tomado como padrão um único dente de uma brocha utilizada para a produção de engrenagens helicoidais internas.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Brochamento Helicoidal

As brochas helicoidais diferem das tradicionais brochas de tração já que ela mesma ou a peça são rotacionadas. Para algumas aplicações, quando o ângulo de hélice é menor que  $15^\circ$ , a rotação da brocha não precisa ser feita por um atuador visto que a peça tem a liberdade de auto rotacionar devido ao pequeno ângulo de hélice (Stemmer, 2005; SME, 1983). No entanto, nos casos em que há uma produção em larga escala ou grandes ângulos de hélice deve existir um sistema de rotação para a ferramenta que esteja sincronizado com o movimento linear da mesma. Uma representação esquemática de uma brocha é mostrada na Fig. (1).

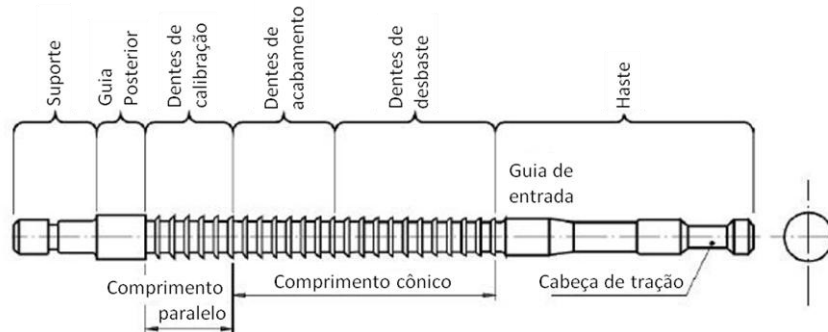
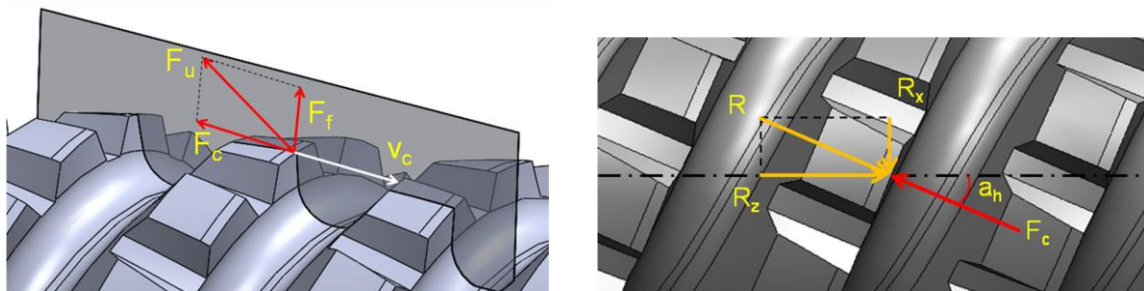


Figura 1. Desenho esquemático de uma brocha de tração.

### 2.2. Forças no Brochamento

No brochamento, assim como em outros processos de usinagem como, por exemplo, o torneamento, a força de usinagem é a força total que atua sobre a ferramenta e pode ser decomposta em componentes, sendo a força de corte geralmente a de maior relevância. A Figura (2) mostra a decomposição das forças no brochamento, em um caso de corte ortogonal.



$F_u$  – força total de usinagem;  $F_c$  – força de corte;  $F_f$  – força de avanço;  $v_c$  – velocidade de corte.  
 $R$  – força de reação;  $R_x$  – reação em “x”;  $R_z$  – reação em “y”;  $a_h$  – ângulo de hélice.

Figura 2. (a) Decomposição das forças de usinagem e (b) Decomposição da força de corte (Gonçalves, 2009).

Nesse caso, embora a força passiva exista quando considerada sobre apenas um gume secundário, o somatório dos vetores da força passiva dos dois gumes se anulam matematicamente. A força de corte pode, então, ser decomposta de modo a corresponder aos eixos principais da brocha. A força de corte gerada no processo de corte, como pode ser observado na Fig. (2b), faz um ângulo em relação ao eixo da brocha de valor igual ao ângulo de hélice. Sendo assim, ela pode ser decomposta em duas forças, uma paralela e outra perpendicular ao eixo da ferramenta que formarão a força de tração e de torque, respectivamente.

### 2.3. Modelo de Kienzle

Kienzle, em 1951, propôs um modelo que descreve o comportamento das forças de usinagem. Este modelo estabelece uma relação não-linear entre a força específica de corte e a espessura de usinagem (Stemmer, 2005; König e Klocke, 1997), conforme a Eq. (1).

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

Onde:

$k_{c1.1}$  – força específica de corte para  $b \cdot h = 1 \text{ mm}^2$ ;

$1-m_c$  – expoente da equação de Kienzle.

$h$  – espessura de usinagem;

$b$  – largura de usinagem.

A equação de Kienzle, Eq. (1), fornece o embasamento para determinar a força de corte e a potência de usinagem, e 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  $1-m_c$ .

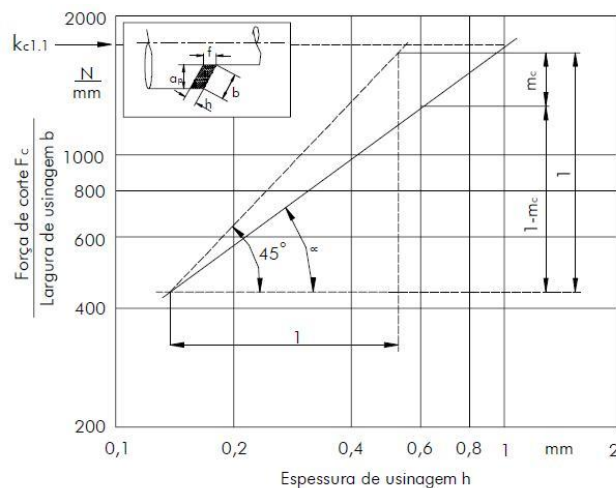


Figura 3. Gráfico para determinação de  $k_{c1.1}$  e  $1-m_c$  (Kienzle *apud* König e Klocke, 1997).

Devido à propriedade logarítmica que  $\log(1)=0$ , quando o valor da espessura de usinagem  $h$  for 1 o valor de  $F_c/b$  representará a força específica de corte para uma seção de cavaco  $b \times h = 1 \text{ mm}^2$ .

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para encontrar os parâmetros utilizados como dados de entrada no modelo de forças proposto, ensaios de torneamento ortogonal foram realizados. Tais ensaios tiveram como objetivos principais a determinação das constantes da equação de Kienzle ( $1-m_c$  e  $k_{c1.01}$ ) do material a ser usinado e a obtenção dos fatores de correção para o ângulo de saída. Primeiramente, corpos-de-prova disponíveis no Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP) e posteriormente corpos-de-prova que passaram por um processo de conformação a frio foram utilizados. As ferramentas de torneamento utilizadas reproduzem o gume típico de um dente de uma brocha.

Para os ensaios foram utilizados um torno CNC COSMOS 20U fabricado pela empresa ROMI, disponível no LMP) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Ele é equipado com uma plataforma piezelétrica Kistler 9257A, a qual possui três canais de aquisição de dados dispostos nos eixos cartesianos  $x$ ,  $y$  e  $z$ . Para viabilizar a leitura do sinal vindo da plataforma, amplificadores Kistler 5011 foram utilizados. Três amplificadores foram utilizados, sendo um para cada eixo cartesiano. Para a conversão dos sinais analógicos vindos dos amplificadores foi utilizada uma placa de

aquisição National Instruments PCI-MIO-16E-1, um microcomputador e um software de aquisição de dados, armazenando os sinais obtidos e possibilitando sua posterior análise e tratamento.

A Fig. (4) mostra, de forma esquemática, o processo de medição das forças no torneamento e os equipamentos utilizados.

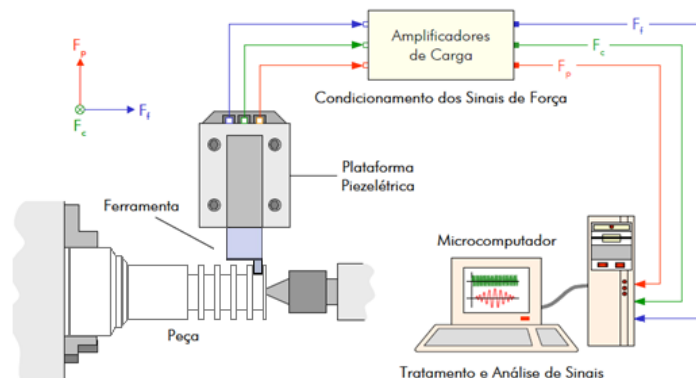


Figura 4. Esquema de medição de forças no torneamento (Gonçalves, 2009).

### 3.1. Ferramentas de corte

Para a realização dos ensaios foram utilizadas ferramentas similares às utilizadas em operações de sangramento e que simulam o gume de um dente da brocha, Fig. (5).

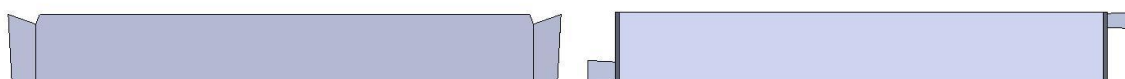


Figura 5. Ferramentas utilizadas nos ensaios de torneamento (Gonçalves, 2009).

O material utilizado nas ferramentas foi o aço-rápido AISI M2, pois ele possibilita a fabricação de uma ferramenta com a geometria requerida sem acarretar em um custo demasiadamente alto. É também o mesmo material utilizado na fabricação das brochas, tornando os resultados destes ensaios mais próximos dos valores encontrados no brochamento.

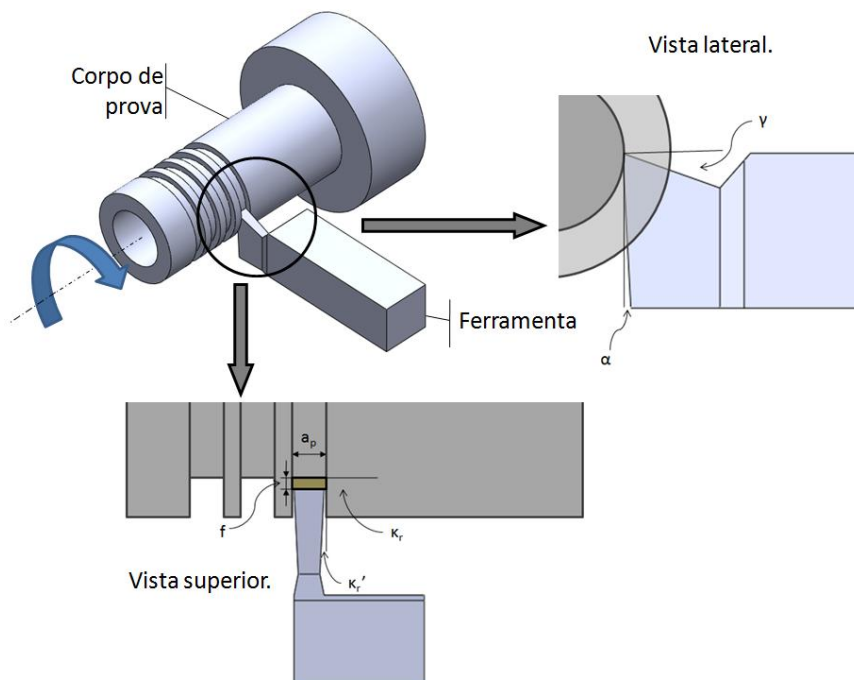


Figura 6. Ângulos principais da ferramenta (Gonçalves, 2009).

Ferramentas com diferentes ângulos de saída foram confeccionadas para se estudar a influência da variação deste ângulo sobre a força de corte. Estes ângulos variam de  $16^\circ$  a  $24^\circ$ , com um incremento de  $2^\circ$ . O ângulo de incidência ( $\alpha$ ) foi mantido constante em  $3^\circ$  para todas as ferramentas. Este valor também foi adotado para o ângulo de direção do gume

secundário ( $\kappa_r$ ). Já ângulo de direção do gume ( $\kappa_r$ ) é de  $90^\circ$ , também para todas as ferramentas. A Figura (6) mostra as características geométricas de uma ferramenta utilizada. Além disso, duas larguras do gume diferentes foram utilizadas nas ferramentas, com 3 e 4 mm.

Embora a brocha seja formada por uma seqüência de dentes, preferiu-se simular a ação de um único gume. Este procedimento simplifica a operação e não compromete os resultados dos cálculos de tensão sobre a ferramenta, já que durante a simulação, o algoritmo utilizado simula a ação dos vários dentes da brocha.

### 3.2. Corpos-de-prova

Na primeira etapa dos ensaios, corpos-de-prova cilíndricos e constituídos de aço AISI 1040 disponíveis no Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP) foram utilizados. Esta etapa se fez importante devido à quantidade limitada de corpos-de-prova dos quais se desejava levantar a força específica de corte.

Na segunda etapa dos experimentos, foram utilizados corpos-de-prova idênticos aos utilizados na operação de brochamento para a produção de engrenagens helicoidais. Estes corpos-de-prova foram fornecidos por uma empresa que utiliza este processo. Eles são constituídos de aço AISI 1022 com características específicas para forjamento a frio, processo pelo qual as peças passaram antes de serem ensaiadas, o que deixou o material encruado.

### 3.3. Procedimento experimental

A determinação dos coeficientes da equação de Kienzle pode ser feita nas operações de torneamento longitudinal, faceamento ou torneamento ortogonal, sendo este último escolhido por apresentar mais similaridade com o processo de corte encontrado no brochamento.

A determinação destes coeficientes foi realizada mantendo-se constante a largura de usinagem e variando-se os avanços. A faixa de avanços utilizada foi escolhida tomando como base o avanço por dente nas brochas utilizadas na empresa parceira. Elas variam de 0,03 mm a 0,06 mm com um incremento de 0,01 mm. A largura de usinagem foi mantida constante e com valor de 3 mm. O ângulo de saída utilizado para os ensaios foi de  $20^\circ$  e como o  $\kappa_r$  das ferramentas utilizadas é igual a  $90^\circ$ , a profundidade de corte é igual à largura de usinagem e o avanço igual à espessura de usinagem.

Na primeira etapa de ensaios, com os corpos-de-prova de aço AISI 1040, a ferramenta usinou 2 mm no raio do corpo-de-prova. O tempo de aquisição foi alterado conforme o avanço utilizado, assim como a frequência de aquisição, que foi ajustada para manter um número de pontos adquiridos do sinal relativamente constante. Além disso, foi calculado o tempo de usinagem e somado um valor de 5 segundos para garantir que todo o sinal fosse adquirido. Foram feitas quatro repetições para cada valor de avanço.

Depois de terminada a primeira etapa dos ensaios, de posse do procedimento de ensaios adquirido, deu-se início à segunda etapa, onde a quantidade de corpos-de-prova era limitada. Para estes ensaios foram utilizados os corpos-de-prova fornecidos pela empresa parceira.

Um tempo extra também foi adicionado ao tempo de usinagem para garantir a aquisição de todo o sinal. Com este material, além dos ensaios para a determinação das constantes da equação de Kienzle, foram realizados ensaios para a determinação dos coeficientes de correção das forças de corte para a mudança do ângulo de saída das ferramentas.

### 3.4. Tratamento do sinal

O sinal obtido nos ensaios de torneamento apresenta ruído nos trechos iniciais e finais da captura do sinal. Por isso, a primeira etapa do tratamento deste sinal é a seleção do intervalo de medição.

Tanto para a determinação das constantes da equação de Kienzle quanto dos coeficientes de correção para a variação da força com a variação do ângulo de saída é importante o conhecimento do valor médio dos ensaios. Sendo assim, para cada ensaio foi calculada a média aritmética e o desvio-padrão do sinal.

Para determinação do coeficiente de Kienzle e do expoente da equação de Kienzle para a força de corte, foram utilizadas as Eq. (1). Os resultados obtidos são apresentados na Tab. (1).

**Tabela 1. Constante de Kienzle adquirida.**

$1-m_c$	$k_{c1,1}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
0,82	1.692

### 3.5. Fatores de correção para o ângulo de saída

Apesar de já existirem diversas publicações sobre fatores de correção para a força de corte e a constante de Kienzle, com várias tabelas sobre os diversos processos de usinagem de ferramentas com geometria de gume definido, na maioria delas esses fatores de correção foram baseados em ensaios padronizados de torneamento longitudinal. Neste trabalho, optou-se por realizar ensaios de torneamento ortogonal, com uma geometria compatível com a dos dentes da brocha, e obter os fatores de correção diretamente, apenas com a variação do ângulo de saída.

Os ensaios de força realizados permitem conhecer a variação da força de corte em relação ao ângulo de saída. Na Figura (8) são mostrados os valores adquiridos dos ensaios de força.

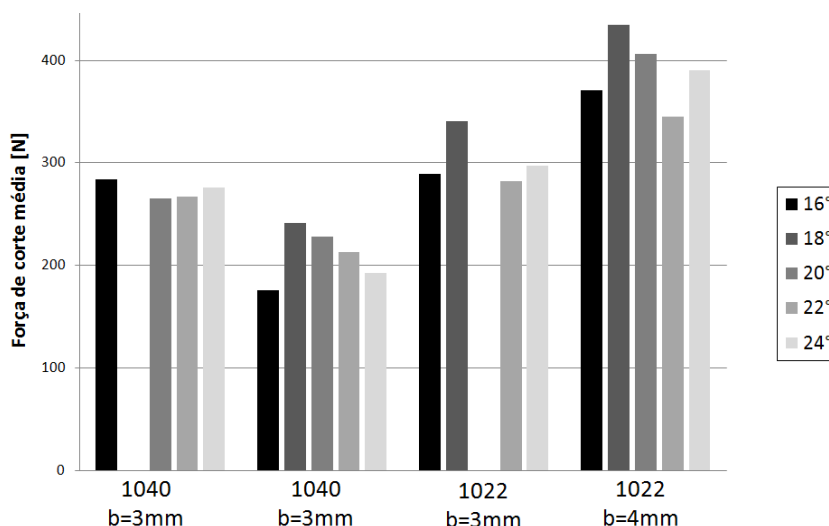


Figura 7. Média dos valores de força de corte para os ensaios realizados (Gonçalves, 2009).

Com base nos resultados obtidos nos ensaios de força, pretende-se chegar a um fator de correção para o ângulo de saída. Para isso, os valores foram referenciados em relação à ferramenta utilizada para a obtenção do coeficiente de Kienzle, ou seja, a de 20°.

A Tabela (2) apresenta essa diferença percentual da força de corte junto com a diferença percentual obtida pela correção sugerida por König e Klocke (1997), que afirma que a força de corte varia 1,5% para cada grau do ângulo de saída. Nesta tabela alguns valores não puderam ser obtidos devido ao colapso da ferramenta durante o ensaio. Foi o caso das ferramentas de 18° na primeira bateria de ensaios com o aço AISI 1040 e a ferramenta de 20° na usinagem do aço AISI 1022 com b=3mm. Para o caso do segundo ensaio, com a ferramenta de 20°, não se pode utilizar o ensaio como referência, nesse caso utilizou-se a ferramenta de 18°.

Tabela 2. Variação percentual da força de corte.

$\gamma$	Segundo König e Klocke (1997)	1040 b=3mm	1040 b=3mm	1022 b=3mm	1022 b=4mm
16°	6,00%	7,00%	-23,00%	-15,18%	-8,61%
18°	3,00%		5,46%	0,00%	6,98%
20°	0,00%	0,00%	0,00%		0,00%
22°	-3,00%	0,77%	-6,85%	17,17%	-15,13%
24°	-6,00%	4,03%	-15,60%	-12,79%	-3,78%

Nota: os valores 1040 e 1022 correspondem à classificação AISI para aços.

Os resultados mostrados na Tab. (2) apresentam algumas discrepâncias em relação à variação de força de corte em função do ângulo de saída proposta por König e Klocke (1997). Isso se deve a fatores como o raio de arredondamento do gume, que é uma fonte de incertezas em relação às forças de usinagem, principalmente na usinagem de pequenas espessuras. Além desse, outro fator importante é a possível formação de gume postiço, que teria influência significativa na variação da força de corte.

Os resultados apresentados por Saglam *et al* (2007), que também realizaram experimentos para verificar a influência da variação do ângulo de saída na  $F_c$ , mostram que embora a variação percentual da  $F_c$ , quando analisada pontualmente, ou seja, de ensaio para ensaio, varie entre 0,8% e 2,9%, a média de seus valores é de 1,5%. Schroeter (1997), que também verificou a influência do ângulo de saída na  $F_c$  e obteve valores de variação da  $F_c$  entre 1,6% a 7% para cada grau do ângulo de saída, afirma que para avanços progressivamente menores a importância do ângulo de saída diminui gradualmente, o que pode ser explicado pelo crescente domínio do ângulo de saída efetivo, fortemente negativo para pequenas espessuras de usinagem, sobre o ângulo de saída nominal.

#### 4. SIMULAÇÃO DO MODELO DE FORÇA

A partir dos modelos da geometria e força, um algoritmo pode ser elaborado e implementado, sendo utilizado o software Matlab por apresentar algumas vantagens na programação, como a possibilidade de se utilizar uma matriz sem que haja a necessidade de dimensioná-la previamente, como é usual em outras linguagens, como linguagem C. Para uma aplicabilidade mais ágil e intuitiva, preferiu-se implementar o algoritmo utilizando programação com o uso de *Graphic User Interface* (GUI). A Figura (9) mostra a tela de entrada dos valores de geometria e parâmetros de corte.



Figura 8. Tela de entrada do algoritmo de simulação do brochamento (Gonçalves, 2009).

À esquerda da tela de entrada estão as caixas de texto onde devem ser informados os valores de geometria e parâmetros de corte referentes à ferramenta e à peça a ser usinada, como citado anteriormente. Logo abaixo das caixas de texto está o botão que inicia a simulação. Ao ser clicado, são rodados os algoritmos contendo os modelos desenvolvidos e em seguida os resultados aparecem no lado direito da tela. No canto superior direito são apresentados os principais resultados da simulação, em formato numérico. Abaixo desses resultados são mostrados os gráficos resultantes da simulação, como por exemplo, o comportamento da força de tração sobre a ferramenta. Esses gráficos podem ser selecionados no campo de seleção de gráficos.

Os dados de entrada para a simulação tanto da geometria da ferramenta quanto para os esforços aplicados sobre ela são mostrados na Tab. (3). Estes valores foram obtidos com base na geometria de uma ferramenta já existente e nos ensaios de força realizados.

Tabela 3. Parâmetros de entrada para a simulação.

Parâmetros de entrada	Valor	Unidade
Comprimento da região de corte	15,00	mm
Diâmetro inicial	16,10	mm
Diâmetro final	19,30	mm
Passo das ranhuras	117,27	mm
Passo do canal dos dentes	24,00	mm
Ângulo de hélice	27	°
Número de ranhuras	10	-
Número de canais de dentes	3	-
Largura da base dos dentes	3,70	mm
Largura da crista dos dentes	2,70	mm
Altura do canal dos dentes	3,00	mm
$k_{c1.1}$	1.692	N/mm <sup>2</sup>
$1-m_c$	0,82	adimensional
Velocidade de corte	10	m/min
Comprimento peça	15	mm
Ângulo de saída	20	°
Ângulo do chanfro de alívio	0	°
Diâmetro do cabo de tração	11,80	mm

Como saídas desse algoritmo, apresentam-se em forma de gráfico os seguintes valores de interesse: potência de corte, torque total, tração total, torque interno, tração interna, tensão cisalhante, tensão normal e tensão equivalente. Além disso, também são apresentados separadamente, em dados numéricos, os valores máximos de potência e tensão equivalente bem como o instante em que os mesmos acontecem.

Na simulação, tem-se que a somatória da força de corte dos gumes resultou em uma força de tração e um momento torçor, que variaram ao longo da ferramenta e ao longo do tempo. Para a força de tração, o valor máximo foi de 8.470 N e ocorreu no início da usinagem, mais precisamente no instante 0,15 s, conforme a Fig. (10a).

O comportamento da força de tração reflete exatamente o comportamento da força de corte sobre o eixo z, pois sua relação é linear. Nesse caso a força de corte é máxima onde o volume de cavaco usinado é máximo, ou seja, no início do processo, quando os gumes estão usinando todo o comprimento da peça e onde a largura dos gumes é maior.

Como resultado da simulação para o momento torçor, o valor máximo foi de 31.300 N.mm, conforme as Fig. (10b) e Fig. (10c). Como o torque é uma função da  $F_c$  e do raio da ferramenta na posição observada sobre a brocha, seu comportamento é, nesse caso, praticamente constante, pois embora a força de corte diminua durante o processo, o raio da ferramenta aumenta.

Através dos valores de força de tração e momento torçor, pode ser calculada a tensão equivalente sobre a ferramenta. Conforme pode ser visto na Fig. (10d), o valor de tensão máxima ocorreu também no início da ferramenta e no início da usinagem, em  $t=0,15$  s, e seu valor máximo foi cerca de 130 MPa.

A tensão de cisalhamento apresentou um comportamento praticamente constante ao longo do tempo de usinagem, sendo que seu valor máximo se localizou na posição 0 mm sobre o eixo z da ferramenta, Fig. (11a). Seu valor máximo foi de cerca de 80 MPa.

A tensão normal apresentou um pico máximo, de cerca de 60 MPa, na posição inicial da ferramenta, e no instante  $t=0,15$  s, Fig. (11b). Esse comportamento se deve à força de tração, que foi máxima no início da usinagem, e a área da seção transversal, que é menor no início da ferramenta.

A simulação resulta em três valores de tensão, permitindo ao projetista, definir critérios de projeto baseados nessas tensões, como por exemplo, para a tensão equivalente, o valor obtido foi de 130 MPa. Considerando-se um aço-rápido M2 comumente utilizado para essa aplicação, o valor para a tensão de escoamento fica em torno de 380-440 MPa. Ou seja, um coeficiente de segurança em torno de 3. Porém, embora este coeficiente de segurança pareça razoável, deve-se levar em conta a aproximação grosseira utilizada no cálculo de tensões, que aproxima a complexa geometria da brocha a um cilindro homogêneo.

O resultado da simulação para a potência de corte máxima foi cerca de 1,5kW, Fig. (11c). Por ser a velocidade de corte constante, a potência de corte máxima ocorreu na força de corte máxima, ou seja, no início da brocha e no início da usinagem, em  $t=0,15$ s.

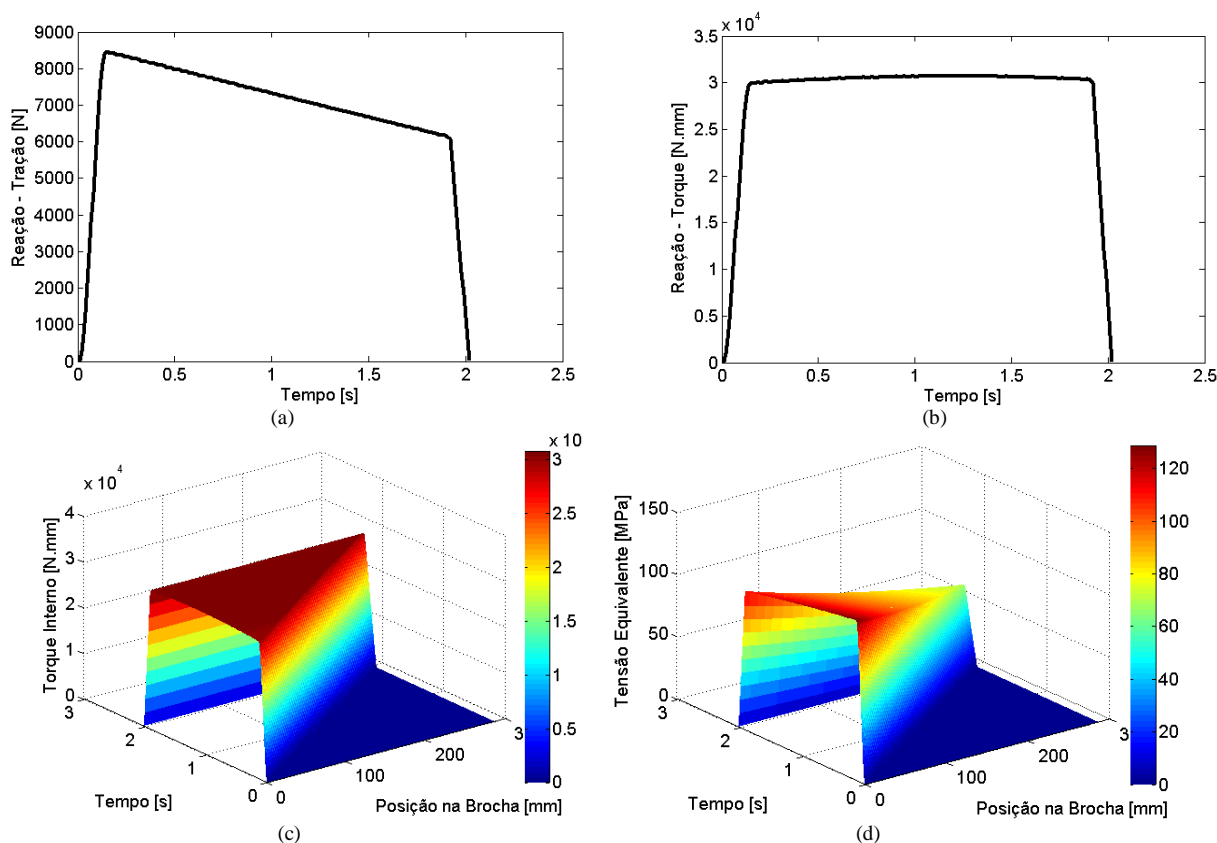
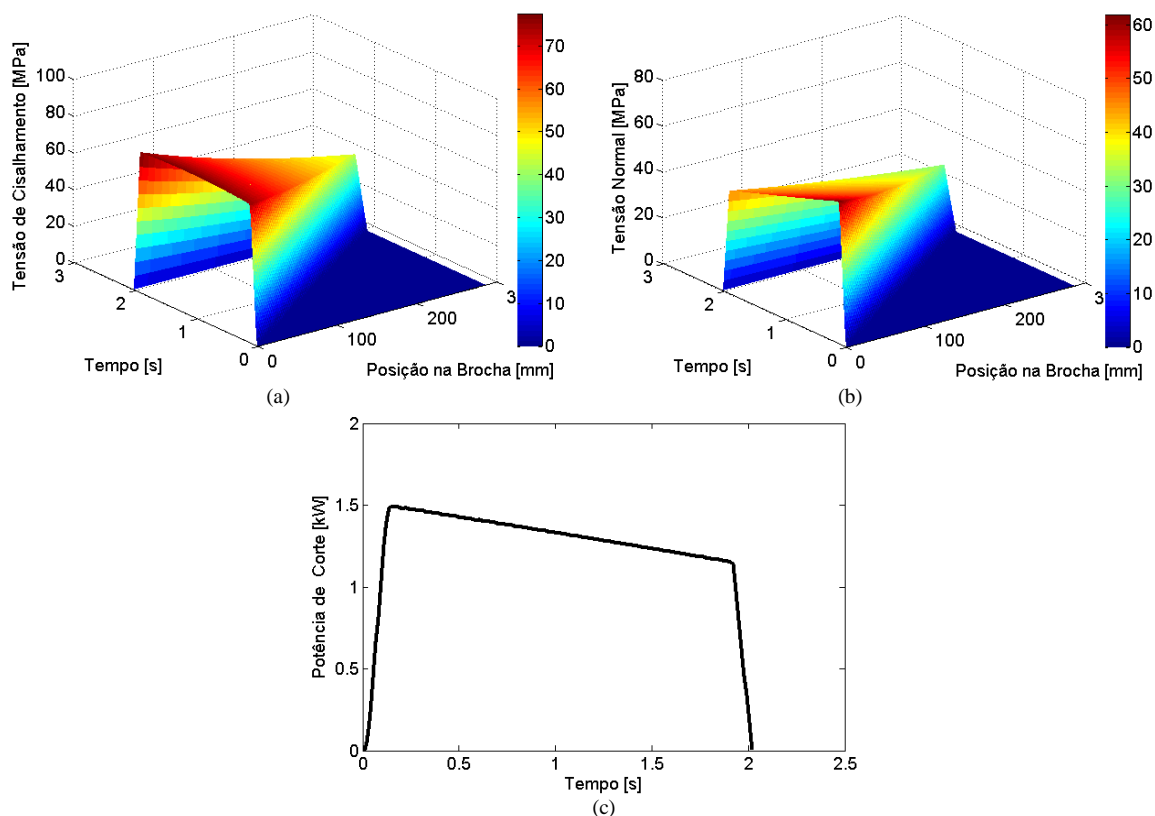


Figura 9. Resultados da simulação: (a) Reação – Tração, (b) Reação – Torque (c) Torque interno, (d) Tensão equivalente, (Gonçalves, 2009).





**Figura 10. Resultados da simulação: (a) Tensão de cisalhamento, (b) Tensão normal e (c) Potência de corte (Gonçalves, 2009).**

## 5. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma simulação computacional onde foram analisados os esforços sobre a ferramenta decorrentes do processo de brochamento. Para isso, utilizaram-se modelos matemáticos deduzidos do processo, tanto geométricos como cinemáticos e de esforços.

Para o modelo de força utilizou-se a equação de Kienzle, em função de sua praticidade e aplicação em uma extensa faixa de espessuras de usinagem. O valor obtido para as constantes da equação estão próximas às encontradas na literatura (Tabellenbuch, 1999).

Sobre o estudo da variação da força de corte com a variação do ângulo de saída, com os ensaios realizados pode-se concluir que a partir dos resultados apresentados, para este trabalho em particular a teoria proposta por König e Klocke (1997) necessita de uma adaptação ao processo de brochamento. Entretanto, até que não se desenvolva um modelo mais adequado cabe utilizá-la no presente estudo, já que não se verificou quantitativamente a influência de outros fatores sobre a força de corte, como o raio do gume e formação de gume postiço, por exemplo. Sendo assim, no algoritmo elaborado, o fator de correção para o ângulo de saída é de que para cada grau acrescido no ângulo de saída, 1,5% do valor da força de corte deve ser diminuído e vice-versa. O comportamento não linear observado nos resultados demonstra a dificuldade de se realizar ensaios em pequenas espessuras de usinagem. Fica clara a influência da espessura de usinagem sobre a força de corte, onde o raio do gume ( $\rho$ ) realiza uma parcela significativa do corte do material, como já mostraram outros estudos (Schroeter, 1997, Sutherland, 1996).

A simulação apresentou graficamente valores para tensão equivalente, tensão de cisalhamento e tensão normal, bem como valores de potência, tração, torque e valores geométricos. A forma como os dados simulados foram apresentados permite que se conheça o comportamento dos valores de tensão ao longo do ciclo de usinagem por toda a extensão da brocha, permitindo que o projetista tenha condições de prever eventuais falhas. Além disso, são fornecidos os valores máximos de potência, tração, torque e tensão equivalente devidos à usinagem. Os valores de potência servem como uma forma de dimensionar a ferramenta, quando a potência disponível na máquina ferramenta é crítica. A simulação da potência também serve para projetos de novas máquinas ferramentas, orientando o projetista na escolha certa dos servomotores e parâmetros de usinagem. Por ser um tema ainda em estudo e pela dificuldade apresentada, ainda não foi possível validar os modelos de força desenvolvidos, devido à grande dificuldade de se adaptar uma plataforma de aquisição de forças em uma brochadeira helicoidal. Também não foi possível a utilização de extensômetros como forma alternativa de se quantificar os esforços, pois, devido à natureza do movimento e em decorrência de barreiras físicas (tais como o mandril de fixação da brocha) não havia a possibilidade de se instalar o sensor. Em função da não validação dos modelos, recomenda-se que a utilização dos mesmos seja de forma qualitativa, ou seja, comparação entre as simulações geradas.

## 6. REFERÊNCIAS

- ASM, 1997, "Metals Handbook", Vol. 16, Machining, American Society for Metals.
- Gonçalves, D. A., von Paraski, H., Schroeter, R. B., 2009, "Description Of Helical Broach Geometry Using Mathematical Models Associated With CAD 3D Models" COBEM 2009, Gramado, RS, Brazil.
- Gonçalves, D. A., 2009, "Modelagem e Simulação das Forças no Brochamento". UFSC, Florianópolis/SC. Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Santa Catarina, novembro de 2009.
- König, W., Klocke, F., 1997, "Tecnologia da Usinagem com Ferramentas de Corte de Geometria Definida - Parte 1", 5ª. Berlin : Springer-Verlag. Traduzido e adaptado por Rolf Bertrand Schroeter e Walter Lindolfo Weingaertner do livro "Fertigungsverfahren – Drehen, Fräsen, Bohren".
- Saglam, H. Yaldiz, S. Unsacar, F., 2007, "The effect of tool geometry and cutting speed on main cutting force and tool tip temperature". Materials and Design. 28, p. 101-111.
- Schroeter, R. B., 1997, "Usinagem de Ultraprecisão de Elementos Ópticos Transmissivos. Florianópolis", UFSC. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Santa Catarina.
- SME, 1983, "Tool and Manufacturing Engineers Handbook", Vol 1: Machining. Fourth Edition.
- Stemmer, C. E., 2005, "Ferramentas de corte II", 3ª ed, Ed. UFSC, Florianópolis, Brazil, 314 p.
- Sutherland, J.W., Salisbury, E.J. and Hoge, F.W., 1996, "A Model for the Cutting Force System in the Gear Broaching Process", Int. J. Mach. Tools Manufact. Vol. 37, No. 10, pp. 1409-1421.
- Europa Lehrmittel. "Tabellenbuch Metall". 41 ed. Haan-Gruiten: Europa- Lehrmittel, 1999. 383 p.

## 7. DIREITOS AUTORAIS

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

**Daniel Amoretti Gonçalves, daniagon@terra.com.br**  
**Henrique von Paraski, henrique@vonparaski.com**  
**Rolf Bertrand Schroeter, rolf@emc.ufsc.br**

Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP), UFSC, Caixa Postal-476 EMC, 88.010-970 Florianópolis/SC, Brasil

**Abstract:** *Considering the difficulties imposed by the economy, companies are forced to constantly renew their knowledge and their know-how, always seeking to develop and to optimize their production methods. Thus, the broaching process appears as an application for many situations when high productivity is the central factor. The efficiency of the process can be seen as an increase of quality by reducing pieces with deficiencies, increasing productivity, reducing operating time and costs. The process of helical broaching uses a single special tool that performs roughing, semi-finishing and finishing operations in single a machining cycle. Due to this characteristic, the broach is considered a tool of high cost, compared to other tools such as drilling or boring tools. Accordingly, to obtain a correct dimensioning of the tool in the broaching process, an accurate knowledge of the loadings that act on the tool is needed. Values such as stress, traction forces and, in the case of helical broaching, torque guide the tool designer in the design of the tool critic parts. To obtain these values, turning tests were made simulating a single tooth of the broach. These tests allow to learn about key characteristics such as the specific cutting forces of the material and the variation of the forces for the rake angle variation, then the corrections coefficients for the rake angle could be obtained. These coefficients, the specific cutting forces and the geometric features of the cutting tool are used as input data for the algorithm which simulates the force models. Thus, it is possible to obtain the values of tension, traction and torque on the broach and thereby to verify that the tool resists to the loadings which could act on the broaching tool during broaching.*

**Keywords:** *Broaching, forces, simulation*

## RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.