



HAL
open science

INFLUÊNCIA DA PROFUNDIDADE DE CORTE E DO AVANÇO NA FORÇA DE CORTE NO FRESAMENTO DE FACEAMENTO

Daniel Oliveira de Lima, Anna Carla Araujo, Jose Luis Lopes Silveira

► **To cite this version:**

Daniel Oliveira de Lima, Anna Carla Araujo, Jose Luis Lopes Silveira. INFLUÊNCIA DA PROFUNDIDADE DE CORTE E DO AVANÇO NA FORÇA DE CORTE NO FRESAMENTO DE FACEAMENTO. VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2012, São Luis, Brazil. hal-03212870

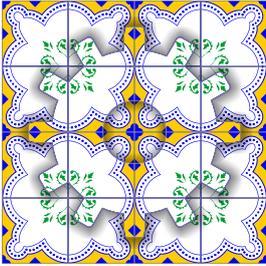
HAL Id: hal-03212870

<https://hal.science/hal-03212870>

Submitted on 30 Apr 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



INFLUÊNCIA DA PROFUNDIDADE DE CORTE E DO AVANÇO NA FORÇA DE CORTE NO FRESAMENTO DE FACEAMENTO

Daniel Oliveira de Lima, daniel.lima@ifrj.edu.br¹

Anna Carla Araujo, anna@mecanica.ufrj.br^{1,2}

José Luis Lopes da Silveira, jluis@mecanica.ufrj.br^{1,2}

¹Programa de Engenharia Mecânica - COPPE/UFRJ - Rio de Janeiro - RJ, Brasil

²Departamento de Engenharia Mecânica - UFRJ - P.O. Box 68.503, CEP 21.941-972 - Rio de Janeiro - RJ, Brasil

Resumo: Com a globalização e os recentes avanços das máquinas ferramenta na indústria de manufatura, se faz necessário uma busca contínua por melhores processos, visando a redução de custo e aumento de produtividade, que é uma condição fundamental para se conquistar novos mercados. O objetivo desse trabalho é utilizar os resultados obtidos em experimentos, para obter parâmetros de corte mais adequados através de recursos computacionais, visando a otimização dos processos e tornando possível determinar o menor custo e o aproveitamento máximo dos recursos das máquinas e das ferramentas de corte. Este estudo propõe avaliar através de um experimento, as forças de corte no fresamento de faceamento, utilizando uma fresa de facear com diâmetro de 63 mm e velocidade de corte de 396 m/min. A velocidade de corte foi mantida constante em todos os testes, e foram efetuadas mudanças na profundidade de corte e no avanço. As forças de corte foram medidas com um dinamômetro e os valores das pressões específicas de corte K_t , K_r e K_a foram calculados para todos os testes. A partir dos resultados de todos os testes é realizada uma análise de variância para determinar a influência da variação dos parâmetros no cálculo da pressão específica e conseqüentemente nas forças de corte e na vida da ferramenta. Os resultados revelaram que o avanço tem uma maior contribuição nos valores de K_t e K_r e a profundidade de corte teve uma maior contribuição na variação do K_a .

Palavras-chave: Forças de Usinagem, Fresamento de Faceamento, ANOVA.

Nomenclatura:

- F_x - força na direção X
- F_y - força na direção Y
- F_z - força na direção Z
- F_t - força tangencial
- F_r - força radial
- F_a - força axial
- A - ângulo da posição angular da aresta da ferramenta
- n - rotação
- a_p - profundidade de corte
- f_z - avanço por dente
- f - avanço por volta
- t - espessura do cavaco
- K - pressão específica de corte
- A - área da seção do cavaco
- a - número de níveis de f_z
- b - número de níveis de a_p
- r - número total de ensaios em cada teste
- SS_{f_z} - soma dos quadrados de f_z
- SS_{a_p} - soma dos quadrados de a_p
- MS_{f_z} - quadrados médios de f_z
- MS_{a_p} - quadrados médios de a_p
- F_0 - razão entre cada quadrado médio e o quadrado médio dos erros
- P - value - valor tabelado da função F de distribuição

1. INTRODUÇÃO

Na indústria o processo de faceamento é amplamente utilizado nos mais diversos processos de usinagem, por ser um processo tão importante, muitos estudos têm sido realizados com o objetivo de melhorar a qualidade do processo, das ferramentas e das trajetórias de corte, normalmente geradas pelos sistemas CAD/CAM. Na cadeia produtiva o objetivo é sempre tentar reduzir o número de ferramentas envolvidas no processo e tempos de usinagem, o que refletirá diretamente na redução de custos, mas sem prejuízo na qualidade do produto. Em muitos casos, o faceamento pode eliminar outros processos, contribuindo assim na redução de tempo de fabricação. O desenvolvimento de novas ferramentas para faceamento, novos suportes porta-ferramenta, máquinas cada vez mais rígidas, com maior precisão, pode contribuir para garantir o mínimo de vibração e um acabamento superficial cada vez melhor. Sabe-se que a própria dinâmica do corte provoca grande parte da vibração e segundo o estudo realizado por Kin and Ehmann (1993) sobre a dinâmica do corte, os motores de acionamento da máquina-ferramenta, podem também ter uma parcela de contribuição nas vibrações do processo, logo pode-se afirmar que em todo processo de usinagem, deve-se garantir ao máximo, a rigidez do processo, para assim poder garantir a qualidade do corte e confiabilidade na obtenção dos dados para posterior análise (Altintas, 2000).

O fresamento de faceamento é um processo que, através dos anos, tem recebido merecida atenção por parte da literatura e dos pesquisadores. Martellotti (1975) iniciou o desenvolvimento das equações matemáticas para o processo de fresamento relacionando a espessura do cavaco com as forças de corte. No faceamento a seção de corte varia durante a remoção do material e as componentes das forças de corte variam no tempo. Koenigsberger and Sabberwal (1961) realizaram um estudo experimental das forças de corte no faceamento onde foi adicionada a parcela de desbalanceamento da ferramenta em relação ao eixo e diversos pesquisadores têm investigado os fenômenos envolvidos no fresamento de faceamento com ferramentas de modelagem computacional (Andersson *et al.*, 2011).

Quando se considera a ferramenta rígida, existem três principais abordagens para se prever as forças de corte: empírica, analítica e mecânica ou mecanicista (E. J. A. Armarego, 1969). Em todas elas, é necessário se realizar uma avaliação experimental, monitorando o desgaste da ferramenta, para se determinar qual dessas reduz o erro entre o experimento e o modelo com um custo computacional que seja compatível com a precisão desejada. Jayaram *et al.* (2001) utilizam um modelo mecânico considerando que a força de corte é proporcional à área da seção transversal do cavaco e que permite calcular constantes de proporcionalidade, chamadas de pressões específicas, nas direções das componentes da força. Estas constantes variam com a geometria da ferramenta, com as condições de corte, com a classe do inserto e com as propriedades do material e da peça. Araujo and Silveira (2001) utilizaram este método incluindo uma parcela adicional, que varia com o comprimento da aresta, à parcela que é proporcional à área do cavaco.

Nos últimos anos, as grandes indústrias vêm utilizando cada vez mais novas tecnologias na otimização de seus processos de manufatura, a metodologia que é amplamente utilizada nos últimos anos é conhecida como planejamento e análise estatística de experimentos (Montgomery, 2005). Este método tem atingido excelentes resultados e tem se mostrado muito eficiente na solução dos novos desafios em processos de fabricação, que por sua vez, estão cada vez mais bem elaborados, objetivando principalmente qualidade e baixo custo de produção. Em paralelo a evolução desta metodologia de planejamento de experimentos, a análise de variância (ANOVA) vem se mostrando muito eficiente na avaliação dos dados obtidos no experimento, visando mostrar de forma objetiva, qual é a influência de cada variável do sistema, e de que maneira ela pode influenciar no processo em estudo (Li *et al.*, 1999). Yang YK, Chuang MT, Lin SS (Yang *et al.*, 2009) utilizaram este método para aperfeiçoar os dados de corte no fresamento de grafite sem fluido de corte.

Neste artigo é utilizada a abordagem mecanicista para calcular a pressão específica nas direções tangencial, radial e vertical da fresa de facear, a partir de dados experimentais das forças de corte no referencial da mesa da máquina ferramenta.

2. FORÇAS DE CORTE NO FACEAMENTO

A geometria do processo de usinagem de fresamento de faceamento é simples se comparada ao fresamento de topo pois o ângulo de hélice dos insertos e a profundidade de corte são bem menores. Desta forma a análise tridimensional do corte pode ser apresentada através da vista superior da região do corte, como pode-se verificar na Figura 1.

A espessura do cavaco varia com a rotação da ferramenta e pode ser calculada como função do avanço por dente f_z e do ângulo A apresentado na Fig. 1 através da relação de Martellotti (1975):

$$t(A) = f_z \cdot \text{sen}(A) \quad (1)$$

A partir da área instantânea do cavaco, pode-se calcular a força de corte considerando as três componentes de forças: radial F_r , tangencial F_t , representadas na Figura 1, e axial F_a perpendicular ao plano representado na Fig.1. Estas forças estão diretamente relacionadas à geometria da ferramenta, do material da ferramenta e da peça.

$$F_r = K_r \cdot a_p \cdot f_z \cdot \text{sen}(A) \quad (2)$$

$$F_t = K_t \cdot a_p \cdot f_z \cdot \text{sen}(A) \quad (3)$$

$$F_a = K_a \cdot a_p \cdot f_z \cdot \text{sen}(A) \quad (4)$$

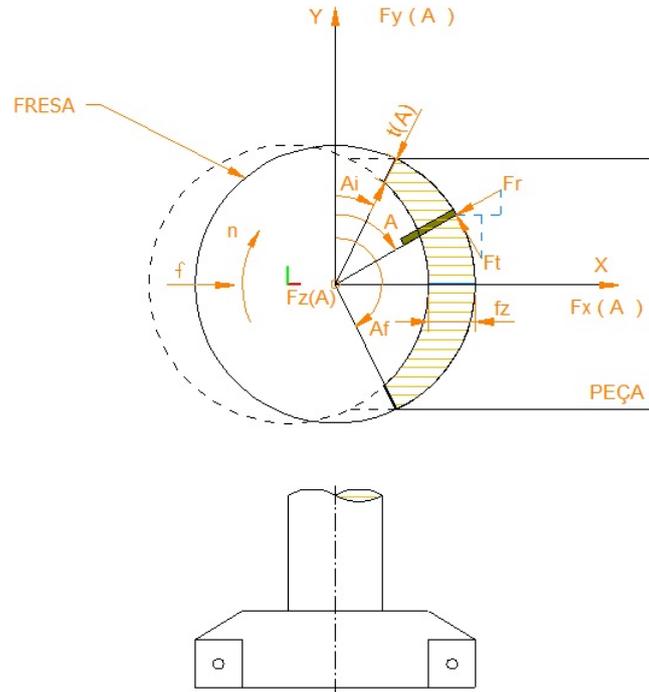


Figura 1: Geometria do Corte e Componentes da Força de Corte no Fresamento de Faceamento

Desta forma, é necessário conhecer as constantes de proporcionalidade (pressões específicas em cada direção: K_r , K_t e K_a , que podem ser representadas por um vetor \vec{K} que carrega os três valores escalares de K . A força de uma aresta de corte i na posição angular A pode ser expressa por:

$$\vec{F}_i = \begin{bmatrix} F_t \\ F_r \\ F_a \end{bmatrix} = \vec{K} \cdot a_p \cdot f_z \cdot \text{sen}(A) = \begin{bmatrix} K_t \\ K_r \\ K_a \end{bmatrix} \cdot a_p \cdot f_z \cdot \text{sen}(A) \quad (5)$$

2.1 Decomposição das Forças nos Eixos Principais

As três componentes da força de corte no referencial do inserto (F_t , F_r e F_a) estão em direções em que não coincidem com as direções dos eixos do dinamômetro fixo na mesa da máquina. A decomposição das três forças nos eixos do dinamômetro F_x , F_y e F_z , em função da posição angular, pode ser calculada pelas equações (6), (7) e (8). Para facilitar, é conveniente alinhar os eixos do dinamômetro aos eixos da máquina.

$$F_x = -F_t \cdot \cos(A) - F_r \cdot \text{sen}(A) \quad (6)$$

$$F_y = F_t \cdot \text{sen}(A) - F_r \cdot \cos(A) \quad (7)$$

$$F_z = F_a \quad (8)$$

2.2 Cálculo das Pressões Específicas

Para calcular os valores das pressões específicas a partir das componentes da força na direção dos eixos da máquina F_{xyz} utiliza-se a matriz de transformação \mathbf{T} :

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} -\cos(A) & -\text{sen}(A) & 0 \\ -\text{sen}(A) & \cos(A) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (9)$$

A força F_{xyz} é calculada a partir de F_t , F_r e F_a por:

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} = \mathbf{T} \cdot \begin{bmatrix} F_t \\ F_r \\ F_a \end{bmatrix} \quad (10)$$

Para calcular as componentes do vetor de pressões específicas \vec{K} em cada posição angular A utiliza-se a equação (11):

$$\vec{K} = \frac{F_{xyz} \cdot \mathbf{T}^{-1}}{f \cdot a_p \cdot \text{sen}(A)} \quad (11)$$

O valor de cada componente de \vec{K} pode ser considerado constante ao longo do tempo, e da posição angular do inserto. Desta forma basta realizar o cálculo em alguns pontos da força, se for conhecida a posição angular. Quando o valor da força resultante F_{res} for máximo por passe da aresta, sabe-se que a posição angular é 90° e pode-se escolher este ponto para realizar o cálculo da pressão específica. O trabalho experimental desenvolvido utiliza esta técnica para identificar as forças de corte no referencial do inserto.

$$F_{res} = \sqrt{F_r^2 + F_t^2 + F_a^2} = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (12)$$

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Com o objetivo de estudar a influência dos parâmetros de avanço por dente e da profundidade de corte na pressão específica, foram realizados testes com velocidade de corte constante. Os experimentos foram realizados em um centro de usinagem ROMI, modelo Polaris V400, com uma fresa de facear Sandvik, R290-063Q22-12L, com diâmetro de 63 mm e um inserto de metal duro da classe classe 4030. Considerando que a montagem da ferramenta não apresenta inclinação no eixo de rotação e utilizou-se um único inserto para garantir maior precisão na profundidade de corte e evitar diferenças de altura de um inserto em relação ao seguinte, o que provocaria uma variação de área do cavaco e de forças desnecessariamente. A velocidade de corte utilizada em todos os testes foi de 396 m/min.

Inicialmente fixamos o dinamômetro Kistler (modelo 9257 AB) no centro da mesa do centro de usinagem, tomando-se o cuidado para garantir um perfeito alinhamento dos eixos do dinamômetro com os eixos da máquina, usando-se para isso um relógio comparador, assim pode-se garantir a qualidade dos sinais amplificados pelo condicionador de sinais Kistler (modelo 5233A1). Em seguida fixamos a barra de alumínio 6351T6, com diâmetro de cinco polegadas. Depois de conferido todas as fixações, a montagem da ferramenta, o pre-setting da ferramenta, definimos a origem do programa e a transferência do programa para a memória do comando, pode-se iniciar os testes. Foram realizados oito testes de usinagem transversal radialmente a barra, passando pelo centro da mesma, em cada corte variou-se a profundidade e o avanço de forma aleatória, conforme apresentado na Tabela 3. A leitura das forças se iniciaram quando a fresa atingiu um ângulo de contato de 180° . A aquisição dos sinais foi realizada conectando o condicionador de sinais a uma placa de aquisição de sinais National Instruments (modelo NI-USB-6251). Esta placa transmitiu os sinais das componentes das forças nas direções X, Y e Z para um computador utilizando o software *LabView*. Um osciloscópio digital, auxiliou na definição dos sinais de saída. As variáveis utilizadas são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Dados do Experimento

Rotação	2000 RPM
Diâmetro da Ferramenta	63 mm (Sandvik R290-063Q22-12L)
Velocidade de corte (V_c)	396 m/min
Avanço por dente (f_z) - Com dois níveis	0,1 e 0,2 mm/dente
Profundidade de corte (ap) - Com dois níveis	0,8 e 1,6 mm
Material	Alumínio 6351T6
Pastilha	Metal Duro - classe 4030
Frequência de Amostragem	4 kHz

3.1 Planejamento de Experimentos

A análise de variância (ANOVA) visa fundamentalmente verificar se existe uma diferença significativa entre as médias de uma variável de saída com a variação de um ou mais parâmetros do experimento, isto é, se os fatores exercem influência em alguma variável dependente. Dessa forma, permite que vários grupos sejam comparados simultaneamente a partir de um conjunto de experimentos propriamente planejado. Assim quanto maior for a média da primeira comparada à segunda, maior é a evidência de que existe variabilidade entre grupos, ou seja, médias diferentes. Os fatores podem ser de origem qualitativa ou quantitativa e a variável dependente deverá ser necessariamente contínua.

O modelo utilizado neste experimento é um dos modelos mais simples, é chamado de *Two-Factor Factorial Design*, onde apenas duas variáveis a_p e f_z são observadas. Onde a variável a_p possui 2 níveis e a variável f_z também com 2 níveis, e uma réplica em cada teste foi realizada, isto é, totalizando $2 \times 2 \times 2 = 8$ testes. Sempre que uma ANOVA é feita é usual expressar os resultados conforme a Tabela 2.

Neste experimento foi decidido testar dois níveis de avanço e dois níveis de profundidade de corte e a partir daí calcular as médias das componentes do vetor pressões específicas \vec{K} na posição angular $A = 90^\circ$, para isso utiliza-se a equação (11). Os valores médios calculados de K_i em cada teste, são apresentados na Tabela 5. Com estes resultados obtidos, deseja-se determinar a influência da variação dos parâmetros de corte no cálculo da pressão específica que são particularmente importantes, pois possibilita o técnico de métodos e processos definir melhor os parâmetros de corte ideais para prolongar a vida da ferramenta com a qualidade superficial exigida, com o mínimo de vibração e principalmente com redução de custos de processo e por outro lado possibilita também ao fabricante de ferramentas melhor dimensionar o projeto da ferramenta.

Tabela 2: Tabela de Análise de Variância - ANOVA

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Gr. Liberdade	Quadrados Médios	Fator F	Prob.>F
f_z	SS_{f_z}	a-1	$MS_{f_z} = \frac{SS_{f_z}}{a-1}$	$F_0 = \frac{MS_{f_z}}{MS_E}$	
a_p	SS_{a_p}	b-1	$MS_{a_p} = \frac{SS_{a_p}}{b-1}$	$F_0 = \frac{MS_{a_p}}{MS_E}$	
$f_z \cdot a_p$	$SS_{f_z \cdot a_p}$	(a-1).(b-1)	$MS_{f_z \cdot a_p} = \frac{SS_{f_z \cdot a_p}}{(a-1).(b-1)}$	$F_0 = \frac{MS_{f_z \cdot a_p}}{MS_E}$	
Erro	SS_E	a.b.(r-1)	MS_E		
Total	SS_T	a.b.r - 1			

Tabela 3: Planejamento de Experimentos e Testes

	Parâmetro	Baixo (-1)	Alto (+1)
P_1	Avanço por dente - f_z (mm/dente)	0,1	0,2
P_2	Profundidade de corte - a_p	0,8	1,6

Neste trabalho definiu-se dois níveis extremos da faixa de valores definidas pelo fabricante da ferramenta para as duas variáveis f_z e a_p e realizou-se um planejamento fatorial 2^2 com uma réplica por experimento, como pode ser observado na Tabela 3. A seqüência de cada teste foi realizada de forma aleatória, como pode-se observar na Tabela 4.

Tabela 4: Sequência dos Experimentos

Ordem	Experimento	Réplica	P_1	P_2	a_p	f_z
1	1	1	-1	-1	0,8	0,1
2	2	1	1	-1	1,6	0,1
3	3	1	-1	1	0,8	0,2
4	4	1	1	1	1,6	0,2
5	2	2	1	-1	1,6	0,1
6	4	2	1	1	1,6	0,2
7	3	2	-1	1	0,8	0,2
8	1	2	-1	-1	0,8	0,1

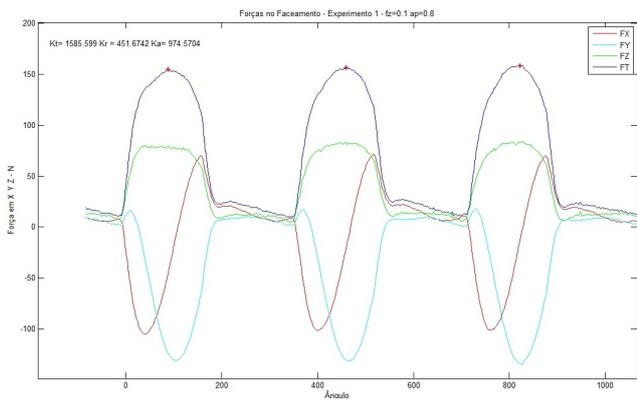
3.2 Cálculo das Pressões Específicas K_i

A partir das equações (6), (7) e (8), as componentes F_t , F_r , F_a foram calculadas a partir do ponto onde a força resultante é máxima, considerando que neste ponto $A = 90^\circ$. Nas Figuras 2, 3, 4 e 5 foram evidenciados os três primeiros pontos de valores máximos das força, das três primeiras voltas, para melhor visualização.

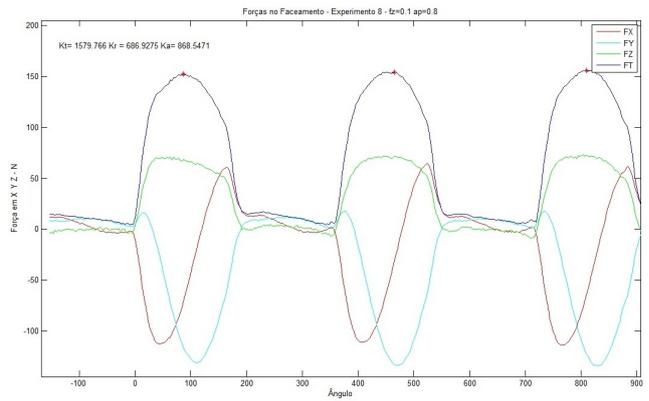
As Figuras 2, 3, 4 e 5 foram extraídas respectivamente dos sinais dos experimentos de 1 a 4. As Figuras 2a, 3a, 4a e 5a mostram resultados da primeira réplica e as Figuras 2b, 3b, 4b e 5b da segunda réplica. Nas figuras são apresentadas as componentes F_x , F_y , F_z e o módulo da força resultante F_{res} .

3.3 Resultados de Pressões Específicas

Em cada teste os sinais adquiridos pelo dinamômetro foram utilizados para calcular os valores médios de K_t , K_r e K_a no software *Matlab*, a partir de uma seqüência de rotações. A cada rotação as pressões foram calculadas e armazenadas para análise estatística evidenciados em vermelho nas Fig. 2 a 5. Em cada um destes pontos os valores de K_i , que estão impressos no canto superior esquerdo de cada gráfico, e compoem a Tabela 5.

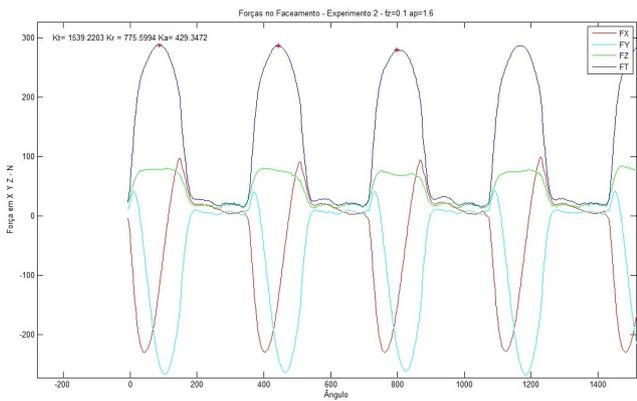


(a) Experimento 1 - Réplica 1

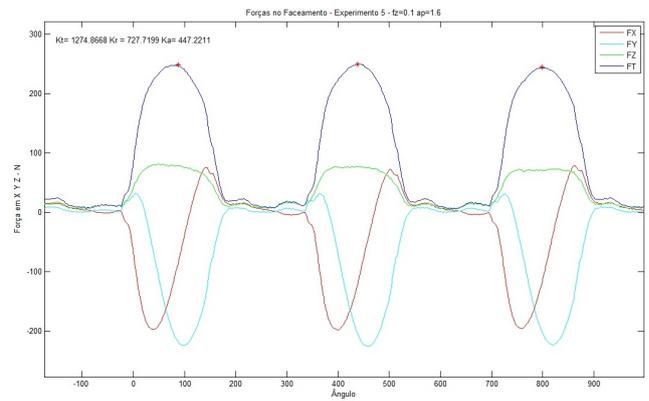


(b) Experimento 1 - Réplica 2

Figura 2: Componentes das forças no experimento 1

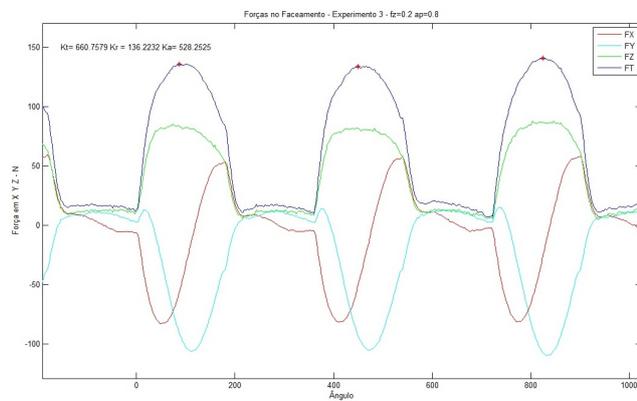


(a) Experimento 2 - Réplica 1

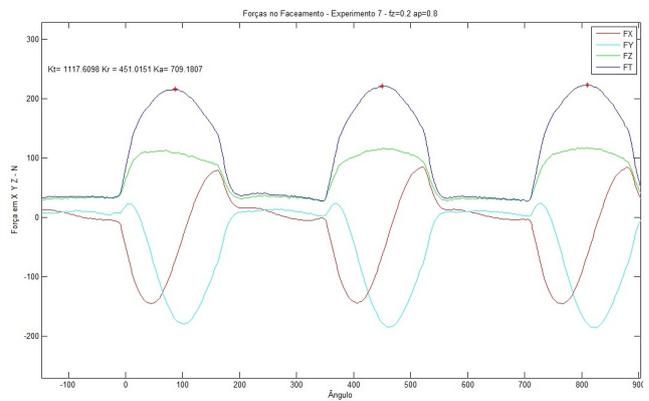


(b) Experimento 2 - Réplica 2

Figura 3: Componentes das forças no experimento 2



(a) Experimento 3 - Réplica 1



(b) Experimento 3 - Réplica 2

Figura 4: Componentes das forças no experimento 3

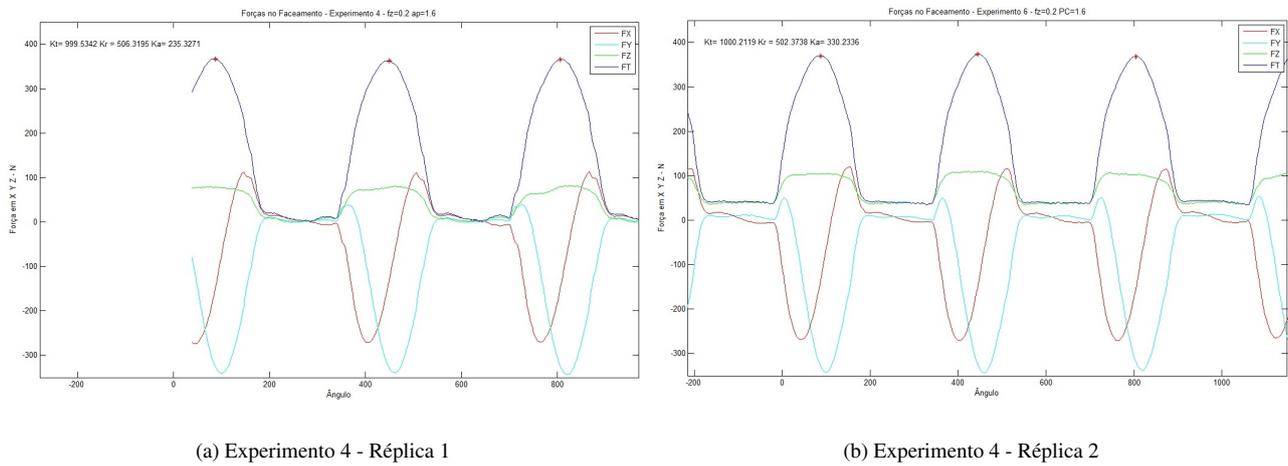


Figura 5: Componentes das forças no experimento 4

Tabela 5: Pressões Específicas Médias de cada Teste (N/mm^2)

Ordem (Exp/rep)	K_t	K_r	K_a
1 (1/1)	1585,5	451,6	974,6
2 (2/1)	1539,2	775,6	429,3
3 (3/1)	660,7	136,2	528,2
4 (4/1)	999,5	506,3	235,3
5 (2/2)	1274,8	727,7	447,2
6 (4/1)	1000,2	502,4	330,2
7 (3/2)	1117,6	451,0	709,2
8 (1/2)	1579,7	686,9	868,5

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A partir dos valores apresentados na Tabela 6, foi realizada uma análise de variância em função do avanço e da profundidade de corte. Os resultados ANOVA das variáveis de saída K_t , K_r e K_a estão apresentados nas Tabelas 6, 7 e 8 respectivamente. Cada tabela contém os valores da soma de quadrados da fonte de variação, o número de graus de liberdade de cada variável, o fator F associado e a avaliação da função teste. Uma vez fixado o nível de significância do teste, H_0 deve ser rejeitado se $F > F_{1-\alpha}$.

Tabela 6: Análise de Variância para valores de K_t

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Gr. Liberdade	Quadrados Médios	Fator F	Prob.>F
f_z	605736.3	1	605736.3	17.39	0.014
a_p	2109.2	1	2109.2	0.06	0.8177
$f_z \cdot a_p$	40991.9	1	40991.9	1.18	0.339
erro	139315.5	4	34828.9		
Total	788152.9	7			

A partir dos valores da Análise de Variância para os valores de K_t , apresentados na Tabela 6, podemos concluir que existem evidências estatisticamente significativas ao nível de 97.5% na interação do avanço. Comparando o maior valor de $F_0 = 17.39$, consultando a tabela de $F_{1,4}$ (Montgomery, 2005) e considerando o valor de $\alpha = 0.025$, foi encontrado o valor de $F_{0.025,1,4} = 12.22$, que é inferior ao valor calculado, pode-se concluir que o avanço tem uma contribuição muito maior para o valor de K_t do que a profundidade de corte, desta forma pode-se considerar que o limite superior para P-value é 0.025.

Tabela 7: Análise de Variância para valores de K_r

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Gr. Liberdade	Quadrados Médios	Fator F	Prob.>F
f_z	136761.7	1	136761.7	6.98	0.0575
a_p	77258.4	1	77258.4	3.94	0.118
$f_z \cdot a_p$	402.4	1	402.4	0.02	0.893
erro	78373	4	19593.3		
Total	292795.6	7			

A partir dos valores da Análise de Variância para os valores de K_r , apresentados na Tabela 7, podemos concluir que existem evidências estatisticamente significativas ao nível 90% na interação do avanço. Comparando o maior valor de $F_0 = 6.98$, consultando a tabela de $F_{1,4}$ (Montgomery, 2005) e considerando o valor de $\alpha = 0.1$, foi encontrado um valor de $F_{0.1,1,4} = 4.54$ que é inferior ao valor calculado. Pode-se concluir que o avanço tem uma contribuição muito maior para o valor de K_t do que a profundidade de corte, desta forma pode-se considerar o limite superior para P-value é 0.1.

Tabela 8: Análise de Variância para valores de K_a

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Gr. Liberdade	Quadrados Médios	Fator F	Prob.>F
f_z	105040.5	1	105040.5	15.77	0.0165
a_p	335553.2	1	335553.2	50.36	0.0021
$f_z \cdot a_p$	10854.3	1	105040.5	1.63	0.2709
erro	26651	4	6662.8		
Total	478099.3	7			

A partir dos valores da Análise de Variância para os valores de K_a apresentados na Tabela 8. Podemos concluir que existem evidências estatisticamente significativas ao nível 99% na interação da profundidade de corte. Comparando o maior valor de $F_0 = 50.36$ com o valor da tabela $F_{1,4}$ (Montgomery, 2005) e considerando o valor de $\alpha = 0.01$, foi encontrado um valor de $F_{0.01,1,4} = 21.20$, que é inferior ao valor de F_0 calculado, Pode-se concluir que a profundidade de corte tem uma contribuição muito maior para o valor de K_a do que o avanço, desta forma pode-se considerar o limite superior para P-value é 0.01.

5. CONCLUSÕES

Considerando as variações das forças por parte dos erros de aquisição dos dados, da excentricidade do fuso, da fixação do inserto e pelo que demonstram os resultados obtidos através da Análise de Variância para os valores de K_i apresentados na Tabela 6, 7 e 8, podemos concluir que existem evidências estatísticas significativas que demonstram que a influência da variação dos parâmetros no cálculo da pressão específica e conseqüentemente nas forças de corte e na vida da ferramenta, revelaram que o avanço tem uma maior contribuição nos valores de K_t e K_r e a profundidade de corte teve uma maior contribuição na variação do K_a . Assim esse resultado possibilita ao técnico de métodos e processos selecionar melhor os parâmetros de corte ideais para que se aumente a vida da ferramenta, com a rugosidade desejada, gerando redução de custos com ferramentas e redução nos tempos de fabricação, bem como possibilitando ao fabricante de ferramentas avaliar os dados obtidos e melhor dimensionar a ferramenta.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, a CAPES e a COPPE/UFRJ pelos investimentos de pesquisa realizados no laboratório CEFCON. Agradecemos ao CEFET/RJ pela cooperação em pesquisa em modelagem e monitoramento de forças de usinagem e a utilização multi-usuários de equipamentos nesta área. Por fim, ao Departamento e Programa de Engenharia Mecânica por possibilitar a estrutura necessária de pesquisa.

7. REFERÊNCIAS

- Altintas, Y., 2000. *Manufacturing automation*. Cambridge University Press, New York, 1st edition.
- Andersson, C., M.Andersson and Stahl, J., 2011. "Experimental studies of cutting force variation in face milling". *Journal of Machine Tools and Manufacturing*, Vol. 51, pp. 67–76.
- Araujo, A.C. and Silveira, J., 2001. "The influence of specific cutting force on end milling models". *16th Brazilian Congress of Mechanical Engineering*, Vol. 14, pp. 486–495.
- E. J. A. Armarego, R.H.B., 1969. *The machining of metals*. Prentice-Hall, Inc. New Jersey.
- Jayaram, S., Kapoor, S. and DeVor, R., 2001. "Estimation of the specific cutting pressures for mechanistic". *Int. J. Mach. Tools Manufacturing*, Vol. 41, pp. 265–281.
- Kin and Ehmann, 1993. "A cutting force model for face milling operations". *Int. J. Mach. Tools Manufact*, Vol. 33/5, pp. 651–673.
- Koenigsberger, F. and Sabberwal, J.P., 1961. "An investigation into the cutting force pulsations during milling operations,". *Int. J. Mach. Tool Design and Research*, Vol. 1, p. 15.
- Li, X., Nee, A., Wong, Y. and Zheng, H., 1999. "Theoretical modelling and simulation of milling forces". *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 89/90, pp. 266–272.
- Martellotti, M., 1975. "An analysis of the milling processes". *Annals of CIRP*, Vol. 40/1, pp. 213–221.
- Montgomery, D.C., 2005. *Design and Analysis of Experiments*. Cambridge University Press, New York, 6th edition.
- Yang, Y.K., Chuan, M.T. and Lin, S.S., 2009. "Optimization of dry machining parameters for high-purity graphite in end milling process via design of experiments methods". *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209/1, pp. 4395–4400.

8. DIREITOS AUTORAIS

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

EFFECT OF DEPTH OF CUT AND FEED RATE ON CUTTING FORCES IN FACE MILLING

Abstract: *The recent advances in machine-tool manufacturing industry induces a continuous search for better processes, cost reduction and productivity increase and it is a fundamental need to conquer new markets. The major motivation of this research is to use the practical results obtained in experiments and seek to optimize the data through computational resources. The optimization of the processes and making it possible in determining the lowest cost and maximum utilization of machines and tools. The objective of this study is to analyze the variation of two parameters in face milling and its effects in the cutting forces. The cutting speed was kept constant and changes was performed in the depth of cut and feed rate, which were made four experiments, each with two replicates. A dynamometer was used for the acquisition of the forces and the data is analyzed in several revolutions. In each file generated by the dynamometer, the values of the specific pressure components K_t , K_r and K_a were calculated from the point where the force is maximum at every revolution. Average values were calculated and compared with the other tests. ANOVA study is applied to the experiments in order to conclude the influence of the parameters in the cutting pressure.*

Keywords: *Machining Forces, Face Milling, ANOVA.*