



HAL
open science

EFEITOS DE PARÂMETROS DE CORTE NAS FORÇAS DE USINAGEM EM FRESAMENTO INTERNO DE ROSCAS

Anna Carla Araujo, Francirlei Gripa Cardoso, Guilherme Dornelles,
Guillaume Fromentin

► **To cite this version:**

Anna Carla Araujo, Francirlei Gripa Cardoso, Guilherme Dornelles, Guillaume Fromentin. EFEITOS DE PARÂMETROS DE CORTE NAS FORÇAS DE USINAGEM EM FRESAMENTO INTERNO DE ROSCAS. VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2012, São Luis, Brazil. hal-03212875

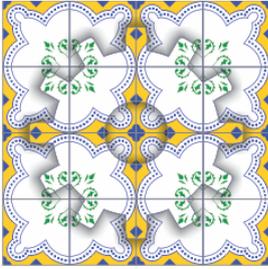
HAL Id: hal-03212875

<https://hal.science/hal-03212875>

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.



EFEITOS DE PARÂMETROS DE CORTE NAS FORÇAS DE USINAGEM EM FRESAMENTO INTERNO DE ROSCAS

Guilherme Dornelles dos Santos¹, gds67@hotmail.com
Francirlei Grippa Cardoso², frangripa@usimachi.com.br
Anna Carla Araujo^{1,3}, anna@mecanica.ufrj.br
Guillaume Fromentin⁴, guillaume.fromentin@cluny.ensam.fr

1 Departamento de Engenharia Mecânica - UFRJ - P.O. Box 68.503, CEP 21.941-972, Rio de Janeiro - RJ, Brasil
2 Programa de Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais – PPEMM–CEFET/RJ, Rio de Janeiro - RJ, Brasil
3 Programa de Engenharia Mecânica - COPPE/UFRJ - Rio de Janeiro - RJ, Brasil
4 LABOMAP – ENSAM/Cluny - Borgonha, França.

Resumo: O fresamento de roscas está se tornando cada vez mais empregado como um processo produtivo para a fabricação do filete de rosca, em virtude das suas vantagens para os setores de manufatura industrial, tais como o aeroespacial, aeronáutico, nuclear, entre outros. Dois processos são utilizados para a abertura de roscas internas: o macho de roscar e a fresa de rosca. A fresamento de roscas permite altas velocidades de corte, ao contrário do macho de roscar, que ainda requer uma inversão do fuso da máquina, pode confeccionar diâmetros de roscas maiores e é facilmente removida no caso de quebra. Como consequência, há um aumento do uso da fresa de rosca para a fabricação de peças de alto custo. Esta demanda faz com que o seu estudo seja cada dia mais necessário e valorizado, buscando sempre uma melhor compreensão e o desenvolvimento de modelos teóricos para os cálculos das forças de usinagem otimizando processo e geometria da ferramenta. Neste trabalho é realizado um estudo experimental onde uma geometria fixa da ferramenta é utilizada para fabricar roscas internas com três parâmetros de corte variáveis, são eles o avanço por dente, a profundidade de corte e o diâmetro nominal da rosca. As forças de corte nas direções da mesa, da superfície cilíndrica do furo são calculadas a partir das forças adquiridas no referencial da ferramenta rotativa. Uma análise estatística dos efeitos de cada variável e suas combinações é realizada. Concluiu-se que, nas condições utilizadas, um aumento no diâmetro nominal da rosca reduz a amplitude e o valor médio das forças de corte. Em relação ao avanço por dente quanto a variação da profundidade de corte, a relação entre a força experimental e a área aproximada de corte reduz.

Palavras-chave: Fresamento de roscas, Forças de Corte, Planejamento de experimentos.

1. INTRODUÇÃO

O setor de usinagem tem uma relação estreita com a produção e com a necessidade de atender a demanda do mercado industrial. Um melhor conhecimento da mecânica do corte pode implicar na redução de desperdício de tempo e material, desta forma, beneficiando economicamente o setor. A mecânica do corte é por si só um processo bastante complexo e que exige um esforço científico grande. Com o objetivo de um melhor entendimento deste processo, diversos modelos de corte com diferentes abordagens têm-se aplicado à compreensão da usinagem. Desde simulações em escala atômica para micro-usinagem (Filiz *et al*, 2008), comportamento do corte de materiais avançados, compósitos e cerâmicas, determinação das forças de corte para diferentes geometrias (Altintas, 2000), até o estudo de desgaste e atrito de forma a ampliar a aplicação dos modelos básicos do corte.

Diversas aplicações no mundo industrial utilizam roscas que podem ser utilizadas tanto para transmitir esforço quanto apenas para unir dois ou mais elementos. Segundo Rodrigues (2011), uma das principais formas de união entre peças na indústria mecânica é a fixação do tipo parafuso-porca. Seja para uma rosca externa ou interna, esta usinagem representa um desafio para a correta aplicação das ferramentas de corte. Os principais aspectos que devem ser observados ao planejar e solucionar problemas de usinagem de roscas são: a definição da tecnologia mais adequada de usinagem, o tipo de ferramenta e, finalmente, os parâmetros de corte para a operação. Para definir a tecnologia de usinagem é necessário, antes de qualquer decisão, conhecer o perfil da rosca que será produzida, uma vez que as dimensões primitivas e as tolerâncias do perfil são informações determinantes para a escolha correta entre as técnicas com remoção de cavaco, roscas usinadas, ou sem remoção de cavaco, roscas laminadas (Bretas, 2009). Roscas produzidas por deformação plástica são mais resistentes, devido sua estrutura granular, em relação às produzidas por usinagem. Esta tem sua vantagem na precisão e no acabamento superficial (Smith, 1989).

É necessário conhecer as forças de usinagem envolvidas para ser capaz de prever o comportamento dinâmico, a qualidade do acabamento da superfície, a estabilidade do processo de usinagem e evitar a quebra ou o desgaste excessivo das ferramentas. Segundo Zhang (2003), a indução de vibração durante o rosqueamento com macho de rosca tem sido aplicada em titânio e outros materiais para reduzir o torque e, desta forma, aumentar a eficiência e reduzir a sobrecarga do torque de rosqueamento (Da Mota, 2009). A função da vibração no processo de rosqueamento tem como função reduzir o atrito entre a peça e o macho. Já Mezentsev (Mezentsev *et al*, 2002), propõe que padrões das forças radiais são particularmente úteis na identificação de falhas. O modelo desenvolvido prevê o torque e forças radiais para um determinado conjunto de condições de corte e foi realizado o rosqueamento do material em várias combinações de falhas: desalinhamento entre furo e macho, reversão do rosqueamento e quebra de dentes do macho. O modelo pode ser usado para demonstrar como padrões únicos nestes sinais de força podem ser empregados para identificar a presença dessas falhas.

O estudo das forças de corte no fresamento de roscas iniciou com o modelo mecanicista proposto em 2004 (Araujo, Silveira e Kapoor, 2004). Neste estudo foram analisados processos de usinagem realizados com a fresa de rosca em uma trajetória linear, similar ao fresamento de topo, com o objetivo único de calibrar o modelo que foi adaptado e validado na trajetória circular, que condiz com a prática do processo. A velocidade vertical foi desprezada neste primeiro trabalho.

Fromentin *et al* (2010) realizaram uma análise precisa da geometria gerada pela revolução da ferramenta combinada com a velocidade de avanço, o que proporcionou um cálculo fino da geometria do cavaco. Estudou-se os impactos de diferentes estratégias da trajetória de entrada para a qualidade da rosca. Vishal e Fromentin (2011) adicionaram a componente vertical à simulação e consideraram um fator muito relevante ao modelo: a variação ponto a ponto local dos ângulos da aresta de corte. A geometria da ferramenta apresenta valores diferentes na aresta superior, na área frontal e na inferior de cada dente de rosca e ainda uma variação contínua na mesma aresta.

Neste artigo será apresentado um estudo experimental que compõe parte do projeto de pesquisa de modelagem de forças no fresamento de roscas. O tema mais amplo objetiva também a otimização da variação dos parâmetros geométricos da ferramenta, que não será tratado neste trabalho. Neste caso é realizada a avaliação experimental dos efeitos de diversos parâmetros de corte nas forças de usinagem onde a geometria da ferramenta é fixa e estuda-se uma faixa de valores do avanço por dente, dois diâmetros nominais da rosca e dois comprimentos rosqueados, ambos usinados em um só passe.

2. CINEMÁTICA DO FRESAMENTO DE ROSCA

O fresamento de roscas é o processo de formação de filetes de rosca através de uma fresa que possui a forma do perfil da rosca, podendo usinar um ou mais filetes por vez, com uma ou mais arestas cortantes. A ferramenta gira em torno do próprio eixo, proporcionando a velocidade e corte necessária. Ao mesmo tempo a ferramenta percorre uma trajetória helicoidal ao redor da linha de centro da rosca.

O processo de usinagem de roscas por fresamento pode ser dividido em cinco etapas básicas, como mostra a Figura 1. Na etapa (1) a ferramenta é posicionada. Na etapa (2) a ferramenta se desloca para baixo até a posição onde será iniciada a usinagem, enquanto executa um movimento axial, a certa velocidade de avanço, até a profundidade radial de corte selecionada. Em (3) a ferramenta executa um movimento helicoidal para cima no furo e para uma volta completa. O número de dentes engrenados inicialmente na parede da peça é o número de filetes gerados em uma volta. Se os filetes para a profundidade total do furo não é alcançado em uma etapa, repetir (1) até (3), até completar. Na etapa (4) a ferramenta volta para o eixo central do furo, sem deslocamento vertical. Finalmente em (5) a ferramenta se desloca na direção vertical.

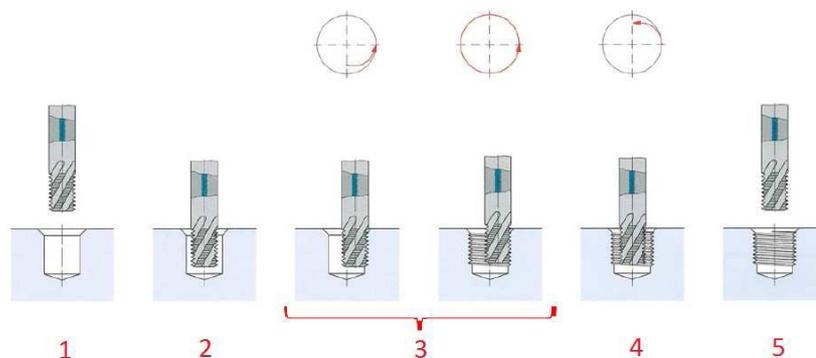


Figura 1 – Etapas do processo de fresamento de roscas. (1) Posicionamento da ferramenta. (2) Deslocamento vertical para baixo. (3) Movimento helicoidal da ferramenta. (4) Deslocamento da ferramenta para a posição de (2). (5) Movimento vertical da ferramenta para cima. (Araujo, 2005)

De acordo com Smith (2008) a estratégia da entrada da ferramenta na peça para iniciar o corte da rosca deve ser observada no fresamento. São quatro trajetórias as mais utilizadas para a entrada da ferramenta na peça, a saber:

- Linear: Este método caracteriza-se pela entrada com trajetória no plano e por um segmento de reta. Este método possui um grande ângulo de contato entre o material e a fresa, levando a uma situação indesejada de alto carregamento na ferramenta e cavacos longos, também tem como desvantagem, prejudicar o acabamento e a geometria na região de entrada da ferramenta (Fig. 2a).
- Circular com $\frac{1}{4}$ de círculo: Neste método a ferramenta realiza inicialmente uma trajetória linear, e em seguida percorre uma trajetória de $\frac{1}{4}$ de círculo, com raio menor que o do furo, entrando em contato com a peça com menor carregamento que o método linear. Geralmente utilizado para situações onde o diâmetro da ferramenta e o diâmetro da rosca são muito diferentes. Apresenta a vantagem, de a ferramenta percorrer uma trajetória menor. O carregamento na ferramenta ainda se mantém alto (Fig. 2b).
- Circular com semicírculo: Este método tem como característica o uma trajetória semicircular do centro da ferramenta, com raio menor que o furo. Neste método é encontrado o menor carregamento, uma vez que o ângulo de contato inicial é relativamente pequeno durante a entrada (Fig. 2c).
- Linha tangente: O uso deste método é restrito ao fresamento de rosca externas. Nele, a ferramenta percorre um trajeto tangencial com relação à peça a ser fresada, sendo caracterizado pelo baixo carregamento e pela pequena trajetória percorrida pela ferramenta (Fig. 2d).

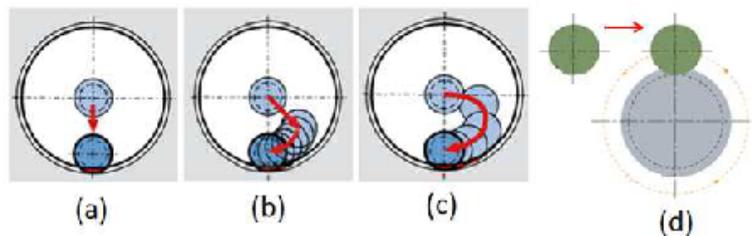


Figura 2 – Métodos de entrada da ferramenta na peça. (a) Linear; (b) Circular com $\frac{1}{4}$ de círculo; (c) Circular com semicírculo; (d) Linha tangente. (Smith, 2008)

3. FORÇAS NO FRESAMENTO DE ROSCAS

Descrever calcular as forças de corte no fresamento de roscas, alguns parâmetros devem ser considerados. A velocidade de corte e a espessura do cavaco variam com o diâmetro da ferremanta $d_i < d(z) < D_t$ em diferentes posições da aresta de corte, como mostra a Fig. 3a.

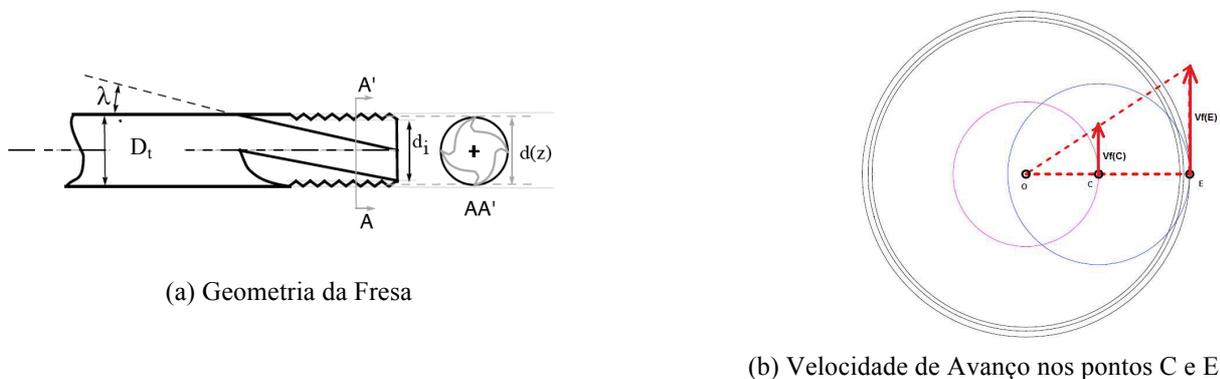


Figura 3 – Geometria da Ferramenta e Velocidade de Avanço

O avanço por dente calculado na direção da trajetória, f_t , é calculado de forma idêntica ao fresamento de topo, em função da velocidade de avanço V_f , do número de hélices z e da rotação da ferreamenta n :

$$f_t = \frac{V_f}{z \cdot n} \quad (1)$$

no entanto, a distância efetiva percorrida por um dente, cuja aresta está localizada no ponto E da Fig.3b, pode ser projetada no plano perpendicular ao eixo da ferramenta e calculada por:

$$f_{t_{xy}} = \frac{f_t}{\sqrt{\left(\frac{p_\theta}{r_{tt}}\right)^2 + 1}} \quad (2)$$

onde p é o passo angular da rosca e r_{tt} é o raio da trajetória helicoidal da ferramenta.

As forças de usinagem são comumente calculadas em função da espessura do cavaco, que neste caso é função do avanço $f_{t_{xy}}$ e da posição de cada ponto da ferramenta. O valor máximo da espessura do cavaco $t_{c_{max}}$ é calculado em função do diâmetro externo D_t e o espessura de corte radial r_{doc} , calculada pela expressão da Eq. 3, em função do diâmetro nominal da rosca D e do passo P .

$$t_{c_{max}} = 2f_{t_{xy}} \sqrt{\frac{r_{doc}}{D_t} \left(1 - \frac{r_{doc}}{D_t}\right)}, \quad (3)$$

onde:

$$r_{doc} = \frac{P(80.\sqrt{3}D - 75.P)}{256(D - D_t)} \quad (4)$$

As forças de usinagem medidas experimentalmente são a soma das contribuições de cada uma das arestas de corte em contato com a superfície em usinagem do corpo de prova. No fresamento de rosca interna esta superfície representa um referencial importante pois se mantém constante a relação local entre o material removido e esta superfície. Este referencial está representado pela base R1 concêntrica com a ferramenta e orientado com a superfície do furo. O referencial R1 é localizada pelo ângulo θ_1 , apresentado na Fig. 4, que relaciona a posição X e Y do centro da ferramenta em relação ao centro do furo.

Outros dois referenciais são fundamentais para a compreensão da decomposição das forças de corte: o referencial R0 é fixo na peça e localizado no centro do furo, enquanto que o referencial R2 é fixo em um ponto da ferramenta e gira junto com ela. Os três referenciais são apresentados na figura 4.

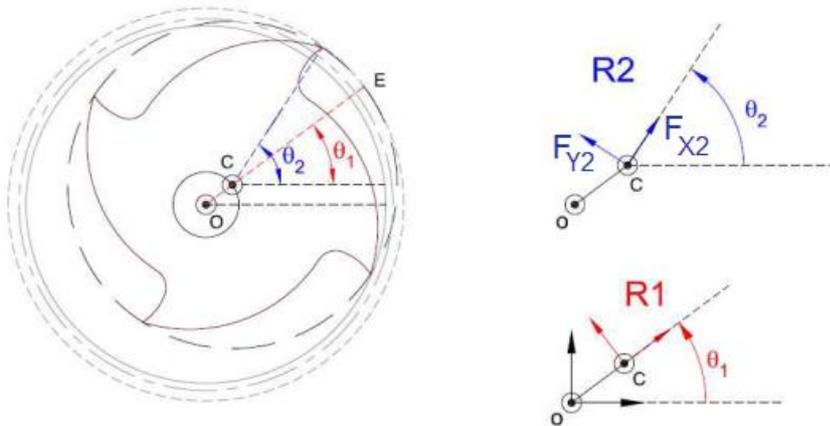


Figura 4 – Os referenciais e suas relações.

As forças no referencial R2 (F_{X2} , F_{Y2} e F_Z) são medidas por um dinamômetro fixo na ferramenta. As componentes da força resultante nos referenciais R0 (F_{X0} e F_{Y0}) e R1 (F_{RAD} e F_{TAN}) são calculadas em função das equações (5).

$$\begin{aligned} F_{X0} &= F_{X2} \cos(2\pi - \theta_2) - F_{Y2} \sin(2\pi - \theta_2) \\ F_{Y0} &= F_{X2} \sin(2\pi - \theta_2) + F_{Y2} \cos(2\pi - \theta_2) \\ F_{X1} &= F_{RAD} = F_{X0} \cos(-\theta_1) - F_{Y0} \sin(-\theta_1) \\ F_{Y1} &= F_{TAN} = F_{X0} \sin(-\theta_1) + F_{Y0} \cos(-\theta_1) \end{aligned} \quad (5)$$

Os três referenciais incluem a direção Z e portanto a componente F_Z é coincidente. A força resultante ser calculada através da equação 9.

$$F_{res} = \sqrt{F_{X2}^2 + F_{Y2}^2 + F_Z^2} \quad (6)$$

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Com o objetivo de analisar a influência de cada um dos parâmetros nas forças de corte, o procedimento foi elaborado a partir de um planejamento fatorial de 2 níveis e 3 variáveis, sendo elas: avanço por dente f_t , profundidade de corte a_p e o diâmetro nominal da rosca D . A tabela 1 apresenta os valores das variáveis utilizados nos testes.

Em todos os testes a velocidade de corte igual a 35 m/min. Foram realizadas duas réplicas por teste e todas as réplicas de todos os testes foram realizadas de forma aleatória (Santos, G.D, 2011).

Tabela 1 – Planejamento dos parâmetros de corte

TESTE	D (mm)		a_p (mm)		f_t (mm/dente)		D	a_p	f_t
1	BAIXO	12	BAIXO	12	BAIXO	0,1	-1	-1	-1
2	BAIXO	12	BAIXO	12	ALTO	0,2	-1	-1	1
3	BAIXO	12	ALTO	18	BAIXO	0,1	-1	1	-1
4	BAIXO	12	ALTO	18	ALTO	0,2	-1	1	1
5	ALTO	18	BAIXO	12	BAIXO	0,1	1	-1	-1
6	ALTO	18	BAIXO	12	ALTO	0,2	1	-1	1
7	ALTO	18	ALTO	18	BAIXO	0,1	1	1	-1
8	ALTO	18	ALTO	18	ALTO	0,2	1	1	1

4.1. Descrição da Montagem do Experimento

A máquina-ferramenta utilizada foi um centro de usinagem CNC DMG 85VL (Fig. 5a) com capacidade de 25kW, 85 Nm de torque máximo, rotação máxima de 18000 rpm e velocidade de avanço máxima de 120 m/min. O corpo de prova foi fixado na mesa da máquina, orientado em relação aos eixos do comando CNC. Foram realizada a furação do corpo de prova com diâmetro aferido de $11,00 \pm 0,04$ mm.

Em relação ao corpo de prova, foi utilizado um bloco retangular, com dimensões de 150 mm x 140 mm x 50 mm, composto por uma liga de titânio Ti-6Al-4V. A homogeneidade do material foi testada através de ensaios de dureza realizados em ambos os lados do bloco. A dureza média do material foi de $482,9 \pm 19$ HV em um dos lados e de $495,3 \pm 29$ HV no outro. Todos os testes aqui apresentados foram realizados na mesma face do bloco.

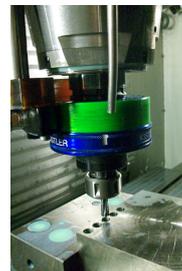
A ferramenta utilizada para realizar o fresamento de rosca tem as seguintes características: diâmetro externo de 10 mm, ângulo de hélice de 10° , ângulo de saída global de 10° e quatro hélices. Cada hélice é composta de arestas de corte para realizar o perfil da rosca métrica de uma entrada. Com o auxílio de um relógio comparador, o *run-out* foi aferido com valor máximo de 0,05mm.

A ferramenta foi montada em um dinamômetro rotativo acoplado ao cone da máquina CNC. Na montagem a orientação dos eixos foi alinhada em relação a ponta das hélices na base da ferramenta.

Em todos os testes e réplicas foram obtidos tanto os sinais no tempo de força e momento a partir do dinamômetro (Figura 5b), quanto os sinais de posição do centro da ferramenta a partir da interface da máquina CNC (Fig. 5c).



(a) Máquina CNC



(b) Dinamômetro



(c) Interface da máquina CNC



(d) Amplificador e placa

Figura 5 – Equipamentos de teste e aquisição de dados.

Os sinais adquiridos são amplificados e convertidos de analógico para digital através de uma placa de aquisição (Fig. 5d) e enviados ao computador para armazenamento.

4.2. Sinais Experimentais

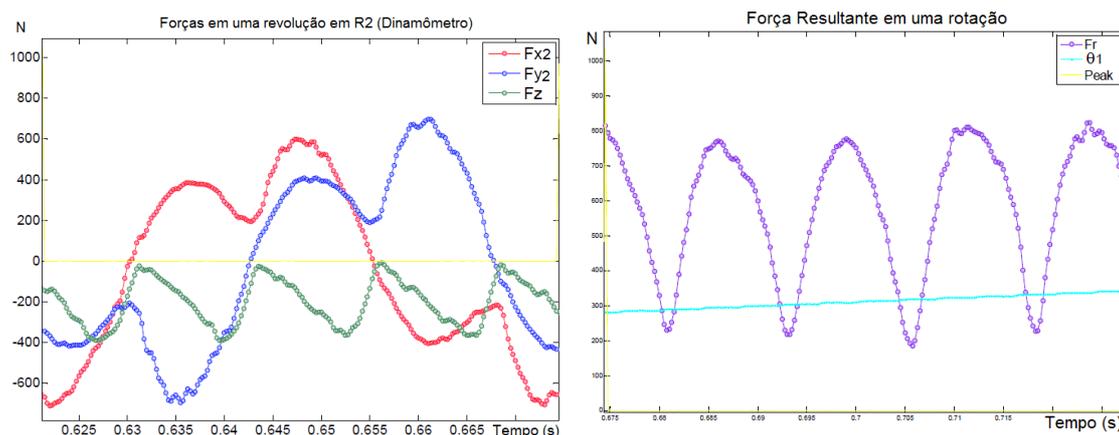
Em cada teste realizado foram obtidos os seguintes sinais no tempo:

- 1) Posição do centro ferramenta no tempo (X, Y e Z)
- 2) Forças de corte, no referencial da ferramenta R2, no tempo (F_{x2} , F_{y2} e F_z)
- 3) Torque resistido pela ferramenta no tempo (M_z)
- 4) Pico de referência por rotação para indicar o início de cada nova rotação.

A posição do centro da ferramenta foi utilizada para calcular o ângulo θ_1 e identificar o período onde o corte é efetuado de modo contínuo, sem efeitos de entrada e saída da ferramenta na peça. Apenas os pontos deste período de modo contínuo foram levados em consideração na análise das forças. A componente Z da posição identifica a profundidade de corte local.

A partir os sinais do dinamômetro, foram calculadas a força resultante, a força radial em relação a superfície do furo. A força resultante foi estudada por passar uma visão geral de todas as forças do sistema. Já a força radial foi escolhida uma vez que é a força que tende a fletir a ferramenta para o centro do furo, podendo causar a deflexão da ferramenta, ocasionando um corte desalinhado. O torque obtido também foi avaliado para estudar eventuais esforços de torção na ferramenta. Sua transferência de referencial não é necessária, uma vez que ele é o mesmo em todos os referenciais, por ser perpendicular ao plano de corte. O pico de referência é utilizado para que seja quantificado o número de voltas dadas pela ferramenta, conferindo a rotação e o período de uma rotação.

A figura 6 mostra os resultados no tempo do teste 1, como exemplo.



(a) Forças em R2

(b) Força Resultante

Figura 6 – Resultado Experimental de uma réplica do teste 1

4.3. Tratamento dos sinais

O tratamento dos sinais foi realizado com o *software* MATLAB com filtro passa baixa de 50 vezes a frequência de passagem de cada uma das quatro hélices da ferramenta. A partir de cada sinal filtrado foram calculadas as seguintes variáveis de saída Y em cada um dos testes i e réplicas j:

- a média dos máximos a cada ¼ de volta da força resultante - $F_{resMax}(i,j)$.
- a média dos máximos a cada ¼ de volta da força radial - $F_{radMax}(i,j)$.
- a média dos máximos a cada ¼ de volta da torque - $M_{Max}(i,j)$.

Foi utilizado um parâmetro global \bar{A} aproximado para cada teste que está relacionado com a quantidade de material retirado por volta. Este valor será chamado de área aproximada de corte que efetivamente não calcula a área de contato entre cavaco ferramenta de maneira adequada mas tem relação estreita com ela.

$$\bar{A} = f_t \cdot a_p \quad (7)$$

Cada média calculada se dividida por \bar{A} pode compensar o efeito direto da ampliação da área de contato nas comparações entre as forças. A tabela 2 apresenta as médias de cada teste divididas por \bar{A} .

Tabela 2 – Médias de cada teste e réplica dividido pela área

Teste/ Réplica	Fres/A (N/mm ²)	Frad/A (N/mm ²)	Mz/A (N/mm)
1A	490,3	336,0	1,76
1B	495,1	330,6	1,78
2A	354,2	209,7	1,38
2B	358,4	209,3	1,38
3A	469,6	343,8	1,66
3B	479,9	354,5	1,66
4A	306,5	202,2	1,19
4B	312,1	202,0	1,22
5A	236,9	154,6	0,80
5B	226,2	151,2	0,78
6A	160,4	94,1	0,62
6B	154,7	90,7	0,60
7A	205,6	139,1	0,75
7B	207,2	141,1	0,75
8A	145,5	85,4	0,57
8B	145,5	87,0	0,57

Cada variável de saída Y para o teste i terá um valor médio considerando as duas réplicas:

$$\bar{Y}(i) = \frac{Y(i, 1) + Y(i, 2)}{2} \quad (8)$$

A variância S em cada teste i é calculada por:

$$S^2(Y(i)) = (\bar{Y}(i) - Y(i, 1))^2 + (\bar{Y}(i) - Y(i, 2))^2 \quad (9)$$

A variância conjunta S_p é calculada por:

$$S_p^2 = \frac{\sum_{i=1}^8 S^2(Y(i))}{8} \quad (10)$$

Os efeitos de cada variável de entrada E(ft), E(ap) e E(D) são calculados a partir das respostas de cada média de teste de acordo com a análise fatorial das equações (11).

$$\begin{aligned}
 E(f_t) &= \frac{1}{4} (\bar{Y}(2) - \bar{Y}(1)) + (\bar{Y}(4) - \bar{Y}(3)) + (\bar{Y}(6) - \bar{Y}(5)) + (\bar{Y}(8) - \bar{Y}(7)) \\
 E(a_p) &= \frac{1}{4} (\bar{Y}(3) - \bar{Y}(1)) + (\bar{Y}(4) - \bar{Y}(2)) + (\bar{Y}(7) - \bar{Y}(5)) + (\bar{Y}(8) - \bar{Y}(6)) \\
 E(D) &= \frac{1}{4} (\bar{Y}(5) - \bar{Y}(1)) + (\bar{Y}(6) - \bar{Y}(2)) + (\bar{Y}(7) - \bar{Y}(3)) + (\bar{Y}(8) - \bar{Y}(4))
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

Os efeitos combinados de duas variáveis de entrada E(ft, ap), E(ft,D) e E(ap,D) são calculados por:

$$\begin{aligned}
 E(f_t, a_p) &= \frac{1}{4} ((\bar{Y}(1) + \bar{Y}(4) + \bar{Y}(5) + \bar{Y}(8)) - (\bar{Y}(2) + \bar{Y}(3) + \bar{Y}(6) + \bar{Y}(7))) \\
 E(f_t, D) &= \frac{1}{4} ((\bar{Y}(1) + \bar{Y}(3) + \bar{Y}(6) + \bar{Y}(8)) - (\bar{Y}(2) + \bar{Y}(4) + \bar{Y}(5) + \bar{Y}(7))) \\
 E(a_p, D) &= \frac{1}{4} ((\bar{Y}(1) + \bar{Y}(2) + \bar{Y}(7) + \bar{Y}(8)) - (\bar{Y}(3) + \bar{Y}(4) + \bar{Y}(5) + \bar{Y}(6)))
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

e os efeitos combinados das três E(ft, ap, D) pela equação 13.

$$E(f_t, a_p, D) = \frac{1}{4} ((\bar{Y}(2) + \bar{Y}(3) + \bar{Y}(5) + \bar{Y}(8)) - (\bar{Y}(1) + \bar{Y}(4) + \bar{Y}(6) + \bar{Y}(7)))
 \tag{13}$$

O intervalo de confiança de cada um dos efeitos foi calculado utilizando o valor de t de *Student* com nível de confiança de 95%.

$$E_i \pm t \sqrt{\frac{Sp^2}{4}}
 \tag{14}$$

A tabela 3 apresenta o panorama dos resultados obtidos na análise de efeitos na força resultante, na força radial e no torque: a média entre as réplicas, a variância de cada teste, a variância conjunta, os efeitos provocados pela variação de cada parâmetro de corte e suas combinações, o intervalo de confiança absoluto e relativo em relação ao valor do efeito.

Tabela 3 – Efeitos associados a cada variável

	E(ft)	E(ap)	E(D)	E(ft,ap)	F(ft,D)	E(ap,D)	E(ft,ap,D)	Intervalo de Confiança
Fres/A	-109,17	-25,53	-223,01	-4,00	41,76	6,93	10,52	5,23
% do IC	-5%	-20%	-2%	-131%	13%	76%	50%	
Frad/A	-96,29	-2,62	-155,61	-4,15	39,11	-6,85	7,46	3,81
IC/Efeito	-4%	-145%	-2%	-92%	10%	-56%	51%	
Mz/A	-0,30	-0,09	-0,82	-0,01	0,12	0,05	0,02	0,01
IC/Efeito	-3%	-11%	-1%	-69%	8%	20%	58%	

Todos os efeitos analisados, tanto os de uma variável de entrada quanto de duas ou três variáveis tem intervalos de confiança são iguais, pois são calculados a partir da variância conjunta (Kapoor, 2011). Porém, o intervalo de confiança tem uma relação diferente com o efeito em cada caso. Ao se dividir cada valor do efeito de cada variável pelo intervalo de confiança, pode-se avaliar se o valor encontrado é significativo. Abaixo de cada linha de efeitos da tabela 3, é calculado o percentual do intervalo de confiança em relação ao valor do efeito. Valores elevados desta relação indicam que nada pode ser concluído em relação ao efeito causado pela variação deste parâmetro.

5. CONCLUSÕES

Neste artigo são apresentados resultados experimentais de uma ferramenta de fresamento de roscas com geometria fixa para produzir elementos rosqueados com o mesmo passo em uma liga de titânio. Com a velocidade de corte constante foi elaborado um planejamento de experimentos de dois níveis para os parâmetros de velocidade de avanço, profundidade de corte e diâmetro do elemento roscado. As variáveis de saída estudadas foram as componentes de força que atuam na direção de flexão da ferramenta e a componente que contribui para a torção da ferramenta

provocada pela força entre as arestas de corte e a superfície do furo. É realizado um estudo simplificado de efeitos considerando o intervalo de confiança da medida.

Após a análise estatística realizada é possível concluir os efeitos que o avanço por dente tem um efeito negativo em todas as variáveis de saída, o que implica que ao se aumentar o avanço por dente, a relação entre as forças e a área de corte tendem a cair. Ao se analisar os efeitos da profundidade de corte e o diâmetro nominal da rosca, podem ser observados um comportamento semelhante ao do efeito do avanço por dente. A influência do diâmetro nominal da rosca nas forças e no momento é a mais alta dentre as estudadas. Isso ocorre já que ao se diminuir o diâmetro do furo, aumenta-se o ângulo de contato da ferramenta com a peça, aumentando assim a área. Este aumento de área é responsável pelo aumento das forças e do momento. Os efeitos duplos e triplos estão muito próximos, ou até abaixo da variação do intervalo de confiança, o que os torna de pouca representatividade e podem ser descartados na análise. Pode ser verificado como continuação a análise estatística uma análise de variância de múltiplos parâmetros e a otimização dos parâmetros de corte baseados nos resultados apresentados.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laboratório de Usinagem do ENSAM/Cluny pelos recursos necessários ao desenvolvimento dos experimentos, em especial ao Prof. Gérard Polachon, responsável pelo LABOMAP. Agradecemos ao Programa de Engenharia Mecânica pelo estímulo dado à área de usinagem que, entre outras ações, realizou convite ao Prof. Shiv Kapoor da Universidade de Illinois em Urbana-Champaign para ministrar curso na área de “Design of Experiments”. Por fim, à CAPES e ao convênio BRAFITEC pela continuidade da relação inter-institucional ENSAM/UFRJ.

7. REFERÊNCIAS

- Altintas, Y., 2000, “Modeling approaches and software for predicting the performance of milling operations at mal-ubc”. *Mach. Sci. Technol.*, v. 4, n. 3, p.445-478.
- Araujo, A. C., 1999, “Estudo das forças de usinagem no fresamento de topo”, Dissertação de M.Sc, COPPE / Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Araujo, A. C., Silveira, J. L., Jun, M.B.G., 2005, “A model for thread milling cutting forces”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, v.46, n.1, pp. 2058-2065.
- Araujo, A. C., Silveira, J. L., Kapoor S., 2004, “Force prediction in thread milling”, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Science & Engineer*, v. 26, n.1, p.82-88.
- Bretas, R. A., 2009, “Análise da usinagem de roscas por interpolação helicoidal no ferro fundido vermicular”. Dissertação de M.Sc., Instituto Superior Tupy, Joinville, SC, Brasil.
- Da Mota, P. R., 2009, “Estudo do processo de rosqueamento com macho de corte de metal duro em ferro fundido vermicular”. Tese de D.Sc., Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil.
- Filiz, S., Xie, L., Weiss, L.E. e Ozdoganlar, O.B., Micromilling of microbarbs for medical implants, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 48, 2008, pp. 459-472
- Fromentin, G., Poulachon, G., 2010, “Modeling of interferences during thread milling operation”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 49, n.1, pp. 41-51.
- Kapoor, S. G., 2011, Notas de aula do curso “Planejamento de experimentos”, COPPE/UFRJ.
- Mezentsev, O.A., Zhu, R., DeVor, R.E, Kapoor,S.G. e Kline, W.A. “Use of radial forces for fault detection in tapping, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 42, 2002, pp. 479-488.
- Rodrigues, Marcelo Acácio., 2011, “Visão geral da fabricação de elementos roscados por usinagem”. *Revista do parafuso*. Editora Milatias Ltda. São Paulo. 25 ed., Mar. Disponível em : <www.revistadoparafuso.com.br>. Acesso em 14 nov. 2011.
- Santos, G.D., 2011, “Efeitos de parâmetros de corte nas forças de usinagem no fresamento interno de roscas”, Projeto Final em Engenharia Mecânica – UFRJ.
- Smith, G. T., 1989, “Advanced Machining: The handbook of cutting technology”. [S.l.]: IFS Publications, UK.
- Smith, G. T., 2008, “Cutting tool technology: Industrial Handbook”. 1 ed. Londres, Springer.
- Stemmer, C. E., 1995, “Ferramentas de Corte II”. 4 ed. Florianópolis, Editora UFSC.
- Vargus. Vardex, 2010, “Advanced threading solutions – turning and milling tools”. Vargus LTD.
- Vishal, Fromentin, G., Poulachon, G., 2011. Investigation of cutting tool geometry effect on cutting forces during thread milling. *J. Ind. ASME*, Vol, pp.
- Zhang, Bi; Fulun, Yang; Jiexin, Wang., 2003, “Fundamental aspects in vibration-assisted tapping” – *Journal of Materials Processing Technology* 132, p. 345–352.

8. DIREITOS AUTORAIS

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

ANALYSIS OF THE EFFECTS ON THREAD MILLING PARAMETERS FOR INTERNAL THREADS IN TITANIUM ALLOY

Abstract. *Thread milling process is increasing as a production process for the manufacture of threads because of its advantages: it allows high cutting speed, unlike the thread tapping which still requires a reversal of the machine rotation, it can machine larger diameter thread and it is easily removed in case of breakage. Consequently, there is an increasing use of thread cutter for the production of costly parts. This demand makes its study is becoming increasingly necessary and valuable, always seeking a better understanding and development of theoretical models for calculation of the forces of optimizing machining process and tool geometry. This work is an experimental study, where a fixed geometry of the tool is used to produce internal threads with three cutting parameters variables: feed per tooth, cutting depth and nominal thread diameter. The cutting forces in the directions of the table, the cylindrical surface of the hole are calculated from the forces obtained in the frame of the rotating tool. A statistical analysis of the effects of each variable and combinations are performed. It was concluded that, under the conditions used, an increase in the nominal thread diameter reduces the amplitude and the average of forces. In relation to the feed per tooth as the variation in depth of cut, the relation between force and area of cut decreases.*

Keywords: *Thread Milling, Cutting Forces, Design of Experiments.*