



HAL
open science

ANALISE DE FORÇAS NO FRESAMENTO DE ROSCAS API

Francirlei Grippa Cardoso, Anna Carla Araujo

► **To cite this version:**

Francirlei Grippa Cardoso, Anna Carla Araujo. ANALISE DE FORÇAS NO FRESAMENTO DE ROSCAS API. 7º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, May 2013, Itatiaia, Brazil. hal-03214834

HAL Id: hal-03214834

<https://hal.science/hal-03214834>

Submitted on 3 May 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.



COMPROMETIDA COM A PROMOÇÃO DO DESENVOLVIMENTO DA ENGENHARIA E DAS CIÊNCIAS MECÂNICAS

7º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO
7th BRAZILIAN CONGRESS ON MANUFACTURING ENGINEERING
20 a 24 de maio de 2013 – Penedo, Itatiaia – RJ - Brasil
May 20th to 24th, 2013 – Penedo, Itatiaia – RJ – Brazil

ANALISE DE FORÇAS NO FRESAMENTO DE ROSCAS API

Francirlei Gripa Cardoso, frangripa@usimachi.com.br¹
Anna Carla Araujo, anna@mecanica.ufrj.br^{1,2}

¹Programa de Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais – PPEMM/CEFET-RJ

²Programa de Engenharia Mecânica – COPPE/UFRJ

Resumo: *O fresamento de roscas permite uma alta velocidade de corte, ao contrário do macho de roscar, que ainda requer uma inversão da rotação do eixo da máquina, e permite a produção de diferentes diâmetros com a mesma ferramenta. Embora seja um processo de rosqueamento vantajoso, não foram encontrados estudos realizados para a fabricação de rosca tipo API, muito utilizada no setor de petróleo. Neste estudo foi utilizada uma ferramenta de metal duro fixada em um suporte adaptado ao centro de usinagem. A trajetória helicoidal cônica, necessária ao fresamento da rosca API, foi programada para a fabricação da peça. São avaliadas as forças de usinagem com diferentes avanços, e é realizado um planejamento experimental. O estudo avaliou as componentes de flexão e torção que a ferramenta está sujeita em relação à superfície da peça e ainda o módulo da força resultante. Mostrou-se que não houve variação significativa da força radial e que a variação das forças tangenciais e resultante foram resultado direto do aumento da área do cavaco, sem outras influências aparentes.*

Palavras-chave: *fresamento de roscas, roscas API, forças de corte*

1. INTRODUÇÃO

O fresamento de roscas está se tornando mais e mais empregado como uma técnica para produção do filete de rosca, devido à suas vantagens para os setores de manufatura industrial, tais como a aeronáutica e aeroespacial. 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 de ferramentas de corte. Por ser uma operação de alto valor agregado, já que é uma das últimas operações de usinagem realizadas, são de extrema importância o conhecimento e o domínio das técnicas da operação, pois a quebra de uma ferramenta durante o processo de rosqueamento pode comprometer a qualidade da peça ou até mesmo provocar o sucateamento dela, acarretando grande prejuízo para a indústria.

Segundo SALES (2008), o controle destes processos é um desafio devido ao material da peça, a tolerância dimensional, a profundidade da rosca, os equipamentos utilizados e outros detalhes que fazem serem complexos os processos de usinagem de rosca. Se algum erro ocorrer enquanto selecionamos ou controlamos os parâmetros de usinagem, podem-se causar danos irreparáveis na peça que pode acabar por resultar em seu descarte. Isso representaria significativos prejuízos de tempo e material porque o processo de rosqueamento é aplicado, geralmente, na etapa final do processo de usinagem. Para evitar o descarte da peça, a ferramenta e as condições de corte devem ter um padrão de confiabilidade.

Quanto aos processos de fabricação de roscas internas por usinagem, Stephenson e Agapiou (1996) e Koelsch (2002) afirmam que os processos mais conhecidos utilizam ferramentas de aresta única de corte, múltipla aresta, fresas integrais e machos rígidos. Para a fabricação de roscas internas em peças com geometria complexas, dois processos são utilizados: o macho de roscar e a fresa de rosca. O fresamento de roscas permite uma alta velocidade de corte, ao contrário do macho de roscar, que ainda requer uma inversão do eixo da máquina (Grzesik, 2008). Além disso, uma fresa de rosca pode confeccionar diferentes diâmetros de roscas, maiores do que seu diâmetro nominal, desde que, tenham o mesmo passo (Araujo et. al., 2004). Desta maneira, se uma quebra da ferramenta ocorrer, pode ser facilmente removida, o que pode ser problemático no caso do uso do macho de roscar.

Existe um grande número de tipos e formas de roscas utilizadas na indústria. Há as de uso mais usual que são as triangulares até as de uso mais específicos, que podemos citar as API. Uma configuração de filete muito utilizada atualmente na indústria petrolífera é a rosca API. A Rosca API, da *American Petroleum Institute*, é utilizada quando é necessário uma boa vedação e um torque alto. A norma API RP 5A3 foi utilizada como referência para a fabricação dos experimentos deste trabalho. As normas para fabricação dessa configuração tem diferenciação em relação ao diâmetro nominal, a inclinação do filete e ao passo da rosca. Para fabricar esta geometria é usual a utilização do torno mecânico. Um novo método de fabricação pode ser obtido através do fresamento de rosca.

Muitas pesquisas têm sido desenvolvidas utilizando a técnica do fresamento de rosca. O estudo das forças de corte no fresamento de roscas iniciou com o modelo mecanicista proposto em Araujo et. al. (2004). Neste estudo foram analisados processos de usinagem realizados com 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. Outro estudo desenvolvido por Araujo et. al. (2005), prevê um modelo de força no fresamento de roscas que pode ser utilizado para entender o processo de fresamento de rosca e conseqüentemente, aumentar o desempenho do processo. Fromentin et. al. (2010) apresenta os aspectos geométricos do processo de fresamento de roscas, pois afirma que há uma interferência geométrica entre a ferramenta e a superfície da peça. Fromentin et. al. (2010A) propõe um modelo geométrico e uma formulação analítica para a aresta de corte da fresa de rosca. Fromentin et. al. (2010B) elabora um modelo para calcular a espessura do cavaco indeformado para o fresamento de roscas e, recentemente, Araujo et al (2013) apresenta o cálculo das velocidades de corte em função da posição da aresta de corte.

Neste artigo serão analisadas as forças de corte no fresamento de rosca API para situações com diferentes avanços, mesma geometria de rosca, mesma velocidade de corte e mesma ferramenta. Este é um estudo promissor, pois serão analisadas as forças para a fabricação de uma geometria de rosca muito empregada no segmento de óleo e gás, utilizando o processo de fresamento de roscas. Não há relatos de estudos de forças para essa geometria de rosca, pois não existe no mercado uma fresa específica para a confecção desta geometria, motivo este, que nos leva a utilizar uma adaptação de um suporte de uma ferramenta existente no mercado.

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 mesma, 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 Fig. (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 de entrada na peça e na etapa (4) ela percorre uma trajetória helicoidal para cima no furo e para uma volta completa. Na etapa (5) a ferramenta volta para o eixo central do furo, sem deslocamento vertical. Finalmente em (6) a ferramenta se desloca na direção vertical.

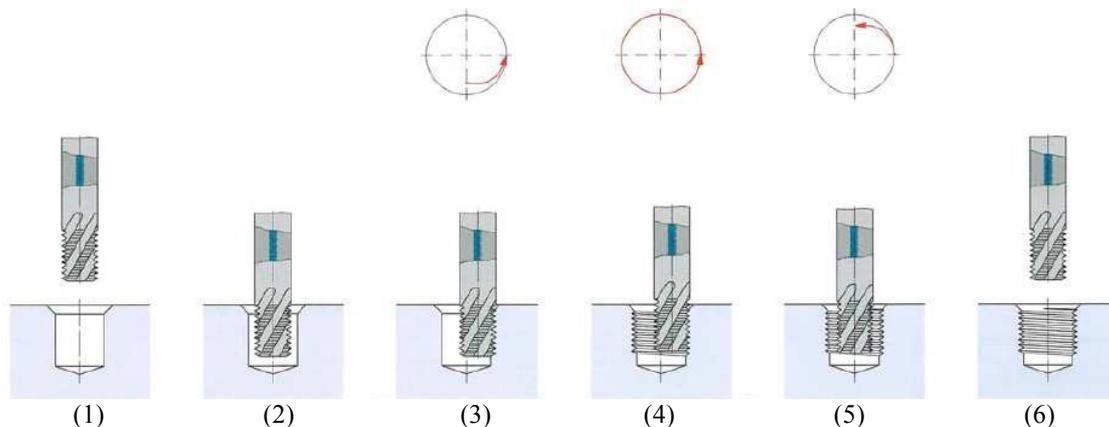


Figura 1 – Etapas do processo de fresamento de roscas. (1) Posicionamento da ferramenta. (2) Deslocamento vertical para baixo. (3) Movimento de penetração (4) helicoidal da ferramenta. (5) Deslocamento da ferramenta para a posição de (2). (6) Movimento vertical da ferramenta para cima. (Araujo et. al., 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 três trajetórias mais utilizadas para a entrada da ferramenta na peça: linear, quando a trajetória no plano é linear, circular com um quarto de círculo e circular com semicírculo. Neste último, o método tem como característica o uma trajetória semicircular do centro da ferramenta, com raio menor que o furo acoplado a uma elevação na vertical. Neste método é encontrado o menor carregamento, uma vez que o ângulo de contato inicial é relativamente pequeno durante a entrada e foi utilizado neste trabalho.

A etapa 4 é a etapa quando é realizado efetivamente o fresamento de roscas. Nesta etapa devem-se definir as velocidades de corte e de avanço para usinar o perfil de rosca desejado. A escolha dos parâmetros certos vai garantir um bom acabamento superficial, bem como, a integridade da ferramenta. Nesta etapa vamos definir se a ferramenta vai executar somente um ou vários passes para usinar a rosca.

2.1 Parâmetros de corte

Segundo Araujo (2004), a fresa de rosca tem geometria similar a fresa de topo. Os parâmetros de corte importantes para o fresamento de rosca são a velocidade de corte e avanço. A fresa de rosca pode ser considerada como uma pilha de discos iguais. Se for uma fresa com ângulo de hélice, cada disco tem uma posição angular fixa em relação ao anterior. Na fresa usada para produzir roscas, os discos tem necessariamente a altura do passo da rosca. Em cada disco, o diâmetro da ferramenta varia em relação à altura, porém, localmente, o processo é igual ao fresamento de topo. O ângulo de hélice λ , o passo p , os diâmetros internos (d_i) e externos (d_e) e o número de navalhas (N_f) definem a geometria da ferramenta conforme Fig. (2a). A velocidade de corte e a espessura do cavaco variam com o diâmetro da ferramenta $d_i \leq d(z) \leq d_e$ em diferentes posições da aresta de corte. A ferramenta utilizada neste trabalho apresenta somente uma aresta de corte conforme a Fig. (5b).

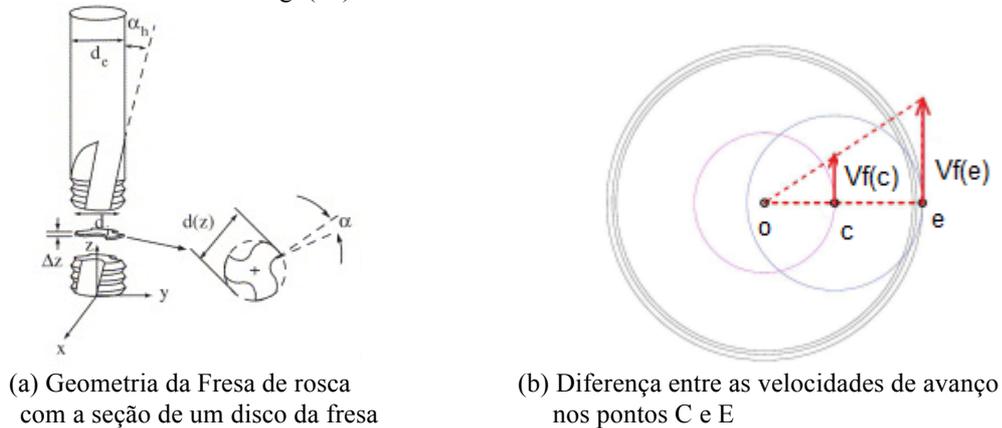


Figura 2 – Geometria da Ferramenta e Velocidade de Avanço (Araujo, 2004)

A velocidade de avanço definida então será calculada a partir do avanço por dente (f_t), do número de hélices (z) e da rotação da ferramenta (n), de forma idêntica ao fresamento de topo, conforme Eq. (1).

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

A distância efetiva percorrida por um dente, cuja aresta está localizada no ponto e da Fig. (2b), pode ser projetada no plano perpendicular ao eixo da ferramenta conforme Eq. (7), onde p_0 é o passo angular da rosca e r_{it} é o raio da trajetória helicoidal da ferramenta, segmento de reta OC na Fig. (2b).

3. FORÇAS NO FRESAMENTO DE ROSCAS

A Força de corte (F_c) pode ser expressa pela relação entre a área da secção de corte (S) e pressão específica de corte, isto é, a força de corte para a unidade de área da secção de corte (K_s) conforme Eq. (2).

$$F_c = K_s \cdot S \quad (2)$$

Uma aproximação da área máxima (S_{max}) pode ser escrita em função da espessura do cavaco máxima (tc_{max}) e do comprimento da aresta (b) como na Eq. (3).

$$S_{max} = tc_{max} \cdot b \quad (3)$$

onde o comprimento da aresta (b) e a soma de cada face da ferramenta conforme a Fig. (3) e dada pela Eq. (4).

$$b = b1 + b2 + b3 \quad (4)$$

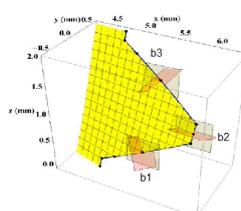


Figura 3 - Aresta de corte (adaptado Fromentin, 2010B)

O modelo mecanístico pode ser considerado uma combinação da abordagem analítica com métodos empíricos em que as forças são proporcionais a força de corte do cavaco (Kline e Devor, 1983). As forças de usinagem medidas experimentalmente são a soma das contribuições de cada uma das arestas de corte conforme Fig. (2a), em contato com a superfície em usinagem do corpo de prova.

As forças de usinagem são comumente calculadas em função da espessura do cavaco, que neste caso é função do avanço por dente ($f_{t_{xy}}$) 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 a espessura de corte radial (r_{doc}), calculada pela expressão da Eq. (5).

$$t_{c_{max}} = 2f_{t_{xy}} \sqrt{\frac{r_{doc}}{D_t} \left(1 - \frac{r_{doc}}{D_t}\right)} \quad (5)$$

Onde r_{doc} é a espessura de corte radial e pode ser escrita pela Eq. (6), em função do diâmetro nominal da rosca (D), do passo (P) e do diâmetro externo (D_t).

$$r_{doc} = \frac{P(80\sqrt{3}D - 75P)}{256(D - D_t)} \quad (6)$$

E $f_{t_{xy}}$ é o avanço no plano xy e é função do avanço por dente calculado na direção da trajetória projetada no plano perpendicular ao eixo da ferramenta e calculada pela Eq. (7).

$$f_{t_{xy}} = \frac{f_t}{\sqrt{\left(\frac{p_\theta}{r_{tt}}\right)^2 + 1}} \quad (7)$$

3.1 Referenciais para decomposição da força de usinagem

No fresamento de roscas temos três referenciais R0, R1 e R2, utilizados no processo de usinagem da rosca. O referencial R0 é fixo no eixo do furo da peça. O referencial R1 estabelece a relação entre o centro da ferramenta e o centro do furo. O referencial R2 estabelece a relação entre a aresta de corte tangente a superfície do furo e o centro da ferramenta. Os três referenciais são apresentados na Fig. (4).

- Referencial da mesa: O referencial da mesa é dado por R0. O referencial R0 é fixo no centro do furo da peça.
- Referencial da posição da ferramenta: 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 , que relaciona a posição X e Y do centro da ferramenta em relação ao centro do furo.
- Referencial de um ponto da ferramenta: O referencial de um ponto da ferramenta é dado por R2. O referencial R2 é fixo no centro da ferramenta e realiza um movimento de rotação em torno do centro da ferramenta. O referencial R2 é localizado pelo ângulo θ_2 , que relaciona a posição X e Y do centro da ferramenta em relação a parede do furo.

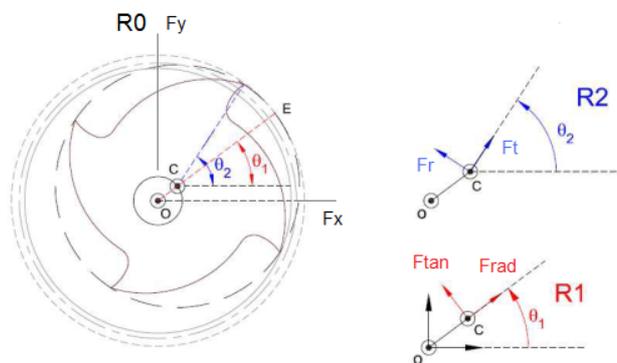


Figura 4 – Os referenciais e suas relações.

As forças no referencial R2 (F_{X2} , F_{Y2} e F_Z) são medidas por um dinamômetro fixo na ferramenta. As forças no referencial R0 (F_{X0} e F_{Y0}) são medidas por um dinamômetro fixo na mesa e as componentes da força resultante no referencial R1 (F_{RAD} e F_{TAN}) são calculadas em função das Eq.(10) e Eq. (11).

$$F_{X0} = F_{X2} \cdot \cos(2\pi - \theta_2) - F_{Y2} \cdot \sin(2\pi - \theta_2) \quad (8)$$

$$F_{Y0} = F_{X2} \cdot \sin(2\pi - \theta_2) + F_{Y2} \cdot \cos(2\pi - \theta_2) \quad (9)$$

$$F_{X1} = F_{RAD} = F_{X0} \cdot \cos(-\theta_1) - F_{Y0} \cdot \sin(-\theta_1) \quad (10)$$

$$F_{Y1} = F_{TAN} = F_{X0} \cdot \cos(-\theta_1) - F_{Y0} \cdot \sin(2\pi - \theta_1) \quad (11)$$

Os três referenciais incluem a direção Z e, portanto a componente F_z é coincidente. A força resultante pode ser calculada através da Eq. (12).

$$Fr = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (12)$$

Neste trabalho as forças medidas estão no referencial R0 fixo no centro do furo da peça, sendo que o dinamômetro foi preso à base da mesa, e foram calculadas as forças radial e tangencial.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

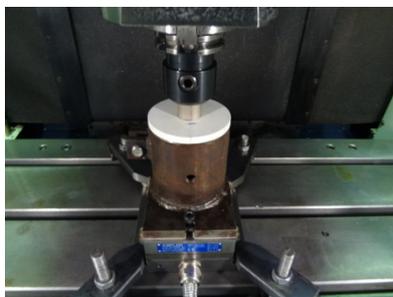
O experimento consistiu de duas etapas. Na primeira etapa foi realizado um teste piloto, para a verificação dos parâmetros de corte e posteriormente foi realizado o experimento. A máquina-ferramenta utilizada foi um centro de usinagem vertical Polares V400 da Romi mostrado na Fig. (5a). O corpo de prova foi fixado na mesa da máquina, através de um gabarito conforme Fig. (5c). O gabarito foi montado sobre um dinamômetro preso à base da máquina CNC mostrado na Fig. (5c). Com a finalidade de garantir uma boa centralização da ferramenta, foi confeccionado um centralizador conforme Fig. (5c).



(a) Máquina CNC



(b) Ferramenta de rosca



(c) Gabarito com centralizador



(d) Placa de Conversão A/D

Figura 5 – Configuração experimental

4.1 Teste piloto

Como uma primeira fase, foi realizado um experimento piloto para verificar a viabilidade da fabricação e a geometria final da peça. Os experimentos foram realizados em corpos de prova de polipropileno conforme Fig. (6), sendo que o furo foi pré-usinado. A usinagem de uma rosca pelo fresamento de rosca necessita que a ferramenta percorra uma trajetória helicoidal. Para usinar roscas API, além da trajetória helicoidal no plano XY, é necessário que a ferramenta realize uma trajetória angular de 7° em relação ao eixo z, eixo normal da peça. Nesta etapa foram usinados três corpos de prova com velocidade de corte constante de 1000 m/min e rotação de 600 rpm.



(a) Corpo de prova usinado com rebarbas (b) Corpo de prova aberto sem rebarbas

Figura 6 - Corpo de prova após o ensaio piloto

4.2 Características do corpo de prova e da ferramenta

Em relação ao corpo de prova, foi utilizado um tarugo redondo de alumínio de liga 6262, com dimensões de 78 mm de diâmetro externo do material e 90 mm de altura. Furo interno com diâmetro de 66 mm e é realizado um ângulo de 7° em relação ao eixo normal. A ferramenta utilizada para realizar o fresamento de rosca foi um suporte de rosqueamento interno para torno mecânico. A ferramenta tem uma aresta de corte para realizar o perfil da rosca API de 2 3/8" REG com uma entrada. Com o auxílio de um relógio comparador, o *run-out* foi aferido com valor máximo de 0,05mm. Durante os ensaios foi utilizado refrigeração para um menor desgaste do inserto.

4.3 Planejamento do experimento

Foram realizados cinco experimentos com diferentes velocidades de avanço (f_t), que resultaram em diferentes valores para o cavaco máximo ($t_{c_{max}}$) conforme Tab. (1). A velocidade de corte foi mantida constante em 250 m/min, isto é, com velocidade de rotação de 2557 RPM. O avanço por dente (f_t) foi calculado em função do cavaco máximo ($t_{c_{max}}$). O valor inicial de $t_{c_{max}}$ foi de 0,03 mm, valor este, calculado a partir do avanço por dente, sugerido pela tabela do fabricante. Os valores subsequentes foram acrescidos de 0,05 mm. Na tabela VI.1 podem-se observar os parâmetros que foram utilizados em cada experimento, com duas réplicas para $t_{c_{max}} = 0,03$ mm e uma para $t_{c_{max}} = 0,15$ mm.

Tabela 1 - Parâmetros de corte dos experimentos finais

Experimento	Avanço por Dente (f_t) (mm/dente)	$T_{c_{max}}$ (mm) Calculado
1	0,07	0,03
1 – réplica	0,07	0,03
1 – réplica	0,07	0,03
2	0,14	0,10
3	0,21	0,15
3 – réplica	0,21	0,15
4	0,28	0,20
5	0,34	0,25

4.4. Aquisição das forças experimentais

Um dinamômetro Kistler Modelo 9257BA foi utilizado para coletar os sinais das 3 componentes da força de usinagem. O sinal elétrico do dinamômetro foi amplificado em um amplificador de sinais e o sinal foi transformado na placa analógica-digital conforme Fig. (4d), que fornece ao computador um sinal que através de um software de comunicação com a placa é traduzido em um vetor de três colunas, uma para cada componente da força conforme a Fig. (6).

Em todos os testes e réplicas foram obtidos os sinais no tempo de força a partir do dinamômetro. 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.

4.5. Tratamento de dados experimentais

A partir dos sinais do dinamômetro foram aquiridas as forças experimentais F_x , F_y e F_z no referencial R0, em relação à mesa conforme Fig. (7). Foi dado um zoom em uma parte do gráfico e selecionado um intervalo onde há sete ondas de força Fig. (8). Neste intervalo são calculadas as forças radiais, tangenciais e resultantes no referencial R1, da superfície da parede do furo. A força radial foi calculada utilizando a Eq. (10), a força tangencial foi calculada utilizando a Eq. (11) e a força resultante foi calculada utilizando a Eq. (12). 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.

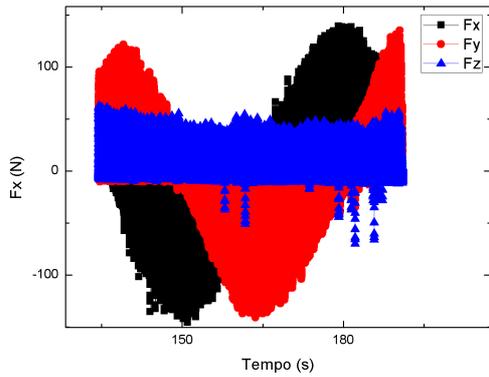


Figura 7 – Forças F_x , F_y e F_z no experimento 1

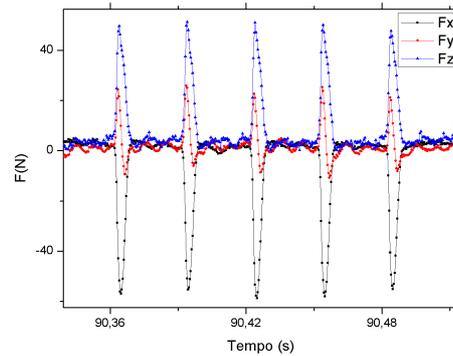
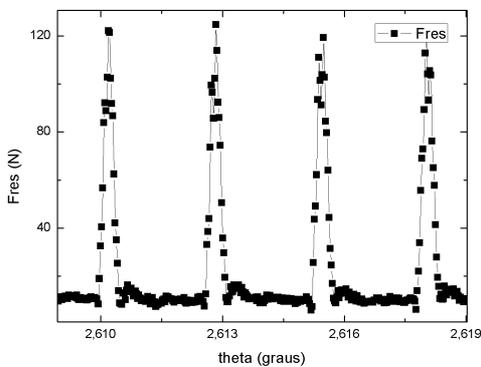
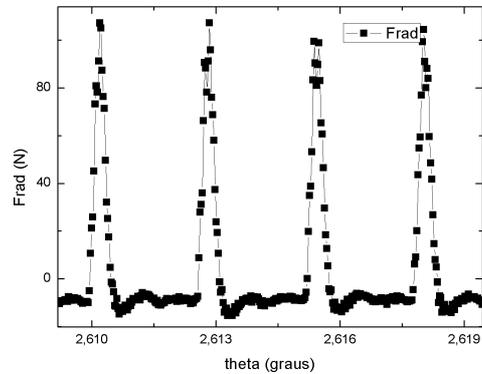


Figura 8 – Intervalo das forças F_x , F_y e F_z no intervalo R0 de cinco rotações

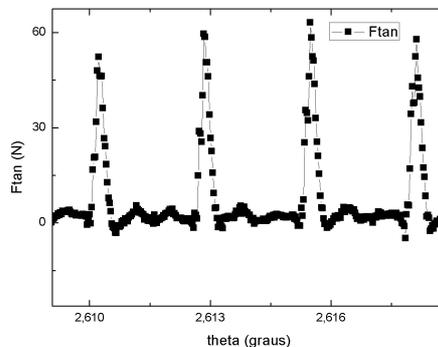
A força resultante foi estudada por passar uma visão geral de todas as forças do sistema. Já a força radial foi escolhida uma vez que é a força que tende a fletir a ferramenta para o centro do furo, podendo causar a deflexão da ferramenta, ocasionando um corte desalinhado e a força tangencial gera uma má formação no filete de rosca. A Figura (9) mostra os resultados no experimento 1 como exemplo.



(a) Força resultante



(b) Força radial do referencial R1



(c) Força tangencial do referencial R1

Figura 9 – Forças experimentais do experimento 1 em uma rotação

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

O tratamento dos sinais foi realizado utilizando o software *STATISTICA*® a partir de uma tabela consolidada de todos os resultados dos testes descritos. A cada teste foram selecionados dez intervalos em uma volta de 360° em torno do furo, em diferentes posições do furo. As mesmas 10 posições foram utilizadas para todos os testes de forma a comparar os resultados. Em cada uma destas rotações e testes, foram analisados os valores máximos, médios e a distância pico-a-pico das forças radial e tangencial do referencial R1 (local entre a peça e a ferramenta) e os valores médios da força de usinagem resultante.

A localização dos dez intervalos de tempo foram realizadas através da posição Θ_1 da ferramenta durante o percurso da trajetória mostrado na Fig. (7). As seguintes posições foram utilizadas para Θ_1 : 13°, 42°, 77°, 104°, 170°, 211°, 230°, 253°, 294° e 333°. A análise estatística com análise de efeitos, a análise de variância (ANOVA) e a identificação dos *outliers* utilizou um intervalo de confiança de 95%. Os resultados podem ser observados na Fig. (10).

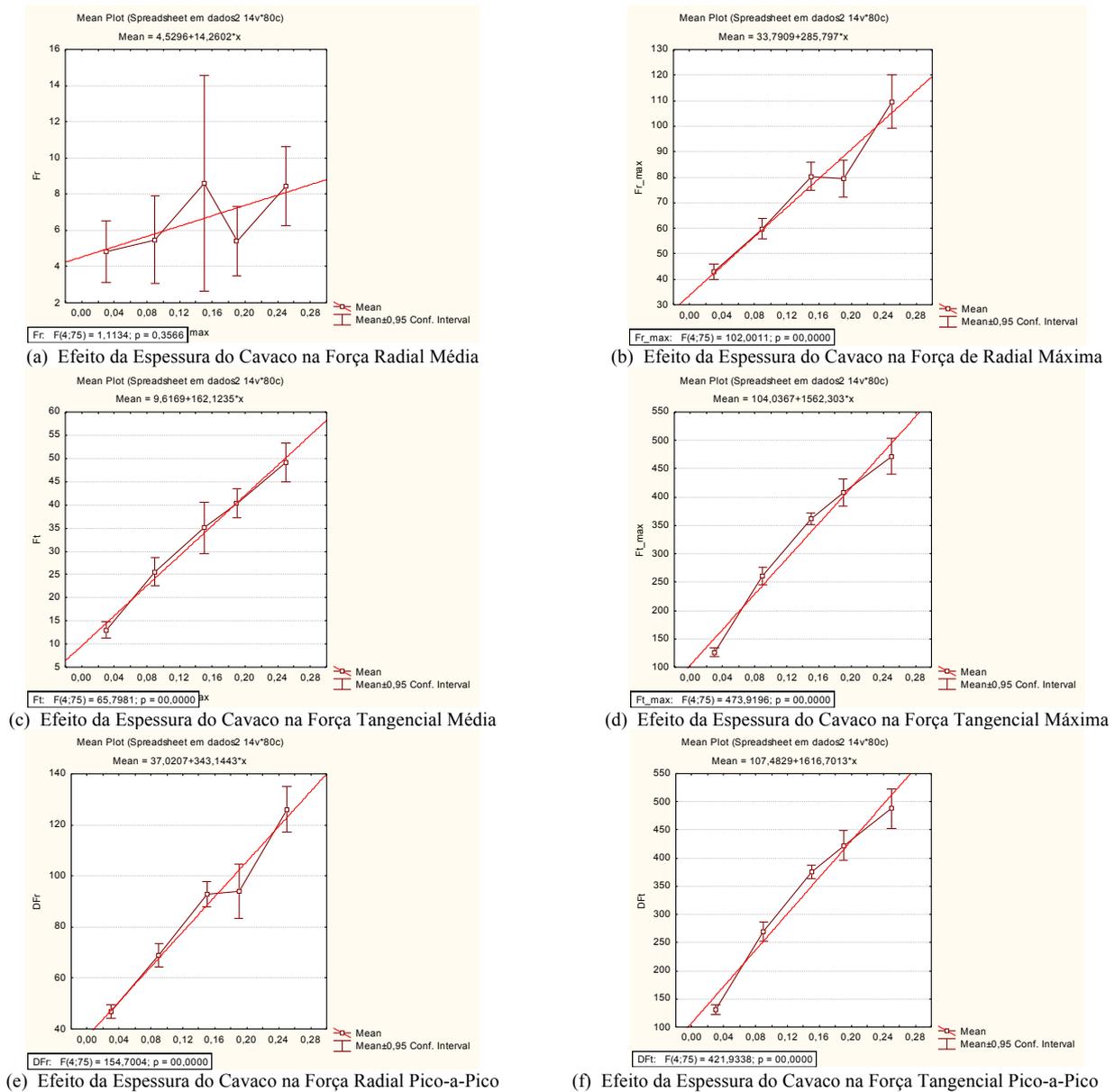


Figura 10 – Efeito da espessura do cavaco em cada componente das forças

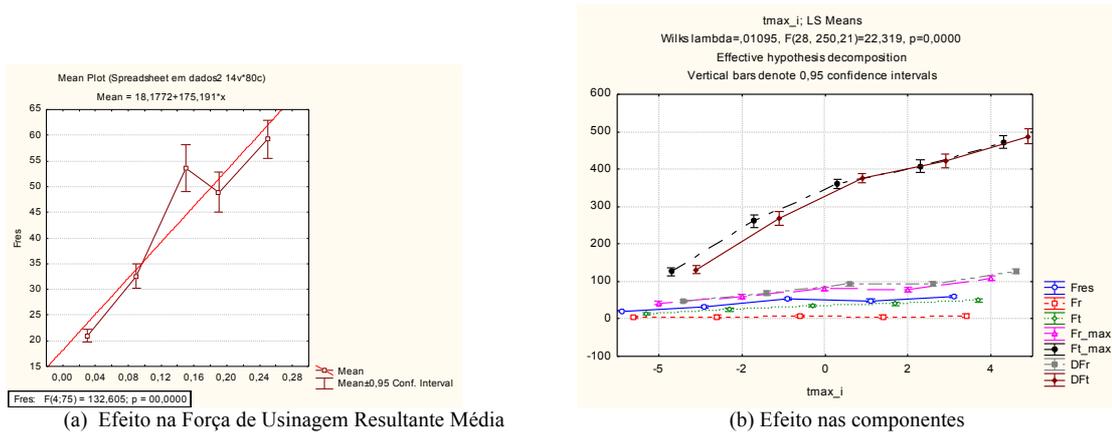


Figura 11 – Efeito da espessura do cavaco nas força de usinagem

A Figura (10) apresenta uma análise das componentes de força com a espessura do cavaco. Sobre a força radial média nada pode ser concluído, pois, de acordo com análise, não houve variação nos valores médios um vez que a probabilidade $p=0,356$ conforme Fig. (10a). A força radial máxima durante a usinagem apresenta variação linear com a variação da espessura do cavaco, e consequentemente do avanço conforme Fig. (10b). Os efeitos do avanço na força radial média para um $t_{c_{max}}=0,20$ mm tem maior discrepância da função linear traçada. A força tangencial média apresentou variação linear das amplitudes com a espessura do cavaco conforme Fig. (10c), e a função linear que melhor aproxima todos os resultados está dentro do intervalo de medida. A Força tangencial máxima também apresenta variação linear nesta faixa de variações de espessura do cavaco com uma pequena discrepância em $t_{c_{max}}=0,03$ e $0,15$ mm, conforme Fig. (10d), o que também acontece na força tangencial pico-a-pico apresentada na Fig. (10f). Na variação pico-a-pico da força radial, houve apenas uma pequena variação para $t_{c_{max}}=0,20$ mm conforme Fig. (10e). Analisando a Fig. (11a), pode-se afirmar que houve uma discrepância na força resultante média para um valor de $t_{c_{max}}$ de $0,15$ mm.

A Figura (11b) resume todos os resultados apresentados e permite a comparação dos efeitos do volume de cavaco removido em cada uma das componentes e suas variações. Percebe-se que a variação pico-a-pico da força radial (DFr) é bem menor que a variação da força tangencial (DFt) e o mesmo ocorre se compararmos os valores absolutos da força radial (Frad) e da força tangencial (Ftan).

A variação pico-a-pico da força radial (DFr) é maior que os valores máximos (Frad max) para os valores de espessura do cavaco máxima ($t_{c_{max}}$) acima de $0,15$ mm, e abaixo desse valor, mantém-se igual. Já a variação pico-a-pico da força tangencial (DFt) é menor que os valores máximos (Ftan max) para valores de espessura do cavaco máxima ($t_{c_{max}}$) até $0,15$ mm, e a partir desse valor, se mantém igual. A Força resultante absoluta (Fres), como esperado, é maior que os valores absolutos da força radial (Frad) e tangencial (Ftan), pois é a resultante das forças.

5. CONCLUSÕES

Neste artigo são apresentados resultados experimentais de uma ferramenta de inserto intercambiável, utilizada para o fresamento de roscas, com geometria fixa, para produzir uma rosca API em uma liga de alumínio. Com a velocidade de corte constante foi elaborado um planejamento de experimentos com a variação da espessura do cavaco máximo.

Após a análise estatística realizada das forças de radial, tangencial e resultante é possível concluir que, na força radial não houve variação significativa. Um estudo posterior deve ser realizado para verificar se há influência da vibração proveniente da variação da força radial. A força tangencial e a força de usinagem apresentaram variação linear em função do aumento da área do cavaco, sem outra influência aparente, o que era esperado. Apenas o corpo de prova com $t_{c_{max}}$ de $0,20$ mm apresentou imperfeições visuais no acabamento superficial. Os outros corpos de prova apresentaram bom acabamento superficial, o que indica que todos os avanços utilizados poderiam ser aplicados.

Visualmente o inserto não sofreu desgaste, apresentando ainda sua cobertura original, sendo que o mesmo inserto realizou a usinagem em todos os corpos de prova e trabalhou com velocidades de avanço acima da tabelada pelo fabricante. A utilização da ferramenta se mostrou aplicável para este caso. Tanto inserto com as peças estão com excelente aspecto visual.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao laboratório CEFCON da COPPE/UFRJ pela disponibilidade da máquina-ferramenta, em especial ao funcionário Vladimir Calixto pelo apoio técnico; ao CEFET/RJ pela estrutura de ensino na Pós-graduação que proporcionou a orientação deste trabalho; e ao LABOMAP/Cluny/ENSAM pela disponibilidade da ferramenta de software estatístico em seu sistema.

7. BIBLIOGRAFIA

- Araujo, A.C., Fromentin, G. e Poulachon, G. *Analytical and experimental investigations on thread milling forces in titanium alloy*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 67, pp. 28–34, 2013.
- Araujo, A.C. *Modelo mecânico de força de usinagem no fresamento de roscas*. Dissertação de D.Sc., UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2004.
- Araujo, A. C., Silveira, J. L. e 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. e Kapoor S., 2004, “Force prediction in thread milling”, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Science & Engineer, v. 26, n.1, p.82-88.
- Fromentin, G. e Poulachon, G. “Modeling of interferences during thread milling operation”, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 49, n.1, pp. 41-51, 2010.
- Fromentin, G. e Poulachon, G. “Geometrical analysis of thread milling—part 1: evaluation of tool angles”. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v.49, pp.73-80, 2010A.
- Fromentin, G. e Poulachon, G.; “Geometrical analysis of thread milling—part 2: calculation of uncut chip thickness”. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v.49, pp.81-87, 2010B.
- Grzesik, W. *Advanced Machining Processes of Metallic Materials: Theory, Modelling and Applications*, 1 ed. Amsterdam: Elsevier Publisher, 2008.
- Kline, W.A. e DeVor, R.E., 1983, “The Effects of Run-Out on Cutting Geometry and Forces in End Milling” International Journal of Machine Tool Design and Research, Vol. 23, pp.123-140
- Koelsch, J.R. *Rosqueamento de alto desempenho*. Máquinas e Metais. n. 432, p. 20- 35, 2002.
- 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.
- Sales, W.F., Becker, Gurgel, M., Alexandre G. e Júnior, János L; *Dynamic behavior analysis of drill-threading process when machining AISI Al-Si-Cu4 alloy*. Int J Adv Manuf Technol, v. 42, pp.873–882, agosto, 2008.
- Smith, G. *Cutting tool technology*, 1 ed. Londres: Industrial handbook Publisher, 2008.
- Stephenson, D. A. e Agapiou, J. S. *Metal Cutting Theory and Practice*, 1 ed. New York: Editora Marcel

8. DIREITOS AUTORAIS

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

ANALYSIS OF THREAD MILLING FORCES FOR API THREAD TYPE

Abstract. Thread milling is a machining operation that allows the use of high cutting speed for manufacturing threads without requiring reversal movement of the axis of the machine and enables the production of different diameters with the same tool. It is important to analyze thread milling forces to avoid tool breakage and optimize tool geometry. There are no studies to manufacture API thread type, widely used in the oil industry. In this study, one thread carbide tool is fixed on a lathe-tool support that was adapted to be used in a milling machine for thread milling. Forces are measured in different machining situations, where feed varies. This study evaluated the force components of bending and twisting the tool and also the magnitude of the resultant force. It is shown that no significant variation of the radial force variation but there is a strong influence on the twist force and resultant force on increasing the chip area.

Keywords: thread milling, threading API, cutting forces