CEFET/RJ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

ANÁLISE DE FORÇAS DE FRESAMENTO DE ROSCAS API

Francirlei Gripa Cardoso

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais

Orientadora:

Anna Carla Monteiro de Araujo

Rio de Janeiro
Novembro – 2012

ANÁLISE DE FORÇAS DE FRESAMENTO DE ROSCAS API

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais

Francirlei Gripa Cardoso

Aprovada por:

_____

Presidente, Prof. Anna Carla Monteiro de Araujo (orientadora), D.Sc

_____

Prof. Hector Reynaldo Meneses Costa, D. Sc.

_____

Prof. Ricardo Alexandre Amar de Aguiar, D. Sc.

_____

Prof. José Luís Lopes da Silveira, D. Sc. - UFRJ

Rio de Janeiro
Novembro – 2012

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

C268 Cardoso, Francirlei Gripa
Análise de forças de fresamento de roscas API / Francirlei Gripa Cardoso.—2012.
x, 70f. + apêndices e anexo : il. p&b. , grafs. , tabs. ; enc.

Dissertação (Mestrado) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2012.
Bibliografia : f.68-70
Orientadora : Anna Carla Monteiro de Araujo

1. Fresagem (trabalhos em metal). 2. Metais – Corte. 3. Roscas (Mecânica). I. Araujo, Anna Carla Monteiro de (Orient.). II. Título.

CDD 621.91

AGRADECIMENTOS

*A **Deus** pelo seu infinito amor, que sempre esteve ao meu lado, principalmente nos momentos mais difíceis da minha vida, que sempre fez cumprir em minha vida, todas as realizações que busquei. Obrigado **Senhor**, por todas as conquistas que tu me destes.*

*Aos meus queridos e amados **pais, Washington Luiz e Maria Luiza** pelo amor, carinho, dedicação, valores, educação e suporte durante toda a minha vida, aos quais, devo minha eterna devoção e gratidão.*

*Aos meus **amigos** que sempre me incentivaram a prosseguir até nos momentos de dificuldade.*

*E não posso esquecer a minha orientadora **Anna Carla**, que se mostrou uma pessoa extraordinária, pela paciência, incentivo, dedicação e conhecimento transmitido durante o meu aprendizado até a finalização deste trabalho.*

RESUMO

ANÁLISE DE FORÇAS DE FRESAMENTO DE ROSCAS API

Francirlei Gripa Cardoso

Orientadora:
Anna Carla Monteiro de Araujo, D. Sc.

Resumo da dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais.

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, 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 as variações 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.

Rio de Janeiro
Novembro – 2012

ABSTRACT

ANALISYS OF THREAD MILLING FORCES FOR API GEOMETRY

Francirlei Gripa Cardoso

Advisor:
Anna Carla Monteiro de Araujo, D. Sc.

Abstract of dissertation submitted to Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ as partial fulfillment of the requirements for degree of Master in Mechanical Engineering and Materials Technology.

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 sector. In this study, one tool carbide is fixed on a lathe support adapted to the machining center 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 bending force variation but there is a strong influence on the twist force and resultant force on increasing the chip area without further apparent influences.

Keywords:

Thread milling, Threading API, Cutting forces.

Rio de Janeiro
November – 2012

SUMÁRIO

Capítulo I Introdução 1
Capítulo II Processo de Usinagem 4
II.1 Forças de Corte em Usinagem 5
II.1.1 Força de Usinagem no Corte Ortogonal 6
II.1.2 Força de Usinagem no Corte Oblíquo 9
II.1.3 Força de Usinagem no Fresamento de Topo 10
II.1.4 Equipamentos de Medição de Forças 13
Capítulo III Processo de Fresamento de Roscas 16
III.1 Geometria da Rosca 16
III.2 Processos de Fabricação de Roscas 18
III.2.1 Processos de Fabricação de Roscas Internas 21
III.3 Fresamento de Roscas 22
III. 4 Cinemática do Fresamento de Rosca 24
III.5 Forças no Fresamento de Roscas 28
III.6 Referenciais para Decomposição da Força de Usinagem 31
Capítulo IV Experimento 34
IV.1 Equipamentos 35
IV.1.1 Centro de usinagem 35
IV.1.2 Dinamômetro 36
IV.1.3 Amplificador de sinais 37
IV.1.4 Aquisição digital 37
IV.1.5 Ferramenta, porta-ferramenta, mandril e gabarito de fixação 38
IV.1.6 Corpo de prova 41
IV.2 Experimento piloto 42
IV.3 Planejamento dos Experimentos 46
IV.4 Resultados Experimentais e Analise Estatística 49
IV.4.1 Resultados Experimentais 49
IV.4.2 Analise Estatística 60
Capítulo V Conclusão 66
Sugestões para trabalhos futuros 67
Referências Bibliográficas 68
APÊNDICE A PROGRAMA DE INTERPOLAÇÃO 71

APÊNDICE B TABELA DE DADOS DOS PONTOS 72
APÊNDICE C ARTIGO COBEF 2013 75
ANEXO 1 INFORMAÇÃO TÉCNICA DO DINAMÔMETRO 86

Lista de Figuras

Figura II.1 – Corte Ortogonal e Oblíquo. 6
Figura II.2 - Força de usinagem e suas decomposições 7
Figura II.3 - Círculo de Merchant 7
Figura II.4 - Forças de usinagem e seus componentes para o processo de fresamento. 9
Figura II.5 - Fresamento de topo. 11
Figura II.6 - Espessura do cavaco indeformado 11
Figura II.7 - Fresa de Topo. 12
Figura II.8 - Plano de contato e vista superior da ferramenta. 12
Figura II.9 - Forças total 13
Figura II.10 - Representação do fenômeno da piezoeletricidade. 14
Figura III.1 - Perfil básico de uma rosca métrica. 16
Figura III.2 - Tipos de Roscas. 17
Figura III.3 - Ponteiras de rosca API 18
Figura III.4 - Perfil de Rosca API 18
Figura III.5 - Orientação das fibras do material em roscas. 19
Figura III.6 - Tipos de Cabeçotes Rosqueador 20
Figura III.7 - Ferramenta de Turbilhonamento. 20
Figura III.8 - Principais processos de usinagem de roscas internas. 22
Figura III.9 - Tipos de Ferramentas para Fresamento de Roscas. 23
Figura III.10 – Geometria da ferramenta. 23
Figura III.11 – Etapas do processo de fresamento de roscas. 24
Figura III.12 – Etapas do processo de fresamento de roscas pela método do thrilling. 25
Figura III.13 – Método Linear. 26
Figura III.14 - Circular com ¼ de círculo. 26
Figura III.15 - - Circular com semicírculo. 27
Figura III.16 - Linha tangente. 27
Figura III.17 - Diferença de velocidade de corte entre centro da ferramenta e ponto de contato peça-ferramenta. 28
Figura III.18 - Parametrização do Fresamento de Rosca. 29
Figura III.19 - – Trajetória da ferramenta. 30
Figura III.20 - Aresta de Corte 31
Figura III.21 – Os referenciais e suas relações 32
Figura IV.1 – Modelo experimental 35
Figura IV.2 – Centro de usinagem Polares V400. 36
Figura IV.3 – Dinamômetro Kistler. 36
Figura IV.4 – Amplificador de sinais. 37
Figura IV 5 – Placa de Aquisição de Sinais. 38
Figura IV.6 – Gabarito de Fixação. 39
Figura IV.7 - Porta ferramentas tipo cone. 39
Figura IV.8 – Porta Ferramenta Rebaixada 40
Figura IV.9 – Inserto API. 40
Figura IV.10 – Corpo de prova. 41
Figura IV.11 – Corpo de prova aberto. 41
Figura IV.12 - Corpo de Prova após o Ensaio Piloto. 42
Figura IV.13 – Aferição de Run-out 43
Figura IV.14 - Centraliador 43
Figura IV.15 – Forças Fx, Fy e Fz com passo temporal. 44
Figura IV.16 - Forças Fx, Fy e Fz no experimento piloto 45
Figura IV.17 - Forças Fx, Fy e Fz no intervalo R0 de cinco rotações. 45
Figura IV.18 - Forças de corte radial à superfície cilíndrica interna do corpo de prova 46
Figura IV.19 - Forças de Corte Tangencial à superfície cilíndrica interna do corpo de prova 46
Figura IV.20 - Componentes Fx, Fy e Fz de todos os experimentos. 48
Figura IV.21 – Usinagem de rosca. 49

Figura IV.22 – Modelo do tratamento de dados 49
Figura IV.23 - Força resultante de todos os experimentos 50
Figura IV.24 - Força radial de todos os experimentos 51
Figura IV.25 - Força tangencial de todos os experimentos 52
Figura IV.26 – Forças no corpo de prova 1 em uma rotação de 360º em relação ao furo para tcmax=0,03 mm/volta. 53
Figura IV.27 – Forças no corpo de prova 2 em uma rotação de 360º em relação ao furo para tcmax=0,03 mm/volta. 54
Figura IV.28 – Forças no corpo de prova 3 em uma rotação de 360º em relação ao furo para tcmax=0,03 mm/volta. 55
Figura IV.29 – Forças no corpo de prova 4 em uma rotação de 360º em relação ao furo para tcmax=0,10 mm/volta. 55
Figura IV.30 – Forças no corpo de prova 5 em uma rotação de 360º em relação ao furo para tcmax=0,20 mm/volta. 56
Figura IV.31 – Forças no corpo de prova 6 em uma rotação de 360º em relação ao furo para tcmax=0,15 mm/volta. 57
Figura IV.32 – Forças no corpo de prova 7 em uma rotação de 360º em relação ao furo para tcmax=0,25 mm/volta. 58
Figura IV.33 – Forças no corpo de prova 8 em uma rotação de 360º em relação ao furo para tcmax=0,15 mm/volta. 58
Figura IV.34 – Gráfico de dispersão da força resultante, radial e tangencial máxima. 59
Figura IV.35 – Gráfico de dispersão da força resultante, radial e tangencial máxima. 59
Figura IV.36 – Forças de corte para ft=0,28 mm/rotação. 60
Figura IV.37 – Forças de corte para ft=0,07 mm/rotação. 60
Figura IV.38 - Efeito do avanço na força de flexão média 62
Figura IV.39 - Efeito do avanço na força radial máxima 62
Figura IV.40 - Efeito do avanço na força tangencial média 62
Figura IV.41 - Efeito do avanço na força tangencial máxima 63
Figura IV.42 - Efeito do avanço na força radial pico-a-pico 63
Figura IV.43 - Efeito do avanço na força tangencial pico-a-pico 64
Figura IV.44 - Efeito do avanço na força resultante média 64
Figura IV.45 - Análise de variância (ANOVA) 65

Capítulo I - Introdução

Os processos de furação e rosqueamento são amplamente aplicados em operações de usinagem. De acordo com ERTUNC (2004), o processo de furação representa quase 40% de todo procedimento de remoção de material na indústria aeroespacial. É possível medir a importância desses processos, tendo em conta o estudo de FURNESS *et al.* (2002). Eles relataram que o processo de furação foi responsável por até 50% de todos os processos de usinagem nos EUA no final de 1990. Se por um lado o rosqueamento e os processos de furação são amplamente aplicados, por outro lado, eles são difíceis de serem controlados.

Segundo RODRIGUES (2011), uma das principais formas de união entre peças na indústria mecânica é a fixação por rosca. A usinagem de roscas, seja externa ou interna, representa um desafio para a correta aplicação de ferramentas de corte. Sendo 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 seu sucateamento, acarretando, dessa forma, 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 seleciona ou controla 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.

Os principais aspectos que devem ser observados para solucionar problemas em rosqueamento, tais como *run-out*, acabamento superficial, entre outros, são: a definição da tecnologia mais adequada de rosqueamento, o tipo de ferramenta e, finalmente, os parâmetros de corte para a operação. Para definir a tecnologia de rosqueamento é necessário, antes de qualquer decisão, conhecer o perfil da rosca que será produzida, uma vez que as dimensões e as tolerâncias do perfil são informações determinantes para a correta escolha entre as possibilidades de usinagem ou mesmo conformação da rosca.

No processo de fabricação de roscas pode-se trabalhar com remoção de cavaco (roscas usinadas) ou sem remoção de cavaco (roscas laminadas). Dentre as roscas usinadas pode-se escolher entre rosquear com macho ou cossinete, fresar com fresas de roscas, tornear ou rosquear com ferramentas perfiladas, turbilhonar e, em aplicações de alta precisão, retificar e lapidar com ferramentas perfiladas ou simplesmente laminar a rosca.

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 está se tornando cada vez mais empregado como uma técnica para produção do filete de rosca interna em peças complexas, devido à suas vantagens em relação ao macho de roscar.

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.

O perfeito conhecimento dos parâmetros de corte pode minimizar os efeitos indesejáveis do processo, uma vez que se pode maximizar o processo de usinagem. Poder-se-ia, dentre outros fatores, prever o desgaste da ferramenta e até mesmo estimar sua quebra. O modelamento de forças nos da uma aproximação do comportamento dos parâmetros de corte. Alguns modelos de força utilizando o macho de roscar foram desenvolvidos, dentre eles podemos destacar DOGRA *et al.* (2002), CAO *et al.* (2002), ARMAREGO *et al.*, (2002). Devido a facilidade de remoção da fresa de rosca, há um aumento do uso da mesma para a fabricação de peças de alto custo, em relação ao macho de roscar.

Segundo ARAUJO (2004), a fresa de topo tem geometria similar ao da fresa de rosca. Em ARAUJO (1999) temos um estudo das forças de usinagem no fresamento de topo. Para modelar as forças no fresamento de rosca, Araujo precisou ter como base o modelamento de forças no fresamento de topo. Outros autores também realizaram modelos de força no fresamento de topo, dentre eles, KAPOOR (2005), LAI (2000), WANG (2011), KLINE (1982).

Muitas pesquisas têm sido desenvolvidas para a fabricação de rosca através do fresamento de rosca. ARAUJO *et al.* (2004), apresenta um modelo mecanicista para o fresamento de rosca. FROMENTIN *et al.* (2010) apresenta os aspectos geométricos do processo de fresamento de roscas, pois afirma que há uma interferência geometrica entre a ferramenta e a superficie 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.

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 consequentemente, aumentar o desempenho do processo.

Um modelo utilizando a espessura do cavaco foi desenvolvido para diferentes profundidades de corte radial ao longo dos vários pontos da aresta de corte da ferramenta, e a influência da excentricidade da ferramenta. A ferramenta é considerada como uma fresa de topo com arestas de corte com perfil de rosca. Em IMANI *et al.* (2012), é apresentado um novo modelo pra a previsão das forças no fresamento de rosca.

Neste trabalho serão analisadas as forças de corte no fresamento de rosca API com o uso de uma ferramenta de inserto intercambiável. Este é um estudo inovador, pois é analisada a fabricação de uma geometria de rosca que não foi modelada. Como não há no mercado uma fresa especifica para a confecção de rosca API, um incerto de metal duro com o perfil da rosca foi colocado em um suporte de torneamento adaptado ao mandril do centro de usinagem.

Esta dissertação esta dividida em cinco partes. No capitulo I temos a introdução propriamente dita. No capitulo II será abordado o processo de usinagem, será visto o surgimento da usinagem, mas o foco são as forças de corte, será abordado o tema da medição das forças no final do capitulo. No capitulo III será discutido todos os assuntos referente ao processo de fresamento de rosca, como geometria da fresa, cinemática do fresamento, forças no fresamento, entre outros. No capitulo IV será exposto como foi realizado o experimento, os materiais, métodos e a analise dos resultados. Finalmente no capitulo V, é apresentada a conclusão da dissertação.

Capítulo II – Processo de Usinagem

Segundo MACHADO (2008), até meados do século XVIII, o principal material utilizado para se fabricar peças na indústria metal-mecânica, era a madeira, que era usinada com ferramentas de aço carbono. Novos e mais resistentes materiais foram desenvolvidos com a revolução Industrial, impulsionando desta maneira, o desenvolvimento dos aços-liga como ferramentas de corte.

A utilização do vapor como fonte de energia para movimentar as máquinas de usinagem, impulsionou a indústria metal-mecânica, no final do século XVIII, propiciando o aparecimento de máquinas ferramentas responsáveis pela fabricação de outras variedades de máquinas-ferramentas e instrumentos. Em 1774, John Wilkinson deu a primeira contribuição relevante ao construir uma máquina para mandrilar cilindros de máquinas a vapor, pois os mesmos, eram usinados com equipamentos projetados para mandrilar canhões e que não asseguravam a precisão exigida (McGEOUGH, 1988).

Em 1797, Henry Maudslay desenvolveu o primeiro torno com avanço automático, permitindo a produção de roscas com passo definido. Em 1862 surge a primeira fresadora universal, desenvolvida por J. R. Brown, que foi utilizada inicialmente para a produção de canais em brocas helicoidais (SANTOS e SALES, 2007).

No final do século XIX, já com a energia elétrica no lugar do vapor, deu-se início aos estudos, com Frederick Winslow Taylor, dos fenômenos que ocorrem nos processos de usinagem, que visavam o aumento da produtividade na fabricação. As pesquisas de Taylor revolucionaram os processos produtivos através do desenvolvimento do aço rápido, dos fluidos de corte e da determinação da equação de vida para ferramentas de corte (SANTOS e SALES, 2007).

Já no século XX, o objetivo principal das empresas era a busca por novos processos de usinagem para aumentar a produção e a qualidade, e diminuir o custo dos produtos, devido ao desenvolvimento tecnológico acelerado e a competitividade.

A definição de usinagem pode ser entendida como operação que confere à peça forma, dimensões ou acabamento, ou ainda uma combinação qualquer desses três, através da remoção de material sob a forma de cavaco. (SANTOS e SALES, 2007). O cavaco, por sua vez, é a porção de material retirado da matéria prima pela ferramenta, caracterizado por possuir forma irregular (FERRARESI, 1977).

De acordo com KALPAKJIAN (1995), em países industrializados, a atividade manufatureira responde por 20% a 30% do Produto Interno Bruto e serve de indicativo confiável do padrão de vida da população do país. Em um panorama geral, a manufatura pode ser definida como o processo de transformação de matérias-primas em produtos acabados, seguindo planos bem organizados em todos os aspectos.

Para TRENT (1985), a usinagem é o processo de fabricação mais popular do mundo, transformando em cavacos algo em torno de 10% de toda a produção de metais e empregando dezenas de milhões de pessoas.

Segundo MACHADO (2008), a usinagem é um processo complexo e simples ao mesmo tempo, no qual se produzem peças removendo-se o excesso de material na forma de cavacos. A usinagem é um processo complexo devido às dificuldades em determinar as imprevisíveis condições ideais de corte, e simples porque, uma vez determinadas essas condições, o cavaco se forma corretamente, dispensando qualquer tipo de intervenção do operador. Com as condições ideias de corte definidas, é possível produzir peças dentro das especificações de geometria, tamanho e acabamento com o menor custo possível.

A usinagem tem ainda a peculiaridade de ser um processo que envolve um elevado número de variáveis que são difíceis de serem mensuradas. SHAW (1984), afirma que é praticamente impossível prever o desempenho no corte dos metais. Não significa dizer que, os estudos dos processos de usinagem não tem valor. A cada nova variável que é detalhadamente estudada e interpretada de maneira adequada contribui para o entendimento do processo pode-se chegar mais próximo da capacidade de prever seu comportamento.

De acordo com BLACK (1995), a imprevisibilidade da usinagem se deve ao fato de esse ser o único processo de deformação plástica cuja única restrição é oferecida pela ferramenta de corte. A variedade de opções para os parâmetros de entrada do processo de usinagem resulta em infinitas combinações e há apenas três maneiras de lidar com tal complexidade: por meio da experimentação; por meio da experiência adquirida ao longo dos anos e através da utilização de modelos teóricos. Segundo MACHADO (2008), nenhuma dessas abordagens é capaz de sozinha, encontrar soluções satisfatórias, sendo recomendada a combinação de duas delas, ou mesmo das três abordagens.

O processo de usinagem envolve os processos de fresamento, torneamento, furação, rosqueamento, entre outros. O segmento de usinagem é uma área de pesquisa muito abrangente e de caráter interdisciplinar. A mecânica do corte é uma área de estudo bastante complexa, cujo campo de pesquisa é vasto. Diversos modelos de corte com diferentes abordagens têm sido aplicados para melhor compreensão da usinagem. Neste sentido é necessário conhecer as forças de usinagem envolvidas para ser capaz de prever o comportamento dinâmico, o acabamento da superfície, o desgaste excessivo e a quebra da ferramenta.

II.1 Forças de Corte em Usinagem

O conhecimento da força de usinagem que age sobre a cunha cortante e o estudo de seus componentes é de grande importância, porque possibilita a determinação das condições

de corte, da potência necessária para o corte, a determinação da usinabilidade de um material e o desgaste das ferramentas de corte.

Esses dados são utilizados também para o dimensionamento de uma maquina ferramenta, para diferentes cargas e velocidades de trabalho (FERRARESI, 1977). Os modelos da mecânica do corte podem ser baseados no modelo ortogonal e obliquo que são apresentados em seguida na Figura II.1.

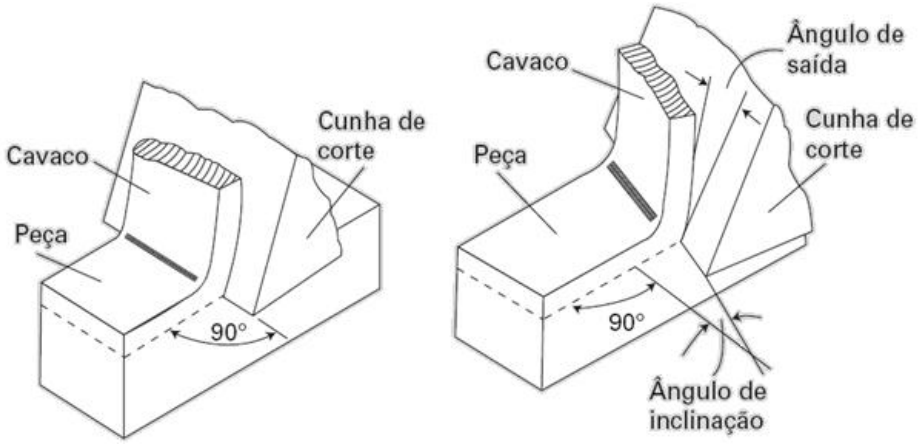


Figura II.1 – Corte Ortogonal e Oblíquo. (FERRARESI, 1977)

II.1.1 Força de Usinagem no Corte Ortogonal

Segundo FERRARESI (1970), o mecanismo da formação do cavaco é mais fácil de ser compreendido e de serem aplicados os cálculos matemáticos quando se considera a formação continua de cavaco no corte ortogonal. A formação do cavaco é considerado um fenômeno bidimensional que pode ser modelado em um plano normal à aresta e representa toda a região do volume do cavaco. O modelo bidimensional da formação de cavacos permite uma análise vetorial das forças que agem sob a ferramenta, cavaco e peça.

Segundo FERRARESI (1970), conforme a ferramenta se movimenta de encontro à peça, uma parte do material da peça sofre tensão até que as tensões de cisalhamento se tornem grandes o suficiente para provocar um deslizamento, que se dá na região de cisalhamento, entre a parte tensionada do material e a peça. Com o intuito de simplificar o estudo da formação de cavaco, podemos comparar essa região a um plano. A Figura II.2 ilustra a força de usinagem (F_U) agindo sobre a cunha cortante e sua decomposição em diversas direções.

A força de corte (F_c), a projeção da força principal de corte sobre a superfície de saída da ferramenta na sua direção tangencial (F_T), a força de compressão (F_N), a projeção da força principal de corte sobre o plano de cisalhamento na sua direção tangencial (F_s), a projeção da força principal de corte sobre o plano de cisalhamento na sua direção normal (F_{NZ}), a força de

avanço (F_f), ângulo de cunha da ferramenta (β); razão entre as forças tangencial e normal sobre a superfície de saída da ferramenta e o ângulo de folga da ferramenta (α) podemos ser visto na Figura II.2.

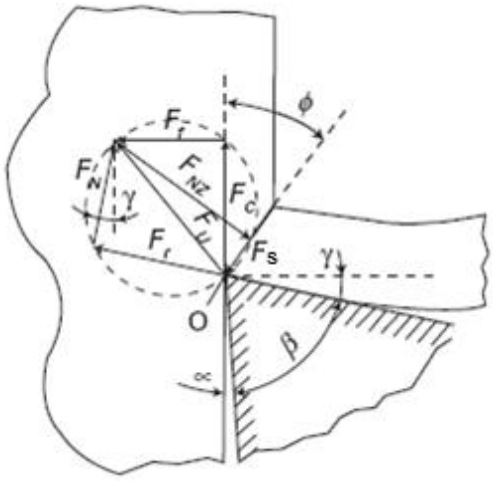


Figura II.2 - Força de usinagem e suas decomposições no plano de cisalhamento, na superfície de saída e nas direções de corte e de avanço. (FERRARESI, 1977)

Para um perfeito entendimento das forças envolvidas no corte ortogonal, podemos decompor a força de usinagem (F_U) nas diversas direções obedecendo a um teorema da geometria que permite representar todos os componentes em um circulo, onde F_U é o diâmetro do circulo. Essa representação é chamada Círculo de Merchant conforme Figura II.3. (MERCHANT, 1954)

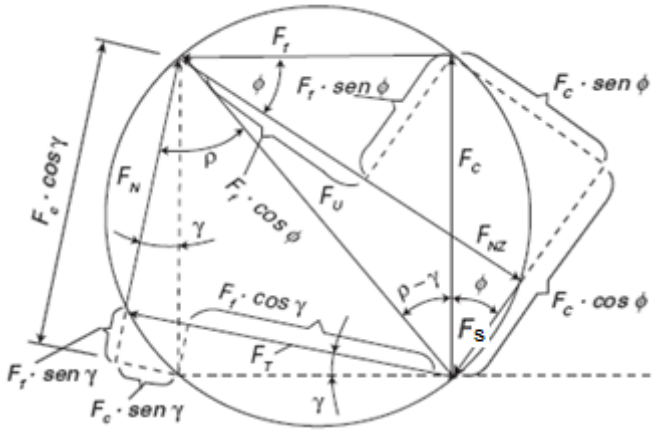


Figura II.3 - Círculo de Merchant (FERRARESI, 1977)

Usando as relações geométricas permitidas pelo Círculo de Merchant, pode-se estabelecer a relação entre a força de usinagem (Fu) e os o ângulo de saída da ferramenta (ɤ),

ângulo de cisalhamento (φ) e ângulo entre a força de usinagem F_U e a componente F_N (ρ), para determinar as demais forças, conforme relação abaixo:

$$F_T = F_U \cdot \text{sen}\rho \quad (2.1)$$

$$F_N = F_U \cdot \cos\rho \quad (2.2)$$

$$F_C = F_U \cdot \cos.(\rho - \gamma) \quad (2.3)$$

$$F_f = F_U \cdot \text{sen}.(\rho - \gamma) \quad (2.4)$$

$$F_s = F_U \cdot \cos.(\varphi + \rho - \gamma) \quad (2.5)$$

$$F_{NZ} = F_U \cdot \text{sen}.(\varphi + \rho - \gamma) \quad (2.6)$$

Segundo MACHADO (2008), há uma alta pressão normal na interface entre a ferramenta e o cavaco, sendo que a superfície real em contato vai aumentar até o seu limite máximo, sendo que a força necessária para o deslizamento é associada à menor tensão de ruptura ao cisalhamento entre os materiais em contato.

A área da secção de corte (S) é dada, em aproximação, pelo produto da profundidade de corte (h) pela área do cavaco (t_c) conforme a equação 2.7.

$$S = h \cdot t_c \quad (2.7)$$

Podemos estabelecer uma relação entre a área do plano de cisalhamento (A_s) e a área do cavaco indeformado (S) para o corte ortogonal, onde:

$$sen\ \phi = \frac{S}{A_S} \quad (2.8)$$

A força de cisalhamento (F_s) necessária para formar cavacos depende da resistência ao cisalhamento do material (k) e da área do plano de cisalhamento nas condições particulares de corte (A_s), onde:

$$F_s = K \cdot A_s \quad (2.9)$$

A força de corte (F_c), a principal componente da força de usinagem (Fu) para dimensionamento do motor de máquinas-ferramentas, pode ser determinada em função da pressão específica de corte (K_s) e da área da seção de corte (S), onde:

$$F_c = K_s \cdot S \quad (2.10)$$

II.1.2 Força de Usinagem no Corte Oblíquo

Segundo MACHADO (2009), conhecer a força de usinagem que atua sobre a cunha cortante é importante para pode-se estimar a potência necessária para o corte e as forças atuantes nos elementos da máquina-ferramenta. Pode-se também prever o desgaste das ferramentas de corte.

De acordo com MACHADO (2009), a formação dos cavacos nos processos de usinagem ocorre tridimensionalmente. Por estar no espaço tridimensional, à força de usinagem (F_U) pode ser decomposta em três componentes básicas que agem diretamente na cunha cortante. A Figura II.4 mostra a força de usinagem tridimensional e suas componentes para o processo de fresamento.

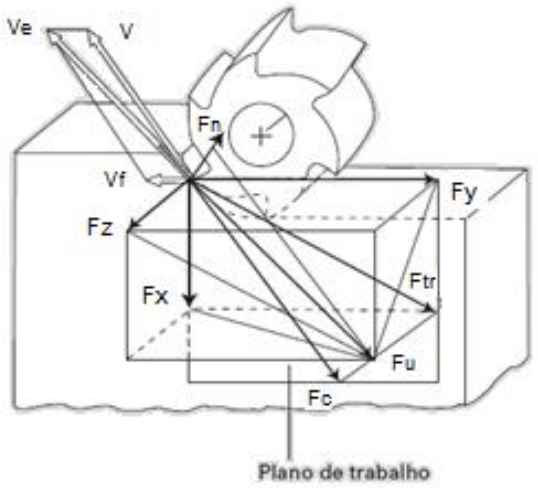


Figura II.4 - Forças de usinagem e seus componentes para o processo de fresamento. (adaptado de FERRARESSI, 1977)

A força de usinagem (F_U) pode ser decomposta em três componentes que são: a força de corte, a força tangencial e a força radial. A força de corte ou força principal de corte (F_C) é a projeção da força de usinagem sobre o plano de trabalho, na direção de corte, dada pela velocidade de corte. A força tangencial (Fx) é a projeção da força de usinagem sobre o plano de trabalho, na direção de avanço, dada pela velocidade de avanço. A força axial (Fz) é a projeção da força de usinagem perpendicular ao plano de trabalho.

Como a força de usinagem é normalmente decomposta nos seus três principais componentes, vale sempre a relação:

$$\left|\overrightarrow{F_u}\right| = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \qquad (2.11)$$

II.1.3 Força de Usinagem no Fresamento de Topo

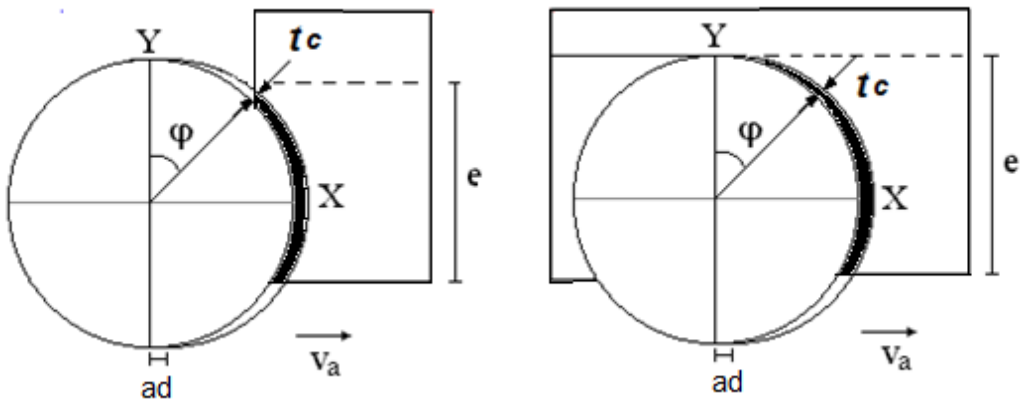
No fresamento de topo, em função de não ser constante a espessura do cavaco com a rotação ao longo da aresta de corte, a força cortante apresenta oscilação. Com o intuito de avaliar o acabamento da peça, a vida útil e o desgaste da ferramenta, devem-se analisar as forças para prever o comportamento mecânico da ferramenta, em operações de usinagem onde há variação na espessura do corte e cortes interrompidos. (ARAUJO, 1999).

Um dos primeiros artigos neste tema foi apresentado por Martellotti (TLUSTY e MACNEIL, 1975) onde foi proposta a equação da variação da espessura do cavaco indeformado com a rotação da ferramenta. No artigo de TLUSTY (1975), a operação de fresamento de topo foi analisada a partir do plano de contato entre a ferramenta e a peça para calcular o volume de material removido a cada instante. Foi considerada a pressão específica de corte constante em cada operação e analisado alguns dos efeitos transientes e a diferença de fase na dinâmica do corte.

O primeiro modelo mecanístico para fresamento de topo foi apresentado por KLINE (1982). Baseou-se na geometria de corte e na pressão específica de corte calculando elementos da força instantânea a partir de segmentos da aresta de corte. O procedimento para a obtenção da pressão específica de corte tangencial e radial foi feito a partir de experimentos onde a força média de corte foi obtida.

ALTINTAS (1991) analisa as forças instantâneas médias e a superfície acabada no fresamento de topo. Utiliza funções exponenciais para modelar a pressão específica de corte em função da espessura do cavaco média por rotação. Nos experimentos de ALTINAS (1991), a espessura média do cavaco não é constante, pois a espessura de penetração varia com o avanço.

As forças no processo de fresamento são nulas, quando a ferramenta não esta em contato com a peça, e vai aumentado conforme a ferramenta vai avançando sob o material a força de corte atinge o seu máximo quando toda a ferramenta esta sob a peça. O processo de fresamento mostrado na Figura II.5 apresenta dois momentos de corte. Na Figura II.5a a ferramenta está começando a cortar a peça de trabalho e a largura de corte (e) muda com o avanço por dente (f_t), então a força vai aumentando com o tempo. Na Figura II.5b a largura de corte (e) já é constante, com isso, a força é constante, pois não há variação na espessura do material.



a) inicio do corte b) corte em execução

Figura II.5 - Fresamento de topo. (ARAUJO, 1999)

A espessura do cavaco não deformado (t_c) para cada ponto da aresta de corte (Figura II.6) pode ser calculada a partir da expressão (2.12) como uma função da posição angular do ponto (φ) e do avanço por dente (ad).

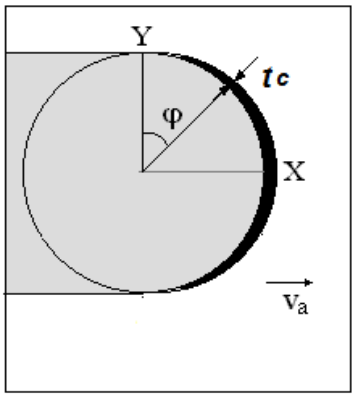


Figura II.6 - Espessura do cavaco indeformado (ARAUJO, 1999)

$$t_c = ad \,.\sin(\varphi) \tag{2.12}$$

A geometria da fresa de topo é mostrado na Figura II.7, onde (h) é a profundidade de corte e (r) é o raio da ferramenta. As variáveis importantes são mostradas na Figura II.8, na qual é apresentada uma vista da face lateral da ferramenta em contacto com a peça de trabalho planificada em um plano em conjunto com a vista superior da ferramenta.

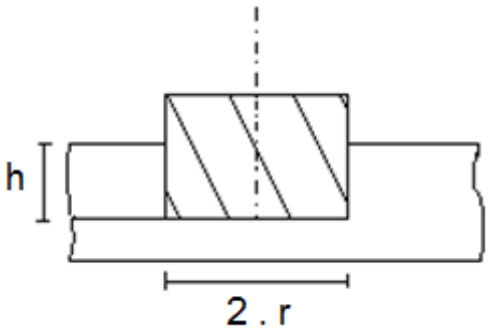


Figura II.7 - Fresa de topo. (ARAUJO, 1999)

Na Figura II.8, a aresta de corte de cada dente é representada por uma linha, inclinado por um ângulo de hélice λ no plano, e na vista superior, a aresta de corte é representada pelo ângulo ψ, o que indica que é o ponto principal da aresta de corte. O ângulo final de contato entre a peça em relação ao eixo y (φ_2) subtraido do angulo inicial de contato entre a ferramenta e a peça em relação ao eixo y (φ_1), é igual ao angulo de contato entre a ferramenta e a peça (φ_0),conforme a equação (2.13) . Para o caso em questão $\varphi_1 = 0$, então $\varphi_o = \varphi_2$. (ARAUJO, 1999)

$$\varphi_o = \varphi_2 - \varphi_1. \qquad (2.13)$$

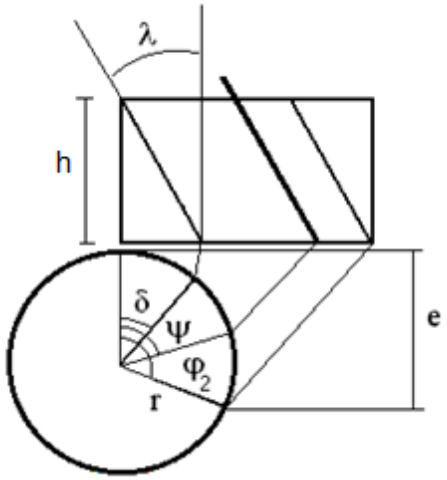


Figura II.8 - Plano de contato e vista superior da ferramenta. (ARAUJO, 1999)

Cada aresta de corte passa de φ_1 até φ_2 através de três fases conforme tabela II.1. Na fase A, a aresta de corte está entrando na peça de trabalho e em cada rotação há um aumento do comprimento da aresta de corte. Na fase B, o comprimento da aresta de corte é constante. Na fase C o comprimento da aresta de corte esta diminuindo. Além disso, dependendo da relação entre o ângulo de contacto φ_0 e o ângulo δ, que é a diferença entre o angulo ψ da

ponta da aresta de corte e do ponto mais acima da aresta cortante em contato com apeça, a geometria da superfície de corte planificada podem ser classificadas como Tipo I, se o ângulo de contacto φ_0 é maior que δ, se essa condição não é aceita, então é chamada de Tipo II. (ARAUJO, 1999)

TABELA II.1 – Interfalo entre φ e ψ. (ARAUJO E SILVEIRA, 1999)

	TIPO I		TIPO II		TIPO I		TIPO II	
Região	φ inicial	φ final	φ inicial	φ final	φ inicial	φ final	φ inicial	φ final
A	φ1	δ	φ1	φ2	φ1	ψ	φ1	ψ
B	δ	φ2	φ2	δ	ψ - δ	ψ	φ1	φ2
C	φ2	φ2 + δ	δ	φ2 + δ	ψ - δ	φ2	φ - δ	φ2

Em geral, as forças de corte na fresa pode ser expressa como uma função da espessura do cavaco (tc) e a profundidade de corte (h) para z=4 (Figura II.9).

$$F = \sum_{i=1}^{4} \int_{\varphi i}^{\varphi f} K\ tc\ dh \qquad (2.14)$$

Onde K é a pressão de corte específico, uma função empírica do material da peça de trabalho, da geometria da ferramenta e a espessura média do cavaco.

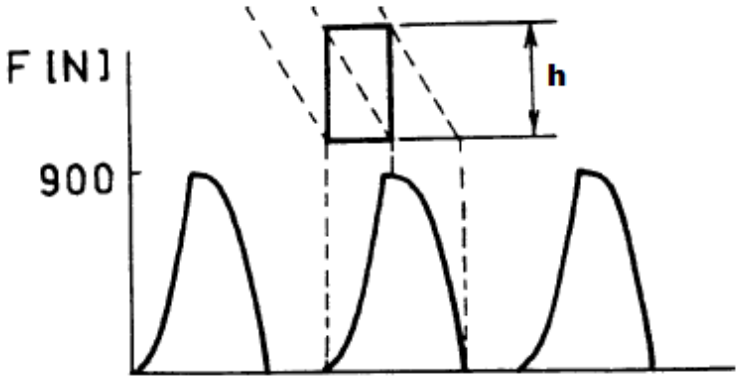


Figura II.9 - Forças total (TLUSTY e MACNEIL, 1975)

II.1.4 Equipamentos de Medição de Forças

O transdutor piezelétrico é utilizado amplamente para medir forças de usinagem. Ele produz um sinal elétrico de saída quando excitado mecanicamente. Além disto, estes transdutores são recíproco o que significa que se for aplicada ao transdutor uma tensão

elétrica, eles são capazes de produzir uma vibração mecânica. Devido a esta característica tais transdutores são muito utilizados em diversas áreas.

A piezeletricidade é um fenômeno associado à geração de cargas elétricas na superfície de um material quando a ele e aplicada certa tensão mecânica capaz de deforma-lo; ou a correspondente mudança da forma do material quando certa tensão elétrica e aplicada em algumas de suas superfícies. A piezeletricidade e então uma maneira de converter-se energia mecânica em energia elétrica, ou vice-versa (Figura II.10).

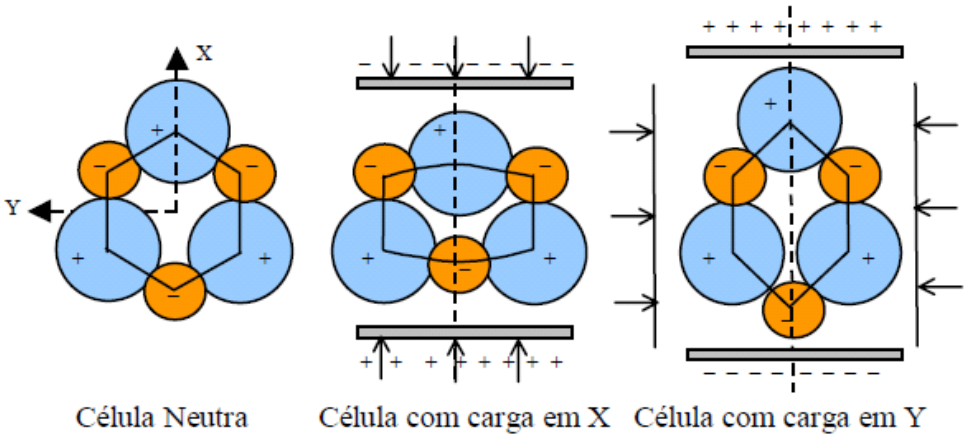


Figura II.10 - Representação do fenômeno da piezoeletricidade. (HOFF, 2009)

Os primeiros materiais piezelétricos estudados foram o quartzo, a turmalina e os sais de Rochelle. Antigamente todos os cristais eram considerados materiais piezelétricos, mas a partir de 1940 certas cerâmicas (titanite de bario e titanite de zircônio) tem sido especialmente fabricadas como os materiais piezelétricos mais usuais.

Segundo HOFF (2009), as medidas das forças de usinagem podem ser classificadas como diretas ou indiretas, sendo as forças diretas medidas através de métodos baseados na piezoeletricidade e no magneto-estricção, e as indiretas através de meios mecânicos, pneumáticos, hidráulicos ou elétricos, sendo este último subdividido em variação da indutância, variação da capacitância e variação da resistência elétrica.

O método de medir força direta através da piezoeletricidade é caracterizado pela geração de eletricidade por materiais submetidos a esforços mecânicos, como é o caso, por exemplo, do quartzo e a turmalina. Através destas cargas elétricas geradas, pode-se determinar a deformação e consequentemente os esforços aplicados ao sistema. O método do magneto-estricção consiste na variação da permeabilidade magnética de certos materiais ferromagnéticos, sob a ação de solicitações mecânicas. Através desta variação de permeabilidade do material pode-se determinar o valor da força que age sobre um sistema. A medida das forças de usinagem, através do uso da eletricidade, ocorre pela variação de três grandezas:

- Variação da indutância: Ocorre geralmente em um sistema de duas bobinas. A medida da variação da indutância delas é feita através da mudança de posição de um núcleo de ferro em seu interior. Este núcleo é ligado à ferramenta de corte.

- Variação da capacitância: Consiste na medida de variação da capacidade de um condensador, devido à variação da distância entre suas armaduras.

- Variação da resistência elétrica: Ocorre através da variação da resistência elétrica de um fio condutor, devido à variação de sua seção, causado por uma força de tração ou compressão.

Os dinamômetros são equipamentos chamados de transdutores. Os transdutores são dispositivos que convertem um estímulo (sinal de entrada) em uma resposta (sinal de saída) proporcional, adequada à transferência de energia, medição ou processamento da informação (BORCHARDT, 1999). Em geral, o sinal de saída é uma grandeza física de natureza diferente do sinal de entrada. Estas grandezas podem ser elétricas mecânicas, químicas, ópticas ou térmicas. O objetivo dos transdutores é detectar a informação e dar uma resposta, geralmente de natureza elétrica, correspondente a variável sob teste. Desta forma, qualquer dispositivo ou componente que se enquadra nesta definição pode ser visto como um transdutor.

Os equipamentos de medidas são definidos como dispositivos utilizados para uma medição, estando eles, sozinhos ou em conjunto com dispositivos complementares (INMETRO, 2008) e são de extrema importância para medir grandezas físicas como temperatura, deslocamento, tempo, força, velocidade, aceleração, umidade, pressão etc. (BORCHARDT, 1999). Para cada grandeza, existem instrumentos específicos para sua medição, e na usinagem os mais conhecidos são os instrumentos de medição de comprimentos, como o paquímetro e o micrômetro, e os de forças como os dinamômetros e torquímetros.

Nos dinamômetros utilizados para medir forças de corte são utilizados sensores compostos por lâminas de quartzo seccionadas em diferentes direções do cristal para medir tensão normal (Fz) ou cisalhamento (Fx e Fy). O conhecimento da força de usinagem é importante para o perfeito dimensionamento das variáveis inerentes ao processo de fabricação, garantindo dessa maneira, a maximização dos resultados.

Capítulo III – Processo de Fresamento de Roscas

O processo de rosqueamento é o processo de usinagem cuja função é produzir rocas internas e externas (DUBBEL, 1979). As roscas podem ser fabricadas em uma grande variedade de processos, dentre eles, usinagem, conformação, fundição e injeção. Neste capitulo serão apresentados os processos de fabricação, sendo que, especial atenção será dada ao fresamento de roscas, processo de fabricação de destaque nesta dissertação.

III.1 Geometria da Rosca

As roscas são elementos mecânicos utilizados para realizar a união entre elementos de fixação mecânicos, possuindo diferentes geometrias. As terminologias das roscas são definidas pela ABNT, através da norma NBR 5876 que segue, no geral, a mesma linha das normas da ISO, DIN, ANSI (STEMMER, 1995). Segundo a NBR 5876, a rosca é a projeção contínua dos filetes helicoidais de secções uniformes na superfície cilíndrica. As roscas podem ser direita ou esquerda, sendo a primeira é definida como aquela que, vista no plano perpendicular ao seu filete,e acoplada com a peça roscada fixa, se afastam do observador quando giradas no sentido horário e a segunda, aquelas que se afastam do observador quando girada no sentido anti-horário (STEMMER, 1995). Outra característica das roscas é quanto ao número de entradas, que podem ser de uma, gerada apenas por um perfil ou de várias, geradas por dois ou mais perfis.

A geometria da rosca pode ser caracterizada por algumas medidas como: diâmetro externo da porca (d) e do parafuso (D); diâmetro menor da porca (d1) e do parafuso (D1); diâmetro dos flancos da porca (d2) e do parafuso (D2); passo da rosca P e ângulo de flancos α como mostra a Figura III.1.

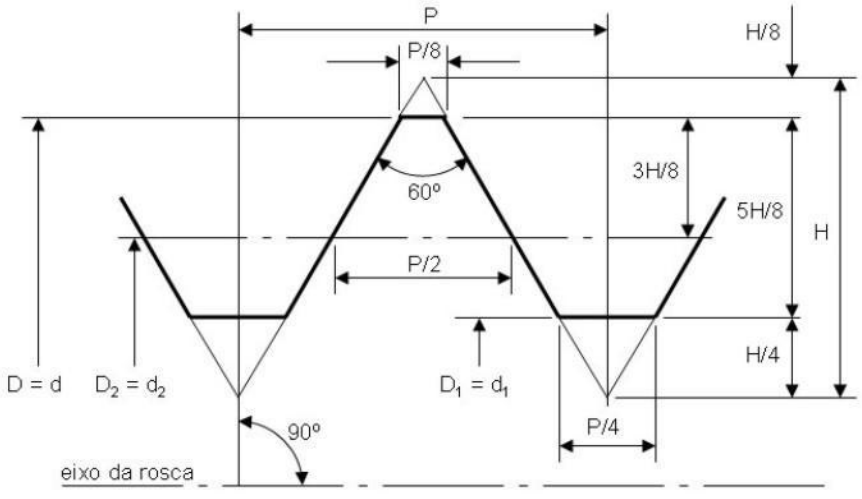


Figura III.1 - Perfil básico de uma rosca métrica. (ABNT, 1988)

Se uma destas dimensões estiver incorreta, o ajuste ou a transmissão de forças ou movimentos entre a rosca interna (peça fêmea) e a rosca externa (peça macho) será deficiente. O desenho do perfil básico de uma rosca é definido pela NBR 11701. Quanto à geometria do perfil, as roscas mais comumente usadas são as de perfis triangular, trapezoidal, quadrada e redonda. Na Figura III.2 pode-se observar alguns tipos e formas de roscas utilizadas na indústria.

Os filetes das roscas podem ser triangulares, com ângulo de 60º (rosca métrica) (Figura III.2a) ou 55º (rosca whitwoth) entre flancos (Figura III.2b), que tem como função a fixação na união de peças; trapezoidal que transmitem movimento suave e uniforme (Figura III.2c); dente de Serra que exercem grande esforço em um só sentido (Figura III.2d); redonda para parafusos de grandes diâmetros sujeitos a grandes esforços (Figura III.2e) e quadrada para parafusos que sofrem grandes esforços e choques (Figura III.2f).

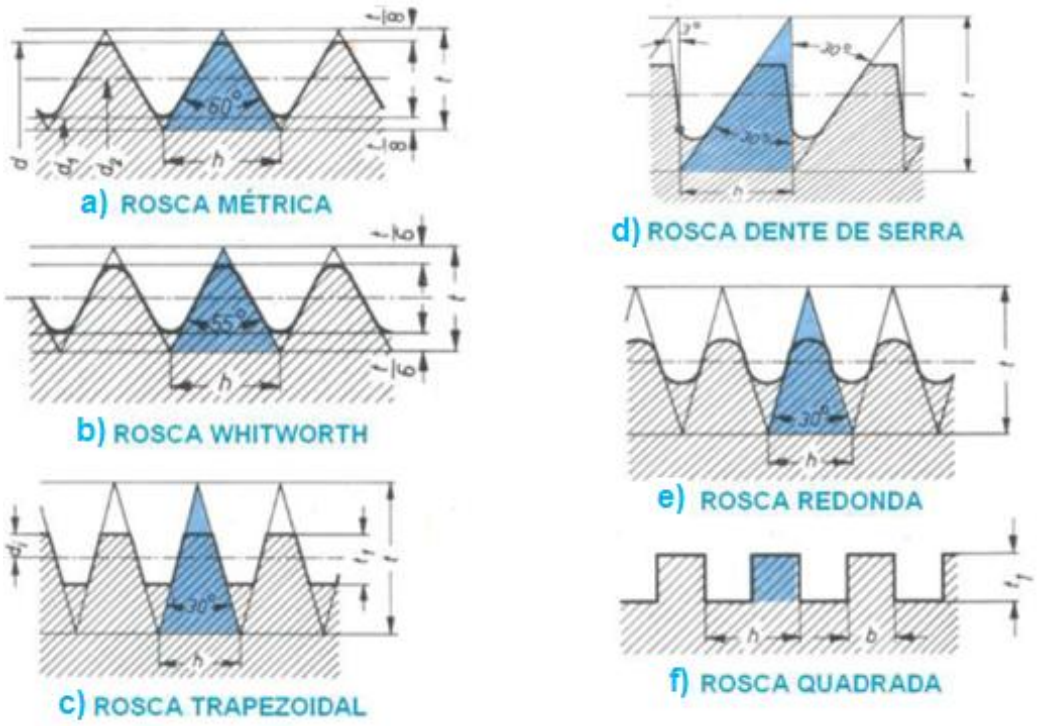


Figura III.2 - Tipos de roscas adaptada de CASILLAS (1987)

Uma conFiguração de rosca muito utilizada atualmente na indústria petrolífera é a rosca API (Figura III.3). A Rosca API tem esse nome devido à abreviação da *American Petroleum Institute* que foi o idealizador desta conFiguração de rosca. Esta conFiguração de rosca é utilizada quando queremos aplicar extrema força de torque. Existem diversas normas API para fabricação de roscas para haste de perfuração.



Figura III.3 - Ponteiras de rosca API (USIMACHI, 2012)

As normas para fabricação de roscas API tem diferenciação em relação ao diâmetro nominal da rosca, ao seu passo e a inclinação do filete de rosca. Na Figura III.4 temos o perfil de uma rosca API com inclinação de 1º 47’ por polegada.

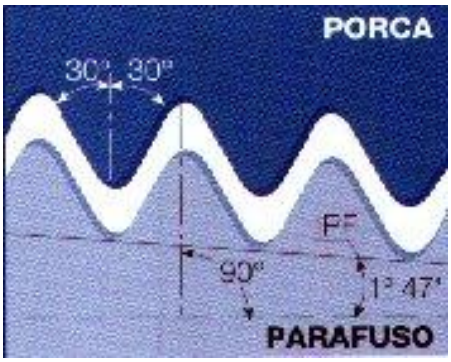


Figura II.4 - Perfil de rosca API (USIMACHI, 2012)

III.2 Processos de Fabricação de Roscas

Segundo DUBBEL (1979), podemos dividir o processo de fabricação de roscas em dois grupos: o com remoção de cavaco e o sem remoção de cavaco. Dentre os com remoção de cavaco podemos destacar: o torneamento com ferramenta simples ou múltipla; os cabeçotes automáticos com pentes, tangenciais, radiais ou circulares; o turbilhonamento; os machos e cossinetes de roscar; a fresagem com fresas simples e múltiplas de roscar e a retificação com rebolos de perfil simples ou múltiplo.

A Figura III.5 mostra características geométricas das roscas laminadas e roscas usinadas. A principal diferença entre a rosca laminada e a usinada é a alta resistência mecânica nos filetes conformados pelo processo de laminação. A não geração de cavacos e a alta durabilidade da ferramenta também são vantagens do processo de laminação a serem consideradas.

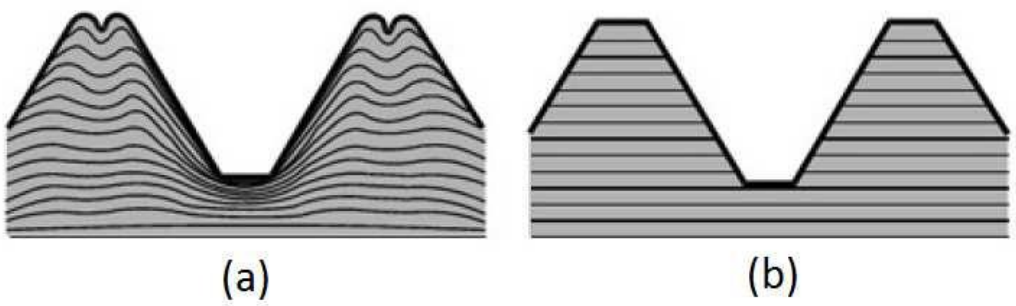


Figura III.5 - Orientação das fibras do material em roscas (a) laminadas; (b) usinadas. (BRETAS, 2009)

A laminação entre rolos ou entre placas planas conFigura-se como um processo sem remoção de cavaco. Neste processo a peça passa por laminadores que podem ser planos ou cilíndricos. A laminação é um processo de conformação continuo que garante uma maior resistência mecânica ao material, pois não há corte da sua fibra. O processo de laminação de roscas causa apenas o deslocamento das fibras do material ao invés de rompê-las como no caso de processos convencionas com remoção de aparas. Na laminação a pressão e o avanço dos cilindros, o tempo e a velocidade de laminação são ajustáveis. O avanço é desligado ao conseguir a profundidade desejada (DUBBEL, 1979).

No torneamento com ferramenta simples ou múltipla de filetar, o perfil da rosca é executado apenas com um gume em vários passes. Esta técnica de rosqueamento é executada em tornos mecânicos. Podemos utilizar ferramentas de aço rápido ou de metal duro. O uso de inserto intercambiável exige altas velocidades de corte e altos avanços em comparação ao uso do de aço rápido.

Os cabeçotes automáticos com pentes, tangenciais, radiais ou circulares podem ser estacionários ou giratórios como mostra a Figura III.6. Esta técnica é utilizada em rosqueadeiras e atingindo-se o comprimento da rosca os pentes abrem-se e a ferramenta retorna a posição original. Segundo DUBBEL (1979), nesta técnica há um menor desgaste da ferramenta, um menor tempo gasto e um melhor acabamento. Os pentes são ajustáveis, havendo uma melhor tolerância dimensional das roscas e uma facilidade para a reafiação.

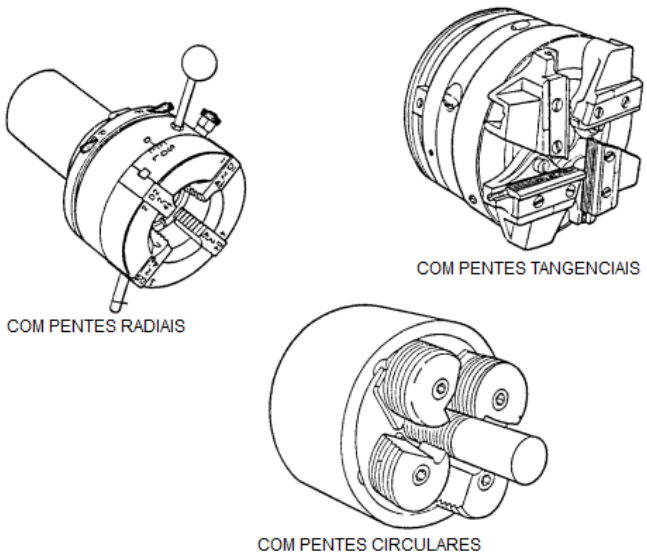


Figura III.6 - Tipos de cabeçotes rosqueador (DUBBEL, 1979)

O turbilhonamento de roscas (tornofresamento) é um processo de torneamento com corte interrompido. Segundo (DUBBEL, 1979), consegue-se a profundidade completa da rosca e também uma elevada qualidade da superfície com uma só passagem da ferramenta. A ferramenta é montada de forma excêntrica em relação à peça que apresenta um movimento rotativo lento no sentido contrário ao movimento rotativo da ferramenta (Figura III.7). Em geral são montadas no cabeçote quatro ferramentas de metal duro defasadas de 90°. Duas atuam no fundo da rosca, uma nos flancos e uma na remoção de rebarbas.



Figura III.7 - Ferramenta de turbilhonamento. (Sandvik, 2011)

De acordo com DUBBEL (1979), na retificação de roscas o filete pode ser cortado no material maciço ou quando se trata de perfis maiores, pode ser pré-cortado ou fresado, depois temperado e finalmente retificado. Procede-se de maneira análoga à fresagem de rosca.

Já no o fresamento de roscas utiliza-se ferramentas perfiladas e o processo é executado através de uma interpolação helicoidal, que realizará o menor tempo de ciclo à medida que o comprimento de contato da ferramenta se aproxime do comprimento da rosca (RODRIGUES, 2011).

O rosqueamento com macho ou cossinete é a forma mais comum de usinar uma rosca, porém é o método que possui o maior número de inconvenientes associados à quebra de ferramentas. Os ângulos de entrada, saída e de folga são todos positivos, pois deverão minimizar as forças envolvidas na operação. Esta condição inevitavelmente fragiliza a entrada da face de corte da ferramenta, que devido ao alto avanço de corte (que para machos e cossinetes será o próprio passo da rosca), resultará em maior desgaste e consequente quebra da ferramenta (RODRIGUES, 2011).

III.2.1 Processos de Fabricação de Roscas Internas

Segundo STEMMER (1995), os principais processos de manufatura de roscas internas na indústria automobilística são: a usinagem e a conformação. A escolha do melhor processo, conforme STEPHENSON e AGAPIOU (1996), esta diretamente relacionada com o grau de precisão dimensional especificado, tipo de material a ser usinada a rosca, aplicação da rosca (fixação, força ou transmissão de movimentos), geometria da peça, entre outros fatores. Além disso, dentre estes processos, uma série de alternativas possibilita a fabricação das roscas. Podemos usinar a rosca por torneamento e/ou fresamento com ferramenta simples ou múltipla; com o uso de machos e/ou cossinetes; com cabeçotes automáticos, pentes radiais, tangenciais ou circulares; por tornofresamento, por retificação ou por ferramentas laminadoras.

Nos processos de usinagem de roscas internas, segundo STEPHENSON e AGAPIOU (1996), a fabricação pode ser realizada por diferentes ferramentas, entretanto, todas as opções necessitam de uma operação prévia de furação. A ferramenta pode cortar ou deformar plasticamente o material do furo, formando os filetes da rosca. A alternativa de laminar a rosca em furos é aplicada em materiais dúcteis, como aços de fácil usinagem, aços de baixa liga, bronze, latão, alumínio, entre outros.

A seleção do melhor processo de rosqueamento e a escolha das ferramentas certas deve ser realizada da forma correta, pois somente desta maneira pode-se ter o melhor acabamento da superfície da rosca e o menor desgaste da ferramenta. 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 conforme Figura III.8. COELHO *et al.* (2006), afirmam que para diâmetros de roscas menores que 15 mm, o processo utilizando machos de corte é amplamente utilizado. No entanto, STEPHENSON e AGAPIOU (1996) descrevem que a usinagem de rosca com machos de corte é utilizada para diâmetros menores que 40 mm. Já a usinagem de roscas com fresas, ferramentas de aresta única ou múltipla aresta através de processos de interpolação helicoidal são principalmente utilizados para grandes diâmetros de roscas, na sua maioria para diâmetros maiores que 30 mm.

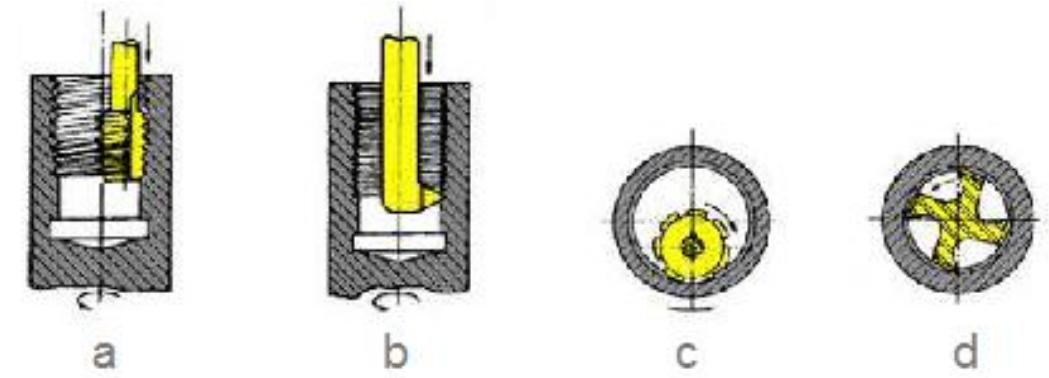


Figura III.8 - Principais processos de usinagem de roscas internas. (a) Ferramenta de múltipla aresta, (b) Ferramenta aresta única, (c) fresa de rosca e (d) macho de roscar. (adaptado de FERRARESI, 1995)

O processo de usinagem de rosca é um dos processos mais complexos de usinagem, pois uma serie de parâmetros geométricos devem ser observados. Além do material da peca, outros aspectos devem ser considerados, como por exemplo, a tolerância dimensional da rosca, a geometria da peça e, principalmente, o diâmetro da rosca.

III.3 – Fresamento de Roscas

O fresamento de roscas é um processo de fabricação que permite a fabricação de roscas de forma rápida e precisa. Neste processo de fabricação a rotação e o avanço são desacoplados, e permite a usinagem de materiais frágeis e com tensão de ruptura elevada. O fresamento de roscas é realizado geralmente em apenas um passe, podendo ser realizado em dois ou três passes para materiais de difícil usinagem. 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.

Segundo STEPHENSON e AGAPIOU (1996), as roscas usinadas através do processo de fresamento de rosca poderão ser fabricadas com ferramentas de aresta única, de múltipla aresta com único corte ou ainda com múltipla aresta de vários cortes. A Figura III.9 ilustra cada uma delas com o objetivo de mostrar a forma das ferramentas.

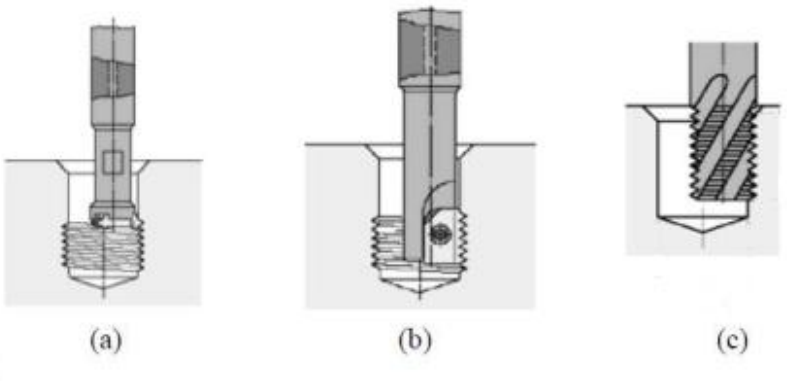


Figura III.9 - Tipos de Ferramentas para Fresamento de Roscas: (a) única aresta; (b) múltiplas arestas com um corte; (c) múltiplas arestas vários cortes (ARAUJO e SILVEIRA, 2004).

Para a usinagem de rosca, as fresas podem ser retas, helicoidais, ou com dentes escalonados. As fresas retas possuem canais retos e são adequadas para a fabricação de roscas internas. Já as duas últimas, podem fabricar tanto roscas internas, como externas, além de reduzirem a pressão de corte, o que resulta em uma menor trepidação (SANDVIK, 2012).

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 à 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 Figura III.10.

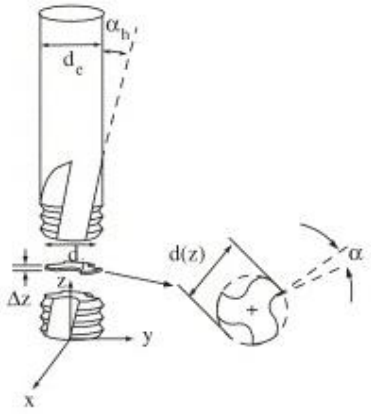


Figura III.10 – Geometria da ferramenta. (ARAUJO, *et. al*, 2005)

A velocidade de corte e a espessura do cavaco variam com o diâmetro da ferramenta di≤d(z)≤de em diferentes posições da aresta de corte. A ferramenta utilizada neste trabalho apresenta somente uma aresta de corte conforme a Figura IV.8.

De acordo com GRZESIK (2008), a fabricação de roscas por interpolação helicoidal utilizando o processo de fresamento é uma alternativa para o aumento da velocidade de corte no processo. Avanços tecnológicos nesta área permitem a usinagem de roscas com tolerâncias mais estreitas. Algumas das vantagens deste método é a redução do tempo de ciclo, a redução de retrabalho e de peças sucateadas devido à quebra de machos dentro da rosca.

III. 4 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 de corte necessária. Ao mesmo tempo a ferramenta percorre uma trajetória helicoidal ao redor da linha de centro da rosca.

No processo de fresamento de rosca pela técnica do *thread milling* a peça já deve ter sido furada anteriormente. A fresa e então posicionada sobre o furo e é executada a usinagem da rosca. A técnica do *thread milling* pode ser dividida em cinco etapas básicas, como mostra a Figura IV.2. 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.

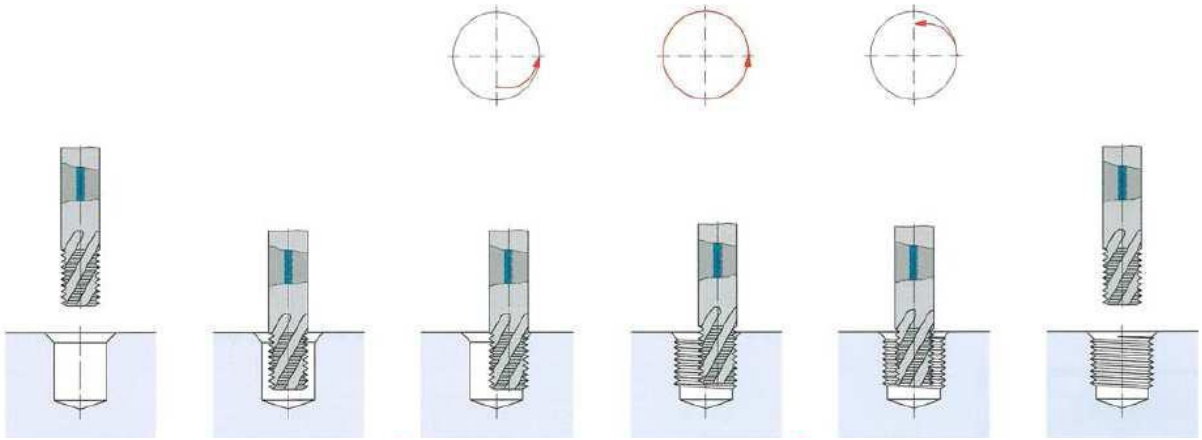


Figura III.11 – Etapas do processo de fresamento de roscas. (1) Posicionamento da ferramenta no centro xy do furo. (2) Deslocamento vertical para baixo. (3) Movimento de penetração (4) Movimento helicoidal da ferramenta. (5) Deslocamento da ferramenta para a posição

STEPHENSON e AGAPIOU (1996) e GRZESIK (2008) estudaram ferramentas de furar e roscar combinadas. Esse processo de fabricação combinado, chama-se de *thrilling* na qual a

peça, não necessita ter sido furada anteriormente. A própria fresa de rosca executa a furação e posteriormente a usinagem da rosca. Nesta técnica em função da ferramenta utilizada, podemos confeccionar também, um chanfro no furo.

O processo de fabricação do *thrilling* pode ser dividido em cinco etapas básicas conforme a Figura III.12. Na etapa (1) a ferramenta é posicionada, sobre a posição a ser furada, executada um movimento vertical descendente, executando assim, a furação e o chanfro. Na etapa (2) a ferramenta executa um movimento de entrada entorno do eixo do furo, nesta etapa o raio do furo e estabelecido. Em (3) a ferramenta executa um movimento helicoidal entorno do eixo do furo e executa uma volta completa. O número de dentes engrenados inicialmente na parede da peça é o numero de filetes gerados em uma volta. Se os filetes para a profundidade total do furo não é alcançado em uma etapa, repetir (3), até completar. Na etapa (4) a ferramenta volta para o centro do furo, sem deslocamento vertical. Finalmente em (5) a ferramenta se desloca na direção vertical ascendente.

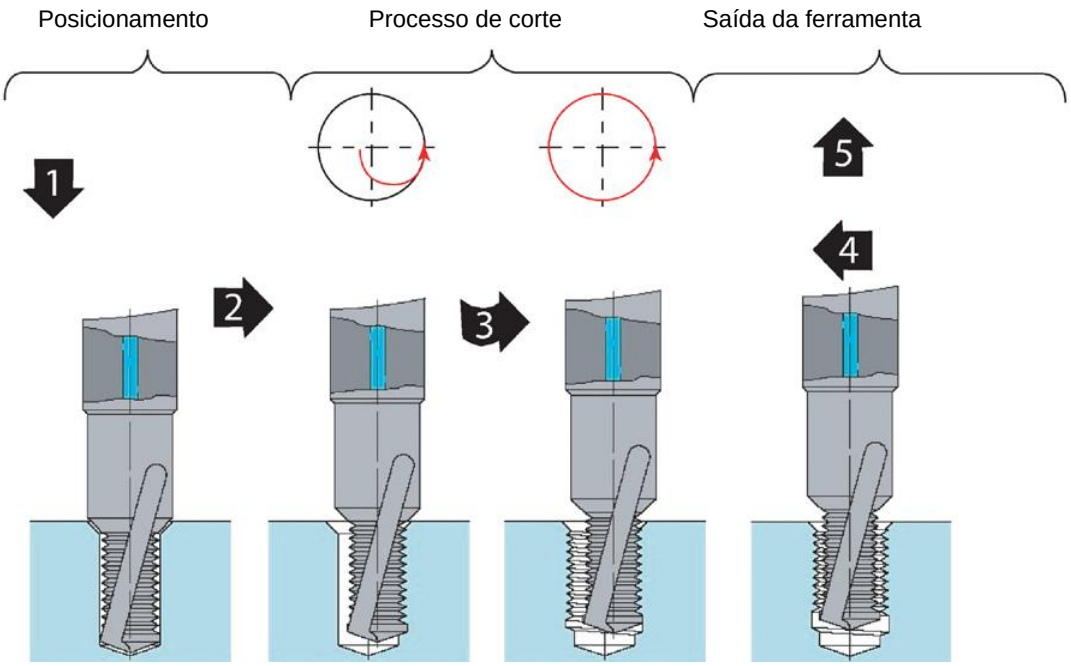


Figura III.12 – Etapas do processo de fresamento de roscas pela método do thrilling. (1) Posicionamento da ferramenta. (2) e (3) Movimento helicoidal da ferramenta. (4) Deslocamento da ferramenta para a posição de (1). (5) Movimento vertical da ferramenta para cima.

Segundo SMITH (2008), a estratégia da entrada da ferramenta na peça para iniciar o corte da rosca deve ser observada no fresamento. São mais utilizadas quatro formas para esta entrada.

O método linear 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 (Figura III.13).

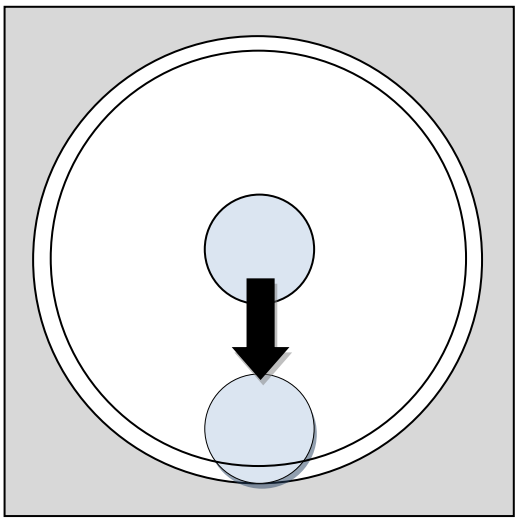


Figura III.13 – Método Linear.

No método circular com ¼ de círculo a ferramenta realiza inicialmente uma trajetória linear, e em seguida percorre uma trajetória de ¼ 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. (Figura III.14)

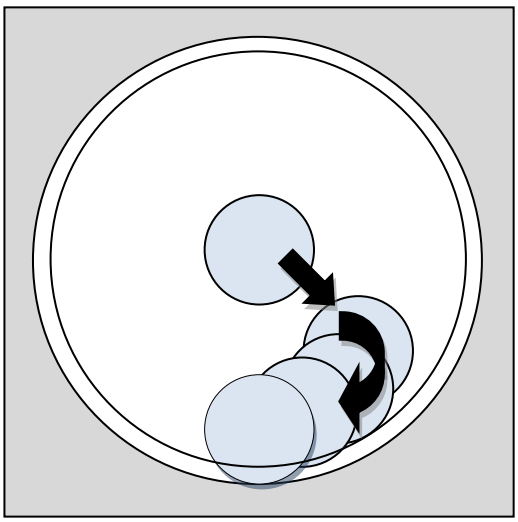


Figura III.14 - Circular com ¼ de círculo.

O método circular com semicírculo tem como característica 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. (Figura III.15)

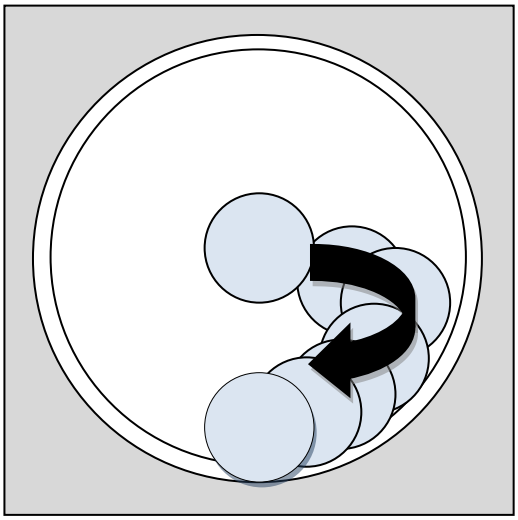


Figura III.15 - - Circular com semicírculo.

O método da linha tangente 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 (Figura III.16).

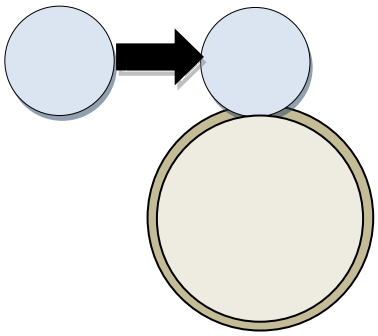


Figura III.16 - Linha tangente.

Em função da ferramenta esta no centro do furo ou tangente a parede do mesmo, há uma variação na velocidade de avanço. Conforme a Figura III.17 pode-se observar que a velocidade de avanço é diferente entre o ponto C e o ponto E da Figura. A distância efetiva percorrida por um dente, cuja aresta esta localizada no ponto E, pode ser projetada no plano perpendicular ao eixo da ferramenta conforme a equação 3.6.

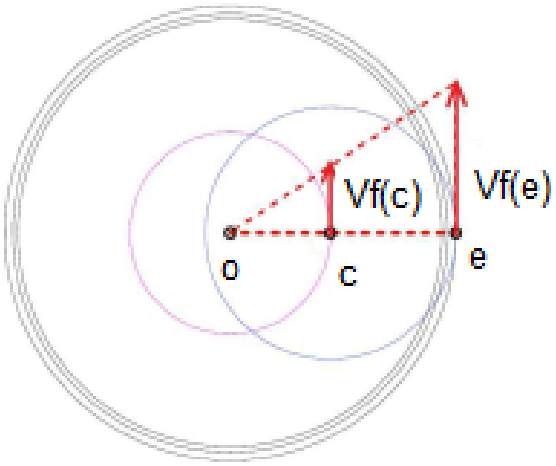


Figura III.17 - Diferença de velocidade de corte entre centro da ferramenta e ponto de contato peça-ferramenta. (CARDOSO, 2012)

A velocidade de corte é calculada em função do diâmetro d(z) da fresa, que é o diâmetro em um ponto qualquer a uma altura z da base da ferramenta conforme a equação 3.1.

$$Vc = \frac{\pi . n . d(z)}{1000} \tag{3.1}$$

Onde n é a velocidade de rotação da ferramenta (RPM). 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 ferreamente (n), de forma idêntica ao fresamento de topo, conforme a equação 3.2.

$$V_f = f_t . z . n \tag{3.2}$$

III.5 Forças no Fresamento de Roscas

No fresamento de topo, a força de corte apresenta uma oscilação característica devido à variação da espessura do cavaco com a rotação dependendo da geometria da ferramenta, ao longo da aresta de corte. Nas operações de usinagem onde há interrupções no corte e variações na espessura de corte, como no fresamento, o comportamento variável dos esforços mecânicos deve ser analisado para prever o comportamento mecânico da ferramenta e consequentemente o acabamento da peca, a vida útil e o desgaste das ferramentas (ARAUJO, 1999).

Segundo ARAUJO (1999), a operação de fresamento de topo abrange dois momentos distintos. Em um primeiro momento a ferramenta está começando a cortar a peça e a espessura de penetração varia com o avanço por dente, logo neste caso a força média aumenta a cada avanço. Em um segundo momento a penetração é constante e a força é,

portanto periódica. Segundo ARAUJO (2004), a fresa de rosca tem geometria similar a fresa de topo.

A Força de corte (F_c) no fresamento pode ser expressa pela equação 2.8. O modelo mecanística é uma combinação de técnicas analíticas e 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 Figura III.10, em contato com a superfície em usinagem do corpo de prova.

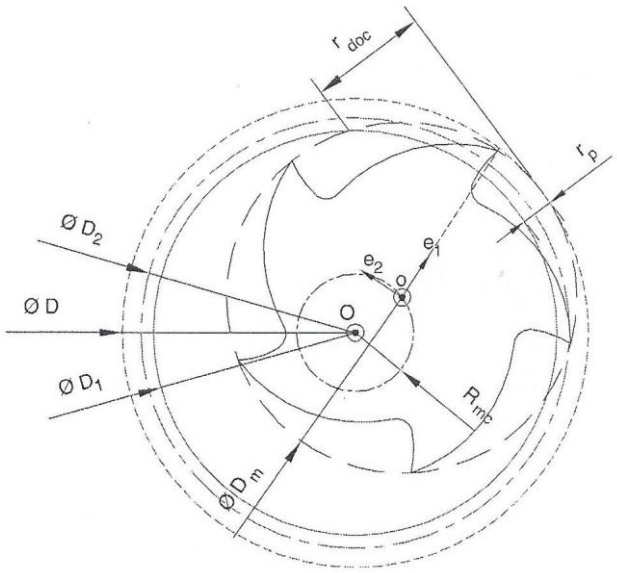


Figura III.18 - Parametrização do Fresamento de Rosca (FROMENTIN, 2010B)

Segundo FROMENTIN (2010B), as forças de usinagem são comumente calculadas em função da espessura do cavaco máxima analiticamente aproximada, que neste caso é função do avanço (ft_{XY}) e da posição de cada ponto da ferramenta. O valor máximo da espessura do cavaco (tc_{Max}) é calculado em função do diâmetro externo (D_m) e a espessura de corte radial (r_{doc}), calculada pela expressão da equação 3.3.

$$t_{c_{max}} = 2f_{t_{xy}}\sqrt{\frac{r_{doc}}{D_m}\left(1-\frac{r_{doc}}{D_m}\right)} \tag{3.3}$$

Onde r_{doc} é a espessura de corte radial e pode ser escrita pela equação 3.4, em função do diâmetro nominal da rosca (D), do passo (P) e do diâmetro externo da fresa (D_m).

$$r_{doc} = \frac{P(80.\sqrt{3}D-75.P)}{256(D-D_m)} \tag{3.4}$$

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 equação

(3.5). Onde P_θ é o passo angular e R_{mc} é o raio da trajetória helicoidal da ferramenta conforme Figura III.18.

$$f_{t_{xy}} = \frac{f_t}{\sqrt{\left(\frac{P_\theta}{R_{mc}}\right)^2 + 1}} \tag{3.5}$$

Um modelo mecanicista para simular as forças de usinagem no fresamento de roscas é apresentado por ARAUJO *et al.* (2005). O modelo foi validado tanto para ferramentas sem ângulo de hélice, quanto para ferramentas helicoidais. Uma vez que a ferramenta avança na peça de trabalho pela profundidade de corte radial, o processo de fresamento de rosca envolve a rotação da ferramenta em torno do centro do furo e um movimento de avanço em relação ao eixo z, desta forma, a ferramenta segue uma trajetória helicoidal (Figura III.19a).

No entanto, o processo foi simplificado por Araujo et. al (2005), transformando o movimento helicoidal que a ferramenta realiza, em um movimento retilineo em relação ao eixo x, semelhante a um processo de fresamento de topo, como mostrado na Fig. III.19b. Esta simplificação é uma boa aproximação do processo, como a velocidade na direção Z é muito pequena em comparação com a velocidade de corte e o raio do furo é grande em comparação com a espessura do cavaco. A força total de corte pode ser calculada somando as forças em cada disco ao longo da fresa de rosca em contacto com a peça de trabalho.

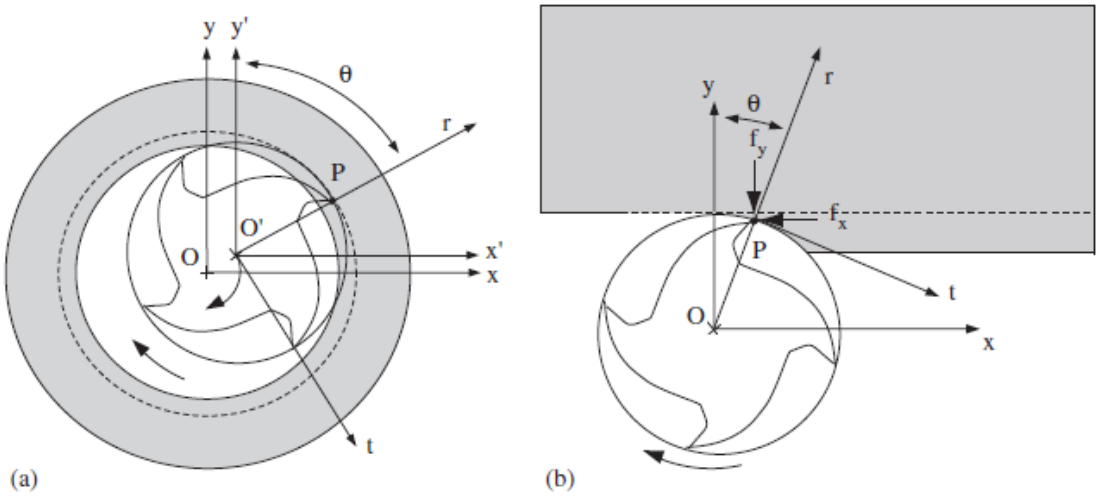


Figura III.19 - – Trajetória da ferramenta. (a) fresamento de rosca; (b) modelo simplificado. (ARAUJO, et al. 2005)

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). 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 equação 3.6.

$$S_{max} = tc_{max} \cdot b \tag{3.6}$$

Onde o comprimento da aresta (b) e a soma de cada face da ferramenta conforme a Figura III.20 e dada pela equação 3.7.

$$b = b1 + b2 + b3 \tag{3.7}$$

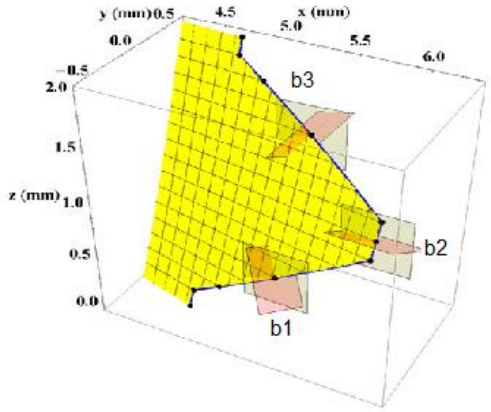


Figura III.20 - Aresta de Corte (adaptado FROMENTIN, 2010A)

III.6 Referenciais para Decomposição da Força de Usinagem

A força resultante de usinagem pode ser decomposta em três referenciais R0, R1 e R2, utilizados no processo de fresamento de rosca. O referencial R0 é fixo na mesa, isto é, no centro do furo. O referencial R1 estabelece a relação entre o eixo de rotação 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 Figura III.21.

a) Referencial da mesa

O referencial da mesa é dado por R0. O referencial R0 é fixo no centro do furo da peça.

b) Referencial da posição da ferramenta

As forças normais e de atrito são necessárias para a determinação das forças de corte para uma dada geometria. A aproximação do modelo mecanisista é uma combinação de

métodos experimentais e empírica na qual as forças são proporcionais à espessura do cavaco inderfomado (tc) (KLINE e DEVOR, 1983). As pressões específicas de corte, Kt, Kr e Kz, têm sido mostrados como uma função da velocidade de corte, do avanço e da constante de corte especifica, que é uma função da combinação do material da peça e da ferramenta. (KAPPOR *et al.*, 2000).

Segundo SAMBHAV *et al.* (2011), as forças normais e de atrito sobre a face de ataque de uma ferramenta pode ser transformado nas direções X, Y e Z para uma dada geometria da ferramenta. Assim podemos dizer que:

$$\begin{vmatrix} Fx \\ Fy \\ Fz \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} Kt \\ Kr \\ Kz \end{vmatrix} . S_{max} \tag{3.8}$$

Este referencial está representado pela base R1 concêntrica com a ferramenta e orientado com a superfície do furo. O referencial R1 é localizada pelo angulo θ_1, que relaciona a posição X e Y do centro da ferramenta em relação ao centro do furo.

c) 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.

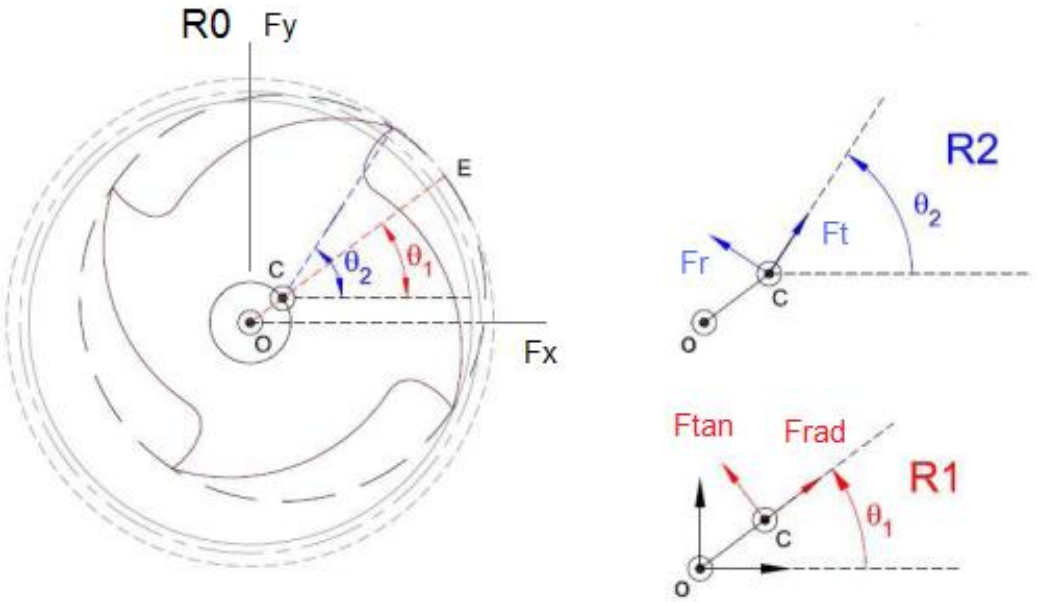


Figura III.21 – Os referenciais e suas relações. (CARDOSO, 2012)

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 equações (3.11) e (3.12). (CARDOSO, 2012)

$$F_{X0} = F_{X2}.\cos(2\pi - \theta_2) - F_{Y2}.\sin(2\pi - \theta_2) \quad (3.9)$$

$$F_{Y0} = F_{X2}.\sin(2\pi - \theta_2) + F_{Y2}.\cos(2\pi - \theta_2) \quad (3.10)$$

$$F_{X1} = F_{RAD} = F_{X0}.\cos(-\theta_1) - F_{Y0}.\sin(-\theta_1) \quad (3.11)$$

$$F_{Y1} = F_{TAN} = F_{X0}.\cos(-\theta_1) - F_{Y0}.\sin(2\pi - \theta_1) \quad (3.12)$$

Os três referenciais incluem a direção Z e, portanto a componente F_Z é coincidente. A força resultante pode ser calculada através da equação (3.13).

$$Fr = \sqrt{F_{x1}^2 + F_{y1}^2 + F_{z1}^2} \quad (3.13)$$

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 em relação ao referencial R1.

Capítulo IV – Experimento

O setor de óleo e gás vem apresentando crescimento crescente ao longo dos anos. Diversos equipamentos têm sido desenvolvidos para garantir a prospecção nos novos campos de exploração, cada vez mais profundos, que estão surgindo. Um dos equipamentos mais utilizados no setor são as hastes de perfuração. Toda haste de perfuração apresenta em sua extremidade uma rosca, cuja configuração é a API. Por ser um modelo de rosca de difícil fabricação, este modelo de rosca praticamente é usinado somente em uma máquina operatriz que é o torno mecânico.

Este trabalho busca encontrar um modelo de fabricação alternativo para esta configuração de rosca. O objetivo principal desta pesquisa tem como finalidade medir e analisar as forças de corte no fresamento de uma rosca API, com o uso de uma ferramenta de inserto intercambiável, para verificar a viabilidade do processo. A operação de fresamento de roscas não tem muitos modelos aplicados na literatura científica (ARAUJO et.al., 2004). O conhecimento da força pode aperfeiçoar a operação e sugerir a criação de novas geometrias para as ferramentas, pois não existe modelo de forças desenvolvido anteriormente com base na bibliografia encontrada para a fabricação de roscas API.

A determinação das forças se faz necessário para verificar se esta geometria de ferramenta pode substituir, com qualidade, uma fresa de rosca na operação de rosqueamento. Verificado a compatibilidade será determinado o melhor custo beneficio entre a velocidade de confecção de roscas versus o desgaste da ferramenta.

O modelo proposto muda a concepção do modelo clássico de fresamento de roscas, pois estabelece uma nova geometria de ferramenta. No modelo clássico temos uma ferramenta com diversas arestas de corte e filetes de corte, onde a força de corte aumenta, à medida que mais filetes entram em contato com a peça. No modelo proposto somente uma aresta de corte, com um filete entrará em contato com a peça para executar a usinagem da rosca.

A principal vantagem com a utilização desta técnica é aumentar a velocidade de corte utilizada no processo de rosqueamento quando comparada à usinagem com outros processos de abertura de roscas internas. A sincronização da rotação da ferramenta com a velocidade de avanço limita a máxima velocidade de corte. Além disso, no caso da utilização de ferramentas de interpolar roscas não há necessidade de inverter o sentido da rotação do eixo-árvore durante a usinagem.

Com dito anteriormente, o conhecimento das forças de usinagem podem aperfeiçoar as operações de usinagem. Para conhecermos estas forças, devemos através do modo experimental, seguir um modelo de trabalho. Em uma primeira fase temos a operação de fresamento de rosca no centro de usinagem, sendo que os sinais gerados pelas forças de corte são coletados pelo dinamômetro preso a base da maquina. Os sinais são então amplificados e transformados de analógicos para digitais em uma placa de aquisição. Com os sinais já no

computador são utilizados *softwear* para transformar os sinais digitais em dados. Após serem tratados, estes dados são então finalmente interpretados. Um modelo de como é realizado o procedimento do experimento esta demonstrado na Figura IV1.

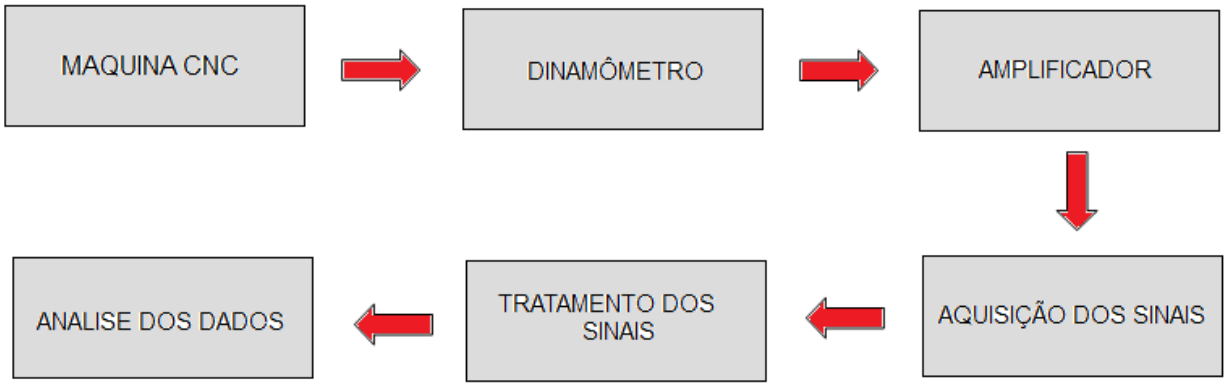


Figura IV.1 – Modelo experimental

IV.1 Equipamentos

IV.1.1 Centro de usinagem

O centro de usinagem vertical Polares V400 da Romi com trocador de pallet do laboratório da COPPE/UFRJ foi utilizado como máquina-ferramenta (Figura IV.2). O painel de controle da máquina opera com linguagem CNC com comando MACH 6 e suas especificações técnicas são: superfície da mesa com comprimento de 900 mm por 420 mm, capacidade de carga de 1000 kg e comprimento de trabalho de 700 mm em X e 420 mm em Y e 470 mm Z. A máxima rotação do eixo é de 10000 rpm e o *magazine* tem capacidade para armazenar 24 ferramentas.

O centro de usinagem utilizado não apresenta uma função que estabeleça uma trajetória helicoidal e cônica. Em função desta restrição um programa CNC foi desenvolvido para a execução da operação de usinagem, a partir de uma função helicoidal sobre um cone cilíndrico. O programa ISO é apresentado no APÊNDICE A. Houve a necessidade de inserir somente parte do programa na memória do centro de usinagem, uma vez que a mesma não tinha espaço suficiente para armazenar as 7220 linhas do programa. Desta maneira o corpo de prova não apresenta todos os filetes conforme a norma de fabricação da rosca API. Para efeito de estudo basta somente à aquisição das focas na confecção de apenas um filete.



Figura IV.2 – Centro de usinagem Polares V400.

IV.1.2 Dinamômetro

O dinamômetro de três componentes Kistler Modelo 9257BA foi utilizado para coletar os sinais de força. A sensibilidade e as características do dinamômetro utilizado podem ser vistas no ANEXO A. O dinamômetro utilizado tem área útil para posicionamento da peça em teste de 100 x 170 mm com furos roscados na parte superior da mesa com o objetivo de fixar os corpos de prova a serem usinados. Uma foto do equipamento preso a maquina pode ser observado na Figura IV.3.

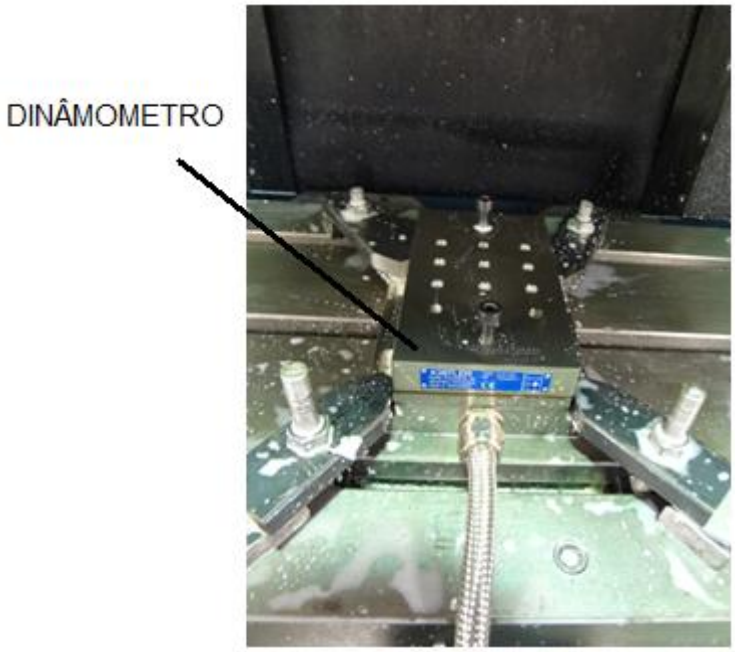


Figura IV.3 – Dinamômetro Kistler.

IV.1.3 Amplificador de sinais

O sinal elétrico que sai do dinamômetro é levado através de cabos coaxiais a um amplificador de sinais Kistler 5233A, onde pode ser ajustada a sensibilidade relativa ao dinamômetro utilizado, que varia com cada canal e é fornecida pelo fabricante do dinamômetro. No caso em questão, a sensibilidade do dinamômetro é de 7,5 para *Fx*, 7,5 para *Fy* e 3,7 para *Fz*. O fator de amplificação é igualmente regulado no amplificador de sinais, de acordo com a faixa de amplitude da força coletada. Pode ser observada na Figura IV.4 uma foto deste equipamento.

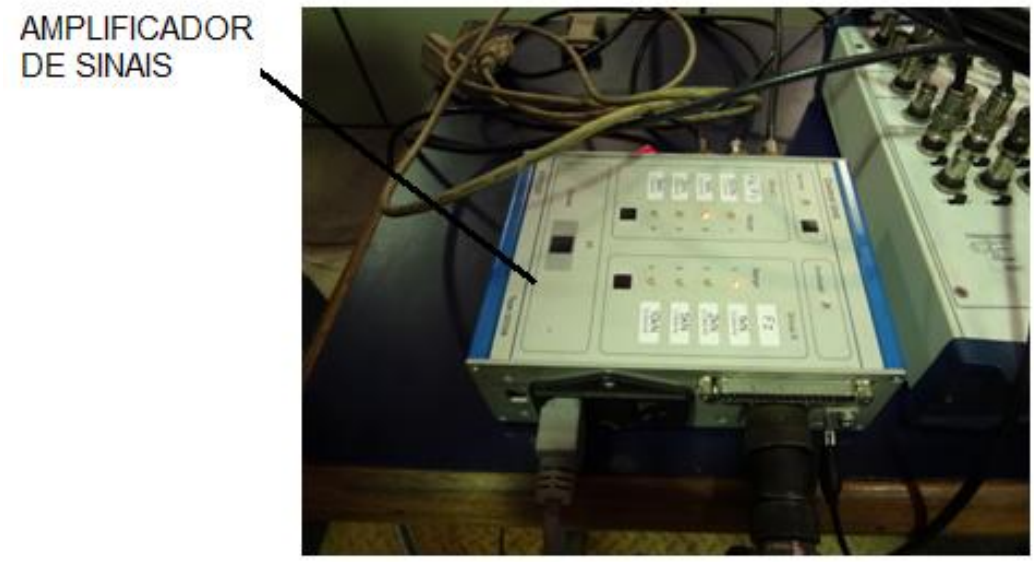


Figura IV.4 – Amplificador de sinais.

IV.1.4 Aquisição digital

O sinal experimental é transformado por uma placa analógica-digital, *National Instruments* modelo USB6251, 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. A frequência de amostragem é regulada pelo usuário e deve ser definida considerando o número de pontos necessários para observar o comportamento da força de corte em relação à rotação da ferramenta e ao número de dentes da fresa. A frequência de amostragem utilizada foi de 3500 pontos por segundo e o fator de amplificação de 100. A Figura IV.5 mostra a placa externa de aquisição de sinais.

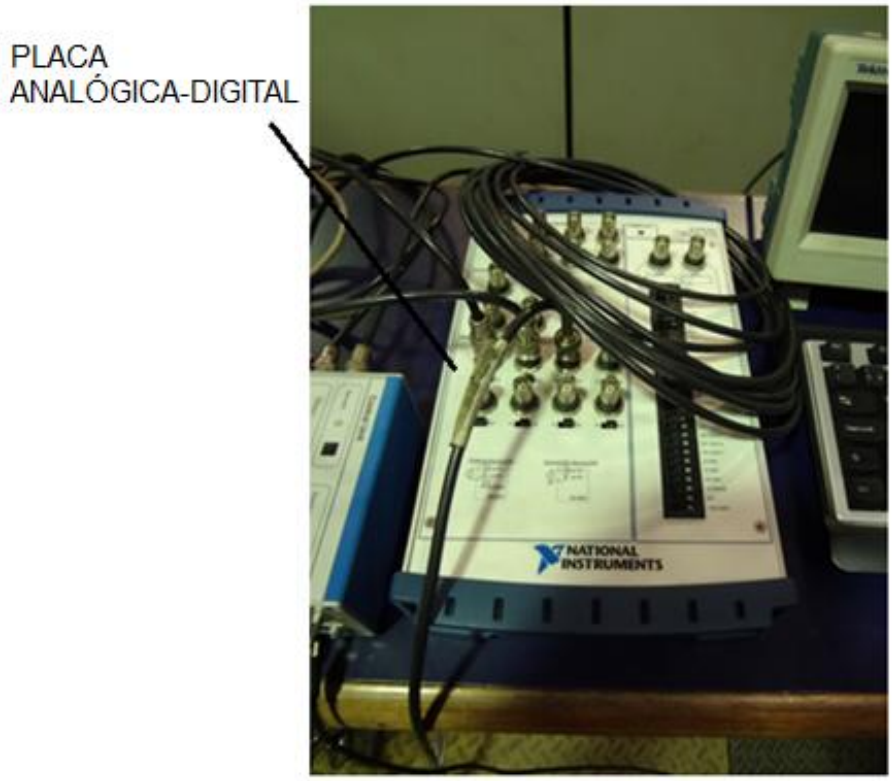


Figura IV 5 – Placa de Aquisição de Sinais.

IV.1.5 Ferramenta, porta-ferramenta, mandril e gabarito de fixação

Para garantir a perfeita fixação entre a peça e o dinamômetro, foi construído um gabarito de fixação. Este gabarito é constituído de uma base com dois rasgos e uma bucha com rasgo lateral. O gabarito foi fixado ao dinamômetro através de dois parafusos de fixação e a peça foi acoplada ao gabarito através de uma bucha com ajuste com folga de 0,1 mm. Através de um parafuso lateral esta folga é retirada quando o mesmo é girado no sentido de aperto. Na Figura IV.6 pode-se observar o gabarito montado.



Figura IV.6 – Gabarito de Fixação.

Os ensaios de fresamento de roscas por interpolação foram realizados com ferramentas e porta-ferramentas da empresa Sandvik. A fixação da ferramenta na máquina foi feita através de dispositivos de fixação, sendo mais conhecido, como porta-ferramentas de haste cônica, mostrado na Figura V.7. Os portas-ferramentas são definidas como dispositivos que agem como uma interface intercambiável entre o fuso de uma máquina e uma ferramenta de corte, de maneira que não seja diminuída a eficiência entre eles (DORMER, 2009). Estes dispositivos se dividem em três partes principais: Haste cônica, flange e mecanismo de prender a ferramenta.



Figura IV.7 - Porta ferramentas tipo cone. (SANDVIK, 2012)

A fixação da ferramenta no suporte utilizado para o experimento é feito por meio de um

parafuso de fixação. A ferramenta é introduzida no furo do suporte e um parafuso lateral no suporte realiza o aperto para a fixação. O furo do suporte era de 20 mm, sendo que a ferramenta apresentava um diâmetro de haste de 25 mm. Para fixar a ferramenta ao suporte foi necessário rebaixa a ferramenta para um diâmetro de 20 mm com um comprimento de 60 mm. A área útil do suporte é de 100 mm (Figura IV.8a)





a) Ferramenta com rebaixo b) Ferramenta fixada no porta ferramenta

Figura IV.8 – Porta Ferramenta Rebaixada

O inserto de aresta única (código 266-RL22V401A0503E1020) foi montado no porta-ferramenta de código 166.0KF 2522. O inserto é de metal duro da classe P20 com cobertura de PVD. Conforme o catálogo do fabricante, o inserto permite a usinagem de roscas com passo de 5 FPP e conicidade de 7º 01’ por polegada (Figura IV.9).

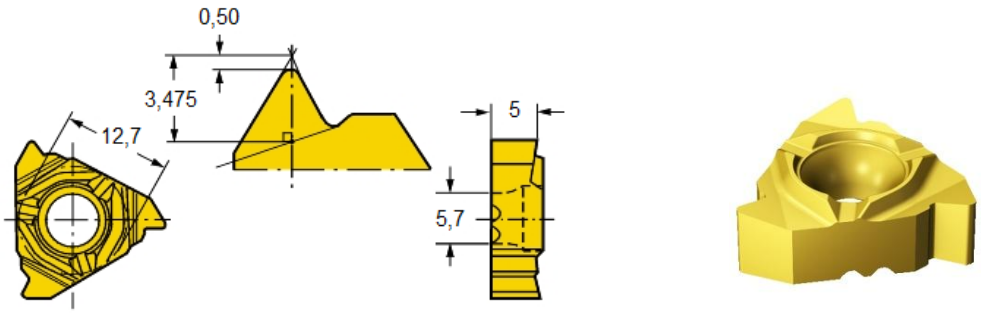


Figura IV.9 – Inserto API. (SANDVIK, 2012)

Os conjuntos de incerto e porta ferramenta foram montados em um mandril tipo BT 40 com o auxílio de pinça, conforme mostra na Figura IV.8b.

IV.1.6 Corpo de prova

Em relação ao corpo de prova, foi utilizado um tarugo redondo de alumínio de liga 6262, com dimensões de 78 mm de diâmetro externo e 90 mm de altura. Furo interno com diâmetro maior de 66 mm e ângulo de 7º em relação ao eixo normal. Foram usinados oito corpos de prova. A ferramenta utilizada para realizar o fresamento de roscas foi um suporte de rosqueamento interno para torno mecânico. A ferramenta tem uma arestas de corte para realizar o perfil da rosca API de 2 3/8" REG com uma entrada.

Foram feitos quatro fios de rosca no corpo de prova de um total de quatorze fios, que é a quantidade estabelecida pela norma, conforme Figura IV.10. A rosca não foi totalmente usinada, pois a maquina não tinha memória suficiente para armazenar todo o programa, fator que não interferiu na análise dos dados, pois era necessário somente um filete de rosca para o estudo do mesmo.



Figura IV.10 – Corpo de prova.

Para uma melhor visualização do perfil de rosca gerado durante a usinagem, alguns corpos de prova foram abertos conforme Figura IV.11.



Figura IV.11 – Corpo de prova aberto.

IV.2 Experimento piloto

Com a finalidade de verificar as variáveis de entrada e saída, foi feito um experimento piloto. No experimento as roscas foram usinadas utilizando a técnica do *thread milling,* que realiza uma rosca em um furo já usinado. A confecção 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 7º em relação ao eixo z, eixo normal da peça.

Em uma primeira fase, foi realizado um experimento piloto para verificar a viabilidade da fabricação, a geometria final da peça, o programa da máquina e as variáveis envolvidas na fabricação. Os experimentos foram realizados em corpos de prova de polipropileno (Figura IV.12), sendo que o furo foi pré-usinado. Nesta etapa foram usinados três corpos de prova com velocidade de corte constante de 1000 m/min e rotação de 600 rpm.



(a) Peça usinada com rebarbas (b) Peça aberta sem rebarbas

Figura IV.12 - Corpo de Prova após o Ensaio Piloto.

O *run-out* aferido foi de ± 0,05 mm com o uso de um relógio comparador da marca *mItutoyo* com resolução de ± 0,01 mm conforme Figura IV.13, tanto no experimento piloto, quanto no experimento. Este valor esta dentro dos padrões de fabricação do processo.



Figura IV.13 – Aferição de Run-out

A usinagem de calibração foi feita sem o uso de óleo refrigerante, uma vez que se tratava de um polímero macio. Durantes os ensaios foi verificado a necessidade de confeccionar um mecanismo centralizador da ferramenta em relação à peça (Figura IV.14), pois manualmente não podia-se garantir a concentricidade da ferramenta. Esta excentricidade pode ser observada na diferença de amplitude entre as forças Fx, Fy (positivas) e Fx, Fy (negativas), conforme o gráfico da Figura IV.16.

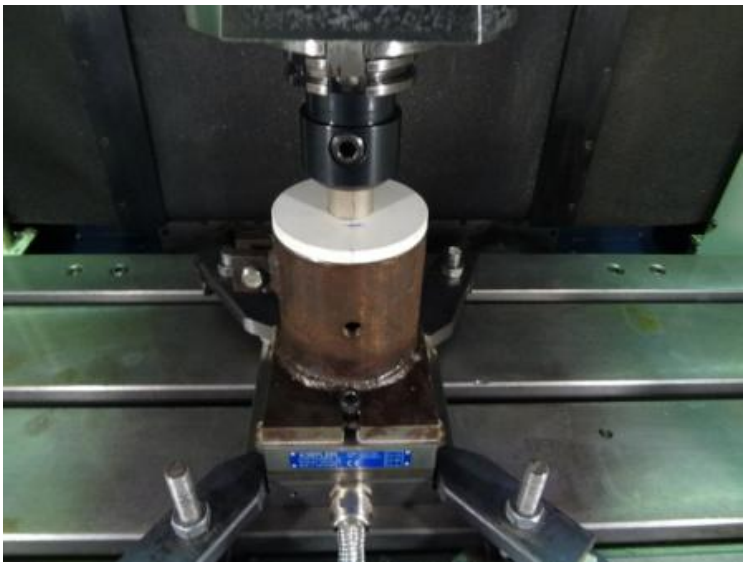


Figura IV.14 - Centraliador

A partir dos sinais do dinamômetro foram aquisitadas as forças experimentais Fx, Fy e Fz no referencial R0, em relação à mesa conforme o gráfico da Figura IV.16. Para analisar a rotação de 360º da ferramenta em relação ao centro do furo θ_1 foi inserido um passo temporal no programa. Esse intervalo foi conseguido através de uma opção de parada do programa, quer dizer, a ferramenta iniciava o corte e em 180º o movimento helicoidal cessava durante um determinado intervalo de tempo. Após este intervalo a ferramenta continuava avançando até dar uma volta completa e novamente cessava o movimento durante alguns segundos. Após este tempo, novamente continuava sua trajetória. Apenas os pontos deste intervalo de 360º foram levados em consideração na análise das forças. A componente Z da posição identifica a profundidade de corte local. Esse passo temporal pode ser visualizado na Figura IV.15 através dos pontos A e B. Somente os dados obtidos dentro desse intervalo foram analisados. Pode-se observar o intervalo AB do experimento piloto com um zoom na Figura IV.16.

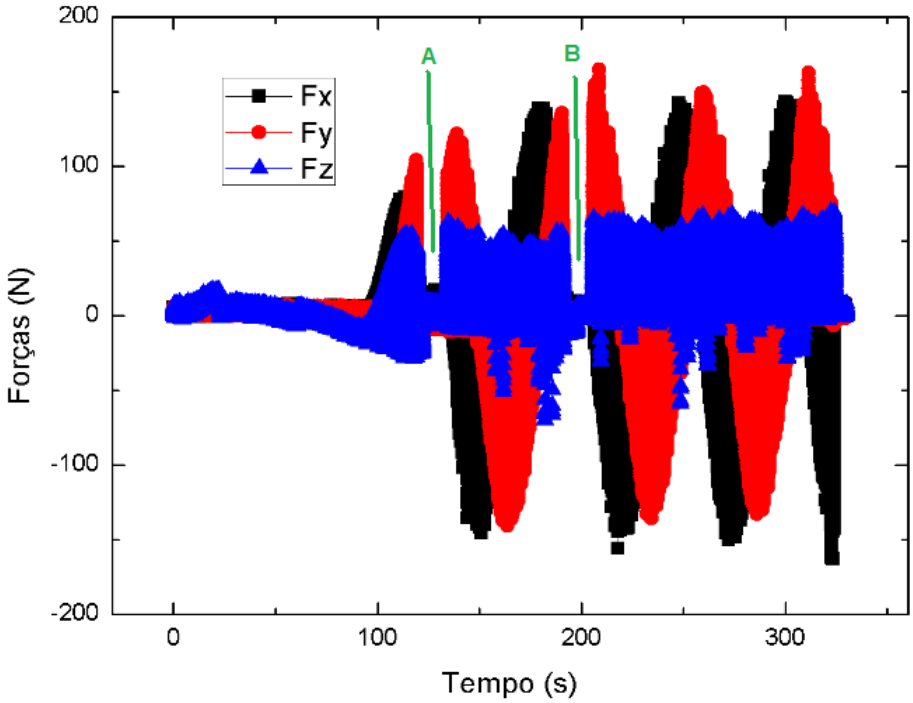


Figura IV.15 – Forças Fx, Fy e Fz com passo temporal.

Não foi feita nenhuma analise estatística dos dados obtidos na calibração, mas pode-se observar na Figura IV.16 que o gráfico obtido das forças Fx, Fy e Fz estão dentro do esperado. As forças Fx e Fy descrevendo uma trajetória senoidal e Fz descrevendo uma trajetória retilínea.

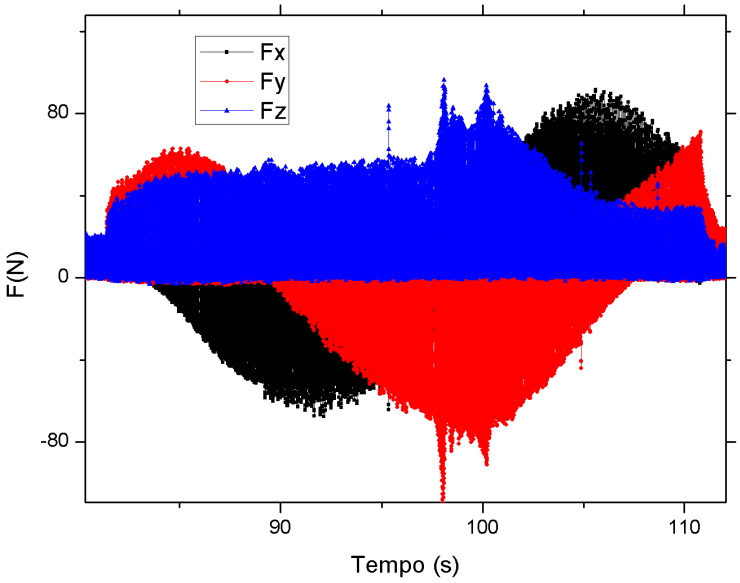


Figura IV.16 - Forças Fx, Fy e Fz no experimento piloto

Uma parte do gráfico é ampliada e é selecionado um intervalo onde pode ser visualizada a curva da passagem da aresta de corte gerando as forças (Figura IV.17). Neste intervalo são calculadas as forças radiais (Fran), tangenciais (Ftan) e resultantes (Fres) no referencial R1. A força radial (Frad) foi calculada utilizando a equação (3.11), a força tangencial (Ftan) foi calculada utilizando a equação (3.12) e a força resultante (Fres) foi calculada utilizando a equação (3.13). A posição do centro da ferramenta foi utilizada para calcular o ângulo θ_1 e identificar o intervalo onde o corte é efetuado de “modo contínuo”, sem efeitos de entrada e saída da ferramenta na peça.

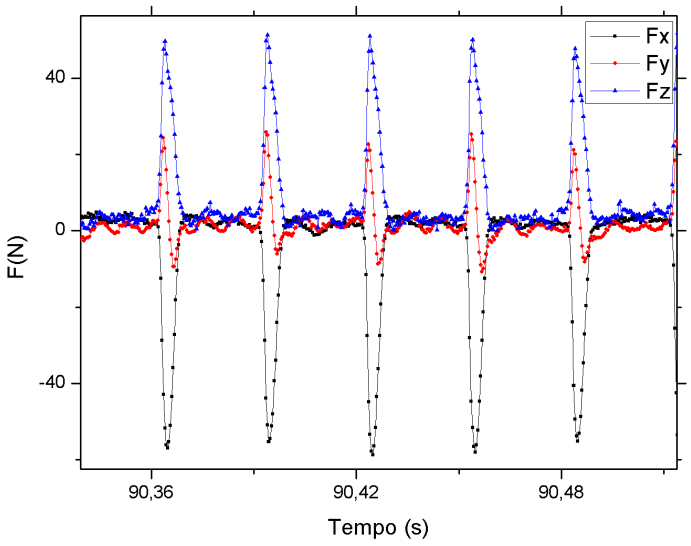
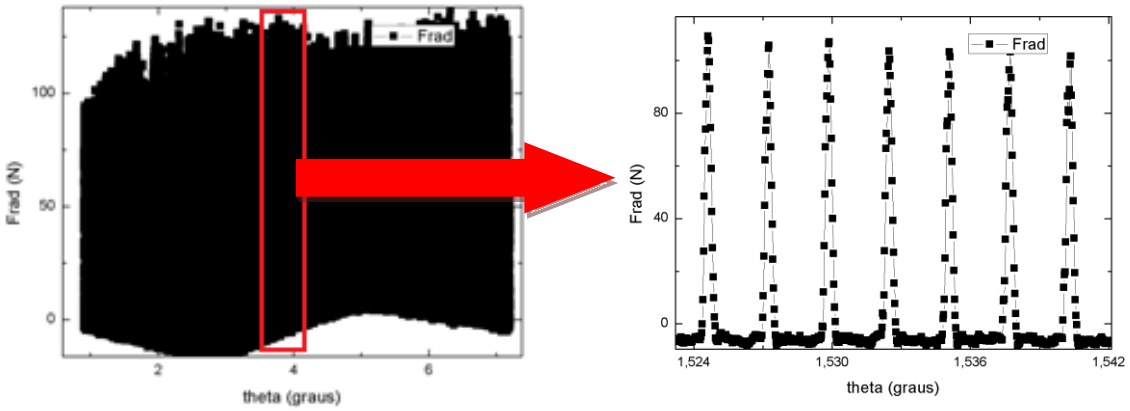


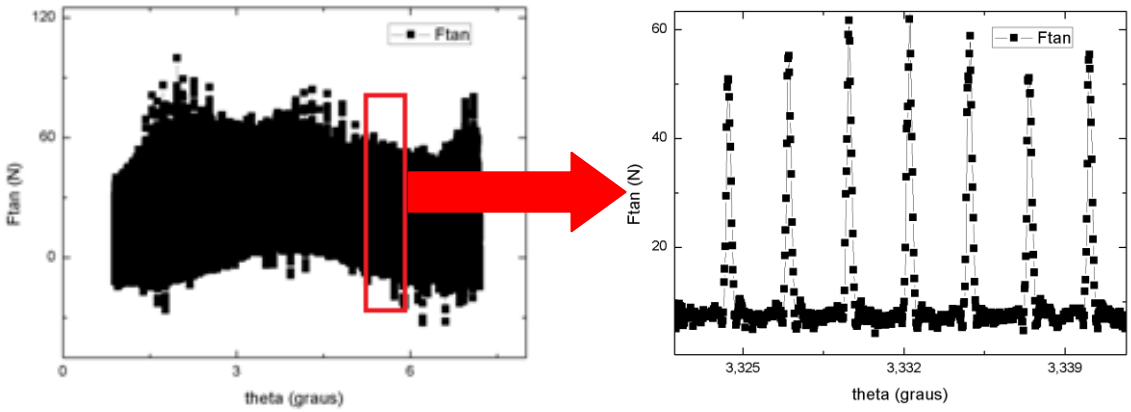
Figura IV.17 - Forças Fx, Fy e Fz no intervalo R0 de cinco rotações.

Com as forças Fx, Fy e Fz obtidas (Figura IV.17) podemos calcular as forças radial, tangencial e resultante. 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 (Figura IV.18) e a força tangencial gera uma má formação no filete de rosca (Figura IV.19).



(a) Força radial no referencial R1 (b) Força radial no referencial R1

Figura IV.18 - Forças de corte radial à superfície cilíndrica interna do corpo de prova (em sete rotações da Ferramenta)



(a) Força tangencial no referencial R1 (b) Força tangencial no referencial R1

Figura IV.19 - Forças de Corte Tangencial à superfície cilíndrica interna do corpo de prova (em sete rotações da Ferramenta)

IV.3 - Planejamento dos Experimentos

Foram realizados cinco experimentos com diferentes velocidades de avanço (ft), que resultaram em diferentes valores para o cavaco máximo (tc_{Max}) (Tabela IV.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 (ft) foi calculado em função do cavaco máximo (tc_{max}). O valor inicial de tc_{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 tc_{Max}= 0,03 mm e uma para tc_{Max}= 0,15 mm. Os gráficos das forças dos 8 experimentos podem ser observados na Figura IV.20.

TABELA IV.1 - Parâmetros de corte dos experimentos

Experimento	Teste	Avanço por Dente (ft) (mm/dente)	tc_{Max} (mm) Calculado
1	A	0,07	0,03
1 – réplica	B	0,07	0,03
1 – réplica	C	0,07	0,03
2	D	0,14	0,10
3	E	0,21	0,15
3 – réplica	F	0,21	0,15
4	G	0,28	0,20
5	H	0,34	0,25

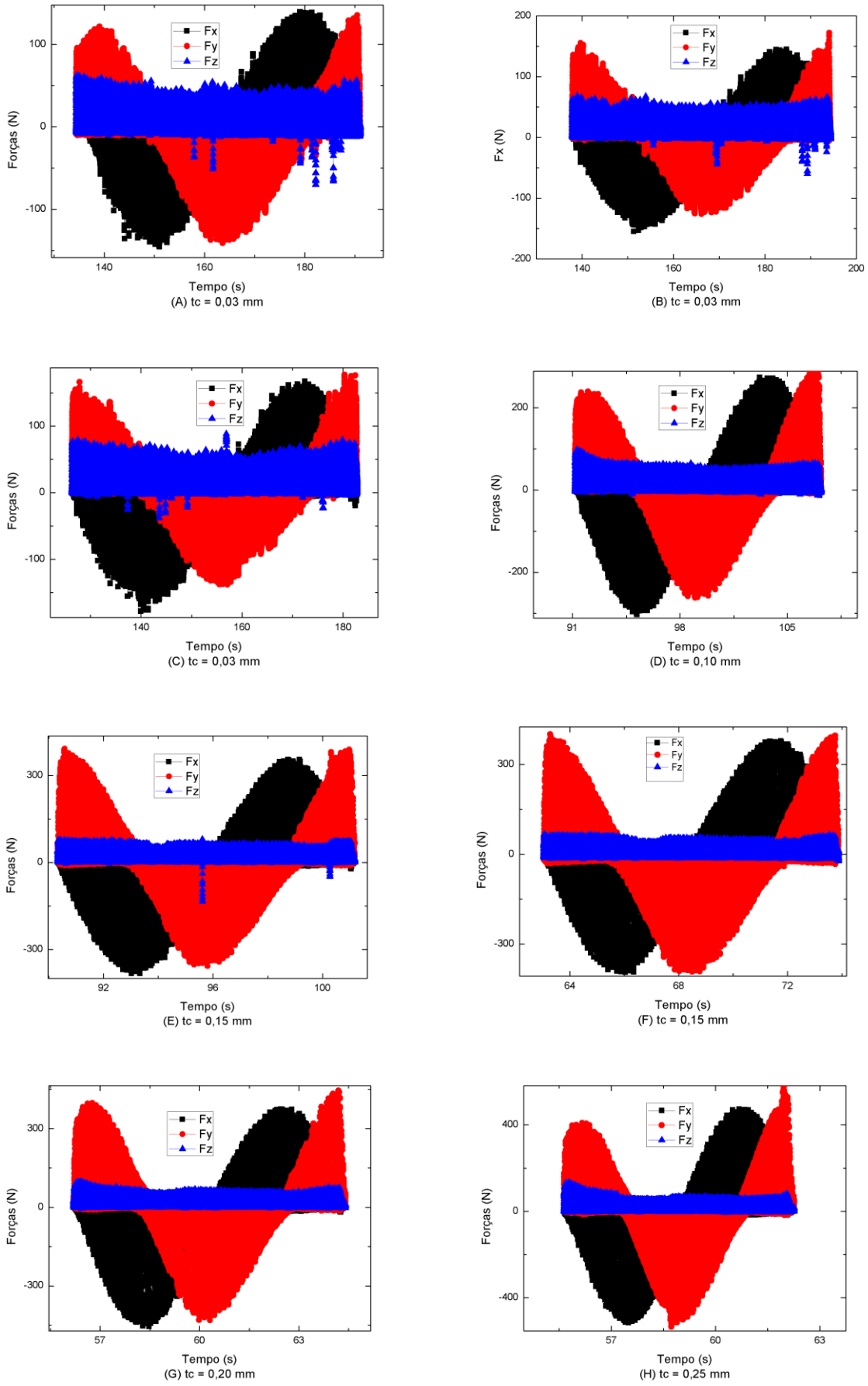


Figura IV.20 - Componentes Fx, Fy e Fz de todos os experimentos.

A técnica utilizada no fresamento do experimento foi a do fresamento de rosca com uma ferramenta de aresta única. Os corpos de prova foram fabricados com a liga de alumínio 6262 com furos usinados em um torno ROMI CNC Centur 40 (Figura IV.10). Os filetes foram usinados em um único passe com a utilização de óleo solúvel conforme Figura VI.21. As forças analisadas correspondem a uma volta de 360º no corpo de prova.



Figura IV.21 – Usinagem de rosca.

IV.4 – Resultados Experimentais e Analise Estatística

A partir dos sinais do dinamômetro foram aquisitadas as forças Fx, Fy e Fz no referencial R0, em relação à mesa. Com os dados foram calculadas as forças radiais (Frad), tangenciais (Ftan) e resultantes (Fres) no referencial R1 para ser analisada a variância. Um modelo do processo é mostrado na Figura IV.22.

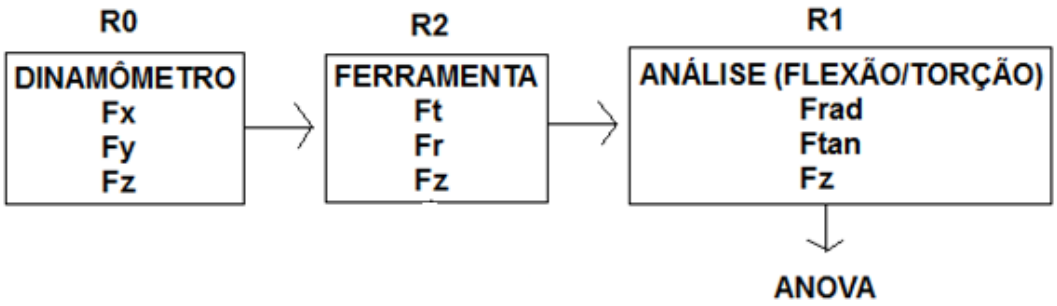


Figura IV.22 – Modelo do tratamento de dados

IV.4.1 – Resultados Experimentais

Os gráficos das forças resultantes dos 8 experimentos podem ser observados na Figura IV.23, os das forças radial na Figura IV.24 e da força tangencial na Figura IV.25.

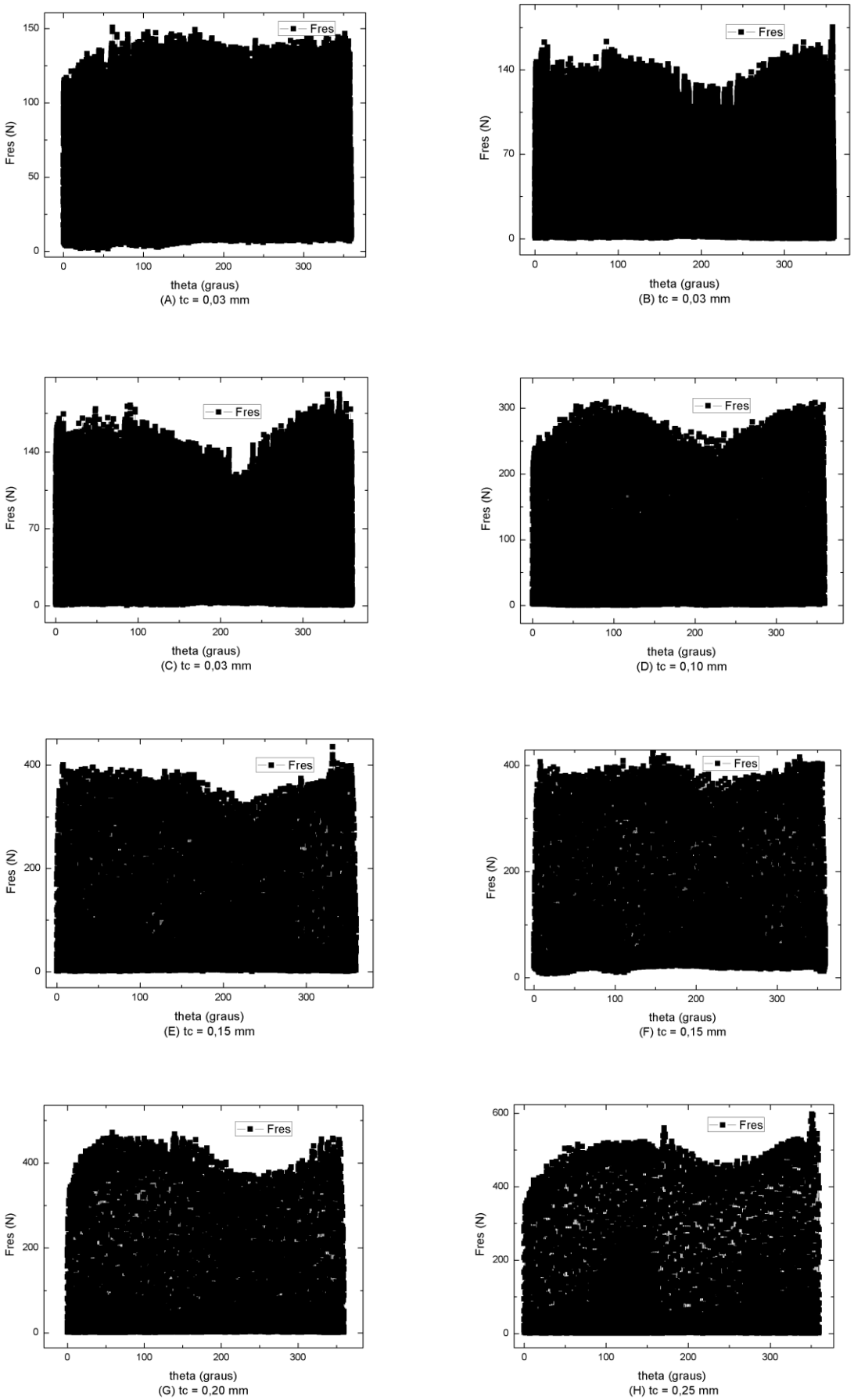


Figura IV.23 - Força resultante de todos os experimentos

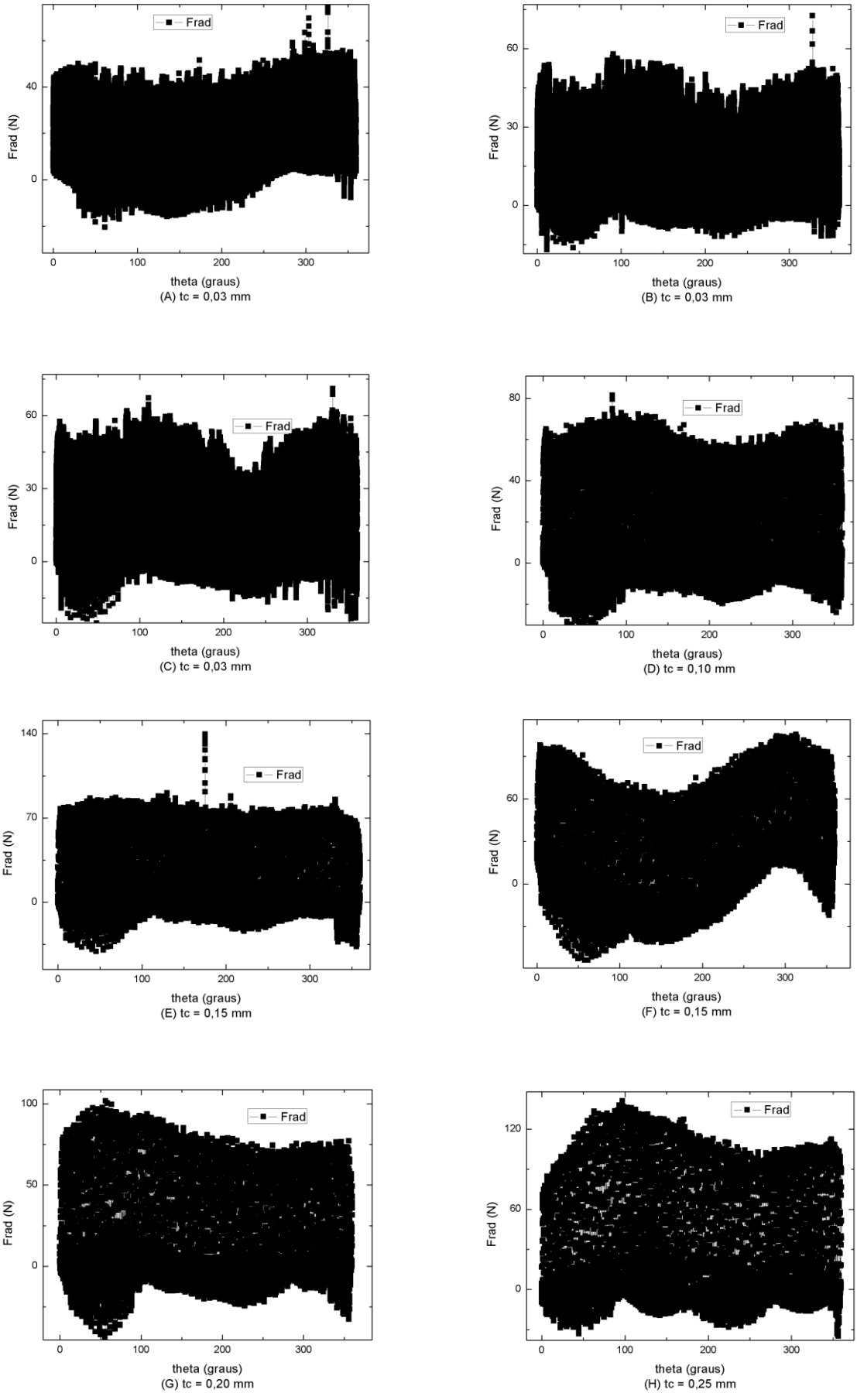


Figura IV.24 - Força radial de todos os experimentos

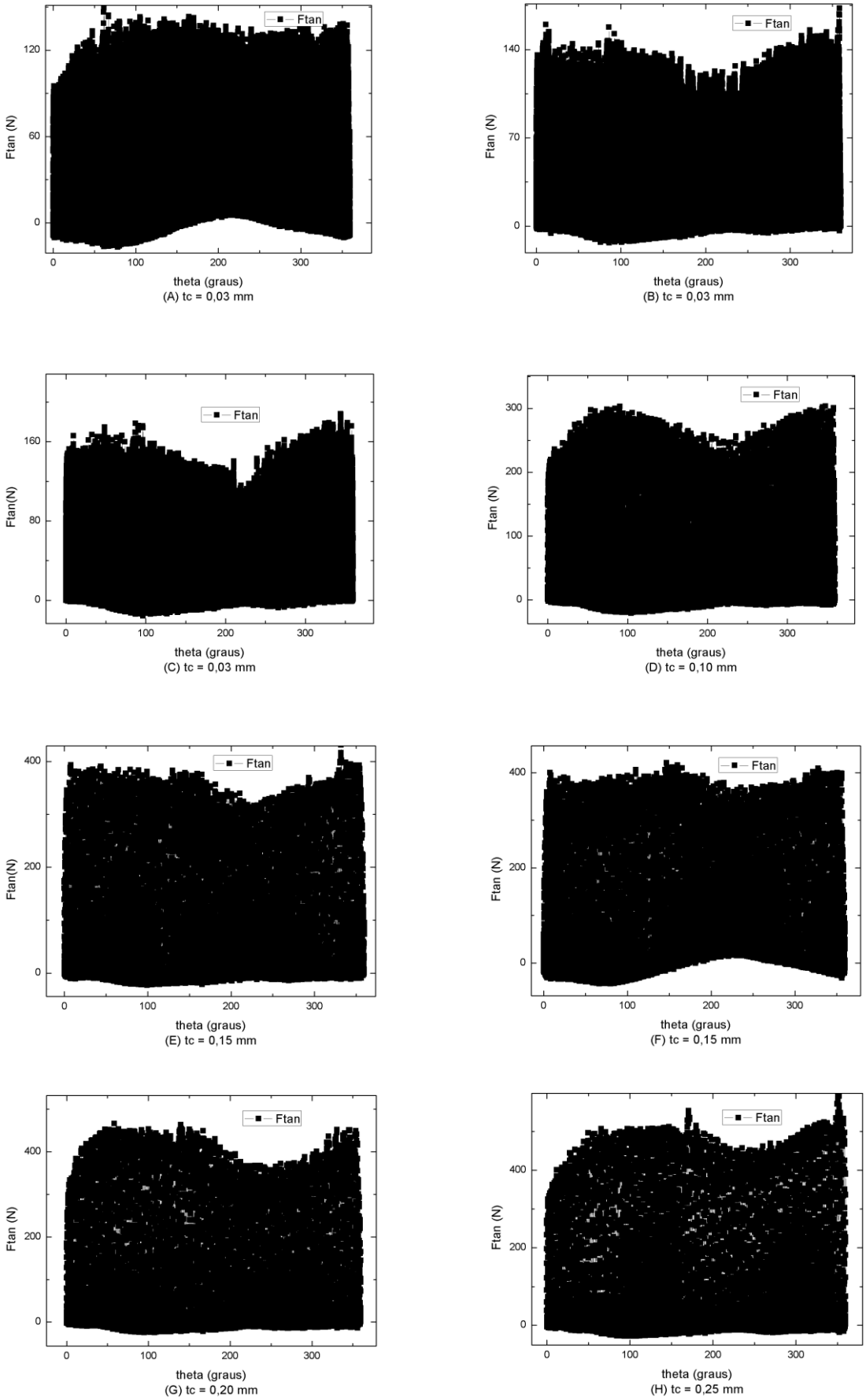
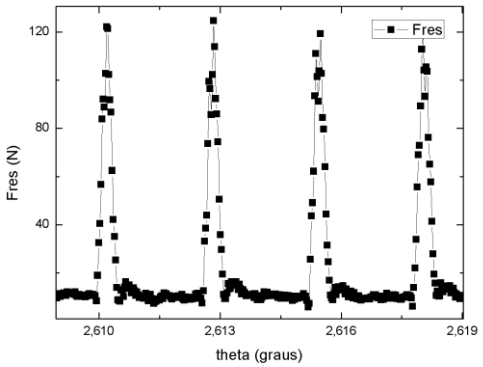
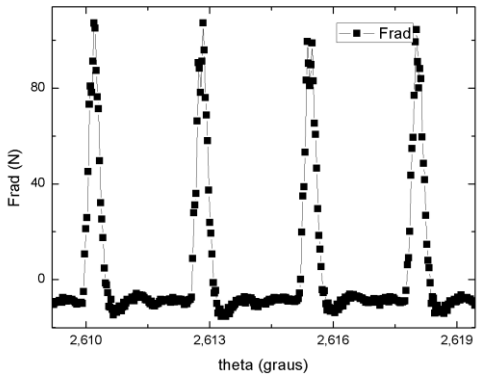


Figura IV.25 - Força tangencial de todos os experimentos

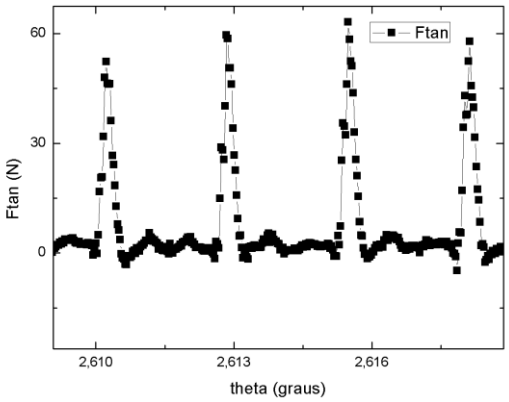
Em uma analise empírica dos dados podemos observar que para um tc_{max}=0,03 mm temos uma Força Resultante pontual em torno de 150 N, a força radial em torno de 100 N e a força tangencial em torno de 60 N.(Figura IV.26) Para as replicas temos uma força resultante em torno de 130 N, a força radial em torno de 60 N e a força tangencial em torno de 130N.(Figura IV.27 e IV.28).



(a) Força resultante

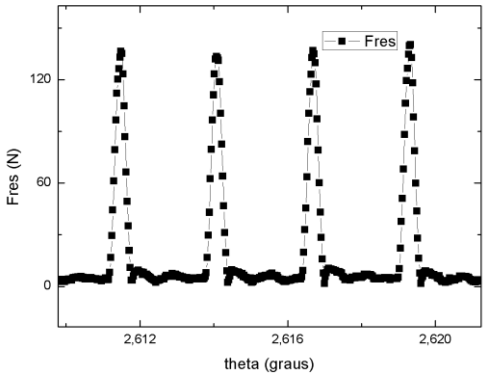


(b) Força radial do referencial R1

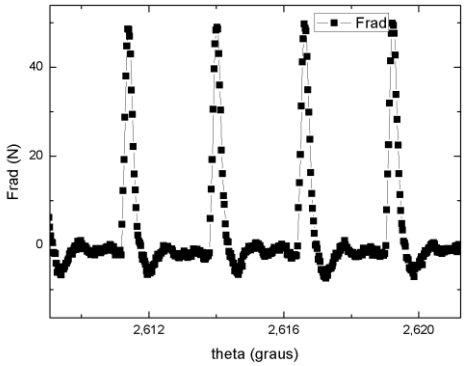


(c) Força tangencial do referencial R1

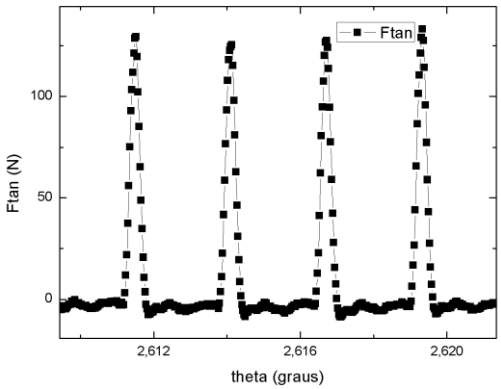
Figura IV.26 – Forças no corpo de prova 1 em uma rotação de 360º em relação ao furo para tcmax=0,03 mm/volta.



(a) Força resultante

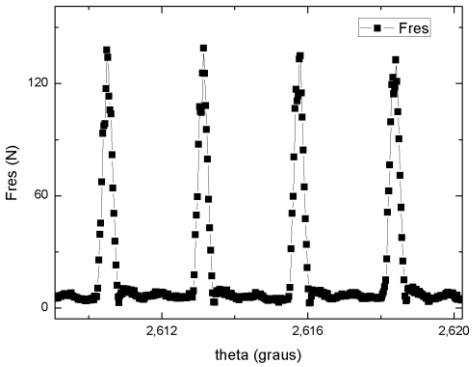


(b) Força radial do referencial R1

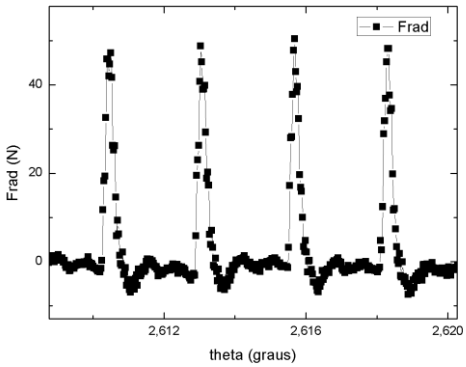


(c) Força tangencial do referencial R1

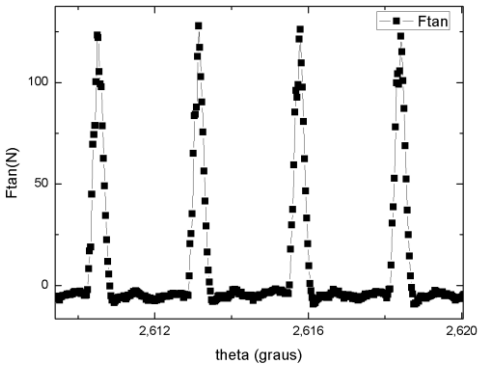
Figura IV.27 – Forças no corpo de prova 2 em uma rotação de 360º em relação ao furo para tcmax=0,03 mm/volta.



(a) Força resultante



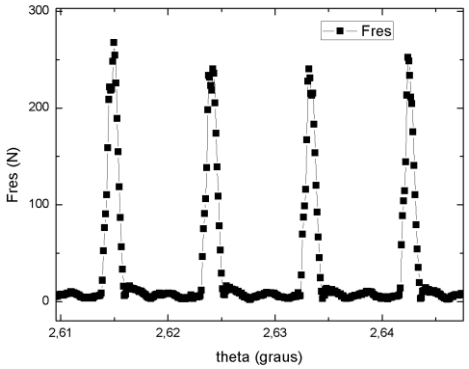
(b) Força radial do referencial R1



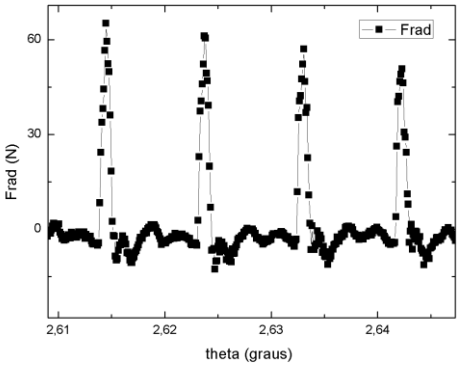
(c) Força tangencial do referencial R1

Figura IV.28 – Forças no corpo de prova 3 em uma rotação de 360º em relação ao furo para tcmax=0,03 mm/volta.

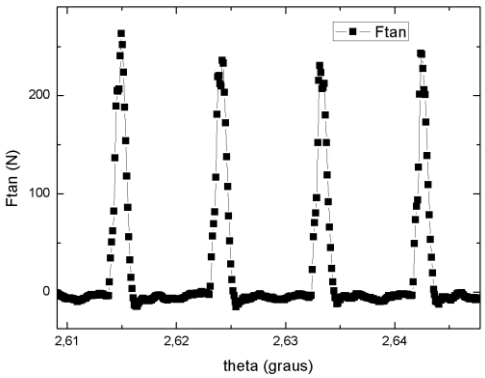
Para um tc_{max}=0,10 mm a força resultante fica em torno de 300 N, a força radial em torno de 70 N e a força tangencial em torno de 300 N.(Figura IV.29).



(a) Força resultante



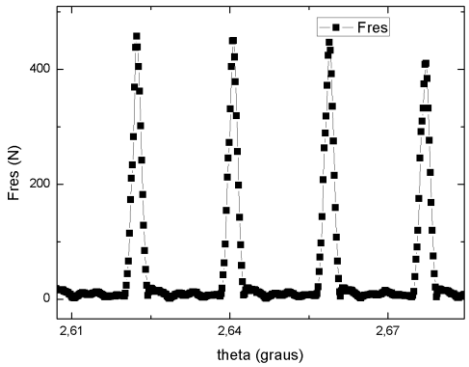
(b) Força radial do referencial R1



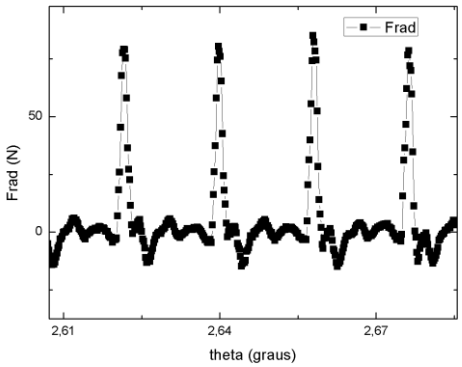
(c) Força tangencial do referencial R1

Figura IV.29 – Forças no corpo de prova 4 em uma rotação de 360º em relação ao furo para tcmax=0,10 mm/volta.

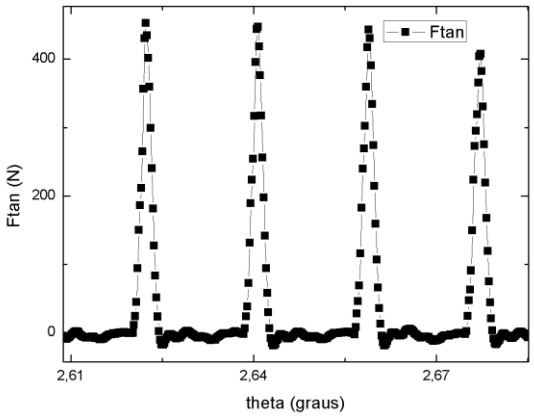
Para um tc_{max}=0,20 mm a força resultante fica em torno de 400 N, a força radial em torno de 75 N e a força tangencial em torno de 400 N.(Figura IV.30)



(a) Força resultante



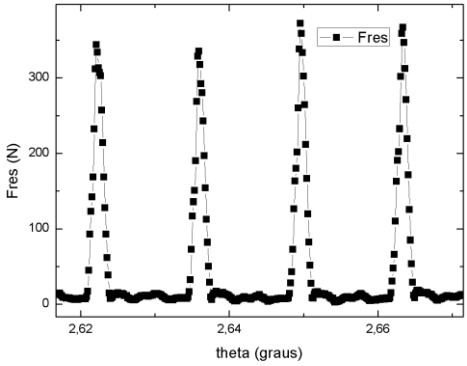
(b) Força radial do referencial R1



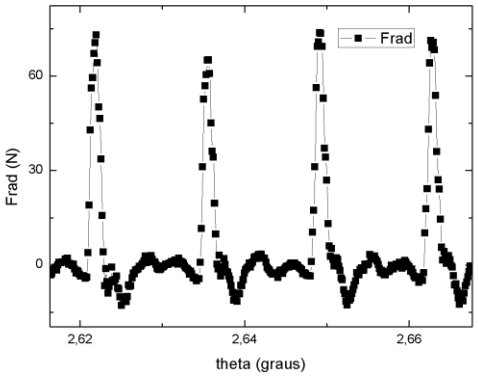
(c) Força tangencial do referencial R1

Figura IV.30 – Forças no corpo de prova 5 em uma rotação de 360º em relação ao furo para tcmax=0,20 mm/volta.

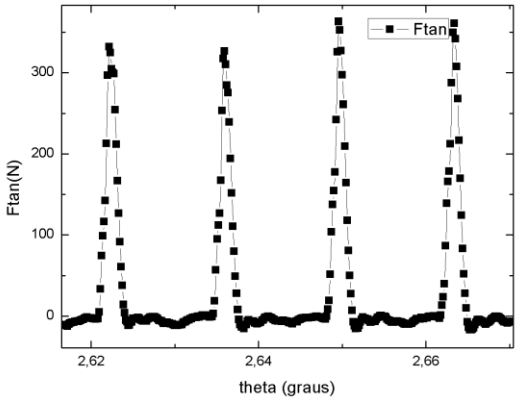
Para um tc_{max}=0,15 mm a força resultante fica em torno de 380 N, a força radial em torno de 80 N e a força tangencial em torno de 350 N.(Figura IV.31) Na replica temos a força resultante em torno de 380 N, a força radial em torno de 60 N e a força tangencial em torno de 400 N.(Figura IV.33)



(a) Força resultante



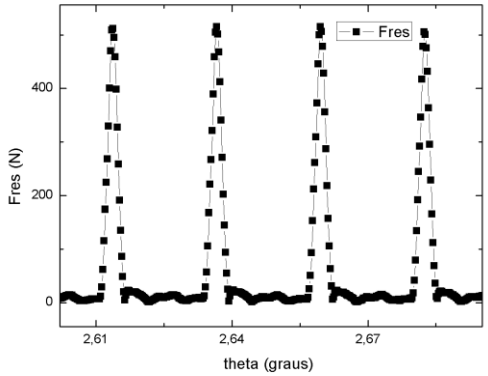
(b) Força radial do referencial R1



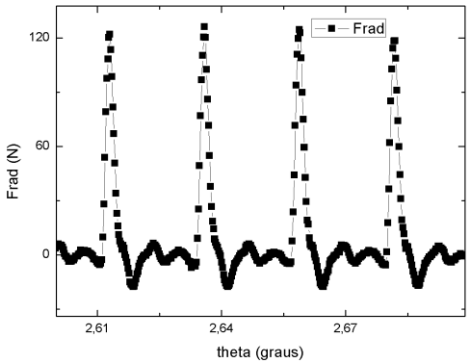
(c) Força tangencial do referencial R1

Figura IV.31 – Forças no corpo de prova 6 em uma rotação de 360º em relação ao furo para tcmax=0,15 mm/volta.

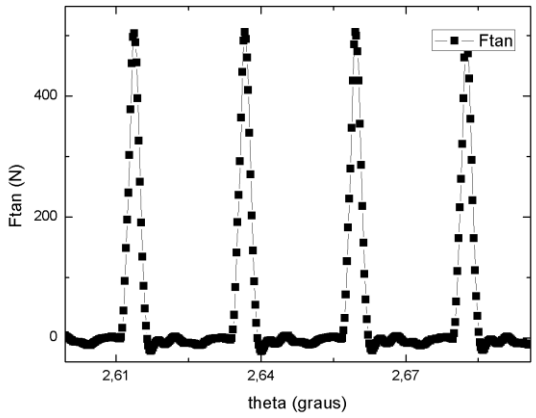
Para um tc_{max}=0,25 mm a força resultante máxima fica em torno de 450 N, a força radial em torno de 110 N e a força rangencial em torno de 430 N.(Figura IV.32).



(a) Força resultante

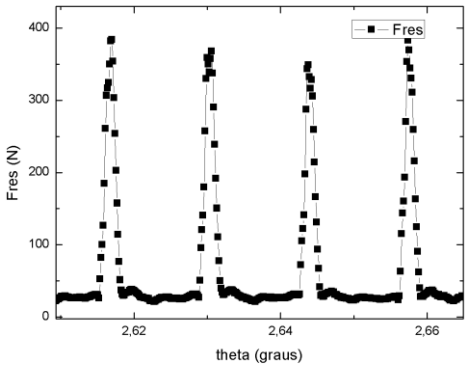


(b) Força radial do referencial R1

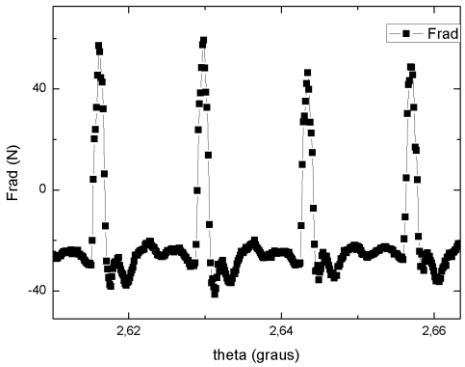


(c) Força tangencial do referencial R1

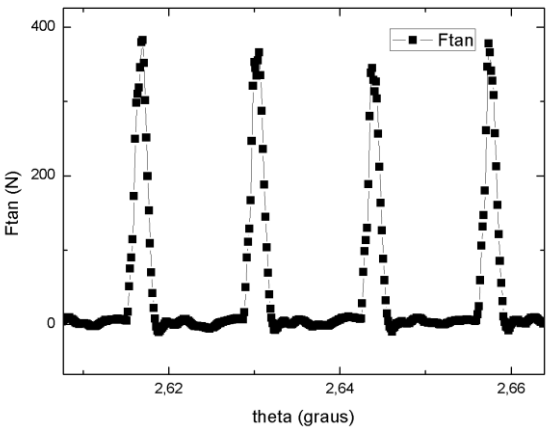
Figura IV.32 – Forças no corpo de prova 7 em uma rotação de 360º em relação ao furo para tcmax=0,25 mm/volta.



(a) Força resultante



(b) Força radial do referencial R1



(c) Força tangencial do referencial R1

Figura IV.33 – Forças no corpo de prova 8 em uma rotação de 360º em relação ao furo para tcmax=0,15 mm/volta.

Na tabela IV.2 pode-se observar as forças resultante, radial e tangencial média e máxima levando-se em consideração todo o gráfico. Pode-se observar que os valores das forças crescem com o aumento da espessura do cavaco, como era esperado.

TABELA IV.2 – Valores experimentais das forças resultante, tangencial e radial

Teste	tcmax	Fres(média)	Fres(máx.)	Frad(média)	Frad(máx.)	Ftan(média)	Ftan(máx.)
A	0,03	23,0	150,6	3,9	74,3	12,3	149,3
B	0,03	18,6	175,4	3,7	72,6	12,4	172,9
C	0,03	21,2	192,5	3,8	71,0	13,9	188,1
D	0,10	34,4	309,0	4,4	81,4	26,5	303,4
E	0,15	45,9	435,2	5,5	139,6	36,1	431,0
F	0,15	64,4	423,8	5,8	105,3	39,3	420,6
G	0,20	51,1	471,8	5,4	101,7	41,8	466,3
H	0,25	61,3	597,8	9,2	141,0	50,5	592,7

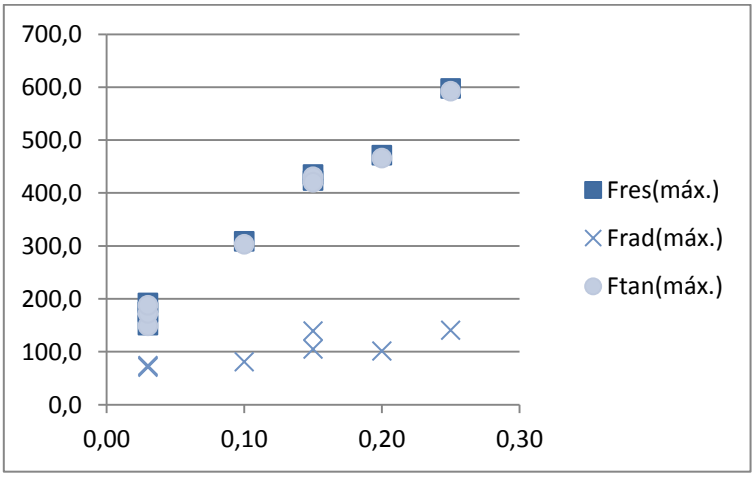


Figura IV.34 – Gráfico de dispersão da força resultante, radial e tangencial máxima.

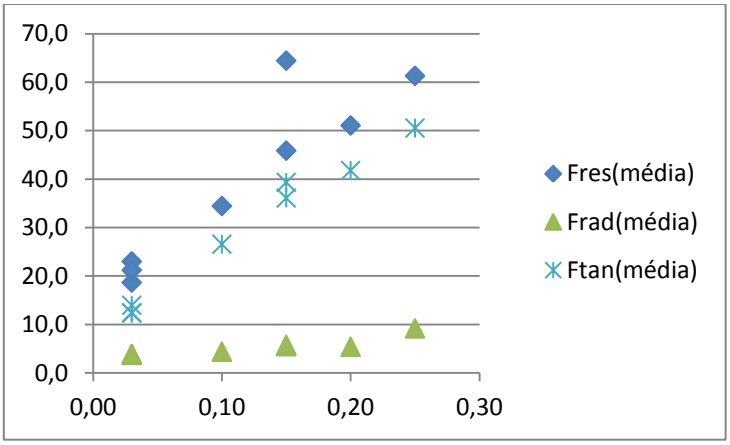


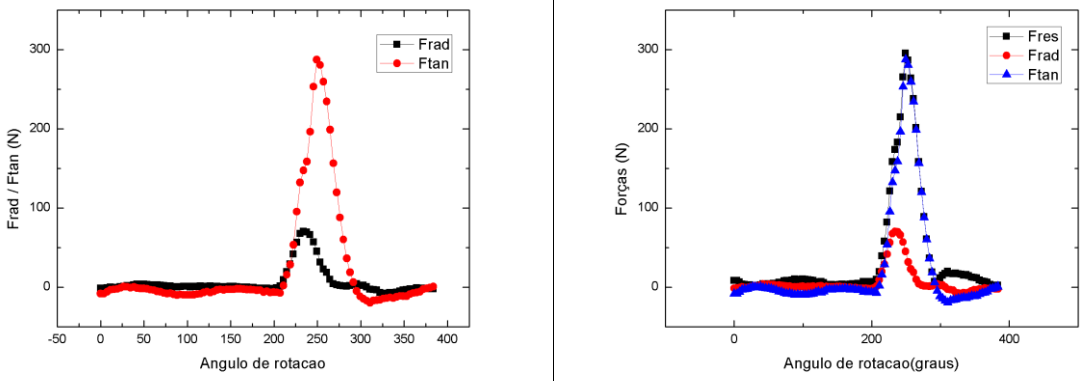
Figura IV.35 – Gráfico de dispersão da força resultante, radial e tangencial média.

IV.4.2 Analise Estatística

O tratamento dos sinais foi realizado utilizando ferramentas estatísticas a partir de uma tabela consolidada de todos os resultados dos testes descritos (APÊNDICE B). A cada teste foram selecionados dez intervalos em uma volta de 360º 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.

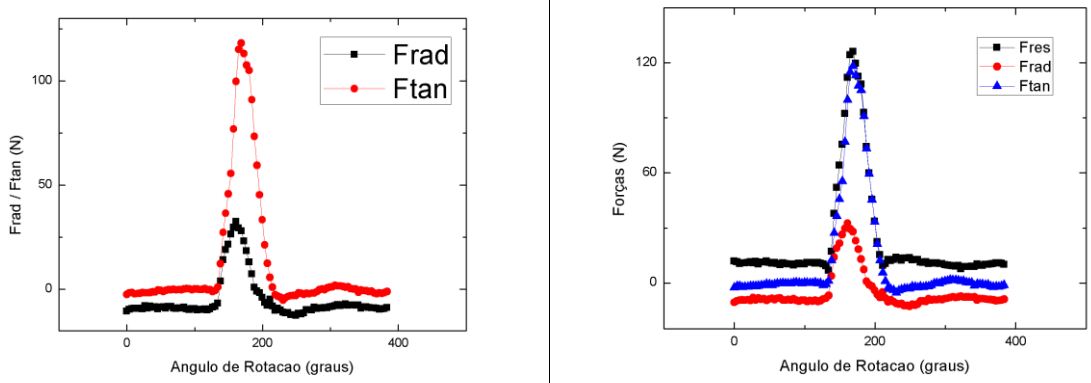
Em cada uma destas rotações e testes, foram analisados os valores máximos, médios e a distância pico-a-pico das forças radial e tangencial do referencial R1 (local entre a peça e a ferramenta) e os valores médios da força resultante.

A localização dos dez intervalos de tempo foram realizadas através da posição Θ_1 da ferramenta durante o percurso da trajetória. As seguintes posições foram utilizadas para Θ_1: 13º, 42º, 77º, 104º, 170º, 211º, 230º, 253º, 294º e 333º. Na Figura IV.36a observa-se as força radial e a força tangencial em um interfalo de Θ_1= 230º para ft=0,28 mm/rotação. Na Figura IV.37a podemos observar as mesmas forças *para* Θ_1= 170º para ft=0,07 mm/rotação.



(a) (b)

Figura IV.36 – Forças de corte para ft=0,28 mm/rotação – (a) Força radial e tangencial em uma rotação da ferramenta. (b) Força Radial, Tangencial e Resultante em um intervalo de tempo.



(a) (b)

Figura IV.37 – Forças de corte para ft=0,07 mm/rotação – (a) Força radial e tangencial em uma rotação da ferramenta. (b) Força Radial, Tangencial e Resultante em um intervalo de tempo.

A análise estatística com análise de efeitos, a análise de variância (ANOVA) utilizou um intervalo de confiança de 95%. Foi feita uma análise das componentes de força com a espessura do cavaco. Sobre a força radial média nada pode ser concluído, pois, de acordo com analise, não houve variação nos valores médios um vez que a probabilidade p=0,356 (Figura IV.38). A força radial máxima durante a usinagem apresenta variação linear com a variação da espessura do cavaco, e consequentemente do avanço (Figura IV.39). Os efeitos do avanço na força radial média para um tc_{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 (Figura IV.40), 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 tc_{max}= 0,03 e 0,15 mm, conforme Figura IV.41, o que também acontece na força tangencial pico-a-pico apresentada na Figura IV.43. Na variação pico-a-pico da força radial, houve apenas uma pequena variação para tc_{max}=0,20 mm (Figura IV.42). Analisando a Figura IV.44, pode-se afirmar que houve uma discrepância na força resultante média para um valor de tc_{max} de 0,15 mm.

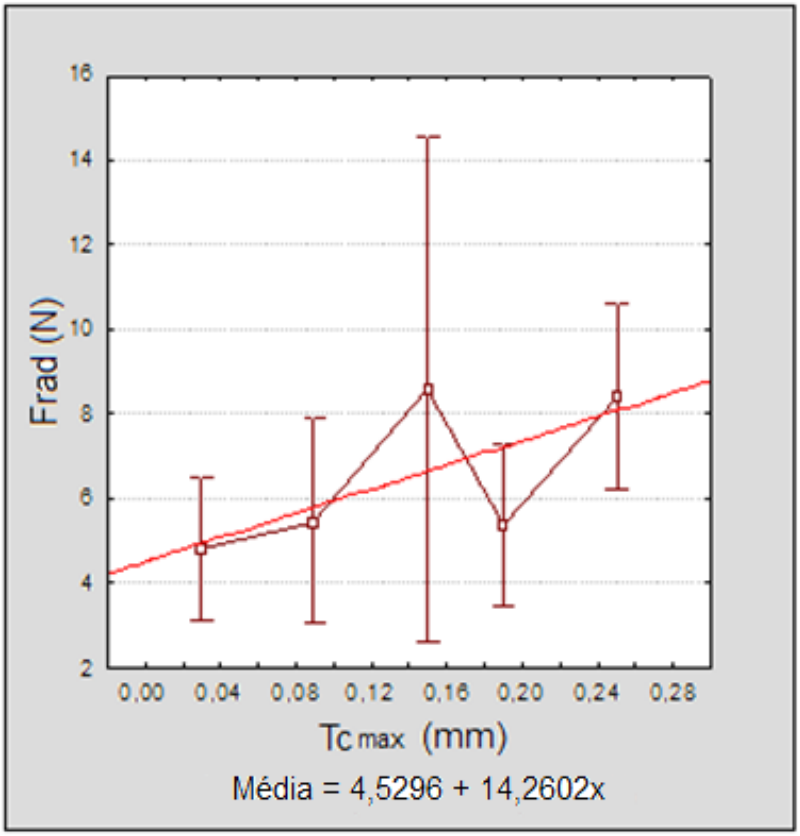


Figura IV.38 - Efeito do avanço na força rádia média

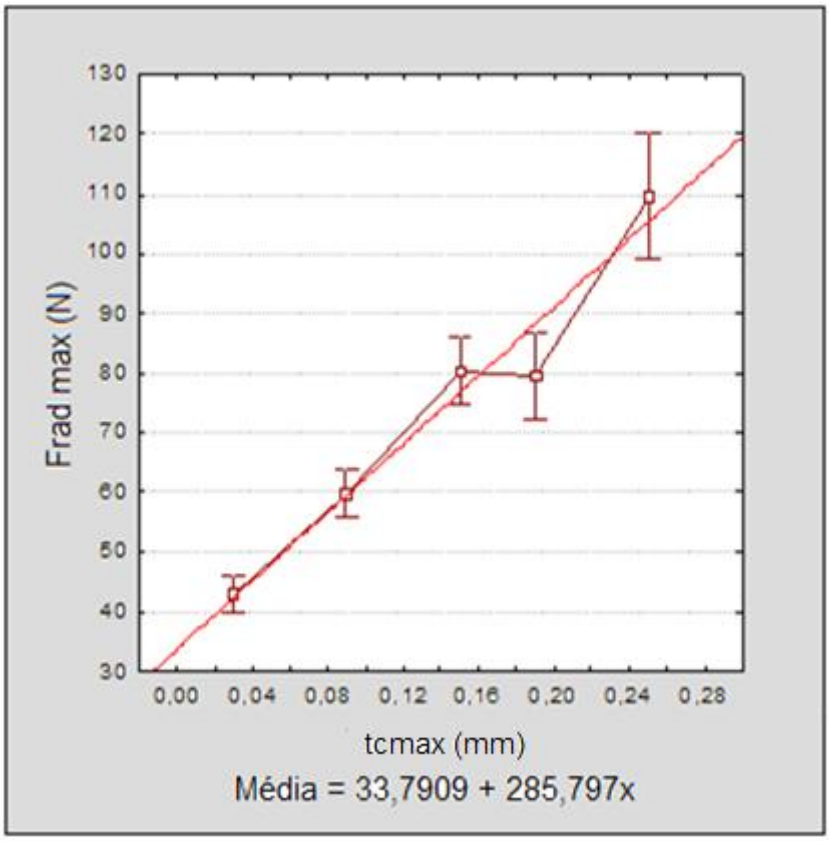


Figura IV.39 - Efeito do avanço na força radial máxima

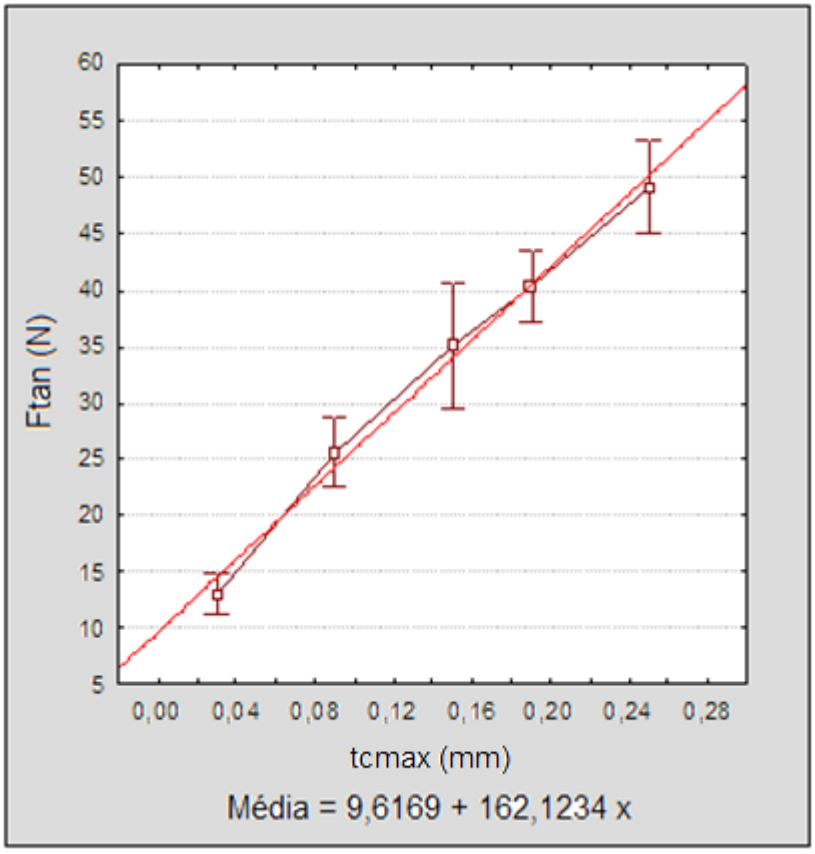


Figura IV.40 - Efeito do avanço na força tangencial média

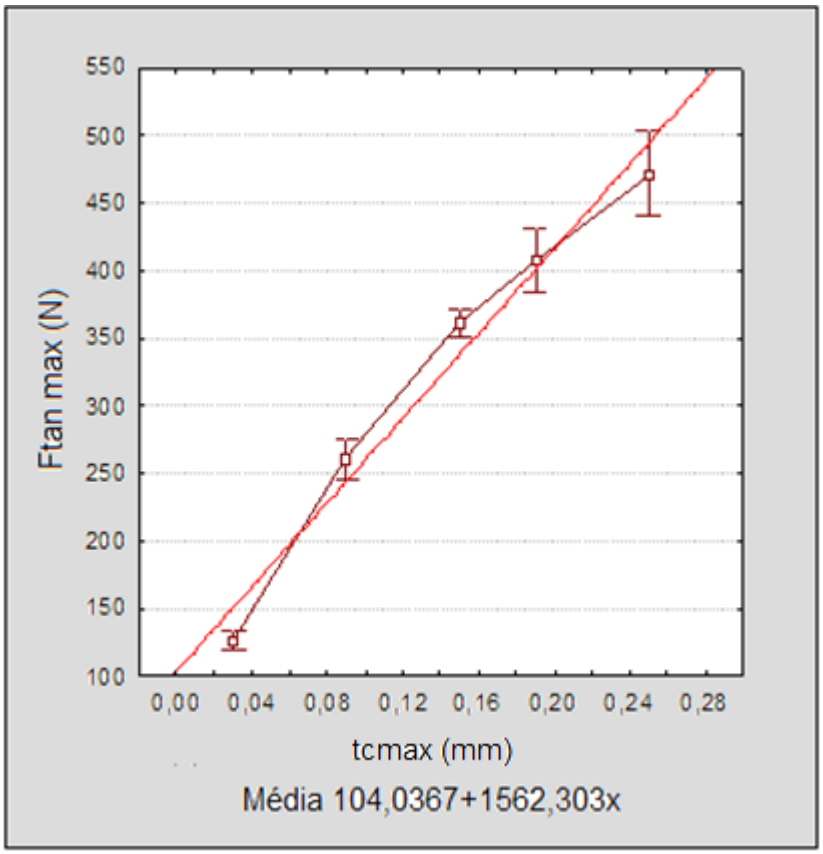


Figura IV.41 - Efeito do avanço na força tangencial máxima

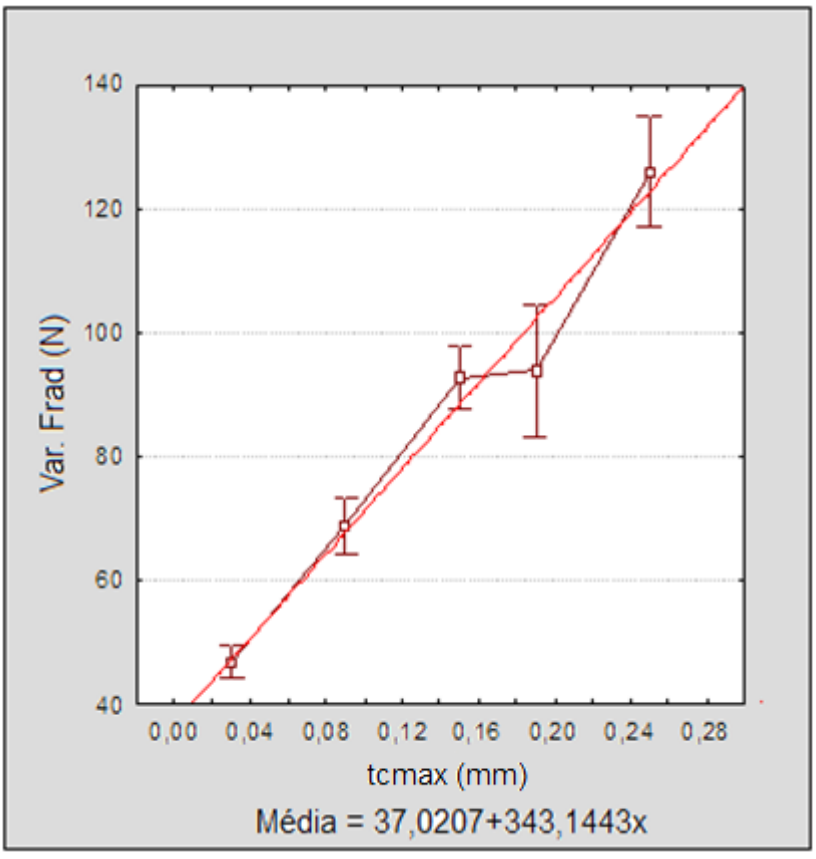


Figura IV.42 - Efeito do avanço na força radial pico-a-pico

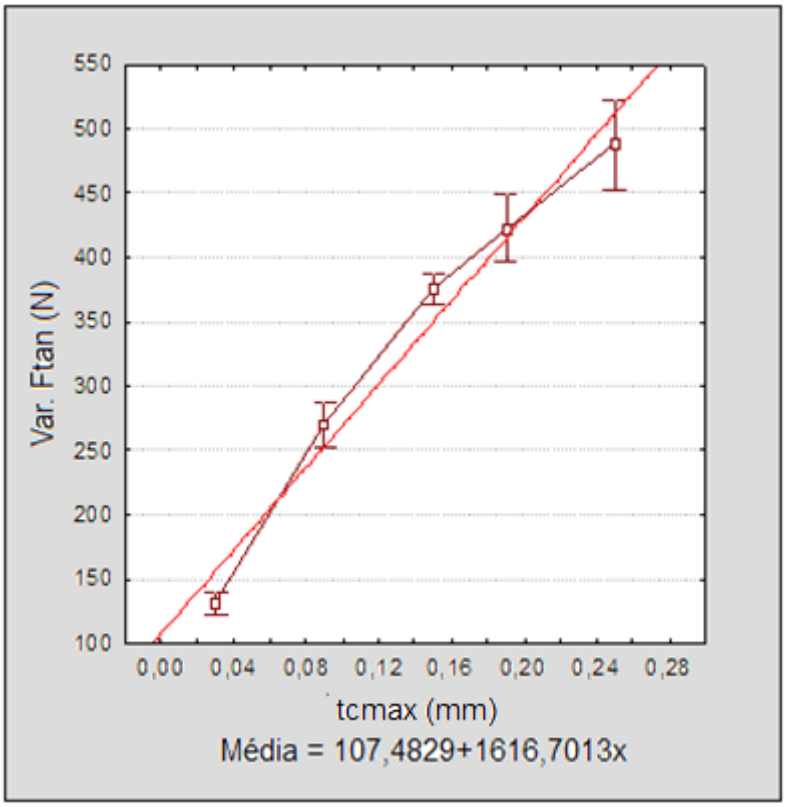


Figura IV.43 - Efeito do avanço na força tangencial pico-a-pico

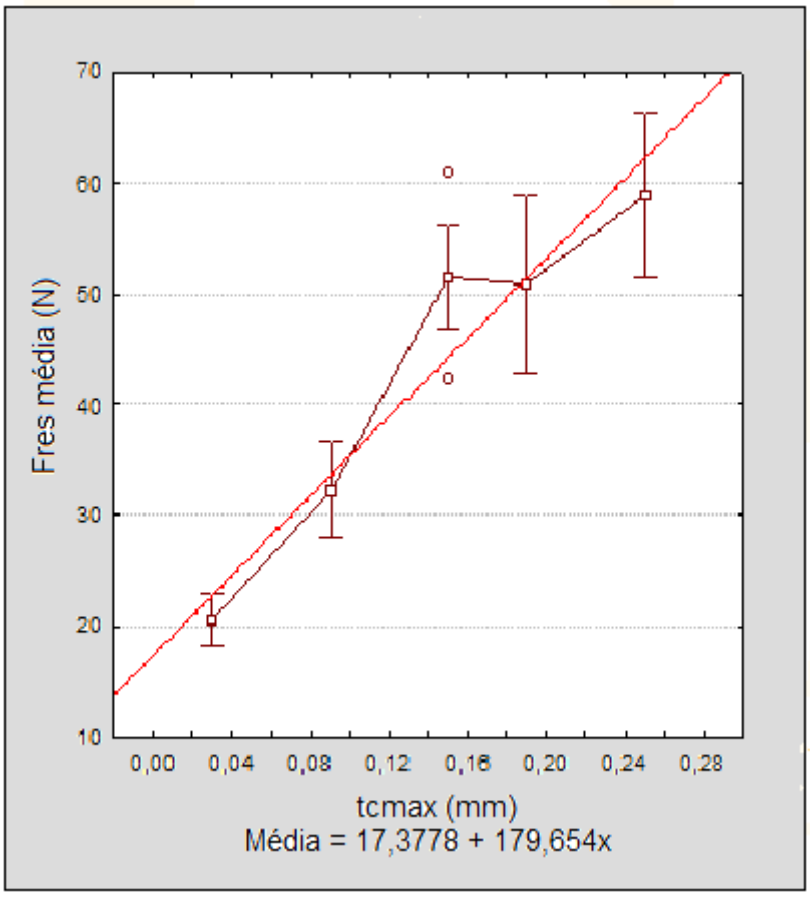


Figura IV.44 - Efeito do avanço na força resultante média

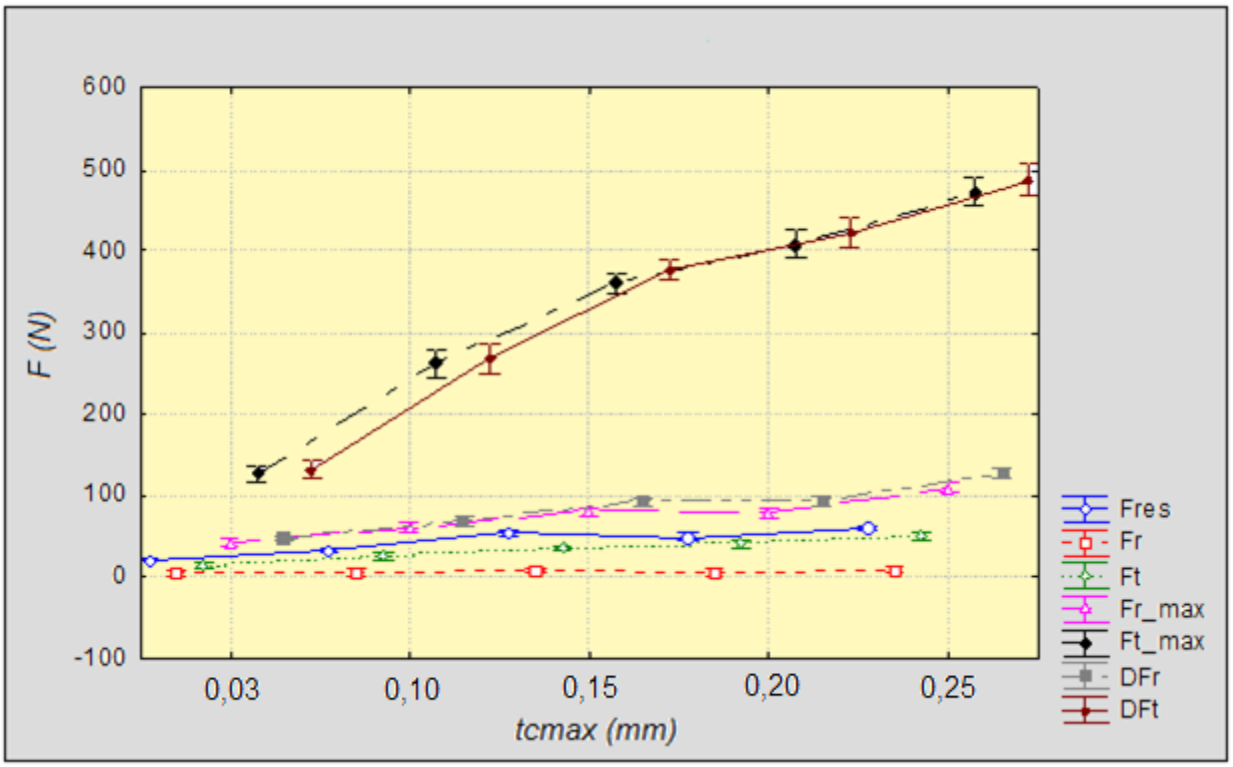


Figura IV.45 - Análise de variância (ANOVA)

A Figura IV.45 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 (tc_{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 (tc_{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.

Capítulo V – Conclusão

Neste trabalho 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 da força com o aumento do avanço, havendo uma indefinição na força radial média. Mesmo alterando os pontos de dados esta indefinição continua. Um estudo posterior deve ser realizado para verificar se há influencia da vibração proveniente da variação do avanço na força radial.

A força tangencial apresentou uma variação linear em função do aumento da área do cavaco. Foi a força que apresentou o melhor resultado dentre as demais. A força resultante apresentou variação linear em função do aumento da área do cavaco, sem outra influência aparente, o que era esperado. Apenas o corpo de prova com tc_{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 como as peças estão com excelente aspecto visual.

Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestões para trabalhos futuros, podemos apresentar alguns itens:

- Uma comparação entre a usinagem da rosca utilizando o torno mecânico e o fresamento de rosca, com os mesmos parâmetros de corte, com o objetivo de avaliar se podemos melhorar os parâmetros de corte utilizando o fresamento de rosca.
- Analise do desgaste dos flancos da ferramenta em função do aumento da espessura do cavaco máximo.
- Calculo através do modelo numérico para comparação com os dados encontrados.
- Simulação computacional para comparação com os dados encontrados.
- Realização do mesmo experimento em materiais frágeis, pois a usinagem em maquinas onde o avanço e a rotação são acoplados é difícil usinar roscas.
- Avaliação do mesmo experimento em outros diâmetros nominais para comparar os resultados e avaliar se há variação dos parâmetros em função do diâmetro da rosca.

Referências Bibliográficas

ALTINTAS, Y.; Spence, A. “End milling force algorithmics for cad systems”. *Annals of CIRP*, v. 40, n. 1, p. 31-34, 1991.

ARAUJO, Anna Carla. *Estudo das forças de usinagem no fresamento de topo*. Dissertação de M.Sc. UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1999.

ARAUJO, A.C.; Silveira, J.L.; “Models for the prediction of instantaneous cutting forces in end milling”. 15º Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica. Nov.1999.

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.; Kapoor S.; “Force prediction in thread milling”. J. Braz. Soc. Mech. Sci. & Eng, v.26, n.1 Rio de Janeiro Jan./Mar. 2004.

ARAUJO, A.C.; Silveira, J.L.; Jun, Martin B. G.; Kapoor, Shiv G.; DeVor, Richard; “A model for thread milling cutting forces”. International Journal of Machine Tools & Manufacture, v. 46, pp. 2057-2065, Dec.2005.

ARAUJO, A.C.; Jun, Martin B. G.; “Modeling and analysis of the thread milling operation in the combined drilling/thread milling process”. 2008 International Manufacturing Science and Engineering Conference, v1, out. 2009

ARMAREGO, E.J.A.; Chen, M.N.P.; “Predictive cutting models for the forces and torque in machine tapping with straight flutetaps”, Cirp Annals—Manufacturing Technology, v.51, pp.75–78. (2002)

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5876 – Roscas –terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11701-Roscas- Tipos e aplicação. Rio de Janeiro: ABNT, 1991.

BLACK, J. T. *Introduction to machining processes*. Metals handbook; machining. 9. Ed. Nova York: ASM International, 1995.

BORCHARDT, Ildon Guilherme. *Introdução ao estudo de transdutores com “strain gages”.* 1.ed. São Leopoldo: UNISINOS, 1999.

BRETAS, Rodrigo Avancini. *Analise da usinagem de roscas por interpolação helicoidal no ferro fundido vermicular*. Dissertação de M.Sc. SOCIEDADE EDUCACIONAL DE SANTA CATARINA INSTITUTO SUPERIOR TUPY, Joenvile, SC, Brasil, 2009.

CAO, Tengyun; Sutherland, John W.; “Investigation of thread tapping load characteristics through mechanistics modeling and experimentation”. International Journal of Machine Tools & Manufacture, v. 42, pp. 1527–1538, julho, 2002.

CARDOSO, F. G.; Santos, G.D.; Araujo, A.C.; Fromentin, G.; “Efeitos de parâmetros de corte nas forças de usinagem em fresamento de roscas”. VII Congresso Nacional de Engenharia Mecanica. Jul./Agos. 2012.

CASILLAS, A. L., Máquinas: Formulário Técnico, São Paulo, Mestre Jou, 4º ed., 1987.

COELHO, R. T.;Arai, Ricardo; Watanuki, Hugo Martinelli; Borges, Emanuel. “An experimental investigation on wear aspects of tapping operation on hardened steels” . Machining Science and Technology, v. 10, n. 2, p.235-250, setembro.2006.

DOGRA A.P.S., K. S.; Devor, R. “Mechanistic model for tapping process with emphasis on process faults and hole geometry. *Journal of Manufacturing Science and engineering*, v. 124, p. 18-25, 2002.

DORMER. “Manual técnico”. Disponível em <http://www.dormertools.com.br>. Acesso em 14 Jun. 2012.

DUBBEL: *Manual do Engenheiro Mecânico*, São Paulo, Hemus, 1979.

ERTUNC, H.M., OYSU C. “Drill wear monitoring using cutting force signals”. Mechatronics, v.14, pp. 533–548, Jun.2004.

FERRARESI, Dino. *Fundamentos de usinagem dos metais.* São Paulo: Ed. Blucher, 1977.

FROMENTIN, G., 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., 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., 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.

FURNESS R.J., Tsao T-C, Rankin J.S. II, Muth M.J., Manes K.W. (1999) “Torque control for a form tool drilling operation”. IEEE Transaction Control System Technology, v7, pp.22–30, jan.1999.

GRZESIK, W..*Advanced Machining Processes of Metallic Materials: Theory, Modelling and Applications,*1 ed. Amsterdan: Elsevier Publisher, 2008.

HOFF, ALEXANDRE GOMES. *Medição de força de usinagem utilizando um transdutor piezoelétrico*. 2009 TCC (Engenharia Elétrica) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos UNISINOS, São Leopoldo, RS, Brasil.

IMANI, B. Moetakef , Abdollahzadeh, H., El-Mounayri, H. “Prediction of thread milling instantaneous cutting forces”. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v.58, pp. 849-859, 2012.

INMETRO. Vocabulário Internacional de Metrologia: conceitos fundamentais e gerais e termos associados (VIM 2008). 1 ed. Rio de Janeiro, 2009.

KAPOOR, S.G.; Baroa, Pradeep Kumar; Joshia, Suhas S.; “Modeling of cutting forces in a face-milling operation with self-propelled round insert milling cutter”. International Journal of Machine Tools & Manufacture, v. 45, pp.831–839, janeiro. 2005

KAPOOR, S.G.; Jayaram, S.; DeVor, R.E.; “Estimation of the specific cutting pressures for mechanistic cutting force models”. International Journal of Machine Tools & Manufacture, v. 41, pp.265–281, julho. 2000.

KALPAKJIAN, S. *Manufacturing engineering and technology,* 3 ed. Nova York: Addison-Wesley Publishing Co., 1995.

KLINE, W.A., DeVor, R.E., “The Effects of Run-Out on Cutting Geometry and Forces in End Milling” International Journal of Machine Tool Design and Research, v.23, pp.123-140, 1983.

KOELSCH, J.R. “Rosqueamento de alto desempenho” . Máquinas e Metais. n. 432, pp.20- 35, 2002.

LAI, Wen-Hsiang, “Modeling of Cutting Forces in End Milling Operations”. Tamkang Journal of Science and Engineering, Vol. 3, No. 1, pp. 15-22, (2000*)*

MACHADO, Alison Rocha. *Teoria da usinagem dos materiais.* São Paulo, Ed. Blucher, 2008.

MCGEOUGH, J. A. *Advanced methods os machining.* Londres: Chapman and Hall, 1988.

MERCHANT, M.E. “Mechanics of the metal cutting process. I Othogonal cutting and type 2 chip”. *J. Applied Physics*, v.16, n.5, pp. 267-275, maio.1954.

TLUSTY, J.; Macneil. “Dynamics of cutting in end milling”. *Annals of CIRP*, v. 24, n. 1, pp. 213 -221, 1975.

RODRIGUES, Marcelo Acácio. “Visão geral da fabricação de elementos roscados por usinagem”**.** Revista do parafuso. Editora Milatias Ltda. São Paulo. 25 ed., Mar. 2011. Disponível em : <www.revistadoparafuso.com.br>. Acesso em 14 nov. 2011.

SALES, Wisley Falco; Becker, Marcelo; Gurgel, Alexandre G.; Júnior, Jánes 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.

SANDVIK. “Manual técnico”. Disponível em <http://www.sandivik.com.br>. Acesso em 24 Set. 2012.

SAMBHAV, Kumar; kumar, Abhishek; Choudhury, Sounak K.; “Mechanistic force modeling of single point cutting tool in terms of grinding angles”. International Journal of Machine Tools e Manufacture, v.51, pp. 775 – 786, junho.2011

SANTOS, S.C; SALES, W.F. *Aspectos tribológicos da usinagem dos materiai,* 1 ed. Ed. Artliber ltda. São Paulo, 2007.

SHAW, M. C.. “Metal cutting principles”. Londres: Oxford University Press, 1984.

SMITH, G. *Cutting tool technology*, 1 ed. Londres: Industrial handbook Publisher, 2008.

STEMMER, C. E., *Ferramentas de Corte 1*. Florianópolis, Universidade de Santa

Catarina,1995.
STEPHENSON, D. A.; Agapiou, J. S. *Metal Cutting Theory and Practice*, 1 ed. New York: Editora Marcel Dekker, 1996.
TRENT, E. M. *Metal cutting*, 2. ed. Londres: Butterworths & Co., 1985.
WANG, Haiyan; Xuda, Qin; Ren, Chengzu; Wang, Qi;" Prediction of cutting forces in helical milling process". Int J Adv Manuf Technol, v.58, pp.849–859, junho,2011.

APÊNDICE A - PROGRAMA DE INTERPOLAÇÃO

```
N10 D01
N20 G55
N30 G00  X0Y0
N40 G00  Z0
N50 S2557  M03
N60 G01  Z-15.8  F100
N70 G01  G41  X-16.054
N80 G01 X-16.054 Y0.000 Z-15.800
N90 G01 X-15.991 Y1.399 Z-15.870
N100 G01 X-15.807 Y2.787 Z-15.940
N110 G01 X-15.502 Y4.154 Z-16.010
N120 G01 X-15.079 Y5.488 Z-16.081
N130 G01 X-14.542 Y6.781 Z-16.151
N140 G01 X-13.894 Y8.022 Z-16.221
N150 G01 X-13.135 Y9.197 Z-16.291
N160 G01 X-12.277 Y10.302 Z-16.361
N170 G01 X-11.326 Y11.326 Z-16.431
N180 G01 X-10.291 Y12.264 Z-16.501
N190 G01 X-9.178 Y13.107 Z-16.572
N200 G01 X-7.996 Y13.850 Z-16.642
N210 G01 X-6.755 Y14.486 Z-16.712
N220 G01 X-5.464 Y15.011 Z-16.782
N230 G01 X-4.132 Y15.422 Z-16.852
N240 G01 X-2.771 Y15.715 Z-16.922
N250 G01 X-1.390 Y15.888 Z-16.992
N260 G01 X0.000 Y15.940 Z-17.063
N270 G01 X1.389 Y15.871 Z-17.133
N280 G01 X2.765 Y15.681 Z-17.203
N290 G01 X4.119 Y15.372 Z-17.273
N300 G01 X5.440 Y14.947 Z-17.343
N310 G01 X6.718 Y14.408 Z-17.413
N320 G01 X7.944 Y13.760 Z-17.483
N330 G01 X9.108 Y13.008 Z-17.553
N340 G01 X10.202 Y12.158 Z-17.624
N350 G01 X11.217 Y11.217 Z-17.694
N360 G01 X12.145 Y10.191 Z-17.764
.
.
.
.
N7780 G01 X2.639 Y-7.249 Z-85.904
N7790 G01 X1.986 Y-7.412 Z-86.238
N7800 G01 X1.325 Y-7.517 Z-86.572
N7810 G01 X0.662 Y-7.563 Z-86.906
N7820 G01 X0.000 Y-7.550 Z-87.240
N7830 G40  G01  X0Y0
N7840 G00  Z25
N7850 M05
N7860 M02
```

APÊNDICE B – TABELA DE DADOS DOS PONTOS

Ensaio	DADOS DE ENTRADA								
	Ft	Tmax	Fres	Fr	Ft	Fr max	Ft max	Var. Fr	Var. Ft
1	0.07	0.03	19,20514	8,83214	3,17559	39,9781	78,64484	36,49497	86,87299
1	0.07	0.03	23,04175	1,70118	5,24385	44,49359	125,2457	50,64965	138,5828
1	0.07	0.03	20,82513	0,45899	3,8563	36,05295	123,5083	42,90513	137,7128
1	0.07	0.03	23,95587	-3,999	16,8275	40,4252	138,8928	53,09821	139,9229
1	0.07	0.03	18,15314	-4,49221	12,33703	22,13077	86,50079	31,40077	84,48599
1	0.07	0.03	22,98752	10,88933	16,19872	47,19377	124,4047	41,80444	126,0926
1	0.07	0.03	24,50626	11,45189	16,80888	51,40957	128,5949	46,35947	131,1587
1	0.07	0.03	25,49166	12,99621	12,03965	53,66833	128,1294	49,03551	134,5615
1	0.07	0.03	23,97527	12,41248	9,40263	48,46461	117,0221	43,11884	123,3277
1	0.07	0.03	23,46192	10,63181	6,10846	45,25912	107,3122	42,00746	116,3644

Ensaio	DADOS DE ENTRADA								
	Ft	Tmax	Fres	Fr	Ft	Fr max	Ft max	Var. Fr	Var. Ft
2	0.07	0.03	20,28427	6,07612	15,56006	43,37769	135,594	43,36664	136,5714
2	0.07	0.03	18,83334	5,43503	13,46774	37,41315	141,7914	47,69556	144,7892
2	0.07	0.03	17,18326	5,76143	11,38281	36,27545	98,94984	42,17554	100,7082
2	0.07	0.03	19,22616	5,222	13,51054	38,34998	121,1646	50,89265	125,1183
2	0.07	0.03	11,01175	-0,94898	5,32672	24,45144	73,06848	30,13436	77,15791
2	0.07	0.03	17,04672	0,31802	10,74575	38,71783	111,985	44,83965	115,6719
2	0.07	0.03	16,80541	-0,42375	12,71158	30,47234	107,6548	39,60927	110,3401
2	0.07	0.03	19,87637	3,2724	17,0575	45,42394	137,712	49,59319	140,6046
2	0.07	0.03	18,63612	2,4267	16,29614	37,87363	122,3314	41,03139	124,4788
2	0.07	0.03	21,72705	7,05488	17,99207	47,98515	155,5556	47,14252	157,2676

Ensaio	DADOS DE ENTRADA								
	Ft	Tmax	Fres	Fr	Ft	Fr max	Ft max	Var. Fr	Var. Ft
3	0.07	0.03	18,30548	6,13008	13,50352	38,74586	121,7973	39,83758	123,4219
3	0.07	0.03	22,78214	6,23425	17,07897	43,31291	146,2708	54,0064	147,7551
3	0.07	0.03	21,87893	6,66103	14,15127	45,27838	154,7515	55,13032	160,8781
3	0.07	0.03	22,92046	8,42034	12,56214	52,92971	143,2643	52,80366	150,2857
3	0.07	0.03	30,32567	7,93285	19,74287	56,65808	141,9144	56,82425	152,3686
3	0.07	0.03	20,85043	3,79345	9,99394	49,0767	131,6483	55,42981	139,6898
3	0.07	0.03	19,17711	1,45207	9,74908	45,98593	130,3542	52,79994	138,0108
3	0.07	0.03	23,6515	3,16445	20,40804	52,0784	159,1258	57,55197	162,2651
3	0.07	0.03	23,00734	3,20643	19,32429	46,90692	144,9354	52,46744	146,9083
3	0.07	0.03	20,54351	2,56162	17,01929	46,41144	145,8414	52,82276	147,4769

Ensaio	DADOS DE ENTRADA								
	Ft	Tmax	Fres	Fr	Ft	Fr max	Ft max	Var. Fr	Var. Ft
4	0.14	0.10	28,88398	8,31213	22,44863	54,88443	218,7536	57,38868	222,2727
4	0.14	0.10	31,35396	8,70649	23,41857	59,60074	250,7199	68,82369	255,9478

4	0.14	0.10	33,08165	8,92042	24,03065	63,15318	264,9775	76,14015	272,3655
4	0.14	0.10	37,81614	8,26957	23,61295	72,86124	292,402	74,91273	311,1443
4	0.14	0.10	30,02563	0,16527	19,5538	53,34581	246,4008	62,67203	258,348
4	0.14	0.10	27,31966	0,30111	22,2809	55,53185	246,2925	73,27328	251,3059
4	0.14	0.10	32,33303	2,60041	27,7851	61,26275	273,5296	68,88916	281,8269
4	0.14	0.10	34,0998	4,86796	30,4147	58,08031	265,6281	64,62424	270,4853
4	0.14	0.10	34,92448	6,26691	31,0757	61,47986	280,8159	67,08374	285,6868
4	0.14	0.10	35,87367	6,36489	31,1115	57,76316	275,4674	76,21899	279,9879

Ensaio	DADOS DE ENTRADA								
	Ft	Tmax	Fres	Fr	Ft	Fr max	Ft max	Var. Fr	Var. Ft
5	0.28	0.20	43,05874	7,68018	37,1575	81,13728	367,5438	87,02214	374,0302
5	0.28	0.21	56,64216	8,10313	45,17919	95,4568	443,7829	128,7006	461,6547
5	0.28	0.22	54,76843	8,96892	42,68513	92,58138	449,0308	106,1857	470,1047
5	0.28	0.23	55,56693	7,92662	41,66684	89,95189	437,599	97,78951	460,6733
5	0.28	0.24	44,94914	2,99788	34,53219	78,81318	397,2043	91,76594	413,5301
5	0.28	0.25	43,17572	1,30901	34,4642	72,47759	361,3148	93,47656	371,6375
5	0.28	0.26	43,09381	2,39811	35,95616	68,31234	365,6771	75,54764	379,6806
5	0.28	0.27	49,70005	4,80387	44,12066	73,50046	421,7691	85,80407	431,4559
5	0.28	0.28	49,29895	5,1515	44,03862	70,35064	429,0324	81,95275	437,8916
5	0.28	0.29	49,09398	4,78366	44,38418	70,88703	407,9303	93,10425	419,0734

Ensaio	DADOS DE ENTRADA								
	Ft	Tmax	Fres	Fr	Ft	Fr max	Ft max	Var. Fr	Var. Ft
6	0.21	0.15	47,1358	8,31205	39,85952	77,89076	378,7059	95,96018	389,7239
6	0.21	0.15	42,54364	8,55425	32,58648	78,20591	351,1755	99,98664	361,5204
6	0.21	0.15	44,44422	7,9185	30,7224	76,70082	349,5779	91,57765	368,3371
6	0.21	0.15	46,53883	7,78458	32,72785	77,73846	357,3143	86,45481	377,8835
6	0.21	0.15	53,5787	7,71819	38,4337	76,78503	353,3558	85,95276	369,9355
6	0.21	0.15	40,55074	2,27657	30,46617	72,07542	307,6073	94,28416	319,6394
6	0.21	0.15	37,49783	1,52663	29,30108	73,61439	274,0496	95,53451	282,2537
6	0.21	0.15	37,20016	1,199	29,60513	67,02808	308,0545	81,44871	320,1105
6	0.21	0.15	46,69817	4,83212	40,23018	78,93041	364,3941	88,60884	376,0365
6	0.21	0.15	52,71114	4,42027	47,17158	75,64769	402,0447	105,4882	412,839

Ensaio	DADOS DE ENTRADA								
	Ft	Tmax	Fres	Fr	Ft	Fr max	Ft max	Var. Fr	Var. Ft
7	0,34	0.25	50,33249	8,01833	42,60429	84,76628	362,3955	103,6954	368,356
7	0,34	0.25	58,3328	11,13303	46,45348	114,0289	451,0882	134,1729	465,4352
7	0,34	0.25	64,05063	14,08909	48,07712	133,5452	499,0086	139,6233	526,0201
7	0,34	0.25	64,94053	12,23852	48,86977	131,3186	498,0736	143,5942	524,3305
7	0,34	0.25	57,45629	6,12672	44,33857	113,2088	497,3028	126,5104	513,6438
7	0,34	0.25	50,97142	4,58915	41,71795	103,969	443,2779	124,8149	455,3503
7	0,34	0.25	58,557	6,22544	50,53403	104,5319	468,3876	112,2245	485,8141
7	0,34	0.25	60,02402	7,36428	53,25685	103,6756	482,3311	118,0551	495,9035
7	0,34	0.25	63,71154	8,13746	57,3167	107,7673	516,2848	124,0418	529,6533

7	0,34	0.25	63,92388	6,68308	58,57368	98,61667	502,9632	133,6934	515,0466

Ensaio	DADOS DE ENTRADA								
	Ft	Tmax	Fres	Fr	Ft	Fr max	Ft max	Var. Fr	Var. Ft
8	0.21	0.15	61.11078	18.92499	-42.29658	299.92079	-1.86157	327.79597	312.38929
8	0.21	0.15	57.32952	12.69824	-35.04053	265.82136	12.52883	292.77328	310.36226
8	0.21	0.15	59.62254	17.03726	-30.05183	255.26828	21.45938	276.53591	306.5812
8	0.21	0.15	49.12198	17.4614	-16.91716	236.9296	21.19474	252.33576	272.57252
8	0.21	0.15	55.2032	34.60652	-16.87782	247.42064	21.67229	252.79075	240.64895
8	0.21	0.15	47.29164	35.03337	-16.68085	255.75515	15.23687	256.9246	215.46965
8	0.21	0.15	50.83908	38.35676	-23.94417	275.80912	13.14313	272.34108	246.95519
8	0.21	0.15	63.80703	45.64103	-39.026	282.32203	8.21951	280.43175	244.23888
8	0.21	0.15	56.49827	38.36709	-37.52809	328.63563	-2.58003	329.28893	258.59809
8	0.21	0.15	79.69278	49.68125	-50.96099	374.544	-4.72242	387.68359	231.00138

APÊNDICE C – ARTIGO COBEF 2013

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 FORCAS DE FRESAMENTO DE ROSCAS API

Resumo: *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, 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. De acordo com ERTUNC (2004), o processo de furação representa quase 40% de todo procedimento de remoção de material na indústria 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, é 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.

Os principais aspectos que devem ser observados ao planejar e solucionar problemas em rosqueamento são: a definição da tecnologia mais adequada de rosqueamento, o tipo de ferramenta e, finalmente, os parâmetros de corte para a operação. Para definir a tecnologia de rosqueamento 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 correta escolha entre as possibilidades de usinagem ou mesmo conformação da rosca. No processo de fabricação de roscas pode-se trabalhar com remoção de cavaco (roscas usinadas) ou sem remoção de cavaco (roscas laminadas).

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. Embora seja um processo de rosqueamento vantajoso, poucos estudos foram feitos a cerca do

fresamento de roscas. 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 rosca 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 a utilizada como referencia para a fabricação dos experimentos deste trabalho. As normas para fabricação de roscas API tem diferenciação em relação ao diâmetro nominal da rosca, a inclinação do filete de rosca e ao passo da rosca. Para fabricar esta geometria de rosca é usual a utilização do torno mecânico. Um novo método de fabricação pode ser obtido através do fresamento de rosca.

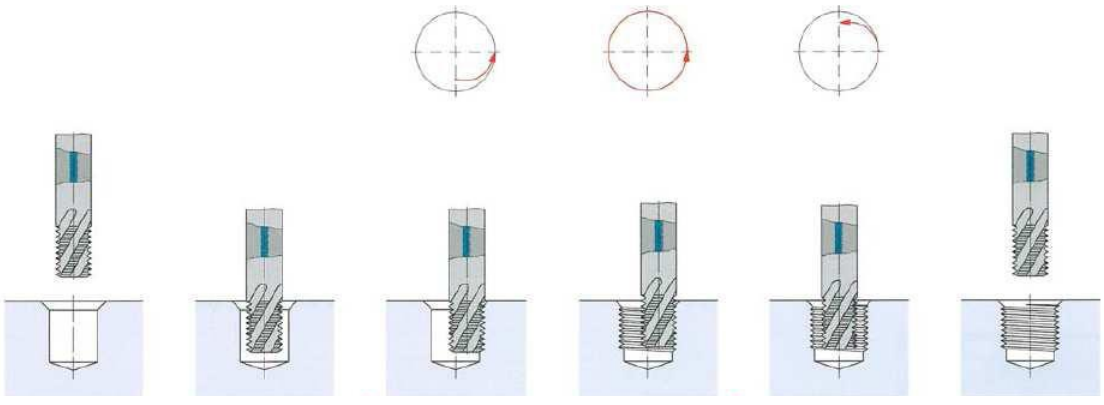
Muitas pesquisas têm sido desenvolvidas para a fabricação de rosca através do fresamento de rosca. O estudo das forças de corte no fresamento de roscas iniciou com o modelo mecanicista proposto em ARAUJO *et al.* (2004). Neste estudo foram analisados processos de usinagem realizados com fresa de rosca 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 consequentemente, aumentar o desempenho do processo. Um modelo utilizando a espessura do cavaco foi desenvolvido para diferentes profundidades de corte radial ao longo dos vários pontos da aresta de corte da ferramenta, e a influência da excentricidade da ferramenta. A ferramenta é considerada como uma fresa de topo com arestas de corte com perfil de rosca. O modelo de força de corte foi desenvolvido utilizando o modelo mecanicista.

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 especifica 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 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 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.



(1) (2) (3) (4) (5) (6)

© Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas 2013

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, 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 peca: 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 à 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 (*di*) e externos (*de*) e o número de navalhas (N_f) definem a geometria da ferramenta conforme Figura 2.a. A velocidade de corte e a espessura do cavaco variam com o diâmetro da ferramenta di≤d(z)≤de em diferentes posições da aresta de corte. A ferramenta utilizada neste trabalho apresenta somente uma aresta de corte conforme a Figura 5.b.



(a) Geometria da Fresa (b) Velocidade de Avanço nos pontos C e E

Figura 2 – Geometria da Ferramenta e Velocidade de Avanço

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 ferreamente (*n*), de forma idêntica ao fresamento de topo, conforme Eq. 1.

$$V_f = f_t \,.\, z \,.\, n \tag{1}$$

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. 5, onde p_θ é o passo angular da rosca e rtt 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).

$$F_c = K_s \,.\, S \tag{2}$$

© Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas 2013

A área da secção de corte (S) é dada, em aproximação, pelo produto da profundidade de corte (h) com a área do cavaco (t_c) conforme Eq. 3.

$$S = h \,.\, t_c \tag{3}$$

O modelo mecanística é uma combinação de técnicas analíticas e 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 (ft_{XY}) e da posição de cada ponto da ferramenta. O valor máximo da espessura do cavaco (tc_{Max}) é calculado em função do diâmetro externo (D_t) e a espessura de corte radial (r_{doc}), calculada pela expressão da Eq. 4.

$$t_{c_{max}} = 2f_{t_{xy}}\sqrt{\frac{r_{doc}}{D_t}\left(1 - \frac{r_{doc}}{D_t}\right)} \tag{4}$$

Onde r_{doc} é a espessura de corte radial e pode ser escrita pela Eq. 5, em função do diâmetro nominal da rosca (D), do passo (P) e do diâmetro externo (D_t)....

$$r_{doc} = \frac{P(80.\sqrt{3}D - 75.P)}{256(D - D_t)} \tag{5}$$

E ftxy 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. (6).

$$f_{t_{xy}} = \frac{f_t}{\sqrt{\left(\frac{p_\theta}{r_{tt}}\right)^2 + 1}} \tag{6}$$

3.1 REFERENCIAIS 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 Figura 3.

a) Referencial da mesa

O referencial da mesa é dado por R0. O referencial R0 é fixo no centro do furo da peça.

b) 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 angulo θ_1, que relaciona a posição X e Y do centro da ferramenta em relação ao centro do furo.

c) 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.

© Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas 2013

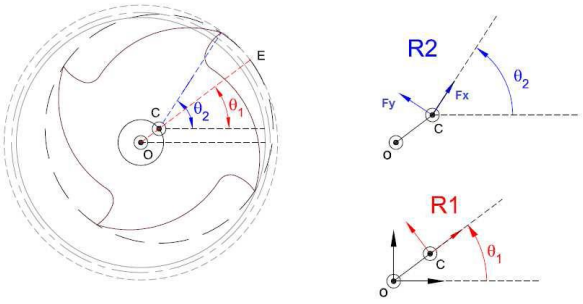


Figura 3 – Os referenciais e suas relações.

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 referenciail R1 (F_{RAD} e F_{TAN}) são calculadas em função das equações (9) e (10).

$$F_{X0} = F_{X2}.\cos(2\pi - \theta_2) - F_{Y2}.\sin(2\pi - \theta_2) \quad (7)$$
$$F_{Y0} = F_{X2}.\sin(2\pi - \theta_2) + F_{Y2}.\cos(2\pi - \theta_2) \quad (8)$$
$$F_{X1} = F_{RAD} = F_{X0}.\cos(-\theta_1) - F_{Y0}.\sin(-\theta_1) \quad (9)$$
$$F_{Y1} = F_{TAN} = F_{X0}.\cos(-\theta_1) - F_{Y0}.\sin(2\pi - \theta_1) \quad (10)$$

Os três referenciais incluem a direção Z e, portanto a componente F_Z é coincidente.

A força resultante pode ser calculada através da Eq. (11).

$$Fr = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (11)$$

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 (Fig. 4a). O corpo de prova foi fixado na mesa da máquina, através de um gabarito conforme Figura 5c. O gabarito foi montado sobre um dinamômetro preso à base da máquina CNC (Fig. 4c). Com a finalidade de garantir uma boa centralização da ferramenta, foi confeccionado um centralizador (Fig. 4c).

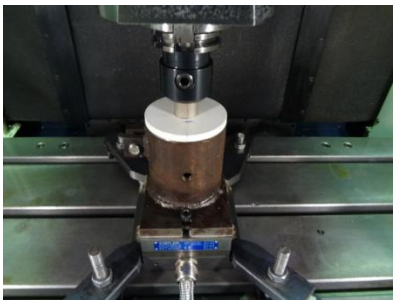


(a) Máquina CNC



(b) Ferramenta de rosca

© Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas 2013



(c) Gabarito com centralizador



(d) Placa de Conversão A/D

Figura 4 – 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 (Figura 5), 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 7º 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 5 - 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 e 90 mm de altura. Furo interno com diâmetro maior de 66 mm e ângulo de 7º em relação ao eixo normal. A ferramenta utilizada para realizar o fresamento de roscas foi um suporte de rosqueamento interno para torno mecânico. A ferramenta tem uma arestas de corte para realizar o perfil da rosca API de 2 3/8" REG com uma entrada. Com o auxilio 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 incerto.

4.3 Planejamento do Experimento

Foram realizados cinco experimentos com diferentes tc_{max}: 0,03 mm (indicado pelo fabricante); 0,10 mm, 0,15 mm, 0,20 mm e 0,25 mm, como mostra a Tab.1. A velocidade de corte foi mantida constante em 250 m/min, rotação constante de 2557 RPM e variação do avanço por dente (f_t). O avanço por dente foi calculado em função do cavaco máximo (tc_{max}). Na tabela 1 podem-se observar os parâmetros que foram utilizados em cada experimento, com duas réplicas cada um (exceto o exp.1 que foram realizadas mais réplicas).

© Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas 2013

TABELA 1 - Parâmetros de corte dos experimentos finais da dissertação

Experimento	Velocidade de Rotação (RPM)	tc_{max}	Avanço por Dente (ft) (mm/dente)	Vc (m.min)
1	2557	0,03	0,07	250
2	2557	0,10	0,14	250
3	2557	0,15	0,21	250
4	2557	0,20	0,28	250
5	2557	0,25	0,34	250

4.4. Aquisição de Forças Experimentais

Um dinamômetro Kistler Modelo 9257BA foi utilizado para coletar os sinais das 3 componentes de força de usinagem. O sinal elétrico do dinamômetro foi amplificado em um amplificador de sinais e o sinal foi transformado na placa analógica-digital (Figura 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. 4d) e enviados ao computador para armazenamento.

4.5. Tratamento de Dados Experimentais

A partir dos sinais do dinamômetro foram aquisitadas as forças experimentais Fx, Fy e Fz no referencial R0, em relação à mesa (Figura 6). Uma parte do gráfico é ampliada e é selecionado um intervalo onde há uma onda de força (Figura 7). 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 equação 9, a força Tangencial foi calculada utilizando a equação 10 e a Força Resultante foi calculada utilizado a equação 11. 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.

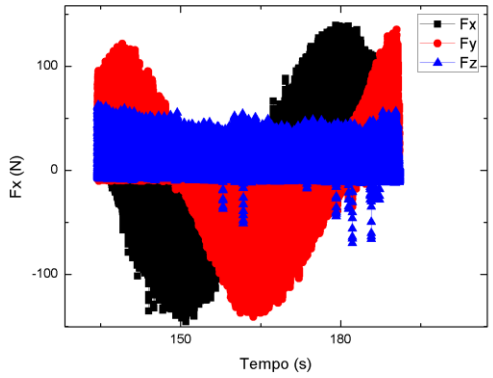


Figura 6 – Forças Fx, Fy e Fz no experimento1

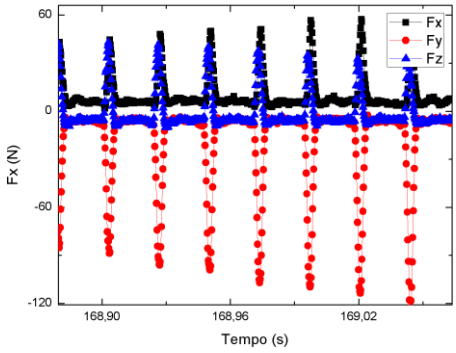
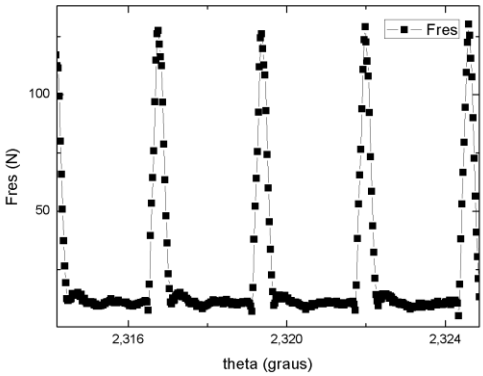


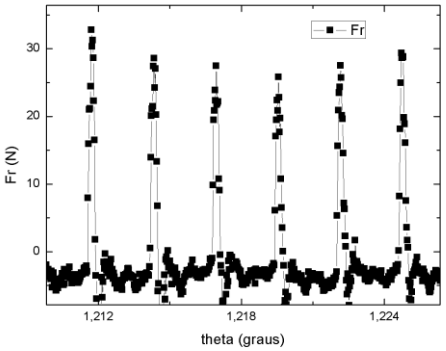
Figura 7 – Intervalo das Forças Fx, Fy e Fz

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 8 mostra os resultados no experimento 1 como exemplo.

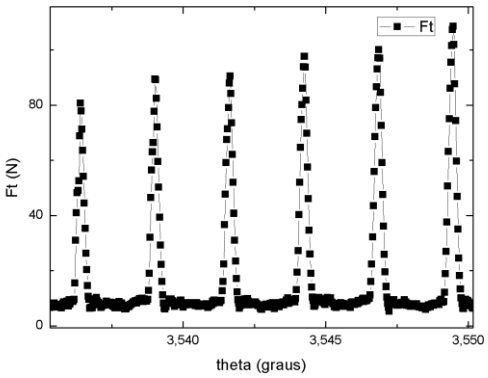
© Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas 2013



(a) Força Resultante



(b) Força Radial do Referencial R1



(c) Força Tangencial do Referencial R1

Figura 8 – Forças Experimentais do experimento 1 em uma rotação

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

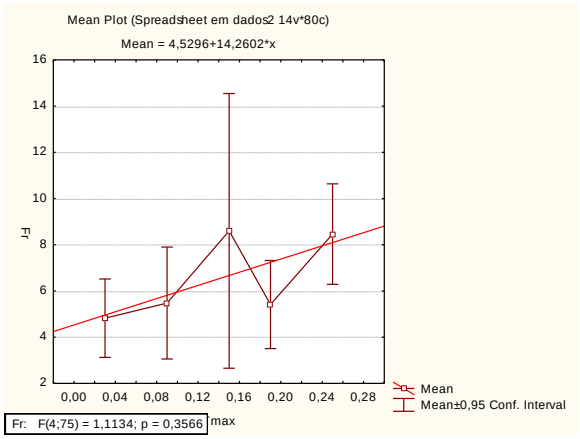
O tratamento dos sinais foi realizado utilizando ferramentas estatísticas a partir de uma tabela consolidada de todos os resultados dos testes descritos. A cada teste foram selecionados dez intervalos de uma rotação em diferentes posições da ferramenta. As mesmas 10 posições foram utilizadas para todos 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 resultante. A força radial no referencial R1 será chamada de força radial na ferramenta, para diferenciar da força radial no referencial de rotação da ferramenta R2. Da mesma forma, a força tangencial em R2 será chamada de força tangencial, pois acompanha a direção da parede do corpo de prova.

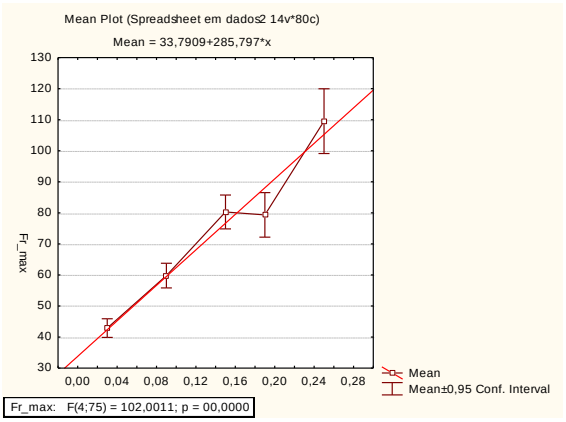
A localização dos dez intervalos de tempo foram realizadas através da posição Θ_1 da ferramenta durante o percurso da trajetória (Fig.7). As seguintes posições foram utilizadas: 13^o, 42^o, 77^o, 104^o, 170^o, 211^o, 230^o, 253^o, 294^o e 333^o.

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. 9.

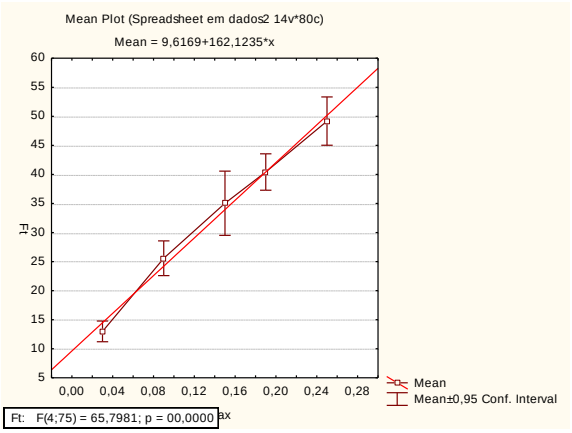
© Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas 2013



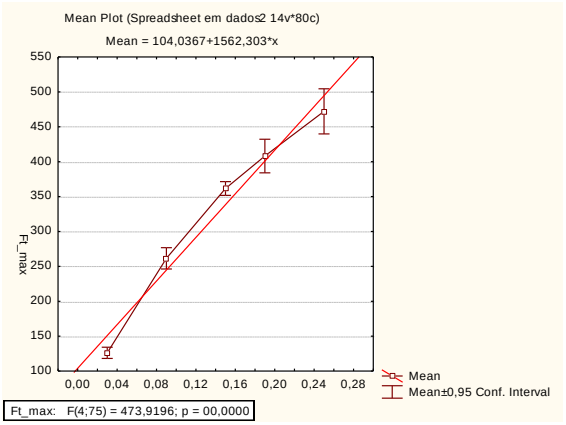
(a) Efeito da Espessura do Cavaco na Força radial Média



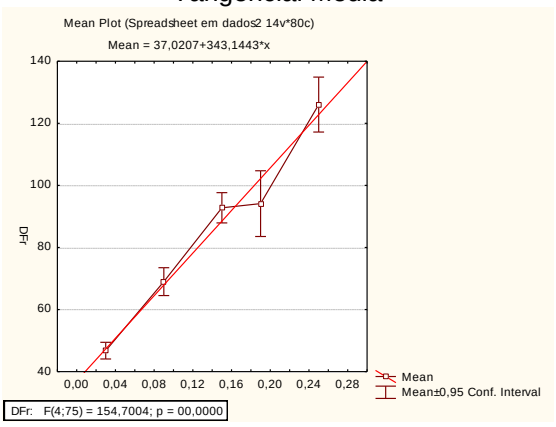
(b) Efeito da Espessura do Cavaco na Força radial Máxima



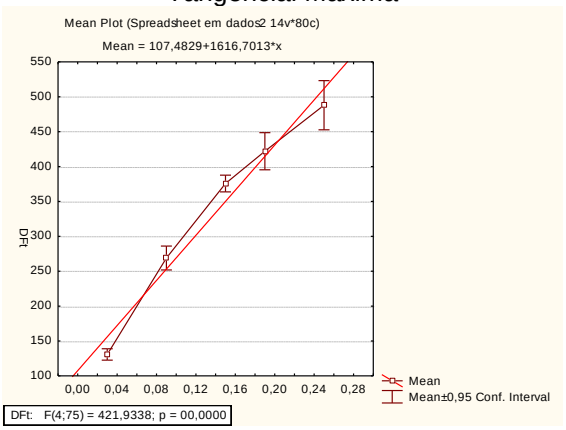
(c) Efeito da Espessura do Cavaco na Força Tangencial Média



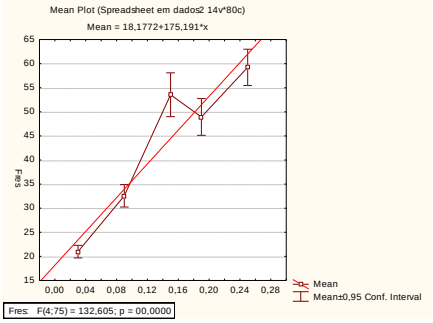
(d) Efeito da Espessura do Cavaco na Força Tangencial Máxima



(e) Efeito da Espessura do Cavaco na Força radial Pico-a-Pico



(f) Efeito da Espessura do Cavaco na Força Tangencial Pico-a-Pico



(g) Efeito da Espessura do Cavaco na Força Resultante Média

Figura 9 – Efeito da Espessura do Cavaco em Cada Componente das Forças

© Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas 2013

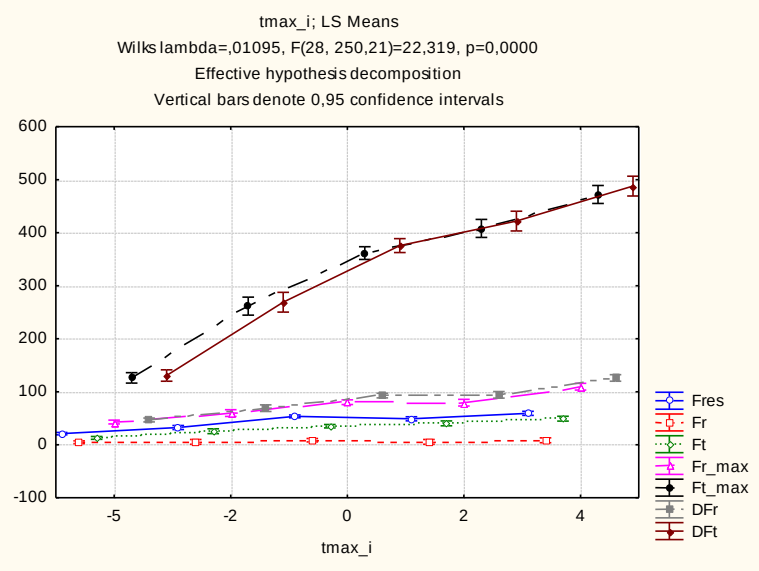


Figura 10 – Efeito da Espessura do Cavaco nas Componentes das Forças

A Figura 9 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 analise, não houve variação nos valores médios um vez que a probabilidade p=0,356 (Figura 9a). A força radial máxima durante a usinagem apresenta variação linear com a variação da espessura do cavaco, e consequentemente do avanço (Fig. 9b). Os resultados desta Figura com tc_{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 (Figura 9c), 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 tc_{max}= 0,03 e 0,15 mm, conforme Fig. 9d, o que acontece na força tangencial pico-a-pico apresentada na Fig. 9f. Na variação pico-a-pico da força radial, houve apenas uma pequena variação para tc_{max}=0,20 mm (Fig. 9e). Analisando a Figura 9g, pode-se afirmar que houve uma discrepância na força resultante média para um valor de tc_{max} de 0,15 mm.

A Figura 10 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 Fr e Ft.

5. CONCLUSÕES

Neste artigo são apresentados resultados experimentais de uma ferramenta de desbaste interno para torno, 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 máxima do cavaco. Após a análise estatística realizada das forças de flexão, tangencial e resultante é possível concluir que, na força radial não houve variação significativa. Um estudo posterior deve ser realizado para verificar se há influencia da vibração proveniente da variação da força radial. A força tangencial e a força resultante 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 tc_{max} de 0,20 mm apresentou imperfeições visuais no acabamento superficial. Os outros corpos de prova apresentaram bom acabamento superficial, o que indica que todas os avanços utilizados poderiam ser aplicados.

6. AGRADECIMENTOS

© Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas 2013

7. BIBLIOGRAFIA

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.
Ertunc, H.M; Oysu C (2004) "*Drill wear monitoring using cutting force signals". Mechatronics* 14:533–548 doi:10.1016/j. mechatronics.2003.10.005
Kline, W.A., 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.
Stephenson, D. A.; 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.

© Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas 2013

ANEXO 1 – INFORMAÇÃO TÉCNICA DO DINAMÔMETRO

3-Component Dynamometer F_x, F_y, F_z, Type 9257BA

KISTLER
measure. analyze. innovate.

Technical Data

Dynamometer Type 9257BA

Range 1	F_x, F_y	kN	–0,5 ... 0,5
	F_z	kN	–1 ... 1
Range 2	F_x, F_y	kN	–1 ... 1
	F_z	kN	–2 ... 2
Range 3	F_x, F_y	kN	–2 ... 2
	F_z	kN	–5 ... 5
Range 4	F_x, F_y	kN	–5 ... 5 [1]
F_z for F_x and F_y ≤0,5 F_z	F_z	kN	–5 ... 10 [2]
Overload	F_x, F_y, F_z	kN	–7,5/7,5
F_z for F_x and F_y ≤0,5 F_z	F_z	kN	–7,5/15
Threshold		N	<0,01
Sensitivity	F_x, F_y	mV/N	10,0
Range 1	F_z	mV/N	5,00
Linearity, all ranges		% FSO	≤±1
Hysteresis, all ranges		% FSO	≤0,5
Cross talk		%	≤±3
Rigidity	c_x, c_y	kN/µm	>1
	c_z	kN/µm	>2
Natural frequency	f_n (x,y)	kHz	≈2,0
(mounted on flanges)	f_n (z)	kHz	≈3,5
Operating temperature range		°C	0 ... 60
Drift (charge amplifier)	F_x, F_y	N/s	≤±0,005
at 25 °C	F_z	N/s	≤±0,01
Ground isolation		MΩ	>100
Connecting cable (integral)	I	m	5
Degree of protection			IP 67
Weight		kg	7,4

[1] Application of force inside and max. 25 mm above top plate area.
[2] Range for turning, application of force at point A.

Control Unit Type 5233A1

Number of channels		3
Number of ranges per channel		4
Output signal	V	±5
Cut-off frequency of the built-in filter	Hz	200
Output connector		3xBNC neg. 37 pin D-Sub
Operating temperature range	°C	0 ... 60
Power supply	V/AC	230/115
(switchable)	%	+15/-22
Power consumption	VA	<23
Dimensions	mm	170x126x55
Weight	kg	1,52