



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

Departamento de Engenharia Mecânica

DEM/POLI/UFRJ



MODELAGEM DA ÁREA DE CORTE NO FRESAMENTO DE ROSCA CÔNICA API

Lucas Andrade Santos

PROJETO FINAL SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO MECÂNICO.

Aprovado por:

Prof. Anna Carla Monteiro de Araujo

Prof. José Luis Lopes da Silveira

Prof. Sylvio José Ribeiro de Oliveira

Eng. Francirlei Grippa Cardoso

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2013

Resumo

A fabricação de roscas com o uso de fresas vem crescendo muito atualmente, visto que, esta apresenta uma boa relação entre tempo de usinagem e qualidade obtida. Por outro lado não existem muitos estudos na literatura sobre o assunto, o que dificulta a tomada de decisões no momento da criação das ferramentas e dos parâmetros de corte. O presente trabalho tem como objetivo modelar a área de corte e a espessura do cavaco formado em um fresamento de rosca cônica com perfil API, a partir do uso de uma ferramenta de torno. A metodologia adotada utilizou um software 3D de CAD, que permitiu o cálculo do perfil da espessura do cavaco. O modelo utilizado traça a trajetória do ponto mais externo dessa ferramenta, onde são plotados todos os pontos da aresta de corte e então o sólido é gerado. A diferença entre o sólido gerado entre duas rotações da fresa em torno do seu próprio eixo é a distribuição dessa espessura ao longo da aresta. O modelo poderá ser adotado para diversos tipos diferentes de ferramentas de fresamento.

Agradecimentos

A Professora Anna Carla Monteiro de Araujo pelo tempo e orientação dedicados, e sobretudo por me ajudar no momento que mais precisei.

Aos demais Professores e colegas do curso de Engenharia Mecânica da UFRJ pelos ensinamentos e experiências que pude passar.

Aos colegas do curso de Engenharia Mecânica da UFRJ pelos bons momentos durante essa parte tão importante da minha vida.

Aos meus pais Elson Luiz da Silva Santos e Lucimar Barrozo de Andrade, que desde sempre me proporcionaram toda a educação e ensinamentos necessários para poder estar aqui hoje, sempre me apoiando em todos os momentos. Obrigado pais.

A minha irmã Julia Andrade Santos pela amizade, compreensão e carinho que sempre teve por mim.

A minha namorada Fernanda Malamace de Azevedo Pinheiro que nos momentos mais difíceis dessa jornada esteve ao meu lado, sempre me escutando e me dando forças.

Sem vocês nada disso seria possível. Todos vocês são muito importantes para mim.

Muito obrigado.

Índice

Índice de Figuras	vi
1. Introdução.....	1
2. Revisão Bibliográfica	2
2.1. Classificação dos Processos de Usinagem	2
2.2. Geometria de Rosca	3
2.3. Fabricação de Roscas.....	5
2.4. Geometria da Ferramenta de Rosqueamento	11
2.5. Força de Corte no Fresamento de Rosca.....	11
3. Metodologia para o Cálculo da Área de Corte na Rosca API.....	13
3.1. Geometria da Ferramenta	15
3.2. Parâmetros de Corte	16
3.3. Definição da Equação Básica do Movimento	17
3.3.1. Fresamento Linear sem Movimento Vertical.....	17
3.3.2. Fresamento Circular sem Movimento Vertical.....	19
3.3.3. Fresamento Circular com Movimento Vertical.....	21
3.3.4. Fresamento Circular com Raio variável com movimento vertical	23
3.4. Modelagem da Espessura de Cavaco Indeformado	27
3.4.1. Fresamento Realizado em Trajetória Linear com Inserto Simplificado sem Movimento Vertical.	28
3.4.2. Fresamento Realizado em Trajetória Circular com Inserto Simplificado sem Movimento Vertical.	31
3.4.3. Fresamento Realizado em Trajetória Circular com Inserto Simplificado com Movimento Vertical	33
3.4.4. Fresamento Realizado Em Trajetória Circular com Redução de Raio com Inserto Simplificado com Movimento Vertical.....	36
3.4.5. Fresamento Realizado em Trajetória Circular com Redução de Raio com Inserto Real com Movimento Vertical.....	39
3.5. Comparação dos Resultados	40
5. Conclusão.....	42

Referencias Bibliográficas 44

Índice de Figuras

Figura 1: Operação de corte tridimensional (FERRARESI, 1970)	3
Figura 2: Representação dos parâmetros básicos de uma rosca (NOGUEIRA E SILVA, 2007)	4
Figura 3: Roscas API (SANDVIK, 2013)	5
Figura 4: Comparativo entre roscas usinadas e conformadas quanto as fibras (Adaptado de NOGUEIRA E SILVA, 2007).	6
Figura 5: Diferentes processos e ferramentas de rosqueamento (Souza, 2010)	6
Figura 6: Ferramentas de fresamento de roscas: (a) ferramenta de aresta única; (b) ferramenta de múltipla aresta de único corte e (c) ferramenta de múltipla aresta de vários cortes (ARAUJO, 2004)	8
Figura 7: Movimento básico em um fresamento (EZCAM, 2006)	9
Figura 8: Tipos de aproximação: A: Direta; B: um quarto de círculo; C: meia volta de círculo (GRIPA, 2012)	10
Figura 9: Espessura do cavaco indeformado (ARAUJO <i>et al.</i> , 2004).	12
Figura 10: Passos do experimento para cada etapa.	13
Figura 11: Ferramenta (SANDVIK, 2013)	15
Figura 12: Parâmetros da ferramenta.	16
Figura 13: Hastes de perfuração com roscas API com tabela de dimensões (Adaptada de OILFIELDTRASH, 2013)	17
Figura 14: Trajetória básica de um fresamento linear no plano	18
Figura 15: Representação da trajetória básica do fresamento circular no plano	20
Figura 16: Trajetória básica do fresamento cilíndrico	22
Figura 17: Representação da equação básica paramétrica do fresamento cônico e sua trajetória	24
Figura 18: Representação do cone formado pelo ponto mais externo da cunha de corte	25
Figura 19: Desenho do perfil das cunhas de corte no programa SolidWorks: (A) Perfil tipos de fresamento triangular teórico (B) Perfil real	27
Figura 20: Tipos de fresamentos modelados	28
Figura 21: Representação básica da formação do cavaco indeformado para fresamento linear.	29
Figura 22: Distribuição da espessura para o fresamento linear no plano e padrão geral da área de corte mostrada em preto.	29
Figura 23: Corte horizontal para o fresamento linear no plano	30
Figura 24: Corte vertical em $X=0$ para o fresamento linear no plano	30

Figura 25: Zoom do corte vertical com $X=0$ e maior espessura para o fresamento linear no plano.....	30
Figura 26: Distribuição da espessura para o fresamento circular no plano e padrão geral da área de corte mostrada em preto.	31
Figura 27: Corte horizontal o fresamento circular no plano	32
Figura 28: Representação do corte vertical em relação ao plano XY em um ângulo qualquer e distribuição da espessura o fresamento circular no plano	32
Figura 29: Representação básica da formação do cavaco indeformado para fresamento em um cilindro.....	33
Figura 30: Distribuição da espessura para o fresamento cilíndrico e corte com área de corte básica.	34
Figura 31: Zoom na maior espessura atingida para o fresamento cilíndrico.....	34
Figura 32: Representação do corte vertical em relação ao plano XY em um ângulo qualquer e distribuição da espessura para o fresamento cilíndrico	35
Figura 33: Corte seguindo o eixo de simetria do inserto para o fresamento cilíndrico.	35
Figura 34: Representação básica da formação do cavaco indeformado para fresamento em um cone.	36
Figura 35: Distribuição da espessura para o fresamento cônico com área básica da seção de corte.	37
Figura 36: Vista superior do corte realizado para o fresamento cônico	37
Figura 37: Representação do corte vertical no plano XY, em um ângulo qualquer e distribuição da espessura para o fresamento cônico	38
Figura 38: Corte seguindo o eixo de simetria do inserto para o fresamento cônico.....	38
Figura 39: Distribuição da espessura para o fresamento cônico com o perfil real da ferramenta	39
Figura 40: Representação do corte vertical no plano XY, em um ângulo qualquer e distribuição da espessura para o fresamento cônico com a aresta real	40

1. Introdução

Os processos de usinagem vêm evoluindo com grande velocidade nos últimos anos, se tornando um fator estratégico para a sobrevivência de qualquer indústria em um mundo tão globalizado. Isso se deve principalmente a necessidade de formas e perfis mais complexos e tolerâncias cada vez menores.

Dentre todos os processos usados atualmente, o rosqueamento é, se não o mais complexo, um dos mais complexos dentre os processos de usinagem existentes. Sua dificuldade vem principalmente do fato de que uma rosca apresenta medidas conectadas: diâmetro maior, diâmetro menor, passo da rosca e ângulo de hélice da rosca (STOETERAU, 2007). Apesar de ultimamente o fresamento ser o processo de fabricação que mais vem sendo usado para a produção de roscas (SANDVIK, 2012), não existem muitos estudos direcionados especificamente para esse assunto. Com a ideia de suprir essa falta de conteúdo teórico sobre o assunto esse trabalho tem como objetivo modelar a espessura do cavaco formado em um fresamento de roscas cônicas com perfil API, a partir do uso de uma ferramenta de torno.

No capítulo dois é realizada uma revisão bibliográfica de itens que são importantes para o completo entendimento do trabalho. No terceiro capítulo é apresentada a metodologia e os materiais usados para o desenvolvimento do modelo proposto, além da apresentação e análise dos resultados obtidos. Finalmente no capítulo 4 são mostradas as conclusões e impressões relacionadas às premissas propostas.

2. Revisão Bibliográfica

A usinagem é o ato de retirar uma porção do material, conhecida como cavaco, de uma matéria bruta. Esse cavaco retirado apresenta formato que varia de acordo com parâmetros de corte, ferramentas e materiais usados. A usinagem possui diversos fatores que podem e influenciam o resultado requerido. Isso se deve principalmente as infinitas combinações de parâmetros de entradas que o processo possui: material da ferramenta, material da peça, geometria da ferramenta, parâmetros de corte e o maquinário usado, o que os tornam difíceis de definir. Por outro lado, uma vez definido, o processo se torna previsível e fácil de ser repetido, não precisando de qualquer intervenção externa. Sendo assim, para o êxito desse processo é necessário obter o máximo de informações disponíveis, que geralmente possuem três fontes: o histórico de acertos e erros cometidos no passado, os resultados obtidos na realização de testes e os estudos teóricos (CIMM, 2013).

2.1. Classificação dos Processos de Usinagem

Os processos de usinagem podem ter diversos tipos de classificação, mas basicamente são divididos em dois grupos com algumas divisões (SOUZA, 2011):

1. Processos convencionais: a retirada do material é efetuada usando o contato físico entre ferramenta e peça (energia mecânica), pelo cisalhamento desta última. São divididos pelos tipos de geometria das ferramentas:
 - 1.1. Ferramentas de geometria definida, ou seja, arestas de corte com geometria e tamanhos conhecidos: tornear, fresar, furar, rosquear, alargar, brochar;
 - 1.2. Ferramentas de geometria não definida, ou seja, partículas abrasivas de formatos aleatórios com arestas de cortes pequenas e variáveis: retificar, brunir, lapidar, lixar, polir;
2. Processos não convencionais: usam outras formas de energia para remover o material, além de não gerarem uma marca padrão na superfície usinada da peça e ter taxa de remoção volumétrica muito baixa. Alguns exemplos são o laser (radiação), eletroerosão (química) e plasma (gases quentes).

Independente do tipo de ferramenta e do seu uso, as ferramentas apresentam basicamente arestas de corte, superfícies de saída e folga. As arestas de corte são as arestas responsáveis pela usinagem efetiva da peça. Elas se encontram na junção

entre a superfície de saída e a superfície de folga. São divididas entre principal e secundária. A figura 1 exemplifica uma ferramenta tridimensional com apenas uma única aresta de corte (FERRARESI, 1970).

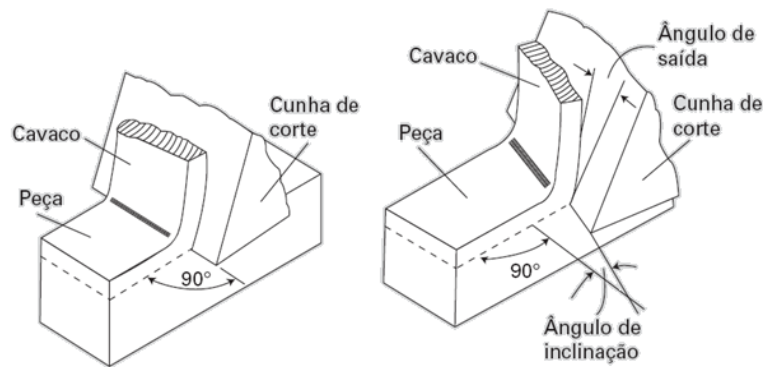


Figura 1: Operação de corte tridimensional (FERRARESI, 1970)

2.2. Geometria de Rosca

Acredita-se que as roscas apareceram pela primeira vez na história com a invenção do parafuso na Grécia antiga, em torno de 400 A.C. pelo matemático pitagórico Arquitas. Ele os usou na criação de equipamentos para a produção de azeite e vinho. Desde então o uso das roscas se tornou um hábito comum, que permite que qualquer equipamento possa ser desmontado para manutenção e remontado logo a seguir, sem grandes perdas de performance, na maioria dos casos. (SANTIAGO, 2013).

Os inventores ao longo do tempo sempre que necessitavam usar uma união roscada acabavam por criar um novo perfil dos dentes, culminando em um número excessivo de perfis, o que causava grandes transtornos quando uma rosca era levada de uma região há outra, o que causava empecilhos a seu uso. A partir do advento da revolução industrial com o aumento da produção e qualidade dos produtos, como citado anteriormente, o uso de conexões roscadas começou a ser realmente relevante.

Para suprir essa crescente demanda os países mais influentes estabeleceram padrões e formas de filetes, com medidas que assegurassem as dimensões e tolerâncias requeridas pelas roscas. Essa atitude tornou possível a produção em grande escala de parafusos e porcas que atendiam aos requisitos, garantindo quase que sua universalidade. (ESSEL, 2013)

O processo de rosqueamento, como o nome diz, consiste no ato de produzir rosca. É um dos processos mais complexos de usinagem, pois para atingir as tolerâncias requeridas pela rosca, pelo menos quatro medidas devem se ajustar entre si: Diâmetro Externo, Diâmetro Interno, Passo, Ângulo de rosca. (NOGUEIRA E SILVA, 2007). A figura 2 mostra essa representação.

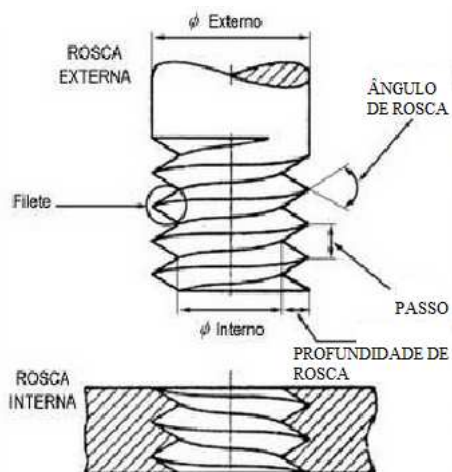


Figura 2: Representação dos parâmetros básicos de uma rosca (NOGUEIRA E SILVA, 2007)

Dependendo da aplicação é escolhido o tipo que mais se adequa as características requeridas. Outro tipo de rosca que possui grande importância é a usada na indústria do petróleo, controlada pela API (American Petroleum Institute), uma agência que controla todas as normas referentes a equipamentos de prospecção de petróleo. Essa rosca é usada em diversos equipamentos, nos quais podemos destacar, principalmente, as hastes de perfuração, sendo cônicas e não cilíndricas, e que terão sua geometria estudada nesse projeto. A API foi criada em 1919 nos Estados Unidos, com a principal missão de normatizar a indústria do petróleo, que durante a primeira grande guerra sofria com a falta de padronização dos equipamentos, o que dificultava o abastecimento de suas tropas. Além disso, visava promover estudos e discussões sobre as melhores práticas encontradas, aumentando a visibilidade e importância do mercado petrolífero (American Petroleum Institute, 2013).

Hoje a American Petroleum Institute possui um grande número de normas, que se aplicam a todo e qualquer equipamento, desde a perfuração do poço, sua completação e consequente retirada dos produtos, e se encontra entre as maiores e mais respeitadas criadoras de normas do mercado, sendo sua licença um requisito

indispensável e obrigatório a qualquer empresa que queira entrar no mercado de petróleo. A figura 3 exemplifica alguns tipos de perfis de roscas API mais utilizados.

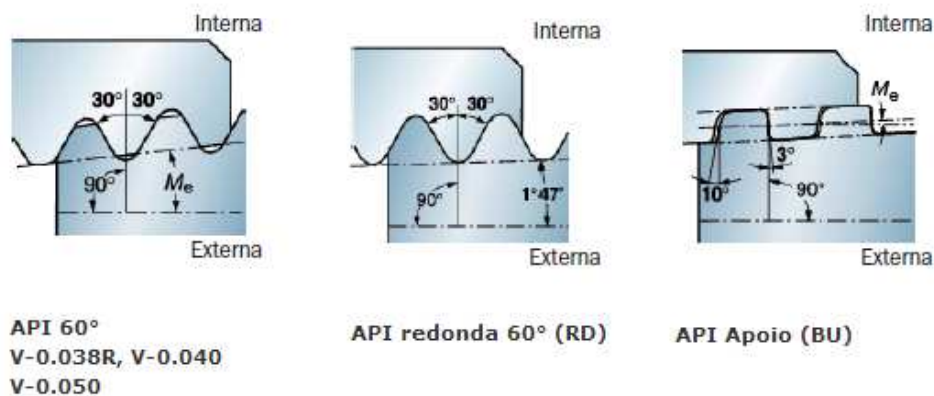


Figura 3: Roscas API (SANDVIK, 2013)

As roscas API usadas em hastes de perfuração seguem as norma 5B e 7 e possuem em geral uma inclinação que podem variar de 4 a 8 graus por polegada, possuindo diâmetro nominal começando em 1 1/4 de polegada.

2.3. Fabricação de Roscas

O rosqueamento de uma peça pode ser executado de várias formas, sendo esta com remoção de material ou apenas pela sua deformação plástica a partir de um processo de conformação mecânica chamada laminação.

A laminação é um processo de fabricação que consiste do contato entre o material da peça e um conjunto de cilindros ou planos. Quando em contato, a peça sofre uma conformação decorrente do movimento relativo entre ela e os planos ou cilindros.

No caso de produção de roscas geralmente é usado um cabeçote laminador, que consiste de um conjunto de rolos, com passo e formato definido, que vão sendo pressionados gradativamente contra o material a ser rosqueado. Quando as dimensões requeridas são atingidas, esses rolos são retraídos e o rosqueamento está terminado. Hoje, esse processo atende os mais variados tipos de rosca do mercado e é altamente adaptado a uma grande gama de máquinas. A laminação preserva as fibras do material, o que concede ao filete alta resistência mecânica, além de preservar o material da ferramenta. Em compensação é um processo que só pode ser

usado para materiais dúcteis, que não necessitam da aplicação de grandes forças para deformar plasticamente e sempre apresentará precisão menor que o de uma usinagem. (DUBBEL, 1979).

A figura 4 mostra a diferença entre uma rosca usinada e uma conformada. É observado que no caso da usinagem, ocorre a quebra das fibras do material, que torna o material mais frágil. Por outro lado, apesar de a conformação manter as fibras unidas, dando maior rigidez ao material, não é fácil de ser executado em materiais de dureza elevada.

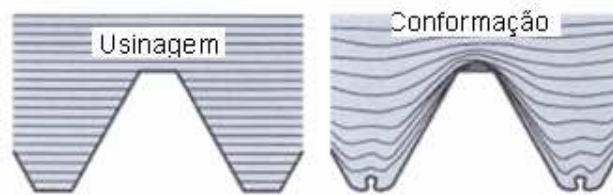


Figura 4: Comparativo entre roscas usinadas e conformadas quanto as fibras (Adaptado de NOGUEIRA E SILVA, 2007).

Na usinagem, existem diversas técnicas usadas para fabricar roscas, as quais podemos destacar: torneamento, rosqueamento com macho e cossinete, turbilhonamento, retificação e fresamento. A figura 5 exemplifica estes processos.



Figura 5: Diferentes processos e ferramentas de rosqueamento (Souza, 2010)

O torneamento consiste do uso de uma ferramenta monocortante, com a forma da rosca, sendo preso na máquina pelo porta-ferramenta. Com o uso do torno mecânico a ferramenta gira em relação à peça, executando a usinagem. Para atingir as dimensões requeridas são executados vários passes. Esse processo é utilizado em roscas de dimensões e passes maiores ou não normatizadas. (DINIZ, 2006)

Sendo o processo mais comum de rosqueamento, o macheamento apresenta também o maior número de inconvenientes associados à quebra de ferramentas. A ferramenta consiste de uma parte cônica na ponta, que apresenta os filetes de cortes, e uma continuação cilíndrica, onde ainda apresenta um único filete de corte que normaliza as dimensões. Para cada tipo de material é usado tamanhos de cones e número de filetes diferentes. O processo se inicia com uma pré-furação, que deve ter diâmetro escolhido a partir de cálculos ou tabelas informativas, para não causar forças excessivas no macho nem causar filetes defeituosos. O próximo passo é a passagem do macho, que pode ser executada manualmente ou com uso de maquinário. A velocidade desse processo é limitada pelo sincronismo entre rotação e avanço. Os machos possuem folgas para o escoamento do cavaco e para o uso de fluidos de corte. Após sua entrada completa, o macho é retirado em rotação reversa a que entrou, finalizando assim o processo. Na maioria dos casos é necessário o uso de um ou mais machos para desbaste e um todo cilíndrico para acabamento (DA MOTA, 2009).

O cossinete funciona de maneira parecida a de um macho, só que é usado para a realização de rosqueamento externo. O equipamento possui uma forma que lembra uma “porca” com mais área superior e inferior. Possui alguns furos para saída do cavaco e pode não ser interiço, possuindo parafusos para o ajuste da profundidade de corte. São divididos basicamente pelo tipo de cavaco proveniente do material, podendo ser com entrada corrigida ou não (RODRIGUES, 2011).

O turbilhonamento é um processo de corte interrompido em que um cabeçote dotado de ferramentas é montado de forma excêntrica em relação a peça, e apresenta movimento lento e inverso ao movimento de rotação da ferramenta. É uma técnica muito usada em materiais de difícil usinabilidade, como o titânio e em peças que possuem relação comprimento/diâmetro instável para a usinagem convencional. Em geral em cada cabeçote são montadas quatro ferramentas, defasadas de 90°, sendo duas laterais, uma de fundo e uma de rebarba. Como pontos positivos esse processo fabrica a rosca em um único passe e sem rebarbas, não usa fluido de corte na maioria

dos casos e aumenta a vida da ferramenta devido ao fato de mais de uma aresta de corte estar em contato com a peça (FERES, 2010).

Na retificação são usados rebolos, que são ferramentas que possuem minúsculas arestas de corte sem geometria definida. Esse processo é usado quando se tem necessidade de tolerâncias mais apertadas, da ordem de IT4 ou menor. Para a retificação de roscas são usados rebolos de filetes simples ou de forma, que dividem o trabalho de remoção (DINIZ, 2006).

O fresamento de roscas é caracterizado pelo desacoplamento entre a rotação da ferramenta e o avanço, o que garante versatilidade das geometrias que esse processo pode gerar. Na fabricação de roscas o fresamento apresenta vantagens em relação aos processos tradicionais com uso de machos e cossinetes, principalmente nas velocidades locais de corte e do material da peça (SOUZA, 2010). Enquanto nos tradicionais a cada rotação a ferramenta avança o correspondente ao passo da rosca na direção vertical, na fresa a máquina-ferramenta realiza um movimento helicoidal de avanço enquanto a ferramenta gira em torno do seu eixo com velocidade bem mais elevada que a própria revolução do diâmetro da rosca. Outra característica é que a fresa permite a usinagem de roscas direitas e esquerdas, internas e externas, furos passantes e cegos, sem a necessidade de troca de ferramenta. Também permite que com o uso de uma única ferramenta se faça o furo e a rosca em totalidade, o que não é possível quando se usa macho, que sempre necessita de pré-furação e do uso de vários machos para atingir a profundidade e comprimento de rosca desejado (SOUZA, 2010).

O fresamento de roscas geralmente é realizado com o uso de três tipos de ferramentas: ferramenta de aresta única de corte, com várias arestas de corte e com vários cortes por arestas, que são mostrados na figura 6.

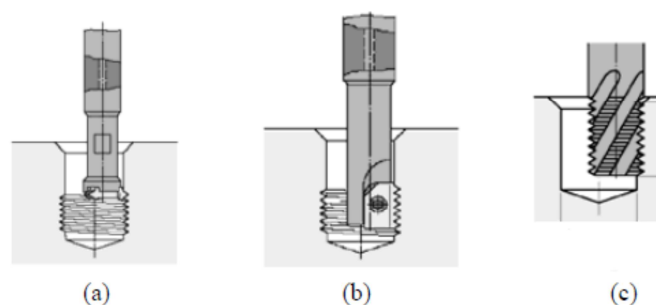


Figura 6: Ferramentas de fresamento de roscas: (a) ferramenta de aresta única; (b) ferramenta de múltipla aresta de único corte e (c) ferramenta de múltipla aresta de vários cortes (ARAUJO, 2004)

O processo para a fabricação de uma rosca funciona basicamente como mostrado na figura 7: a peça a ser usinada possuindo um pré-furo é posicionada na mesa do equipamento. A ferramenta é então posicionada acima das coordenadas desse furo. A fresa é levada para a altura requerida (1). Está é então movida até a profundidade de corte selecionada, já levando em conta o tipo de aproximação e o movimento helicoidal da ferramenta (2).

A ferramenta executa o movimento helicoidal do corte para uma volta completa em torno do furo (3), concluindo a quantidade de voltas necessárias a execução da rosca (4). O perfil do dente corresponde às características da ferramenta. Caso não seja atingida a profundidade requerida nesse primeiro passe, esta é novamente posicionada e esse ciclo é continuado. Ao seu término a ferramenta é posicionada no centro do furo e finalmente retirada (5).

Caso a peça a ser usinada não possua um furo pré-usinado o processo continua praticamente igual, só que nesse caso é usado uma ferramenta que permita que esse furo seja realizado. Então a ferramenta é posicionada nas coordenadas relativas ao furo e o efetua normalmente. Os demais passos continuam idênticos.

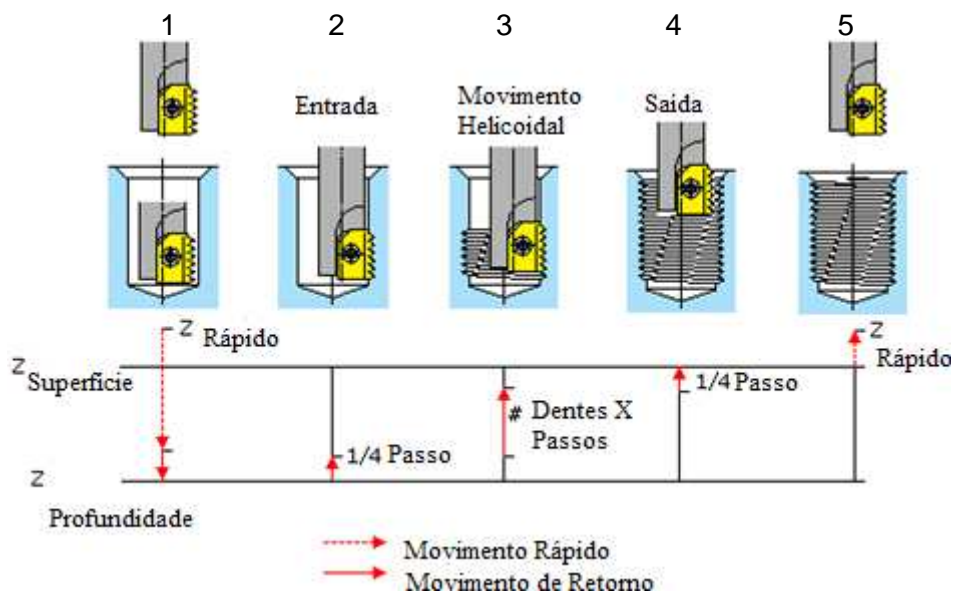


Figura 7: Movimento básico em um fresamento (EZCAM, 2006)

Essa aproximação executada pela ferramenta pode ser realizada de várias maneiras diferentes, que levam em conta como será esse primeiro contato entre as arestas de corte e a peça. São utilizadas três formas principais de aproximação na fabricação de roscas internas: direta, com um quarto de volta e com um meio de volta, como mostrado na figura 8:

- A. Aproximação direta: também conhecida como linear, a ferramenta vai de encontro à peça em uma trajetória reta, o que causa um grande esforço da ferramenta e gera marcas indesejadas no acabamento dessa região.
- B. Um quarto de volta: é muito usada em rosqueamento onde o diâmetro da ferramenta é muito menor do que o diâmetro do furo. A ferramenta se move em um ângulo de 45° em relação à linear até metade do raio, então realiza um movimento de um quarto de círculo e entra em contato com a peça em um ângulo mais favorável. Isso já diminui bastante a força de contato inicial, mas esta ainda continua alta.
- C. Meia volta de círculo: é a melhor forma de aproximar a peça, já que esta apresenta a menor força de contato entre as três, além de promover um melhor acabamento superficial nesta região de contato inicial. O único empecilho desse método é que nem todas as máquinas CNCs possuem os comandos necessários para realizar esse movimento.

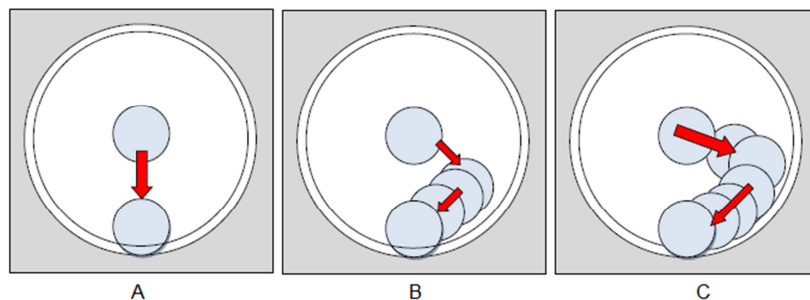


Figura 8: Tipos de aproximação: A: Direta; B: um quarto de círculo; C: meia volta de círculo (GRIPA, 2012)

Sendo assim, o estudo e experimentação de novas máquinas-ferramentas e de novos materiais de ferramentas se tornou assunto recorrente e parte dos investimentos da grande maioria das indústrias que trabalham com tecnologia de ponta.

Com tantas formas possíveis de atingir os mesmos requisitos requeridos pelo produto final, torna-se necessário uma análise crítica para atingir um rosqueamento com menor custo e maior rapidez de conclusão, que é o que realmente importa em um mercado tão competitivo e globalizado.

2.4. Geometria da Ferramenta de Rosqueamento

As ferramentas de rosqueamento em fresa vêm evoluindo em grande velocidade ao longo dos anos, devido tanto a novos formatos quanto por novos conceitos e necessidades industriais. Suas características podem incluir canais internos para injeção de fluido de corte, e canais externos, que permitem o escoamento do cavaco e o consequente escoamento desse fluido de refrigeração. Sendo assim, a escolha do tipo de ferramenta, a quantidade de arestas de corte, se terá canais de escoamento e toda sua geometria é pensada para aumentar a vida da ferramenta, melhorar o acabamento superficial e diminuir o tempo de corte.

Estas podem possuir dentes retos, escalonados ou helicoidais, dependendo do perfil de rosca a ser atingido. As fresas retas são usadas em maioria para usinagem de roscas internas, enquanto as demais podem ser usadas para qualquer tipo de rosqueamento. (SANDVIK, 2013)

2.5. Força de Corte no Fresamento de Rosca

No modelo de ARAUJO (2004) é considerado que o avanço na direção radial é muito maior que o avanço vertical, podendo então desconsiderá-lo. Sendo assim esse modelo considera que a fresa se move linearmente, e não em um movimento helicoidal.

A geometria do cavaco de um fresamento de roscas pode ser aproximada pelo processo de fresamento de topo e é relacionada com o avanço por dente (f_z) e pelo ângulo de inclinação da ferramenta em relação a seu corte (ε). A figura 9 representa essa geometria de cavaco indeformado no fresamento de topo. Fazendo uma aproximação, é possível observar que essa espessura de corte (t) varia com a equação 1:

$$t = f_z * \text{sen}(\varepsilon) \quad (1)$$

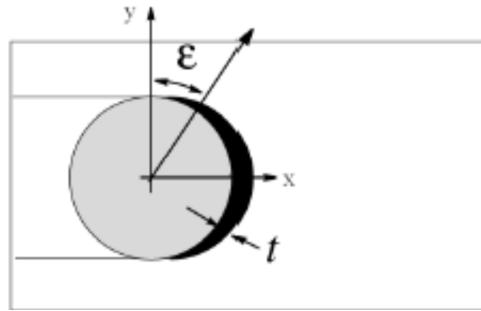


Figura 9: Espessura do cavaco indeformado (ARAUJO *et al.*, 2004).

Aproximadamente, a área da seção de corte (S) pode ser considerada o produto entre a espessura de corte (t) e profundidade de corte (h):

$$S = t * h \quad (2)$$

A força de corte em um fresamento de roscas pode ser analisada de maneira semelhante à do processo de fresamento de topo, que leva em conta a relação entre a área da seção de corte (S) e a pressão específica de corte (K) (ARAUJO, 2004):

$$F_c = S * K \quad (3)$$

Então a força de corte para o fresamento de roscas será o conjunto de todas as parcelas de todas as arestas de corte que entram em contato com a peça naquele instante, ou seja:

$$F_c = K * \sum t * h = K * S \quad (4)$$

Alguns autores usam a equação de Kienzle, que leva em conta o uso de uma pressão específica de corte média (K_{s1}) e de uma espessura média (t_m), que recebe um expoente que depende do material a ser usinado (DINIZ, 2006). Logo a fórmula se transforma em:

$$F_c = K * S = K_{s1} * t_m^{-Z} * S \quad (5)$$

Sendo assim, a modelagem do cavaco indeformado formado por um fresamento se torna de grande valia, pois permite visualizar como varia a área da seção de corte e a espessura de corte, permitindo calcular como a força de corte varia para a usinagem em questão.

3. Metodologia para o Cálculo da Área de Corte na Rosca API

Esse projeto tem como principal objetivo modelar a espessura do cavaco removida com o uso de uma ferramenta de perfil triangular de torno, com uma única aresta de corte, sendo esta indicada para confecção de roscas API cônicas. Sabendo como varia essa espessura ao longo de cada passagem da ferramenta é possível estimar as forças que agem sobre a cunha de corte, a potência necessária à máquina e a capacidade do material de resistir aos esforços.

Para atingir esse objetivo foram usados em conjunto dois programas computacionais: um foi o SolidWorks 2010, um software de CAD 3D que permite simular o corte dessa ferramenta, e o outro o Wolfram Mathematica, um software de cálculos matemáticos que permite visualizar com precisão as trajetórias percorridas por essa ferramenta.

A modelagem foi realizada para quatro tipos diferentes de fresamento, que se diferem pela complexidade do movimento executado pelo centro da ferramenta e pelo conhecimento da variação da espessura do cavaco: em uma direção linear no plano, com trajetória circular no plano, com trajetória circular no plano e variação de altura e com trajetória cônica. O modelo seguiu basicamente os mesmos passos para cada tipo de fresamento abordado, sendo demonstrados na figura 10.

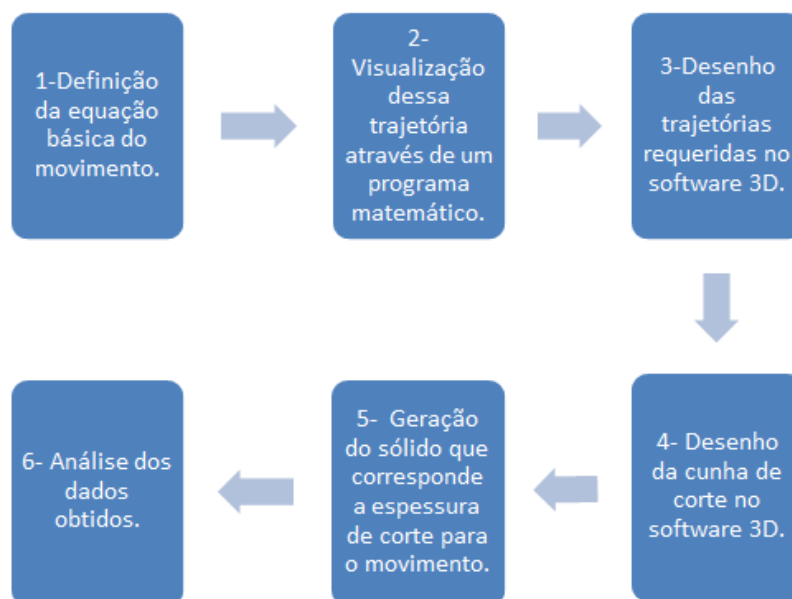


Figura 10: Passos do experimento para cada etapa.

A priori foi necessário descobrir qual a trajetória seguida pela aresta de corte. Essa varia de acordo com o tipo de fresamento e com os parâmetros de corte escolhidos (etapa 1 da figura 10).

A partir dessas equações paramétricas e do programa Wolfram Mathematica foi possível plotar essa trajetória para diversos pontos da cunha cortante. Essa visualização permite entender como se comporta essa variação da espessura do cavaco entre duas rotações seguidas da ferramenta, para o mesmo ponto da aresta de corte. Para continuar a modelagem foi escolhido equacionar a trajetória referente ao ponto mais externo da cunha cortante (etapa 2 da figura 10).

Esta equação com esse parâmetro foi, então, novamente desenhado, mas agora no programa SolidWorks. Para continuar a modelagem foi escolhido equacionar a trajetória referente ao ponto mais externo da cunha cortante. As equações dos diversos pontos já poderiam ter sido plotadas nesse programa, mas devido a um erro de reconhecimento do próprio software, esse não permite que uma curva gerada por equação possua mais de um ponto de interseção, dificultando a visualização do movimento da ferramenta como um todo. Para que fosse possível então usar esse programa a trajetória deste ponto mais externo foi dividida em partes, sendo cada parte referente a uma rotação da ferramenta em torno do seu próprio eixo (etapa 3 da figura 10).

O próximo passo foi desenhar a cunha de corte, que tem seu ponto mais externo coincidente com as trajetórias traçadas acima. A quantidade de material removida e a espessura máxima de cavaco escolhida fazem variar a área da cunha de que efetivamente realiza o corte. Nessa etapa foi de suma importância identificar corretamente os planos em que seriam feitos esse desenhos: os planos levam em conta o ângulo de posição e a inclinação do inserto em relação ao plano de corte, além de sempre serem perpendiculares ao plano da mesa da fresa (etapa 4 da figura 10).

Para finalizar foi gerada a diferença entre duas rotações subseqüentes, que corresponde ao material retirado em cada rotação da ferramenta em torno do seu próprio eixo (etapa 5 da figura 10).

A partir desse ponto são analisados os resultados obtidos, onde são realizados cortes nas seções que permitam melhor visualizar qual o comportamento dessa espessura ao longo do corte. Em todos os casos, como exemplo, foi calculado uma força de corte a partir dos dados obtidos, sempre considerando uma pressão

específica de corte média e a maior espessura do cavaco na área. Essa premissa foi adotada para superestimar a força de corte e evitar erros (Etapa 6 da figura 10).

3.1. Geometria da Ferramenta

Como já mencionado anteriormente o número de estudos relacionados ao fresamento de roscas é muito baixo, principalmente em casos especiais, como o de rosca cônica. Sendo assim, foi escolhido usar a mesma ferramenta usada por GRIPA (2012), que em seu estudo mediu as forças que atuam na ferramenta em um fresamento de roscas. O presente trabalho aumenta a quantidade de informações referentes ao tipo de fresamento possível e permite que estudos mais elaborados possam ser realizados posteriormente.

Essa ferramenta pertence à empresa Sandvik, grande produtora de materiais para usinagem. O inserto de aresta única, mostrado na figura 11 (A), possui código 266-RL22V401A0503E1020, e segundo o fabricante permite a usinagem de roscas com passo de 5 FPP e conicidade de $7^{\circ} 01'$ por polegada, e já possui o formato necessário aos dentes, que são do formato API 60° . O inserto escolhido pode usinar roscas de até 3 mm de profundidade, caso estas possuam uma conicidade. O inserto é montado em um porta-ferramenta da mesma fabricante, que possui código 266RKF-25-22, como apresentado na figura 11 (B).



Figura 11: Ferramenta (SANDVIK, 2013)

Essa ferramenta girando em torno do seu próprio centro descreve um círculo com diâmetro máximo de 34,49 mm (ponto mais externo). Essa pode ser vista na figura 12(A). O inserto possui ângulo de inclinação com a horizontal de 15° . As demais

angulações desse inserto não foram consideradas para esse estudo. A figura 12 (B) mostra essa angulação.

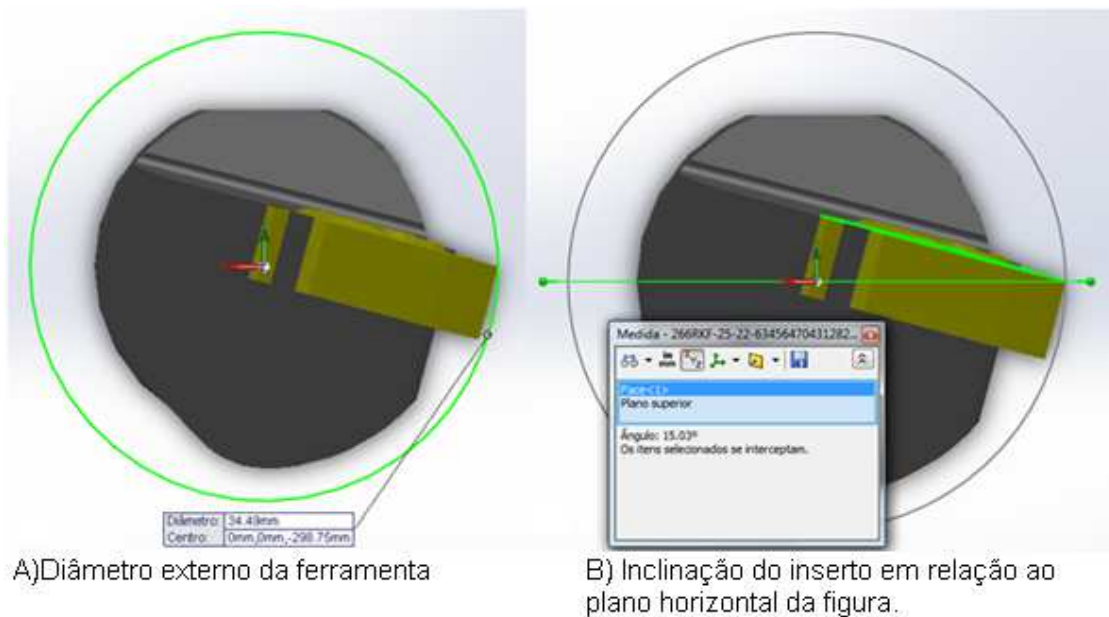
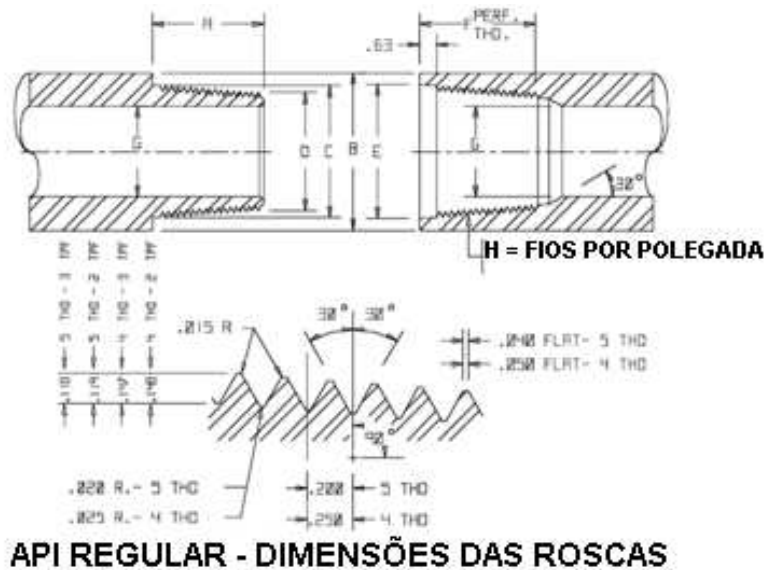


Figura 12: Parâmetros da ferramenta.

3.2. Parâmetros de Corte

Para permitir uma comparação entre os diferentes tipos de fresamentos foi decidido usar os parâmetros de uma rosca cônica, visto que este é o que apresenta maior número de variáveis e, pode ser considerado como uma evolução dos demais. Foi escolhido usinar uma rosca usada em conexões de hastes de perfuração, juntamente com suas dimensões. A figura 13 mostra a geometria e a tabela referente a roscas cônicas usadas em hastes de perfuração. São mostrados os parâmetros de diâmetro maior (letra C na tabela da figura 13), diâmetro menor (letra D na tabela da figura 13), profundidade de rosca (letra F na tabela da figura 13), passo (letra H na tabela da figura 13). Além disso, são mostrados os parâmetros referentes as dimensões do dente a ser produzido. O modelo escolhido foi o 2-3/8" regular com uma entrada, novamente baseado no estudo realizado por GRIPA (2012). Essa rosca possui uma profundidade de dente de 3 mm e atende aos requisitos da ferramenta.



SIZE	A (in.)	B (in.)	C (in.)	D (in.)	E (in.)	F (in.)	G (in.)	H TPI	K TPF
1-1/4	2-5/8	2-3/16	1-23/32	1-5/16	1-3/4	3	5/8	7	2
2-3/8	3	3-1/8	2-5/8	1-7/8	2-11/16	3-3/8	1	5	3
2-7/8	3-1/2	3-3/4	3	2-1/8	3-1/16	3-7/8	1-1/4	5	3
3-1/2	3-3/4	4-1/4	3-1/2	2-9/16	3-9/16	4-1/8	1-1/2	5	3
4-1/2	4-1/4	5-1/2*	4-5/8	3-9/16	4-11/16	4-5/8	2-1/4	5	3
5-1/2	4-3/4	6-3/4	5-33/64	4-21/64	5-37/64	5-1/8	2-3/4	4	3
6-5/8	5	7-3/4	6	5-5/32	6-1/16	5-3/8	3-1/2	4	2
7-5/8	5-1/4	8-7/8	7	5-11/16	7-3/32	5-5/8	4	4	3
8-5/8	5-3/8	10	7-61/64	6-37/64	8-3/64	5-3/4	4-3/4	4	3

Figura 13: Hastes de perfuração com roscas API com tabela de dimensões (Adaptada de OILFIELDTRASH, 2013)

Como parâmetros de corte básicos foram usados uma velocidade de rotação de 2557 RPM e um avanço de 0,07 mm/dente. O material usado como base para a fabricação dessas roscas foi o alumínio 6262, que possui pressão específica média de corte de 600 N/mm² e um Z de 0,25 (GRIPA, 2012).

3.3. Definição da Equação Básica do Movimento

3.3.1. Fresamento Linear sem Movimento Vertical

No fresamento plano em uma direção linear a ferramenta gira em torno do seu próprio eixo e seu centro se move com velocidade constante de avanço no plano. Então a trajetória de qualquer ponto da aresta de corte será um somatório de uma função seno/cosseno (rotação) e uma equação da reta (translação). A figura 14 mostra

a representação dessa trajetória e a equação (6) mostra a equação paramétrica básica desse tipo de movimento para um ponto qualquer e sua trajetória.

$$X(t) = r * \text{Cos}[\theta_1(t)]; Y(t) = r * \text{Sin}[\theta_1(t)] + V * \theta_1(t) \quad (6)$$

Onde:

r = raio de um ponto qualquer da ferramenta. Unidade: mm

θ_1 = ângulo de posição do ponto em relação ao cento da ferramenta. Unidade: rad

V = velocidade de avanço. Unidade: $\frac{mm}{rot}$

t = tempo. Unidade: s

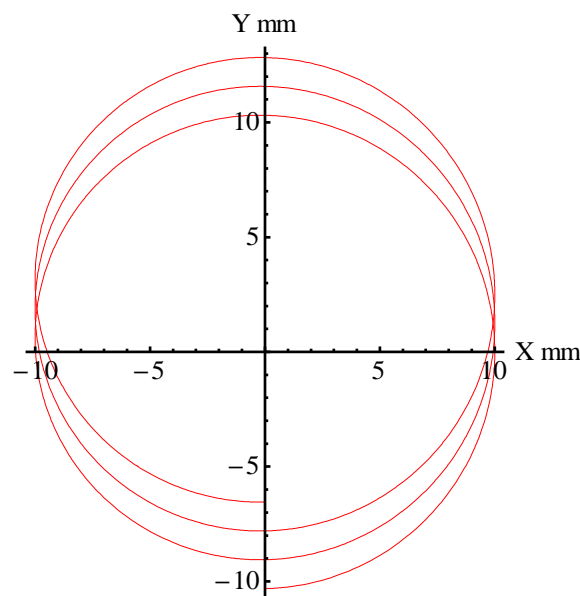


Figura 14: Trajetória básica de um fresamento linear no plano

Para a equação apresentada nesse tópico, e em todos os outros, foi necessário relacionar a velocidade de avanço com as rotações da fresa. Abaixo os parâmetros usados e a equação total já com os ajustes realizados. Poderia ser desenhada a curva real do movimento do ponto mais externo, mas devido ao avanço ser pequeno em relação as dimensões do conjunto fresa e inserto, e de já ter mostrado um exemplo básico dessa trajetória, não se tornaria de grande valia pois não seria muito visual.

- Parâmetros para o cálculo do movimento para o ponto mais externo da cunha de corte para o fresamento linear:

Raio do ponto mais externo da fresa: $r = \frac{34,49}{2} mm$

rotações por minuto da fresa: $RPM = 2557 \text{ rpm}$

Velocidade de avanço: $V_f = 0,07 \text{ mm/rot}$

Relaciona a velocidade de avanço com cada rotação da fresa: $L = \frac{(V_f * RPM)}{120 * Pi}$

Unidade de tempo referente a uma rotação da ferramenta em torno do seu próprio eixo:

$$\text{tempo} = \frac{120 * Pi}{RPM}$$

- Equação paramétrica real do movimento para t em segundos:

$$X(t) = -r * \text{Cos} \left[\frac{(RPM * (t))}{60} \right]; Y(t) = r * \text{Sin} \left[\frac{(RPM * (t))}{60} \right] + L * (t);$$

$$Z(t) = 0; 0,75 * \text{tempo} \leq t \leq 2,75 * \text{tempo} \quad (7)$$

Analisando a expressão acima é possível observar que a variável “L” serve como um contador de rotações, ou seja, para cada rotação completada a ferramenta avança de 0,07 mm. Como a ferramenta deve usinar em sentido horário foi colocado um sinal negativo para o eixo X, para que ele comece de um ângulo de -180°.

3.3.2. Fresamento Circular sem Movimento Vertical

Nesse segundo tipo de fresamento o centro da fresa se move com velocidade constante produzindo uma trajetória circular. Sendo assim a trajetória de qualquer ponto da aresta de corte será um conjunto de duas rotações: uma em relação a seu próprio eixo e uma segunda em torno desse círculo, duas funções seno/cosseno. A equação paramétrica básica desse tipo de movimento é mostrado na equação (8) para um ponto qualquer e sua trajetória é mostrada na figura 15:

$$X(t) = r * \text{Cos}[\theta_1(t)] + R * \text{Cos}[\theta_2(t)]; Y(t) = r * \text{Sin}[\theta_1(t)] + R * \text{Sin}[\theta_2(t)] \quad (8)$$

Onde:

r = raio de um ponto qualquer da ferramenta. Unidade: mm

R = raio do centro da ferramenta em relação ao centro do movimento. Unidade: mm

θ_1 = ângulo de posição do ponto em relação ao centro da ferramenta. Unidade: rad

$\theta_2 = \text{ângulo de posição do centro da ferramenta em relação ao centro do movimento.}$

Unidade: rad

t = tempo. Unidade: s

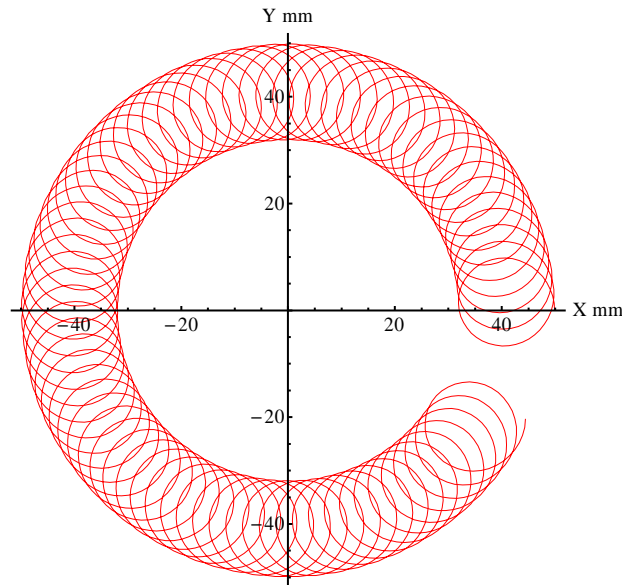


Figura 15: Representação da trajetória básica do fresamento circular no plano

Nessa equação temos a relação entre a rotação da fresa em torno do seu próprio eixo e a rotação em torno da circunferência proposta. Para seguir um padrão de comparação e seguir uma linha de raciocínio entre os tópicos foi escolhido modelar a usinagem do maior diâmetro do perfil API da figura 13, que possui $2 \frac{5}{8}$ polegadas, ou 66,675 mm (caracterizado na tabela pela letra “C”).

Então a profundidade de corte dessa rosca será dada novamente usando toda a área útil da cunha de corte, ou seja, o diâmetro da trajetória do ponto mais externo da ferramenta será dado pelo diâmetro maior somado a altura da cunha cortante, 3 mm.

- Parâmetros para o cálculo do movimento para o ponto mais externo da cunha de corte para o fresamento com trajetória circular no plano:

$$\text{Raio do ponto mais externo da fresa: } r = \frac{34,49}{2} \text{ mm}$$

Raio máximo do ponto mais externo da fresa em relação ao centro do movimento:

$$R = \frac{66,675 + (3 * 2)}{2} \text{ mm}$$

rotações por minuto da fresa: $RPM = 2557 \text{ rpm}$

Velocidade de avanço: $V_f = 0,07 \text{ mm/rot}$

Relaciona a velocidade de avanço com a rotação da fresa: $L = \frac{(V_f * RPM)}{120 * (R - r) * \pi}$

Unidade de tempo referente a uma rotação da ferramenta em torno do seu próprio eixo:

$$\text{tempo} = \frac{120 * \pi}{RPM}$$

- Equação paramétrica real do movimento para t em segundos:

$$X(t) = -(R - r) * \text{Cos}[L * (t)] - r * \text{Cos}\left[\frac{(RPM * (t))}{60}\right];$$

$$Y(t) = (R - r) * \text{Sen}[L * (t)] + r * \text{Sen}\left[\frac{(RPM * (t))}{60}\right]; Z(t) = 0$$

$$0,75 * \text{tempo} \leq t \leq 2,75 * \text{tempo}. \quad (9)$$

Analisando essa expressão observa-se que a variável “L” inclui o avanço por dente, V_f , relacionado com o raio do centro da trajetória do círculo, $R-r$, transformando essa velocidade linear em angular, que de acordo com o número de voltas dadas pela fresa em torno do seu próprio eixo irá movimentar-se.

3.3.3. Fresamento Circular com Movimento Vertical

Nesse tópico a análise leva em conta o mesmo tipo de movimento que o tópico anterior, sendo que agora a fresa passa a se movimentar com uma velocidade constante no eixo Z, produzindo assim uma trajetória cilíndrica. Então, um ponto qualquer da aresta de corte possui: uma rotação em relação a seu próprio eixo, uma segunda rotação em torno desse círculo, duas funções seno/cosseno, e uma função linear na direção do eixo Z. A equação paramétrica básica para esse tipo de movimento está demonstrado na equação (10) e sua trajetória é mostrada na figura 16.

$$X(t) = r * \text{Cos}[\theta_1(t)] + R * \text{Cos}[\theta_2(t)];$$

$$Y(t) = r * \text{Sin}[\theta_1(t)] + R * \text{Sin}[\theta_2(t)]; Z(t) = k * \theta_2(t) \quad (10)$$

Onde:

r = raio de um ponto qualquer da ferramenta. Unidade: mm

R = raio do centro da ferramenta em relação ao centro do movimento. Unidade: mm

θ_1 = ângulo de posição do ponto em relação ao centro da ferramenta. Unidade: rad

θ_2 = ângulo de posição do centro da ferramenta em relação ao centro do movimento.

Unidade: rad

k = passo da rosca. Unidade: mm/rot

t = tempo. Unidade: s

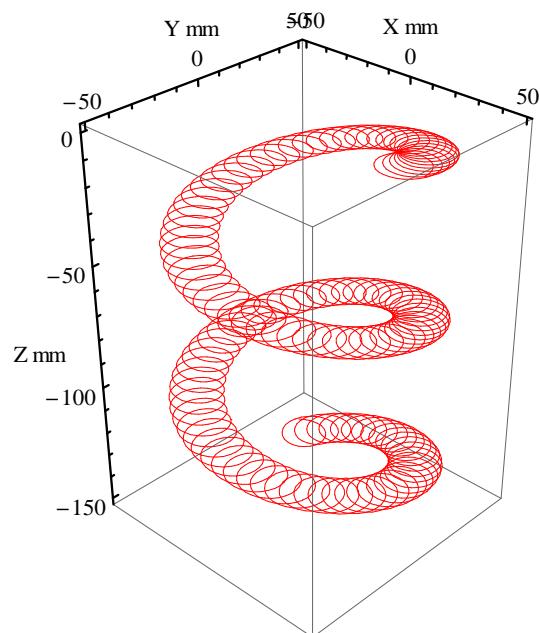


Figura 16: Trajetória básica do fresamento cilíndrico

Além da relação entre a rotação da fresa em torno do seu próprio eixo e a rotação em torno da circunferência proposta existe o fator “k”, que faz a relação entre a rotação em relação ao centro do movimento e a velocidade de avanço na direção Z, ou seja, o passo. Esse passo para a rosca escolhida, como já citado, é de 5 FPP.

- Parâmetros para o cálculo do movimento para o ponto mais externo da cunha de corte para o fresamento com trajetória cilíndrica:

Raio do ponto mais externo da fresa: $r = \frac{34,49}{2} \text{ mm}$

Raio máximo do ponto mais externo da fresa em relação ao centro do movimento :

$$R = \frac{66,675 + (2 * 3)}{2} \text{ mm}$$

Rotações por minuto da fresa: $RPM = 2557 \text{ rpm}$

Velocidade de avanço: $Vf = 0,07 \text{ mm/rot}$

$$\text{Passo: } P = 5 \text{ FPP} = \frac{25,4}{5} \text{ mm}$$

Relaciona a velocidade de avanço com a rotação da fresa: $L = \frac{(Vf * RPM)}{120 * (R - r) * Pi}$

Relaciona a velocidade de avanço em Z com a rotação da fresa: $K = \frac{-(P * L)}{(2 * Pi)}$

Unidade de tempo referente a uma rotação da ferramenta em torno do seu próprio eixo:

$$\text{tempo} = \frac{120 * Pi}{RPM}$$

- Equação paramétrica real do movimento para t em segundos:

$$X(t) = -(R - r) * \text{Cos}[L * (t)] - r * \text{Cos}\left[\frac{(RPM * (t))}{60}\right]; Y(t) = (R - r) * \text{Sen}[L * (t)] + r * \text{Sen}\left[\frac{(RPM * (t))}{60}\right]; Z(t) = K * (t); 0,75 * \text{tempo} \leq t \leq 2,75 * \text{tempo}. \quad (11)$$

Analisando essa expressão observa-se que agora tem-se um fator “K”, que é a relação do passo “P” com as rotações da fresa, que são representadas pelo fator “L”, e com a variável “tempo”. O fator “K” recebe um sinal negativo em sua fórmula para que o movimento aconteça na direção negativa do eixo Z. Como nos demais não é interessante mostrar a trajetória real, devido aos argumentos já apresentados anteriormente.

3.3.4. Fresamento Circular com Raio variável com movimento vertical

Seguindo os mesmos critérios adotados, esse tópico mantém todas as características já apresentadas anteriormente, adicionando um raio variável em relação ao tempo, que junto com os demais parâmetros permitem que o centro da

fresa descreva uma trajetória cônica. Sendo assim o movimento será o conjunto de duas funções seno/cosseno, com raio variável no plano e uma função linear na direção do eixo Z. A figura 17 exemplifica sua trajetória e a equação (12) representa a equação paramétrica básica para esse tipo de movimento.

$$X(t) = r * \text{Cos}[\theta_1(t)] + (R(t)) * \text{Cos}[\theta_2(t)];$$

$$Y(t) = r * \text{Sin}[\theta_1(t)] + (R(t)) * \text{Sin}[\theta_2(t)]; Z(t) = k * \theta_2(t) \quad (12)$$

Onde:

r = raio de um ponto qualquer da ferramenta. Unidade: mm

R = raio do centro da ferramenta em relação ao centro do movimento. Unidade: mm

θ_1 = ângulo de posição do ponto em relação ao cento da ferramenta. Unidade: rad

θ_2 = ângulo de posição do centro da ferramenta em relação ao centro do movimento.

Unidade: rad

k = passo da rosca. Unidade: $\frac{mm}{rot}$

t = tempo. Unidade: s

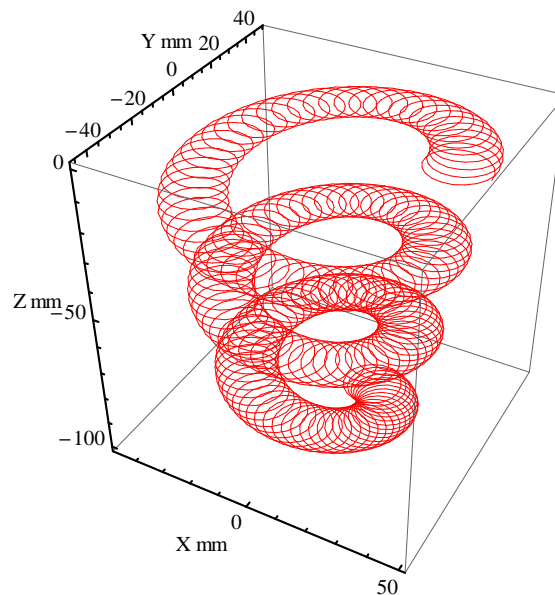


Figura 17: Representação da equação básica paramétrica do fresamento cônico e sua trajetória

Novamente existem os mesmos fatores demonstrados anteriormente, que relacionam as rotações e o avanço na direção Z. A diferença básica entre um cone e um cilindro é a variação do raio com a altura. Para esse caso o raio do centro da ferramenta em relação ao centro do movimento vai diminuindo em relação ao avanço na direção Z.

Seguindo a tabela contida na figura 13, tem-se então um diâmetro maior de 2 5/8 polegadas, 66,675 mm (letra "C") e um diâmetro menor de 1 7/8 polegadas, 47,625 mm (letra "D"), com altura de 2,745 polegadas, 69,723 mm (subtração entre a letra "F" e o valor do apoio de 0,63 polegadas).

Para relacionar essa redução do diâmetro, foi usada uma fórmula matemática básica, que relaciona esse cone a uma equação da reta. A figura 18 exemplifica esse cálculo, já levando em conta o ponto mais externo da cunha de corte. Logo, para cada avanço por rotação da fresa em torno do seu próprio eixo seu raio diminuirá.

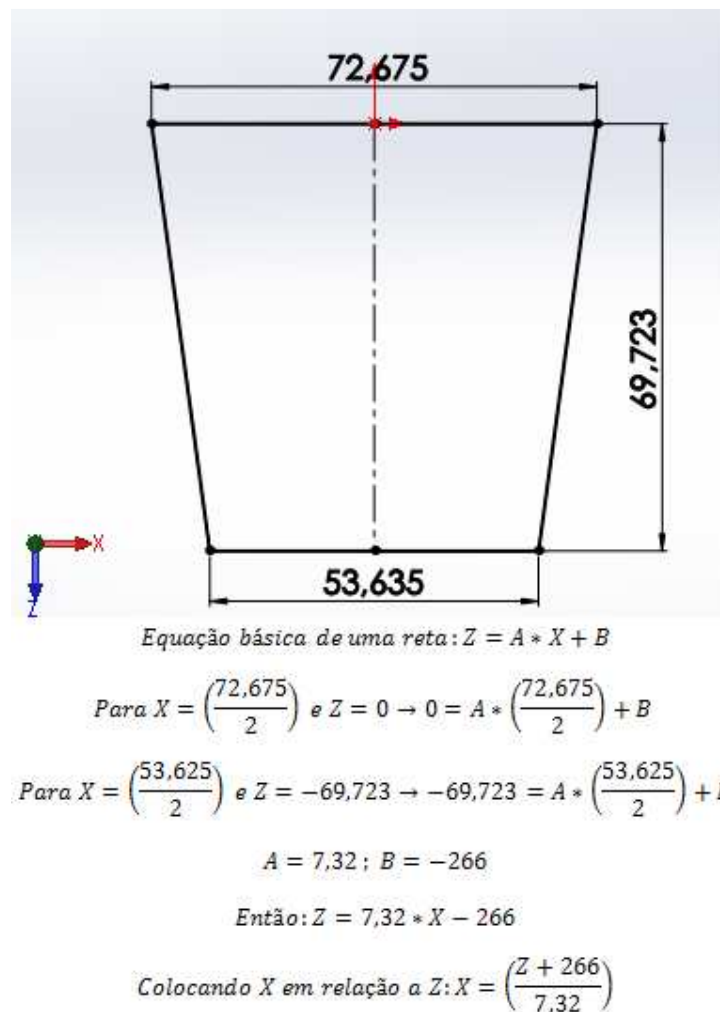


Figura 18: Representação do cone formado pelo ponto mais externo da cunha de corte

- Parâmetros para o cálculo do movimento para o ponto mais externo da cunha de corte para o fresamento com trajetória cônica:

$$\text{Raio do ponto mais externo da fresa: } r = \frac{34,49}{2} \text{ mm}$$

Raio do ponto mais externo da fresa em relação ao centro do movimento :

$$R = \left(\frac{K * (t) + 266}{7,32} \right) \text{ mm}$$

rotações por minuto da fresa: $RPM = 2557 \text{ rpm}$

Velocidade de avanço: $Vf = 0,07 \text{ mm/rot}$

$$\text{Passo: } P = 5 \text{ FPP} = \frac{25,4}{5} \text{ mm}$$

$$\text{Relaciona a velocidade de avanço com a rotação da fresa: } L = \frac{(Vf * RPM)}{120 * (R - r) * Pi}$$

$$\text{Relaciona a velocidade de avanço em Z com a rotação da fresa: } K = \frac{-(P * A)}{(2 * Pi)}$$

Unidade de tempo referente a uma rotação da ferramenta em torno do seu próprio eixo:

$$\text{tempo} = \frac{120 * Pi}{RPM}$$

- Equação paramétrica real do movimento para t em segundos:

$$X(t) = - \left(\left(\frac{K * (t) + 266}{7,32} \right) - r \right) * \text{Cos}[L * (t)] - r * \text{Cos} \left[\frac{(RPM * (t))}{60} \right] ;$$

$$Y(t) = \left(\left(\frac{K * (t) + 266}{7,32} \right) - r \right) * \text{Sen}[L * (t)] + r * \text{Sen} \left[\frac{(RPM * (t))}{60} \right] ;$$

$$Z(t) = K * (t); 2000,75 * \text{tempo} \leq t \leq 2002,75 * \text{tempo} \quad (13)$$

Analisando essa expressão observa-se que agora o raio varia com o tempo em uma função que relaciona o avanço na direção Z a cada rotação da fresa, mantendo as condições propostas anteriormente. Diferentemente dos demais casos aqui demonstrados, o intervalo escolhido para a análise será diferente.

Nos casos anteriores era possível escolher qualquer intervalo, visto que este não teria influencia no cálculo devido a aproximação da ferramenta à peça poder ser considerado já realizado em um intervalo de tempo negativo. No caso do cone, essa aproximação deverá ser considerada. Então, foi usado um intervalo de tempo depois de 2000 rotações da fresa em torno do seu próprio eixo. Como nos demais, não é interessante mostrar a trajetória real, devido aos argumentos já apresentados.

3.4. Modelagem da Espessura de Cavaco Indeformado

No caso de realizar um fresamento frontal ou cilíndrico com o uso dessa ferramenta a profundidade não passaria de 1,95 mm e 2,39 mm respectivamente, senão haveria colisão com o material a ser produzido, além de quando comparado ao fresamento cônico, produziriam rosca de tamanhos diferentes.

Sendo assim, foi escolhido supor, em um primeiro momento, que estes estariam sendo usinados com uma ferramenta simétrica que permita essa profundidade requerida, como mostrado na figura 19 (A). Essa escolha permite comparar de maneira mais real o que acontece entre os diversos tipos de fresamento. No segundo momento foi utilizado o perfil real dessa ferramenta, como mostrado na figura 19 (B).

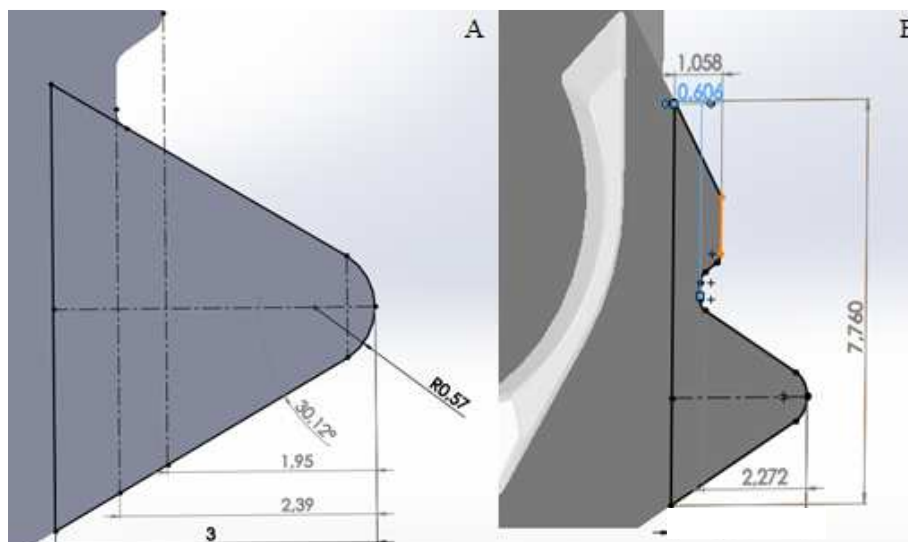


Figura 19: Desenho do perfil das cunhas de corte no programa SolidWorks: (A) Perfil tipos de fresamento triangular teórico (B) Perfil real

A modelagem foi realizada para os cinco tipos de usinagem mostrados na figura 20. Primeiro foi escolhido usar o inserto triangular teórico para os quatro tipos

diferentes de fresamento. Em um segundo momento foi realizada a modelagem para o fresamento cônico com o perfil real da ferramenta.

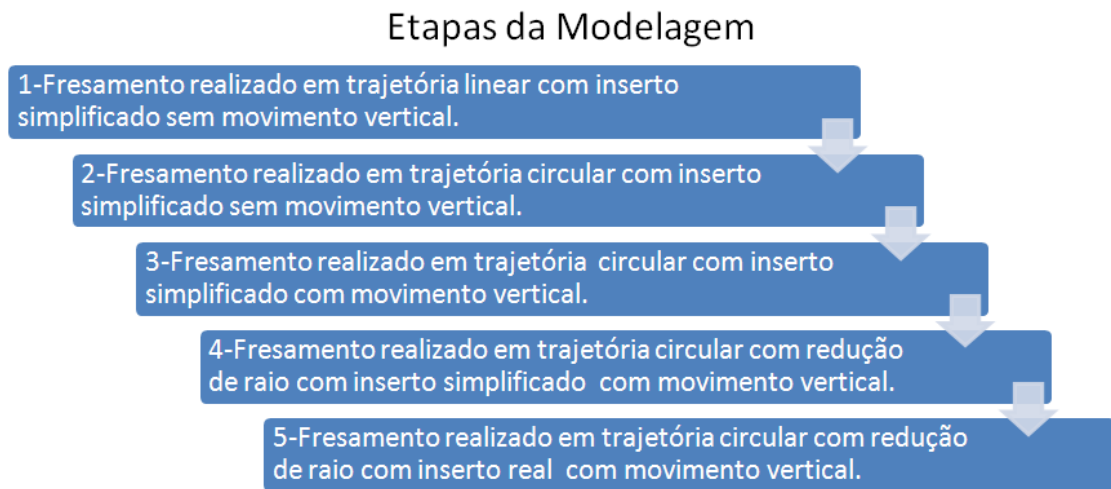


Figura 20: Tipos de fresamentos modelados

3.4.1. Fresamento Realizado em Trajetória Linear com Inserto Simplificado sem Movimento Vertical.

Usando a trajetória do fresamento linear e o perfil triangular teórico é possível visualizar como varia a espessura de corte para esse fresamento. A figura 21 mostra, em vermelho, uma representação básica da formação desse cavaco indeformado para esse caso, que leva em conta cada rotação da fresa em torno do seu próprio eixo e a velocidade de avanço linear (V_f).

A figura 22 mostra a variação do cavaco indeformado para esse movimento, juntamente com uma área produzida por esse corte, mostrada em preto no corte AA'. É possível observar que a espessura máxima de corte acontece em um ponto próximo a $y=0$.

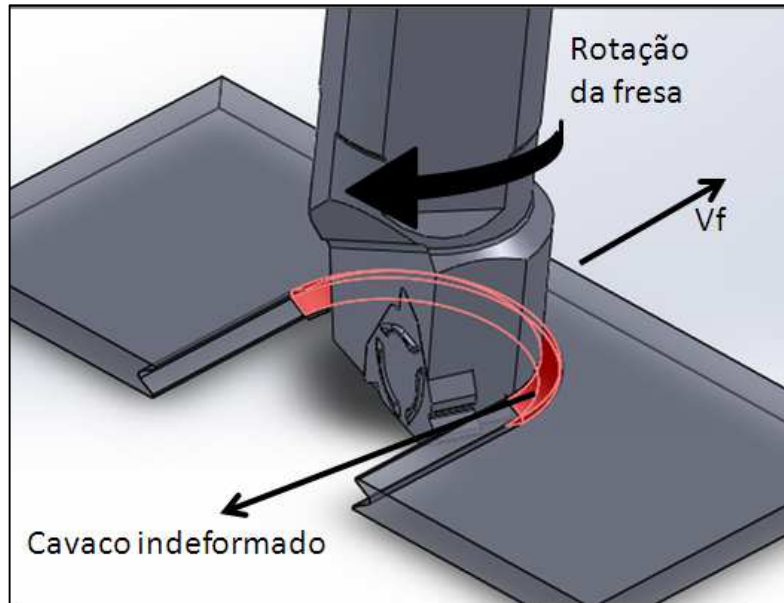


Figura 21: Representação básica da formação do cavaco indeformado para fresamento linear.

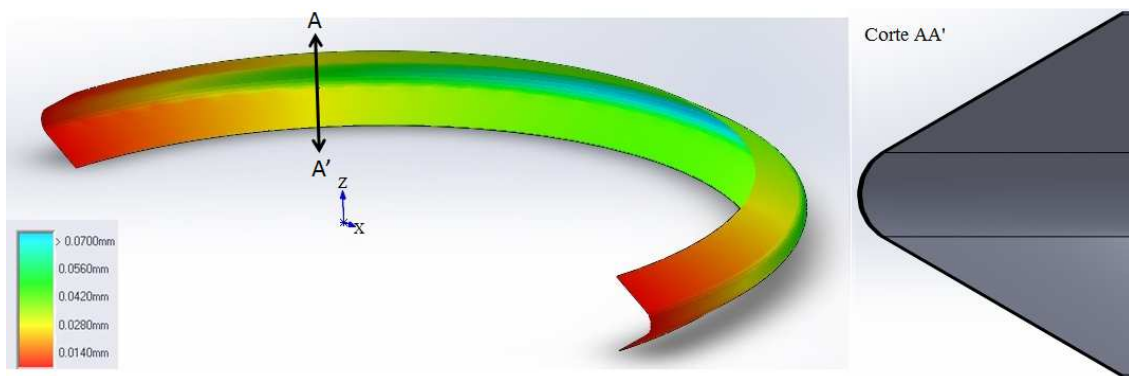


Figura 22: Distribuição da espessura para o fresamento linear no plano e padrão geral da área de corte mostrada em preto.

Para realizar uma análise mais apurada do que realmente ocorre, foram feitos alguns cortes nesse envelope: um corte vertical na região próxima a $X=0$ (figura 23) e um horizontal, em $Z=0$ (figura 24), para visualizar como esta espessura varia em relação ao ângulo de rotação da ferramenta.

A partir do corte horizontal é possível validar que a espessura de corte cresce até um ponto máximo perto de $X=0$ e volta a diminuir a partir desse ponto, possuindo quase que uma simetria perfeita em relação ao eixo x , variando somente a distribuição e espessura máxima encontrada.

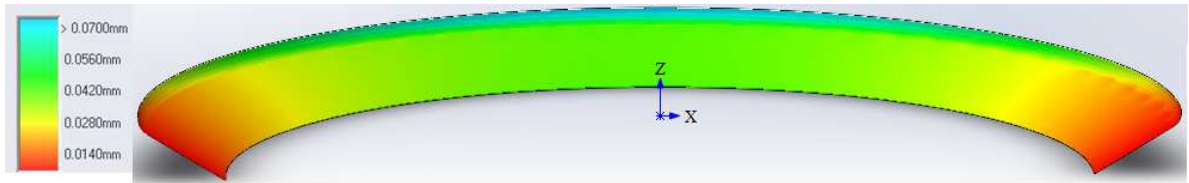


Figura 23: Corte horizontal para o fresamento linear no plano

Fazendo uma análise do corte vertical é possível ver que a espessura se comporta de maneira interessante: ela tende a permanecer constante em Z, mas estando mais próxima de $Z=0$ está começando a crescer chegando em seu ápice nesta coordenada.

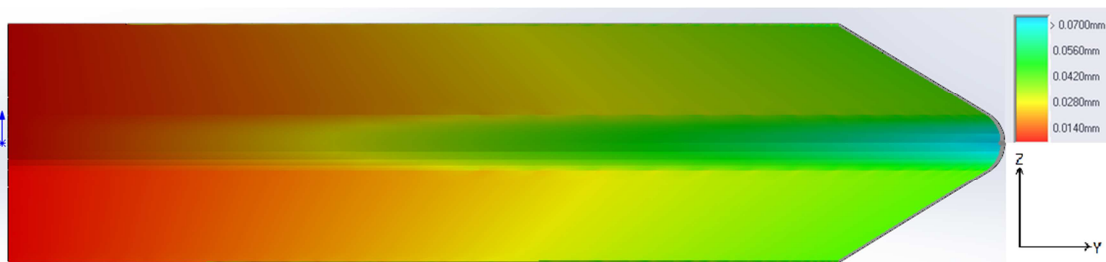


Figura 24: Corte vertical em $X=0$ para o fresamento linear no plano

Como esperado, a maior espessura encontrada será em $Z=0$ e em $X=0$, com o valor de 0,07 mm, sendo igual ao avanço. A figura 25 mostra essa maior espessura encontrada.

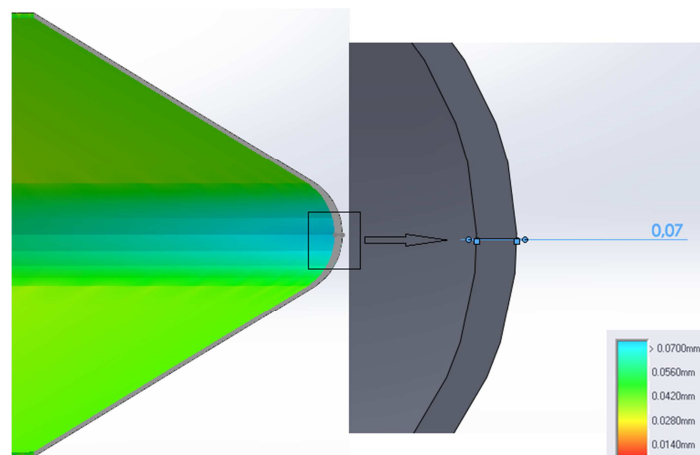


Figura 25: Zoom do corte vertical com $X=0$ e maior espessura para o fresamento linear no plano

A partir dessa área e dessa profundidade de corte obtida é possível calcular a força que está atuando nesse momento na aresta de corte. Nesse ponto escolhido

tem-se uma área de 0,29 mm² e uma espessura máxima de cerca de 0,07 mm. A força estimada nessa área é:

$$F_c = K_{s1} * t_m^{-Z} * S = 600 * 0,07^{-0,25} * 0,29 = 338,3 \text{ N} \quad (14)$$

3.4.2. Fresamento Realizado em Trajetória Circular com Inserto Simplificado sem Movimento Vertical.

Novamente, com o uso da equação para a trajetória circular e o perfil triangular teórico é calculada a espessura de corte. A figura 26 mostra como varia essa espessura juntamente com uma área produzida por esse corte, mostrada em preto no corte AA'. Diferente do caso anterior, é possível observar que a área de corte para esse caso vai diminuindo em altura (na direção do corte AA'), mas fica mais espessa na direção perpendicular a essa. Como na teoria, a forma do cavaco mostrado possui o formato que lembra uma gota.

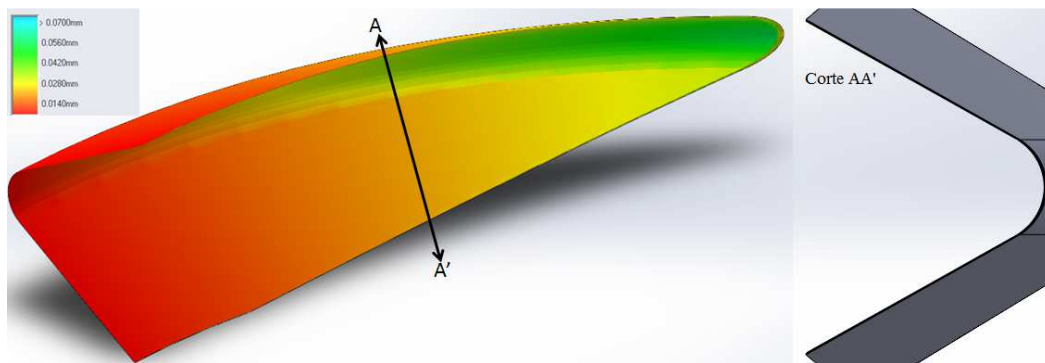


Figura 26: Distribuição da espessura para o fresamento circular no plano e padrão geral da área de corte mostrada em preto.

Realizando um corte horizontal (figura 27) é possível observar a espessura máxima de corte sendo atingida na face interna, no ponto onde a aresta começa a perder o contato com a peça a ser usinada.

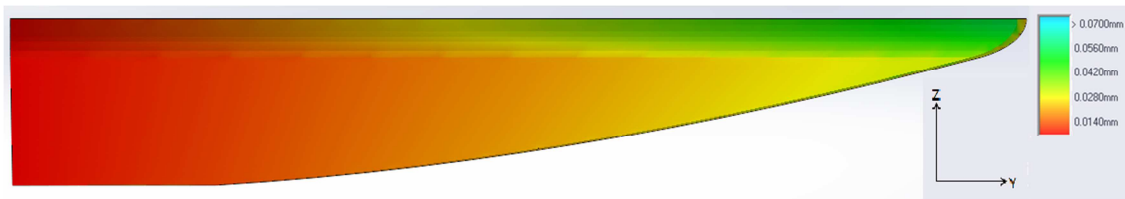


Figura 27: Corte horizontal o fresamento circular no plano

Realizando agora um corte na vertical, em um ângulo qualquer em relação ao eixo da ferramenta, é possível observar novamente uma simetria em relação a horizontal (figura 28). A maior espessura de corte relativa, para esse plano, encontra-se novamente no ponto mais afastado da aresta, em $Z=0$. Qualquer que seja esse ângulo, a maior espessura de corte se encontrará no ponto mais afastado da aresta de corte.

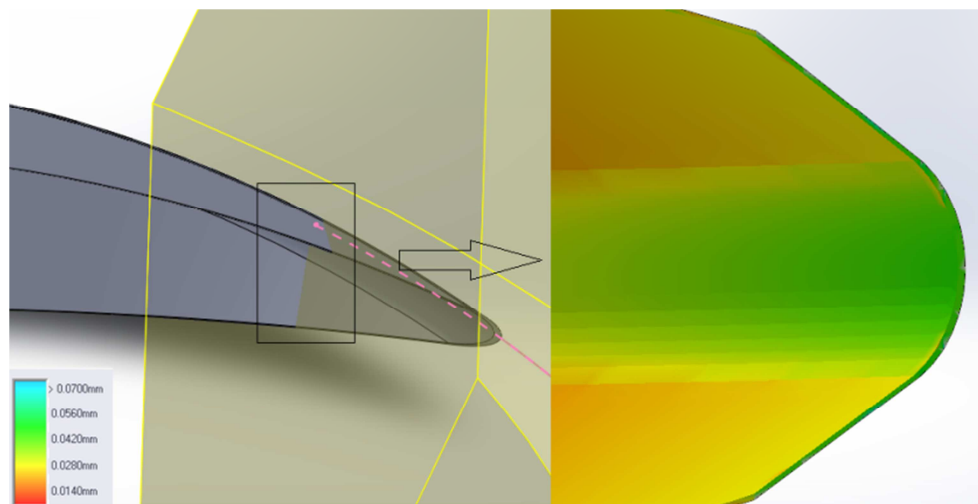


Figura 28: Representação do corte vertical em relação ao plano XY em um ângulo qualquer e distribuição da espessura o fresamento circular no plano

Nesse ponto escolhido tem-se uma área de $0,09 \text{ mm}^2$ e uma espessura máxima de cerca de $0,044 \text{ mm}$. Usando novamente a fórmula para estimarmos a força nesse ponto do corte tem-se:

$$F_c = K_{s1} * t_m^{-Z} * S = 600 * 0,044^{-0,25} * 0,09 = 117,9 \text{ N} \quad (15)$$

3.4.3. Fresamento Realizado em Trajetória Circular com Inserto Simplificado com Movimento Vertical

Nesse terceiro tópico o modelo passa a ter um avanço na direção negativa de Z. Fazendo uma análise da distribuição observamos que ela começa a se tornar bem diferente dos casos anteriores: não ocorre mais simetria e a parte inferior entra em contato primeiro com o material.

A figura 29 exemplifica basicamente a formação desse cavaco indeformado para uma rotação da fresa em torno do seu próprio eixo, com movimento circular em torno do eixo do cilindro e com velocidade de avanço na direção Z ($V_f Z$).

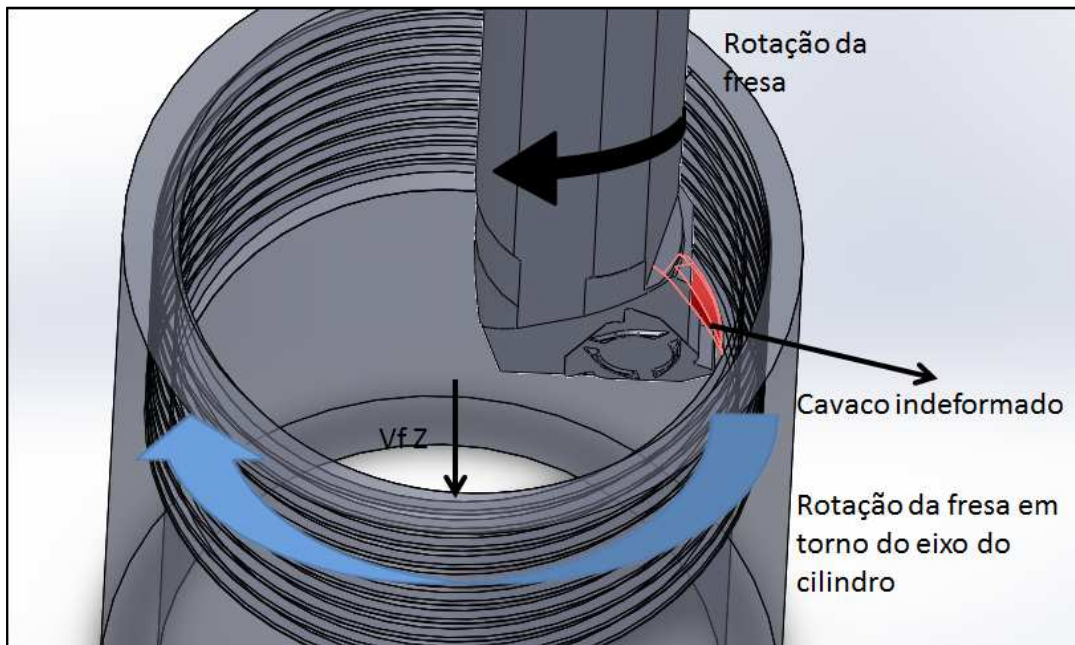


Figura 29: Representação básica da formação do cavaco indeformado para fresamento em um cilindro.

Continuando o movimento, a “ponta” da cunha de corte vai gradativamente entrando em contato com o material, até que a parte superior entre em contato e continue o corte. A figura 30 mostra essa distribuição, juntamente com um corte, representado pela linha AA', que identifica novamente o formato básico da área de corte para esse tipo de fresamento.

A maior espessura de corte é atingida novamente na saída da ferramenta, como é mostrado na figura 31.

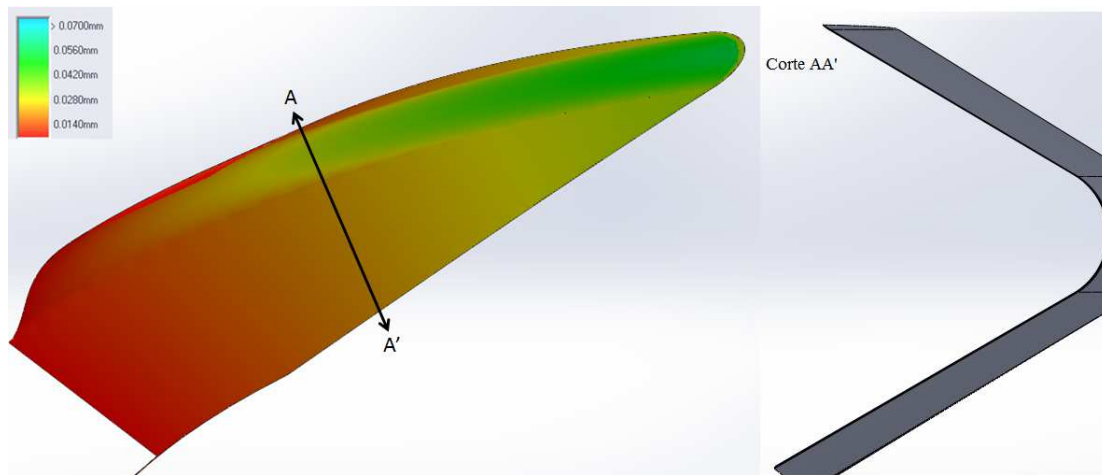


Figura 30: Distribuição da espessura para o fresamento cilíndrico e corte com área de corte básica.

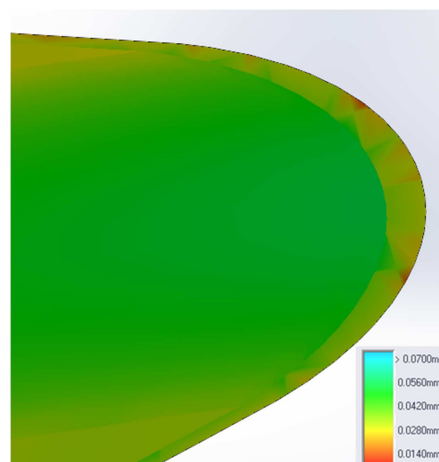


Figura 31: Zoom na maior espessura atingida para o fresamento cilíndrico

Realizando um corte em uma direção vertical qualquer é possível observar como varia essa espessura e sua assimetria em relação ao plano de simetria do inserto. Essa distribuição pode ser observada na figura 32. Como já citado, isso é devido ao avanço na direção negativa de Z que permite a aresta inferior de corte cortar mais que a superior.

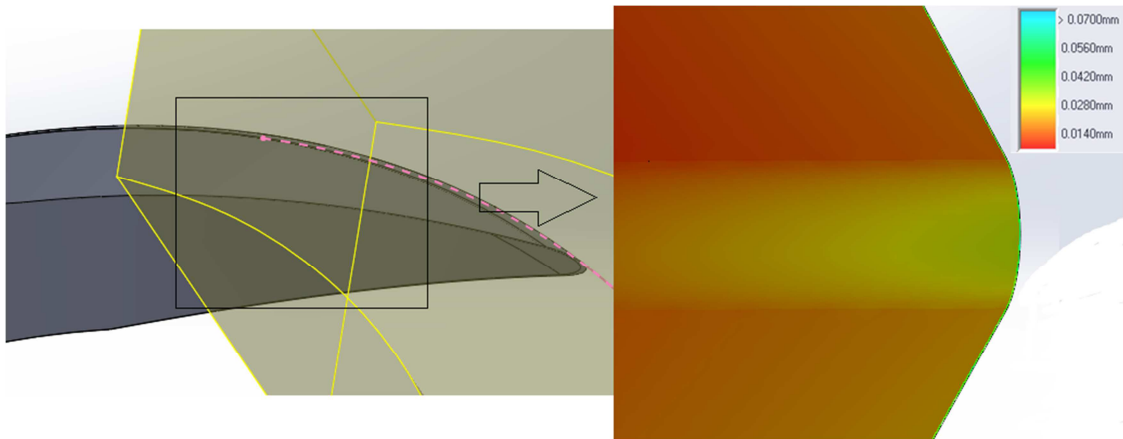


Figura 32: Representação do corte vertical em relação ao plano XY em um ângulo qualquer e distribuição da espessura para o fresamento cilíndrico

Nesse ponto escolhido tem-se uma área de 0,07 mm² e uma espessura máxima de cerca de 0,018 mm. Usando novamente a fórmula para estimarmos a força nesse ponto do corte tem-se:

$$F_c = K_{s1} * t_m^{-Z} * S = 600 * 0,018^{-0,25} * 0,07 = 114,7 \text{ N} \quad (16)$$

Outro fato interessante é que apesar de a ferramenta começar o corte por sua parte inferior a maior espessura atingida novamente será no ponto mais externo da aresta de corte. Isso é coerente com os parâmetros adotados, visto que o avanço por rotação da fresa em torno do seu próprio eixo na direção negativa de Z é muito pequeno. Um corte no plano de simetria do inserto exemplifica isso (figura 33).

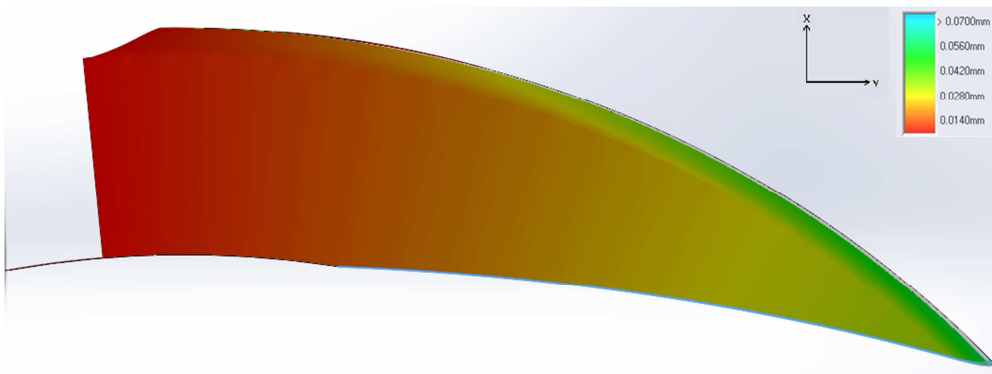


Figura 33: Corte seguindo o eixo de simetria do inserto para o fresamento cilíndrico

3.4.4. Fresamento Realizado Em Trajetória Circular com Redução de Raio com Insero Simplificado com Movimento Vertical

Nesse caso a ferramenta realiza a produção da rosca em um cone. A figura 34 mostra a formação do cavaco indeformado para uma rotação da fresa em torno do seu próprio eixo, com movimento circular de raio variável em torno do eixo do cone e com velocidade de avanço na direção Z ($V_f Z$).

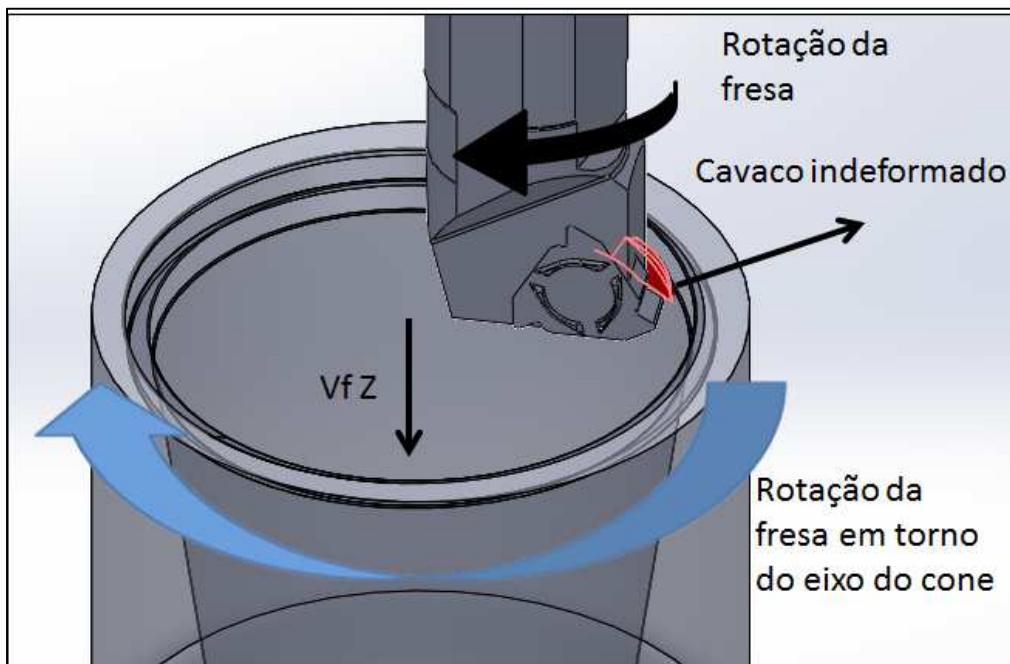


Figura 34: Representação básica da formação do cavaco indeformado para fresamento em um cone.

Fazendo uma análise desse corte é possível observar que, como esperado, a aresta inferior possui um maior comprimento em contato com a peça que a superior. A figura 35 mostra essa distribuição e a área básica da seção de corte para essa trajetória, colorida de preto, onde é possível observar a afirmação acima.

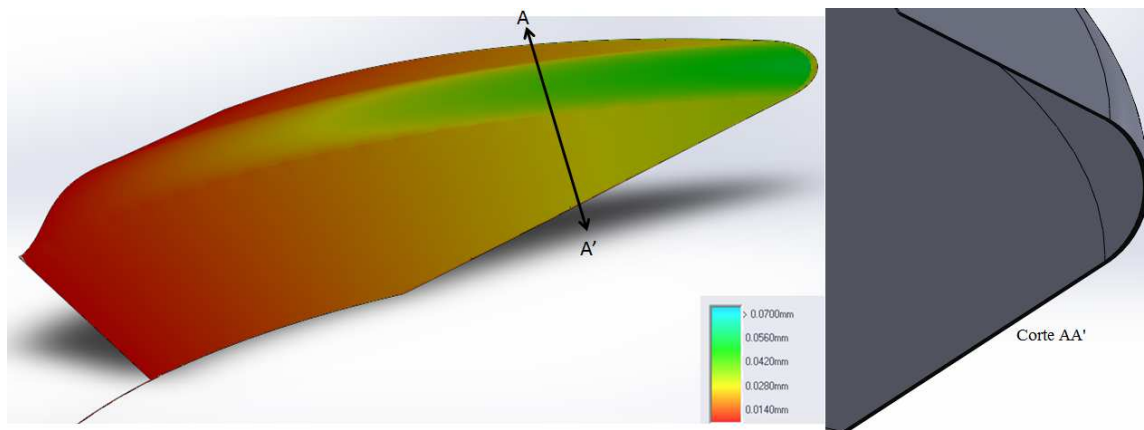


Figura 35: Distribuição da espessura para o fresamento cônico com área básica da seção de corte.

Sendo assim, é justificado o formato que esse inserto realmente possui, tendo a aresta inferior maior que a superior, e tendo um “batente”, que acerta o perfil da rosca anterior. A figura 36 mostra a vista superior, onde validamos a afirmação acima.

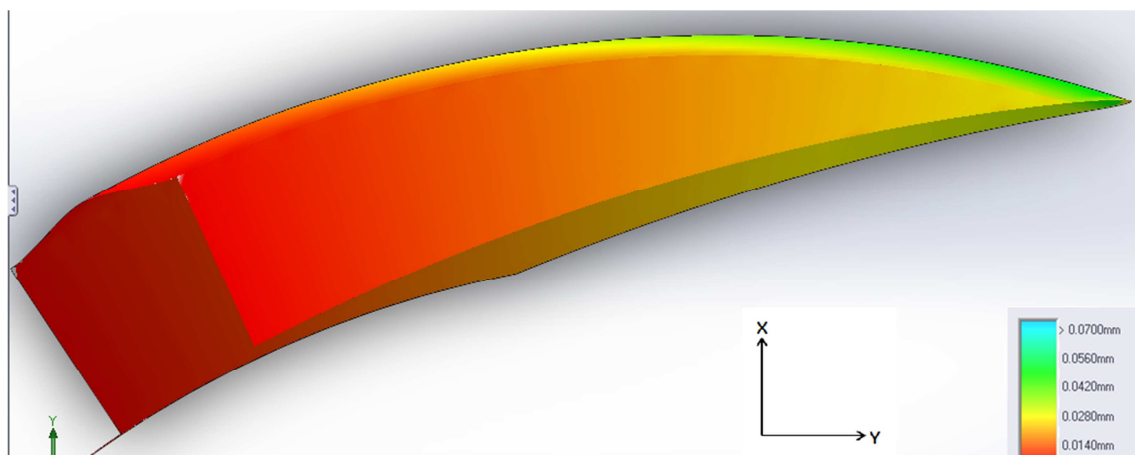


Figura 36: Vista superior do corte realizado para o fresamento cônico

Outro fator a ser lembrado é que, seguindo o caso anterior, a parte inferior é a primeira a entrar em contato com a peça, retirando uma porção maior de material que a superior.

Realizando novamente um corte em uma direção vertical qualquer, é possível observar, como no caso anterior, como varia essa espessura de corte (figura 37). Como esperado, esta possui também uma assimetria em relação ao eixo de simetria da ferramenta.

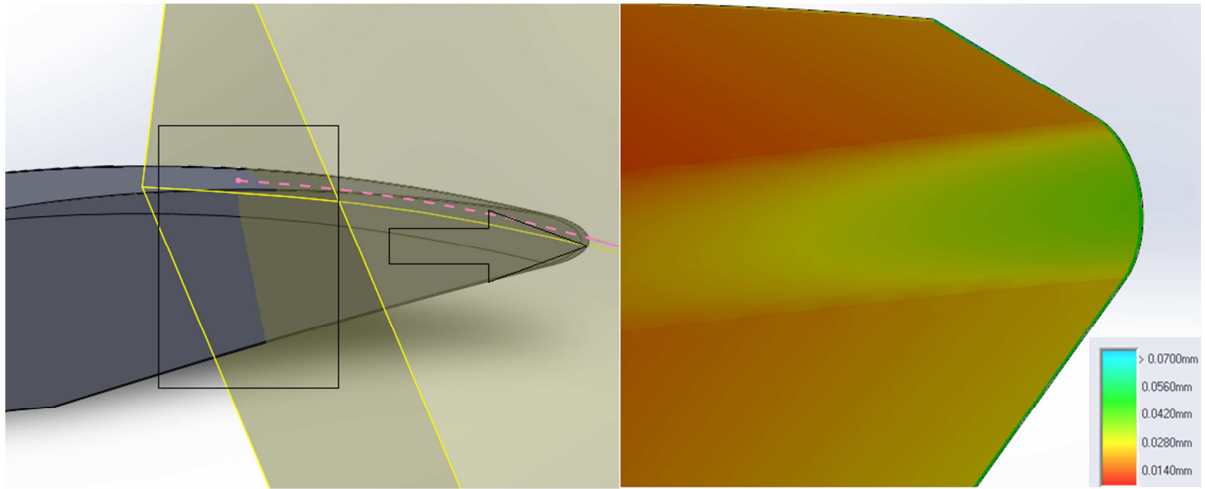


Figura 37: Representação do corte vertical no plano XY, em um ângulo qualquer e distribuição da espessura para o fresamento cônico

Nesse ponto escolhido tem-se uma área de 0,10 mm² e uma espessura máxima de cerca de 0,034 mm. Usando novamente a fórmula para estimarmos a força nesse ponto do corte tem-se:

$$F_c = K_{s1} * t_m^{-Z} * S = 600 * 0,034^{-0,25} * 0,10 = 139,7 \text{ N} \quad (17)$$

Para esse movimento é possível fazer uma comparação com os resultados obtidos por GRIPA (2012) para esses parâmetros: a força aqui encontrada, para esse corte vertical, é um pouco maior que os resultados obtidos por ele. Um fator que pode explicar isso é a simplificação de alguns parâmetros da ferramenta, como ângulos de inclinação.

No caso de realizar um corte seguindo o plano de simetria da ferramenta, se confirma que a maior espessura se encontra próxima a saída da ferramenta, como constatado no caso anterior. Isso pode ser visualizado na figura 38.

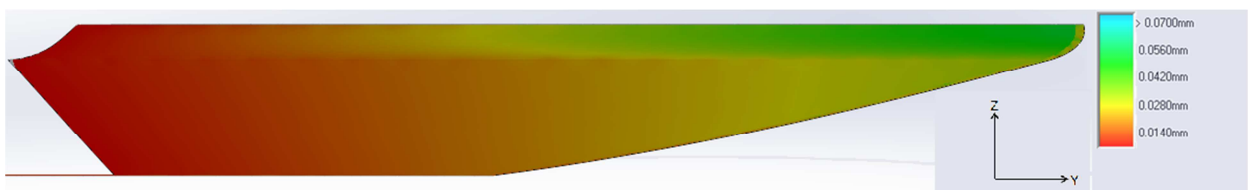


Figura 38: Corte seguindo o eixo de simetria do inserto para o fresamento cônico

3.4.5. Fresamento Realizado em Trajetória Circular com Redução de Raio com Inseto Real com Movimento Vertical

Utilizando agora o perfil real da ferramenta é possível modelar a espessura do cavaco que esta gera. Realizando novamente o modelo é possível observar que o comportamento da espessura de corte é praticamente idêntico ao caso anterior, sendo apenas incluído um novo pedaço dessa aresta, que tem por função básica acertar a crista do dente fabricado na rotação anterior.

A maior espessura de corte atingida novamente se encontra na saída da ferramenta, no ponto mais externo da aresta de corte. A distribuição dessa espessura é mostrada na figura 39.

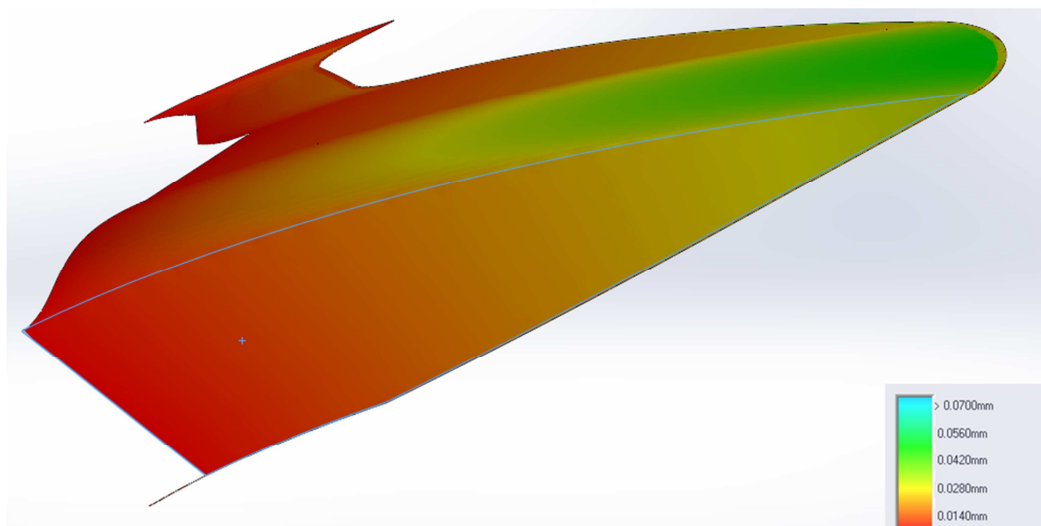


Figura 39: Distribuição da espessura para o fresamento cônico com o perfil real da ferramenta

Realizando um corte em uma direção vertical qualquer é possível observar a mesma assimetria do caso anterior, sendo esta ainda maior por essa aresta de corte ter um formato mais complexo (figura 40).

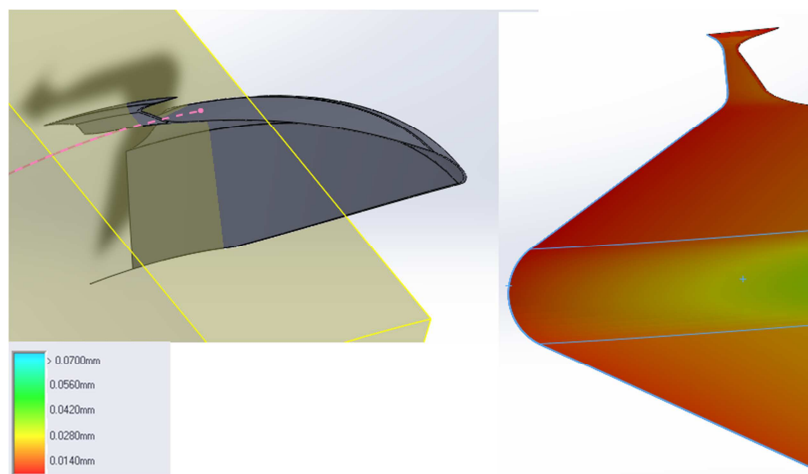


Figura 40: Representação do corte vertical no plano XY, em um ângulo qualquer e distribuição da espessura para o fresamento cônico com a aresta real

Nesse ponto escolhido tem-se uma área de 0,03 mm² e uma espessura máxima de cerca de 0,01 mm. Usando novamente a fórmula para estimarmos a força nesse ponto do corte tem-se:

$$F_c = K_{s1} * t_m^{-Z} * S = 600 * 0,01^{-0,25} * 0,03 = 56,9 \text{ N} \quad (18)$$

Para esse caso, nesse corte vertical, as forças se encontram dentro do observado por GRIPA (2012), que obteve para os mesmos parâmetros uma força resultante máxima próxima a 150 N. Outros cortes poderiam ser feitos e outras forças medidas, para validar a comparação, mas fogem do escopo desse trabalho.

3.5. Comparação dos Resultados

A partir dos resultados obtidos é possível verificar que o modelo aqui apresentado consegue cumprir a tarefa de produzir o perfil da espessura do cavaco de um fresamento de rosca cônica API.

No fresamento linear ocorre a maior variação de espessura de cavaco e conseqüentemente a maior variação das forças de corte. Essa espessura varia de um valor nulo até o máximo, que corresponde ao valor do avanço por dente, 0,07 mm/rot, e volta a ser nulo de novo. A ferramenta fica em contato com a peça por metade do tempo de cada rotação, ou seja, 180°, sendo novamente o maior atingido.

A partir do momento que é considerado o fresamento que tem um movimento circular a variação da espessura de corte apresenta basicamente o formato de uma

gota, com simetria em torno do plano XY. Nesse caso, a espessura de corte máxima encontrada é da ordem de 0,05 mm.

No caso da adição de um avanço na direção -Z, promovendo uma trajetória cilíndrica, é observado uma assimetria de corte entre a aresta superior e a aresta inferior da ferramenta, visto que a inferior entra em contato com a peça primeiro e acaba por cortar uma porção maior de material. A espessura máxima atingida permanece muito parecida a anterior.

No caso do fresamento cônico com inserto sem inclinação em relação ao plano XY, como considerado, é observado um perfil diferente da espessura de corte: a aresta inferior possui uma largura efetiva de corte em contato com a peça maior que a superior, aumentando a variação da distribuição das forças atuantes para cada ponto.

Quando é usado o perfil real da ferramenta para o fresamento cônico a área efetiva de corte aumenta em alguns pontos quando comparados ao perfil teórico, visto que uma nova parte do inserto entra em contato com a peça. Apesar disso, o impacto deste é muito pequeno, visto que ele só entra em contato com a peça em uma pequena porção do corte total.

Excluindo-se o caso inicial do fresamento linear, que tem características próprias muito bem definidas, todos os modelos construídos apresentam características muito parecidas da variação da espessura de cavaco, salvo detalhes. Isso é explicado pelo baixo avanço na direção Z no fresamento cilíndrico e da pequena redução do raio no caso cônico, para cada rotação da ferramenta em torno do seu próprio eixo. Em cálculos mais simples, os quais não necessitem de uma precisão tão acurada de resultados, é possível aproximar os cálculos do fresamento cilíndrico e o do cônico por um fresamento circular no plano com qualidade razoável.

Comparado ao estudo realizado por GRIPA (2012) é possível observar que as profundidades de corte máximas atingidas nas modelagem aqui apresentadas são maiores que as estimadas por ele, sendo a diferença na casa de 0,04 mm no caso linear e de 0,02 nos demais. Maiores estudos comparativos deveriam ser feitos, tanto em relação a modelagem como no experimento para verificar as hipóteses aqui discutidas.

5. Conclusão

A produção de roscas cônicas com perfil de dente API vem crescendo muito nos dias atuais devido, principalmente, às novas descobertas de campos petrolíferos, que impulsionam a indústria voltada à sua prospecção. Sendo assim, a análise aqui realizada se torna mais uma fonte de consulta para esse assunto.

O inserto escolhido para essa análise apresenta assimetria em sua cunha de corte e comprimentos diferentes entre a sua parte superior e inferior, já possuindo o formato requerido a uma rosca API. Somando-se a isso, tem-se sua inclinação quando montado ao porta-ferramenta. Sendo assim, não é um inserto tão simples de modelar, requerendo uma atenção redobrada quanto a seus parâmetros.

Por ter essa geometria característica foi escolhido aproximar esse inserto a um formato triangular teórico, com profundidade de dente semelhante. Essa decisão tornou possível uma melhor comparação entre os fresamentos realizados, melhorando a quantidade de dados e informações colhidas a partir do modelo.

A escolha de começar o estudo por fresamentos mais simples, que possuem resultados comprovados por demais experimentos, se mostrou de grande valia para a validação do modelo e dos resultados obtidos. O modelo aqui apresentado então cumpre com qualidade considerável as premissas propostas.

A ferramenta 3D computacional, apesar de não ser voltada para isso e por possuir problemas referentes à realização de trajetórias mais complexas, se bem operado, consegue modelar com qualidade muito boa a variação da espessura de corte realizada pelo inserto escolhido.

O modelo aqui desenvolvido pode ser usado para outros tipos de insertos e ferramentas, e pode também servir para obter, de maneira relativamente simples, uma estimativa para as forças de corte necessárias a realização de um fresamento.

Comparado aos estudos realizados por FROMENTIN (2010 e 2010B), que modelam a espessura de cavaco em um fresamento de rosca a partir de um conjunto de formulas matemáticas, o presente projeto não consegue atingir a mesma precisão de cálculos. Por outro lado, consegue de maneira simples e acessível estimar a variação dessa espessura. Em relação ao experimento realizado por GRIPA (2012), maiores estudos comparativos necessitam serem feitos para aumentar a qualidade dos dados.

Como sugestão para trabalhos futuros:

- Usar a modelagem aqui apresentada para ferramentas com mais de uma aresta cortante e para arestas com múltiplos cortes.
- Variar a velocidade de avanço da ferramenta e os diâmetros a serem usinados.
- Para cada um dos fresamentos realizados analisar a área do cavaco para diversas posições da ferramenta, comparando-as aos resultados obtidos por GRIPA (2012).

As opções de estudo e teorias são diversas, visto que não há na literatura muitos estudos sobre o assunto.

Referencias Bibliográficas

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, API History. 2013. Disponível em:

<<http://www.api.org/globalitems/globalheaderpages/about-api/api-history.aspx>>.

Acesso em: 5 jan. 2013.

ARAUJO, A.C. *Modelo mecânico de força de usinagem no fresamento de roscas*.

Dissertação

de D.Sc. UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2004.

CIMM. 2013. Base de dados. Disponível em:

<http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/4857-historico#.UH9QjcWHK60>.

Acesso em 10 jan. 2013.

DA MOTA, P. R., Estudo do processo de rosqueamento com macho de corte de metal duro em ferro fundido vermicular. Tese de D.Sc., Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil, 2009.

DINIZ, A. E., MARCONDES, F. C., COPPINI, N. L. Tecnologia da Usinagem dos Metais. 6 ed. São Paulo, Editora Artliber, 2006.

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

ESSEL. A primeira fase da normalização. Essel Eletrônica, 2013 Disponível em: <<http://www.essel.com.br/cursos/material/01/Normalizacao/norma2c.pdf>>. Acesso em: 13 jan. 2012.

EZCAM. Ezcama CAD/CAM. Disponível em:

<http://www.ezcam.com/web/products/help/Express/mill_cycles_extended/thread_milling_cycle.htm> Acesso em: 1 mar. 2013.

FERES, F. —Turbilhoador – precisão total na usinagem de peças roscadas, O Mundo da Usinagem, v. 63, n. 1, pp. 18-22, 2010.

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

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, 2010B.

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, 2010C.

GRIPA, FC. *Análise de Forças no Fresamento de Roscas API*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais) - Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Rio de Janeiro, Rj, Brasil, 2012.

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

NOGUEIRA E SILVA. Processo de Usinagem de roscas. CEFETCE, Ceará, Brasil, 2007. Disponível em: < <http://pt.scribd.com/doc/88649310/Processo-de-Usinagem-de-Roscas>>. Acesso: 8 jan. 2013.

OILFIELDTRASH. Disponível em: <<http://www.oilfieldtrash.com/custom/php/files/1252703762TECHFACT.pdf>>. Acesso em: 18 fev. 2013.

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 24 jan. 2013.

SANDVIK. Sandvik, 2013. Disponível em: <<http://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/>>. Acesso: 10 jan. 2013.

SANTIAGO, JR. Com qual freqüência nós utilizamos um simples parafuso para a finalidade que o mesmo foi concebido? INDÚSTRIAS GERAIS DE PARAFUSOS INGEPAL LTDA, 2013. Disponível em: < <http://www.ingepal.com.br/historia.html>>. Acesso em: 25 jan. 2013.

SOUZA, P. *Usinagem de rosca em osso bovino*. Dissertação D.SC. UFRJ, rio de janeiro, RJ, Brasil, 2010.

SOUZA, A. Processos de Fabricação de por usinagem. Parte 1. Apostila. UFRG, Rio Grande do Sul, Brasil, 2011. Disponível em:

<http://www.chasqueweb.ufrgs.br/~ajsouza/ApostilaUsinagem_Parte1.pdf>. Acesso em: 2 dez. 2012.

STOETERAU, R. *Processos de Usinagem*. São Paulo, 2007. Disponível em: <http://www.lmp.ufsc.br/disciplinas/Stoterau/Aula-01-U-2007-1-introducao.pdf>. Acessado em: 12 dez. 2012

USINAGEM ONLINE. 2009. Disponível em: <<http://www.usinagemonline.com.br/site/lerMaterias.php?intIdMateria=7>>. Acesso em: 8 jan. 2012.