

## *Dissertação de Mestrado*

# **OTIMIZAÇÃO DO FRESAMENTO DE ROSCAS INTERNAS POR INTERPOLAÇÃO HELICOIDAL**

**Igor Lopes de Andrade**

**Natal, fevereiro de 2014**

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**OTIMIZAÇÃO DO FRESAMENTO DE ROSCAS INTERNAS POR  
INTERPOLAÇÃO HELIOIDAL**

IGOR LOPES DE ANDRADE

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de  
MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA  
Sendo aprovada em sua forma final.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Adilson José de Oliveira – Orientador – UFRN

---

Prof. Dr. Adriano Fagali de Souza – Avaliador Externo – UFSC

---

Prof. Dr. Ulisses Borges Solto – Avaliador Interno – UFRN

Aos meus pais e irmãs  
que sempre acreditaram  
na minha capacidade  
e torceram muito por mim.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador, Prof. Adilson José de Oliveira, idealizador do projeto e grande mentor que muito me ajudou a desenvolvê-lo. Sua participação foi fundamental e imprescindível para existência deste trabalho.

Ao Prof. Walter Link, que sempre se mostrou solícito e não mediu esforços para me ajudar nos vários momentos em que precisei de auxílio.

Ao Prof. Luiz Pedro, pelo grande incentivo, empenho e colaboração no desenvolvimento deste projeto.

À toda equipe do LabMan que torceu, se empenhou e contribuiu para a conclusão do meu mestrado: Prof. Anderson, Prof. Ulisses, Prof. Wallace, Prof. Thiago, Prof. Lúcio, Arivaldo, Elmar, Francisco Chavier, João Maria Frazão, Francisco e José dos Santos. A todos os amigos que estão ou estiveram por lá, o meu muito obrigado e a certeza que jamais esquecerei de tudo o que fizeram por mim.

Aos amigos de laboratório Bruno Rocha, José Felipe e Kandice Barros pela grande ajuda na realização dos ensaios e contribuição na pesquisa.

À toda minha família, tios, tias, primos e primas, sem distinção, pelo apoio e incentivo que sempre me deram.

Aos meus amigos André, Francisco Jonas, Klétson, Eduardo César, César Magalhães, Emiliano, Fabian, Claudio e tantos outros que, perto ou longe, sempre me apoiaram e torceram por mim.

À Thalita Arruda, por me apoiar e me aconselhar nos momentos mais difíceis.

À toda equipe do LabMetrol que se empenhou e contribuiu para conclusão do meu mestrado: Henrique, Raiff, Alex, Sanje, Felipe, Breno e Diogo que desde o tempo da graduação, abriu suas portas e me acolheu com todo carinho.

Ao LABMEV, pela realização dos ensaios de MEV e EDS realizados para este trabalho

À Brasimet, pela execução dos tratamentos térmicos nos corpos-de-prova utilizados neste trabalho.

À RODER Ferramentas, pela confecção de ferramentas de corte e porta ferramentas para os ensaios de vida de usinagem.

Aos professores Anderson e Ulisses, pela participação na banca de qualificação, onde geraram importantes contribuições para o melhoramento deste trabalho.

Ao Professor Adriano Fagali, pela contribuição e participação na banca examinadora deste trabalho.

À Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN, pela oportunidade para realização deste mestrado e ao seu Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PPGEM, pela assessoria e paciência.

Ao CNPq pelo suporte como órgão de fomento.

À Petrobras e ao PRH-ANP 14, em especial a Maria e o Prof. Osvaldo, pelo apoio financeiro e contribuições para o melhoramento deste trabalho.

E a todos que, de maneira direta ou indireta, contribuíram para realização deste trabalho.

## Sumário

Lista de Figuras .....	iii
Lista de Tabelas.....	vii
Lista de Equações.....	viii
1 Introdução.....	1
2 Fundamentação Teórica .....	4
2.1 Geometria da Rosca.....	4
2.2 Classificação e ajustes de roscas .....	6
2.3 Medição de roscas internas.....	6
2.4 Usinagem de roscas internas .....	9
2.4.1 Usinagem de roscas internas com macho rígido .....	14
2.4.2 Usinagem de roscas com a técnica de interpolação helicoidal .....	16
2.5 Fresamento de aços temperados e revenidos.....	24
2.6 Desenvolvimentos baseado no conceito de usinagem em altas velocidades....	26
2.7 Ferramentas CAM para suporte à programação da usinagem.....	28
3 Procedimentos Experimentais .....	34
3.1 Máquinas-Ferramenta.....	34
3.2 Ferramentas e sistema de fixação de ferramentas .....	35
3.3 Geometria, material e sistema de fixação dos corpos-de-prova.....	36
3.4 Análise do processo de usinagem.....	41
3.5 Sistema análise da força de usinagem .....	42
3.6 Planejamento experimental .....	43
3.7 Fluxograma do planejamento experimental .....	47
4 Resultados de Discussões.....	48
4.1 Fase experimental 1 – Vida de ferramenta .....	48
4.2 Fase experimental 1 - Desgaste e/ou avarias de ferramentas .....	52
4.3 Fase experimental 1 - Força de usinagem .....	59
4.4 Fase experimental 1 – Considerações parciais .....	68
4.5 Fase experimental 2 – Vida de ferramenta .....	69
4.6 Fase experimental 2 – Desgaste e/ou avarias de ferramentas .....	71
4.7 Fase experimental 2 – Força de usinagem.....	74

4.8 Fase experimental 2 – Considerações parciais .....	79
4.9 Fase experimental 3 – Vida de ferramenta .....	80
4.10 Fase experimental 3 – Desgaste e/ou avarias de ferramentas.....	82
5 Conclusões e sugestões para trabalhos futuros.....	87
6 Referências .....	89
Anexo 1 .....	94
Comportamento das componentes da força de usinagem – Fase experimental 1 ..	94

## Lista de Figuras

Figura 1 – Perfil básico de rosca métrica. ....	5
Figura 2 – Posicionamento de tolerâncias para roscas métricas.....	6
Figura 3 – Medidores de roscas internas e externas. ....	7
Figura 4 – Rosca usinada e laminada. ....	10
Figura 5 – Ferramentas de laminação.....	11
Figura 6 - Relação torque diâmetro do pré-furo com o perfil do filete de rosca. ....	12
Figura 7 - Processo de usinagem “thrilling”.....	13
Figura 8 - Cinemática do processo de roscamento com machos rígidos.....	15
Figura 9 - Operações típicas de fresamento de roscas.....	18
Figura 10 – Configuração de ferramentas para fresamento por interpolação helicoidal.....	19
Figura 11 – Componentes da força de usinagem medidas para ferramenta de múltiplas arestas com $v_c = 85$ m/min. ....	21
Figura 12 - Posicionamento da ferramenta de fresar roscas.....	22
Figura 13 – Comparação do modelo com as forças de corte medidas. ....	24
Figura 14 - Variáveis de influência no processo de HSC.....	27
Figura 15 – Criação da operação de fresamento de roscas internas. ....	29
Figura 16 – Criação da ferramenta de fresamento de roscas internas. ....	30
Figura 17 – Definição dos parâmetros de usinagem no fresamento de roscas internas. ....	30
Figura 18 – Definição da estratégia de usinagem no fresamento de roscas internas – tipo de corte. ....	31
Figura 19 - Definição da estratégia de usinagem no fresamento de roscas internas – tipo de entrada. ....	31

Figura 20 - Definição da estratégia de usinagem no fresamento de roscas internas – número de passes.....	32
Figura 21 – Trajetória da ferramenta do fresamento de roscas cônicas e cilíndrica. ....	33
Figura 22 - Máquina ferramenta utilizada nos experimentos de vida de ferramenta. ....	34
Figura 23 - Máquina-ferramenta utilizada nos experimentos de força de usinagem.....	35
Figura 24 - Ferramentas e porta-ferramentas utilizados nos experimentos.....	36
Figura 25 - Corpo-de-prova para ensaios de vida da ferramenta com roscas M16. ....	37
Figura 26 - Corpo-de-prova para ensaios de vida da ferramenta com roscas M25. ....	38
Figura 27 - Corpo-de-prova para ensaios de força de usinagem com roscas M16.....	39
Figura 28 - Corpo-de-prova para ensaios de força de usinagem com roscas M25.....	39
Figura 29 - Sistema de fixação do corpo-de-prova. ....	41
Figura 30 - Calibradores P-NP para inspeção das roscas M16 e M25. ....	41
Figura 31 - Sistema de análise de desgaste e/ou avaria de arestas de corte. ....	42
Figura 32 - Sistema para aquisição de força de usinagem.....	43
Figura 33 - Procedimento para usinagem da rosca.....	44
Figura 34 – Fluxograma do Planejamento Experimental. ....	47
Figura 35 – Vida de ferramenta em função do número de roscas usinadas e do tempo de usinagem.....	48
Figura 36 – Diagrama de pareto de influência dos fatores e interação dos fatores condição de usinagem, para vida da ferramenta em número de roscas. ....	49
Figura 37 - Superfície de folga da ferramenta de única aresta no sentido axial e radial. ....	53
Figura 38 - Superfície de folga da ferramenta de única aresta no sentido radial e múltiplas arestas no sentido axial. ....	55

Figura 39 - Superfície de folga da ferramenta de múltiplas arestas no sentido radial e única aresta no sentido axial.....	56
Figura 40 - Superfície de folga da ferramenta de múltiplas arestas no sentido radial e axial. .	58
Figura 41 – Forças medidas para ferramenta de aresta única no sentido axial e radial.....	60
Figura 42 – FFT da força de usinagem no eixo x da ferramenta de única aresta no sentido radial e axial.....	61
Figura 43 - Forças medidas para ferramenta de única aresta no sentido radial e múltiplas arestas no sentido axial. ....	63
Figura 44 - Forças medidas para ferramenta de múltiplas arestas no sentido radial e única aresta no sentido axial.....	65
Figura 45 - Forças medidas para ferramenta de múltiplas arestas no sentido radial e axial. ...	67
Figura 46 - Vida de ferramenta em função do número de roscas usinadas e do tempo de usinagem.....	69
Figura 47 - Diagrama de pareto de influência dos fatores e interação dos fatores condição de usinagem, para vida da ferramenta em número de roscas. ....	70
Figura 48 - Superfície de folga da ferramenta de única aresta no sentido axial e radial.....	72
Figura 49 - Superfície de folga da ferramenta de múltiplas arestas no sentido radial e única aresta no sentido axial.....	73
Figura 50 - Forças medidas para ferramenta de aresta única no sentido axial e radial. ....	76
Figura 51 - Forças medidas para ferramenta de múltiplas arestas no sentido radial e única aresta no sentido axial.....	78
Figura 52 - Vida de ferramenta em função do número de roscas usinadas e do tempo de usinagem.....	80
Figura 53 - Diagrama de pareto de influência dos fatores e interação dos fatores condição de usinagem, para vida da ferramenta em número de roscas. ....	81
Figura 54 - Superfície de folga da ferramenta para uma rosca M16 com entrada a 90°. ....	82

Figura 55 - Superfície de folga da ferramenta para uma rosca M16 com entrada a 360°. .....	83
Figura 56 - Superfície de folga da ferramenta para uma rosca M25 com entrada a 90°. .....	84
Figura 57 - Superfície de folga da ferramenta para uma rosca M25 com entrada a 360°. .....	85
Figura 58 - Forças medidas para ferramenta de aresta única no sentido axial e radial para todo ensaio. ....	94
Figura 59 – Forças medidas para ferramenta de única aresta no sentido radial e múltiplas arestas no sentido axial para todo ensaio. ....	95
Figura 60 – Forças medidas para ferramenta de múltiplas arestas no sentido radial e única aresta no sentido axial para todo ensaio. ....	96
Figura 61 – Forças medidas para ferramenta de múltiplas arestas no sentido radial e axial para todo ensaio. ....	97

**Lista de Tabelas**

Tabela 1 – Composição química do material utilizado nos corpos-de-prova.....	40
Tabela 2 – Planejamento fatorial para fase experimental 1.....	46
Tabela 3 – Planejamento fatorial para fase experimental 2.....	46
Tabela 4 – Planejamento fatorial para fase experimental 3.....	46

**Lista de Equações**

Equação 1 .....	4
Equação 2 (ALTINTAS, 2000) .....	62

## **Resumo**

Na usinagem de roscas internas, ferramentas dedicadas, conhecidas como machos rígidos são necessários para cada tipo de perfil e diâmetro, além de reduzidos valores de velocidade de corte quando comparado aos principais processos de usinagem. Esta restrição na velocidade de corte está associada à dificuldade de sincronização da rotação e velocidade de avanço da ferramenta no processo. O fato restringe a flexibilidade e torna os tempos de usinagem longos diante da manufatura de componentes com roscas. Uma alternativa as restrições impostas pelos machos rígidos na usinagem de roscas é o fresamento com a técnica de interpolação helicoidal. A técnica é a fusão de dois movimentos: rotação e interpolação helicoidal. As ferramentas podem ter diferentes configurações: uma única aresta ou múltiplas arestas (no sentido axial, radial ou em ambos). Contudo, o fresamento de roscas com a técnica de interpolação helicoidal é relativamente novo e restritas pesquisas existem sobre o tema, fato que promove desafios para sua ampla aplicação no ambiente de manufatura. O objetivo desta pesquisa é determinar o desempenho dos diferentes tipos de ferramentas no fresamento de roscas com a técnica de interpolação helicoidal em aços endurecidos. Neste sentido, quatro ferramentas com diferentes configurações foram utilizadas para usinagem de roscas em aço AISI 4340 no estado temperado e revenido (40 HRC de dureza). Os resultados mostraram que a utilização do corte concordante possibilitou a usinagem de um maior número de roscas, independentemente do tipo de ferramenta. A utilização do corte discordante causou avaria de lascamento nas arestas de corte, enquanto que o corte concordante promoveu desgaste abrasivo. Outro ponto relevante é que o aumento da relação diâmetro do furo e diâmetro da ferramenta possibilitou incremento da vida da ferramenta.

Palavras-chave: roscamento, fresamento, interpolação helicoidal, estratégia de usinagem, CAD/CAM, aço endurecido.

## **Abstract**

In machining of internal threads, dedicated tools, known as taps, are needed for each profile type, diameter, and low cutting speed values are used when compared to main machining processes. This restriction in the cutting speed is associated with the difficulty of synchronizing the tool's rotation speed and feed velocity in the process. This fact restricts the flexibility and makes machining lead times longer when manufacturing of components with threads is required. An alternative to the constraints imposed by the tap is the thread milling with helical interpolation technique. The technique is the fusion of two movements: rotation and helical interpolation. The tools may have different configurations: a single edge or multiple edges (axial, radial or both). However, thread milling with helical interpolation technique is relatively new and there are limited studies on the subject, a fact which promotes challenges to its wide application in the manufacturing shop floor. The objective of this research is determine the performance of different types of tools in the thread milling with helical interpolation technique using hardened steel workpieces. In this sense, four tool configurations were used for threading milling in AISI 4340 quenched and tempered steel (40 HRC). The results showed that climb cut promoted a greater number of machined threads, regardless of tool configuration. The upcut milling causes chippings in cutting edge, while the climb cutting promotes abrasive wear. Another important point is that increase in hole diameter by tool diameter ratio increases tool lifetime.

Keywords: threading, milling, helical interpolation, machining strategy, CAD/CAM, quenched and tempered steel.

## 1 Introdução

As roscas têm como principais objetivos a fixação de componentes e a transmissão de movimentos. Roscas de fixação têm o objetivo de unir dois ou mais elementos entre si. Este grupo de roscas é utilizado, como por exemplo, em porcas, parafusos e hastes. Por outro lado, as roscas de transmissão de movimentos são utilizadas com o objetivo de transmitir potência e movimentos, transformando-os de giratórios em lineares. Existem diferentes tipos de perfis de dentes nas roscas, entre elas: métrica normal, métrica cônica, whitworth, gás, trapezoidal, dente de serra, edson, etc. Entre as roscas mais utilizadas em elementos de fixação, pode-se citar a rosca de secção triangular métrica ( $60^\circ$ ) ou whitworth ( $55^\circ$ ) em função do maior atrito promovido no contato do conjunto. Essas roscas podem ser internas ou externas e, também, podem ter sentido da hélice direito ou esquerdo. Uma ampla faixa de diâmetros é utilizada (tipicamente entre 1,5 a 300 mm) além de um sistema de tolerância baseado nos padrões ISO (NBR 11701 CB - 206, 1990; NORTON, 2006).

Diversas técnicas estão disponíveis para fabricação de roscas. Roscas internas são geralmente usinadas com uma ferramenta específica chamada macho rígido, que tem a forma da rosca desejada e se parece com um parafuso, mas com ranhuras axiais especiais que permitem a extração do cavaco gerado durante o corte. O processo de usinagem por macho rígido é realizado com limitada rotação da ferramenta em função da necessidade de sincronização da velocidade de corte com a velocidade de avanço. Além disso, para cada tipo, diâmetro, sentido da hélice e classe de tolerância da rosca a ser usinada uma ferramenta adequada é exigida. Outro método de fabricação de roscas internas é a laminação. Ferramentas de aço-rápido e/ou de metal duro, similares aos parafusos, são forçados dentro do furo a ser roscado. Nesse método, o diâmetro inicial do furo é maior que na usinagem por macho rígido, pois o material é deformado para o formato final dos filetes de rosca. Contudo, essa alternativa é aplicada apenas em materiais dúcteis, como por exemplo, aços de baixo carbono, ligas de alumínio, ligas de cobre etc (STEPHENSON e AGAPIOU, 2006).

Observando a flexibilidade como um dos fatores fundamentais para manufatura de roscas de diferentes geometrias, o emprego de ferramentas genéricas é a solução mais adequada para minimizar custos. A capacidade de se adaptar as diferentes especificações técnicas torna uma ferramenta genérica a melhor alternativa. Outras vantagens podem ser em termos de velocidade e de custo de operação, pois os atuais processos utilizam restritas velocidades de corte (em torno de 20 m/min). Este é o caso da usinagem de roscas internas,

que utiliza na maioria das vezes ferramentas dedicadas (machos rígidos), de diferentes perfis e diâmetros para cada situação, e se comparados a processos de usinagem convencionais, apresentam valores de velocidade de corte baixos (LEE, KIM e CHOI, 2003). A técnica de roscamento, os materiais empregados nos machos rígidos e os parâmetros de usinagem sofreram poucas mudanças nas últimas três décadas. Estes fatos demonstram a necessidade de progressão na operação. Deste modo, em função da limitada velocidade de corte e da necessidade de ferramentas dedicadas, a usinagem de peças com diferentes aplicações, dimensões e tolerâncias de roscas demandam longo tempo de operação. Outro inconveniente é a usinagem de materiais que apresentam elevada dureza, as quais não podem ser usinadas com machos rígidos devido aos elevados esforços de corte associados (SMITH, 2008).

Uma alternativa às limitações mencionadas é o fresamento de roscas por meio da técnica de interpolação helicoidal. Essa técnica permite diminuir o número de ferramentas utilizadas em diferentes tipos de rosca, uma vez que uma ferramenta é capaz de usinar vários tipos de passos (dependendo da ferramenta), diâmetros, classe e tipos de roscas, o que torna o processo mais flexível. Por meio dessa técnica também é possível aumentar a velocidade de corte e usinar materiais de elevada dureza. Com o suporte das ferramentas de CAD/CAM o fresamento de roscas por interpolação helicoidal tornou-se viável devido ao desenvolvimento de programação mais complexa para comandos numéricos computadorizados (SMITH, 2008).

Bretas (2009) utilizou a técnica de fresamento de roscas por interpolação helicoidal como alternativa a usinagem de roscas internas por macho rígido no ferro fundido vermicular, utilizando dois tipos de ferramenta de insertos intercambiáveis de metal duro. Fromentin e Poulachon (2010) propuseram uma formulação analítica para análise geométrica da espessura do cavaco no fresamento de roscas por interpolação helicoidal em um único passe, levando em consideração o movimento cinemático da ferramenta, a geometria do perfil da rosca e as condições de corte. Araujo et al. (2006) compararam um modelo analítico de força de usinagem para o fresamento de roscas com os dados experimentais do processo, em um corpo-de-prova de alumínio 6061, utilizando dois tipos de ferramentas helicoidais.

Esta pesquisa propõe contribuir com os avanços científicos no estudo do fresamento de roscas com a técnica de interpolação helicoidal. O objetivo desse trabalho é determinar o desempenho de ferramentas de aresta única e múltiplas arestas nos fresamento de roscas internas com técnica de interpolação helicoidal, em aços temperados e revenidos.

Como objetivos específicos têm-se:

- determinar o desempenho do tipo da ferramenta na quantidade de roscas usinadas, até atingir um determinado valor de desgaste e/ou avaria;
- determinar a influência do tipo de corte na quantidade de roscas usinadas e nos mecanismos de desgaste e avarias na(s) aresta(s) de corte;
- determinar o comportamento da força de usinagem para cada tipo de ferramenta;
- determinar o mecanismo de desgaste e/ou avaria predominante.

## 2 Fundamentação Teórica

A fundamentação teórica tem o objetivo de discorrer sobre as pesquisas relevantes à usinagem de roscas internas, principalmente em aços temperados e revenidos. De uma forma abrangente inicia com uma abordagem geométrica e dos processos de manufatura. Posteriormente, analisa as pesquisas envolvidas com as técnicas de fresamento por interpolação helicoidal, usinagem em altas velocidades, dando suporte para o entendimento dos fenômenos envolvidos no processo.

### 2.1 Geometria da Rosca

Segundo a norma NBR 5876 (1988), as roscas são definidas por uma projeção contínua dos filetes helicoidais de seções uniformes em uma superfície cilíndrica. Cada ponto na rosca segue sua própria hélice. Todas as hélices tem um eixo comum, ou seja, o eixo da rosca; e devem ter o mesmo passo, podendo ser interna, quando é formada na superfície interna do cilindro; e externa, quando é formada na superfície externa do cilindro. Outra variável é seu sentido. A rosca pode ser direita, quando é segue no sentido horário; e esquerda, quando é segue no sentido anti-horário. As roscas podem ser divididas, quanto à aplicação, em elementos de fixação ou transmissores de movimento.

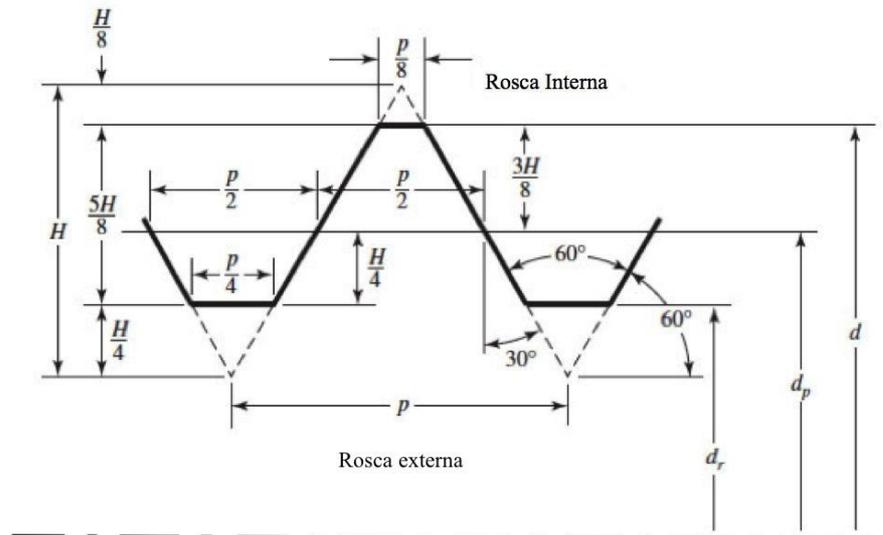
Em função dos diferentes perfis de filete na hélice (triângulo, trapézio, retângulo, semicírculo) surgem os tipos de roscas mais conhecidos: métrica normal, métrica cônica, whitworth, trapezoidal, dente de serra, edson, etc. Dentre essas roscas, as de uma entrada, e com seção transversal triangular com ângulo de 60° ou 55°, são as mais utilizadas em construção de máquinas, denominadas roscas métricas e whitworth, respectivamente. Essas roscas são empregadas como elementos de fixação devido ao maior atrito promovido entre o contato do conjunto (NIEMANN, 1971).

A figura 1 e a equação 1 mostram informações sobre a geometria de um perfil básico de uma rosca métrica assim como caracteres que representam seus parâmetros básicos de construção. Dentre eles pode-se observar o diâmetro maior ( $d$ ), diâmetro menor ( $d_r$ ), diâmetro efetivo ( $d_p$ ), passo ( $p$ ) e altura da rosca ( $H$ ). Vale ressaltar que o valor de  $H$  é dado pela equação 1 (BUDYNAS e NISBETT, 2010).

$$H = \frac{\sqrt{3}}{2} p$$

**Equação 1**

**Figura 1 – Perfil básico de rosca métrica.**



**Adaptado de BUDYNAS e NISBETT (2010).**

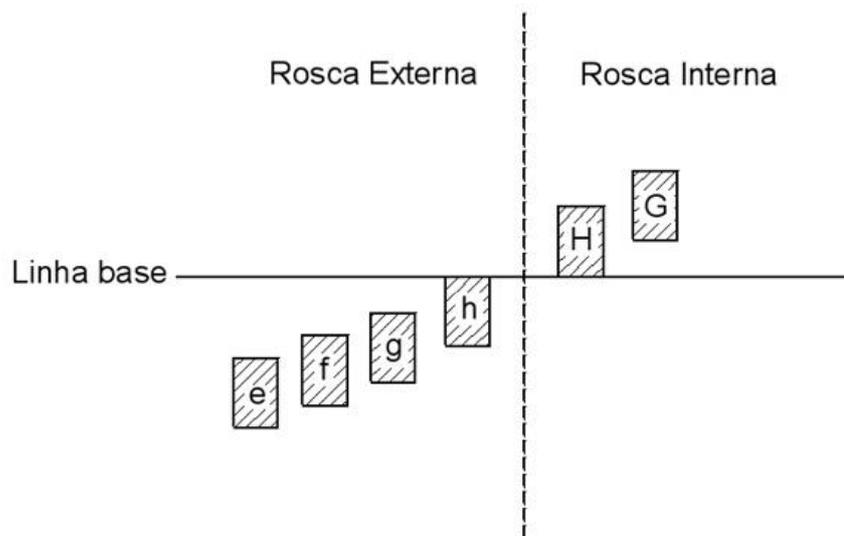
Baseado na figura 1, as cinco dimensões mais importantes de uma rosca, que também são aquelas geralmente medidas para determinar o tamanho nominal e as condições dimensionais de uma componente roscado, são (FARAGO e CURTIS, 1994):

- Passo (p) - É a distância, medida paralelamente ao eixo do elemento em questão, entre pontos correspondentes dos perfis de dente rosca adjacentes.
- Diâmetro efetivo (d<sub>p</sub>) - Um diâmetro teórico entre o diâmetro maior (d) e o diâmetro menor (d<sub>r</sub>).
- Ângulo de flanco (α) - Expressa a inclinação do flanco do perfil da rosca, medida a partir de um plano perpendicular ao eixo da rosca.
- Diâmetro maior (d) – Em uma rosca cilíndrica, é o diâmetro de um cilindro imaginário que tangencia a crista do perfil de uma rosca externa ou a raiz de uma rosca interna.
- Diâmetro menor (d<sub>r</sub>) – Em uma rosca cilíndrica, é o diâmetro de um cilindro imaginário que tangencia a raiz do perfil de uma rosca externa ou a crista de uma rosca interna.

## 2.2 Classificação e ajustes de roscas

Uma zona de tolerância deve ser especificada, tanto em grau de tolerância quanto em posição em relação ao tamanho da base do encaixe da qual faz parte. A natureza de um ajuste é dependente tanto as magnitudes da tolerância e as posições das zonas de tolerância para os dois membros (rosca interna e rosca externa). No sistema de rosca métrica ISO, os desvios fundamentais são designados por letras, maiúsculas para roscas internas e minúsculas para roscas externas. As magnitudes das zonas de tolerância são projetadas por graus de tolerância (6 a 8). A combinação de um grau de tolerância (número) e desvio fundamental (para eixos: e, f, g, h; e para furos: G e H) forma uma designação da classe de tolerância, por exemplo, "6g" (AGOSTINHO; RODRIGUES e LIRANI, 1977). A figura 2 mostra a posição de tolerâncias para roscas métricas.

**Figura 2 – Posicionamento de tolerâncias para roscas métricas.**



**Adaptado de NBR ISO - 965-1(2004).**

Os graus de tolerância e desvios fundamentais para roscas externas são designados 8g, 6g e 4h e as de roscas internas são designados 7H, 6H de e 5H. Alguns exemplos de associação de classe e posição de tolerância são: rosca interna 5H e rosca externa 4h é conhecida como ajuste "fino"; rosca interna 6H e rosca externa 6g um ajuste "médio", e rosca interna 7H com rosca externa 8g um ajuste "grosseiro" (OBERG et al., 2004).

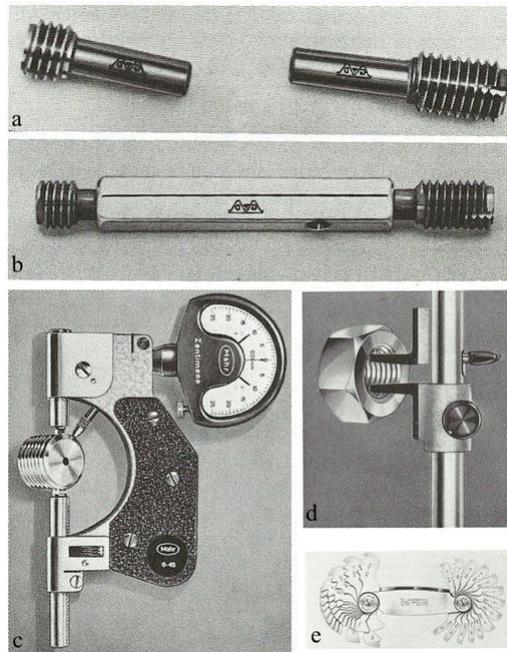
## 2.3 Medição de roscas internas

Informações sobre os métodos de medição e inspeção de roscas são escassas na literatura e a principal fonte desta revisão bibliográfica é Farago e Curtis (1994).

Fundamentalmente, a medição de roscas é feita para determinar se as dimensões inspecionadas estão de acordo com os limites prescritos. A ferramenta mais usada para esse processo de inspeção é basicamente, um calibrador sólido de rosca, que fisicamente incorpora os limites físicos inversos, de dimensões específicas da rosca a ser inspecionada.

A figura 3 ilustra os principais instrumentos de medição de parâmetros de roscas mais comuns na indústria.

**Figura 3 – Medidores de roscas internas e externas.**



**Adaptado de FARAGO e CURTIS (1994).**

Em calibres de rosca projetados para medição do limite máximo ou mínimo de material, como por exemplo, os calibradores PASSA ou NÃO PASSA, ilustrados na figura 3a e figura 3b, geralmente é medida uma dimensão ou um conjunto de dimensões que são considerados parâmetros críticos durante as solicitações realizadas pelo componente roscado. Na figura 3c, é ilustrado um instrumento que pode especificar os limites inferior e superior da rosca externa, gerando um campo aceitável de dimensões dos parâmetros medidos. De forma similar, a figura 3d mostra o equipamento utilizado para a análise de rosca interna. Finalmente a figura 3e mostra um pente de rosca o qual é utilizado para uma análise preliminar do perfil da rosca e do passo.

Por outro lado, calibres que representam o limite mínimo de material de dimensões específicas, não devem aceitar o produto fabricado com a rosca correspondente à dimensão

nominal. Esse tipo de montagem revela que o tamanho real da dimensão da parte pertinente é na superfície limite de menos material do que o exigido no mínimo, isto é, um calibrador é muito pequeno ou o furo é demasiado grande.

Hunsicker et al. (1994) criaram um sistema de iluminação por fibra óptica e captura de imagem por câmera de baixo custo, elaborando um método óptico de medição e inspeção de roscas. Através de uma peça roscada padrão, todo o sistema é calibrado (correção de luminosidade, distorção e resolução), e os diâmetros (maior e menor), o passo da rosca são efetivamente medidos por análise da sombra projetada. Já o diâmetro primitivo, de importância consideravelmente alta, é calculado pela linha média obtida da rosca teórica gerada por um modelo matemático. No entanto, as limitações de resolução, contraste, distorções ópticas, aquisição de imagens, restringem o método para ser utilizado apenas em roscas externas.

Merkac e Acko (2010) propuseram uma técnica mais elaborada de medição do diâmetro primitivo de roscas. Um anel roscado é calibrado através do escaneamento do perfil da rosca, e o seu diâmetro primitivo é calculado por uma técnica de ajuste (método dos mínimos quadrados). Na pesquisa, a técnica mencionada é comparada a dois métodos de calibração convencionais. O primeiro método é executado em uma máquina de medir linear 1D com duas esferas padrão; o segundo método é realizado em uma máquina de medir por coordenadas (CMM), também com duas esferas padrão. Os resultados evidenciam que, dependendo das exigências nas tolerâncias, os métodos tradicionais (medição em máquina linear e em CMM) são muito satisfatórios para anéis de uso industrial, além das informações objetivas em relação ao método de varredura óptica não serem claras no trabalho. Além disso, a pesquisa está mais direcionada a calibração dos anéis roscados do que medir a capacidade ou a qualidade de um processo de usinagem.

Araujo e Silveira (2004), Araujo et al. (2006), Bezerra (2003), Bretas (2009), Lira (2000) e Mota (2006) estudaram o processo de roscamento em diversos materiais. No entanto, apenas Bretas (2009) descreve métodos para avaliar os parâmetros geométricos durante os ensaios. Bretas (2009) utilizou um calibre PASSA ou NÃO-PASSA classe H6. As demais pesquisas evidenciam um interesse apenas na viabilidade do que entender a capacidade real do processo. Desta forma, deixa para pesquisa futuras a análise da capacidade real de processo.

## 2.4 Usinagem de roscas internas

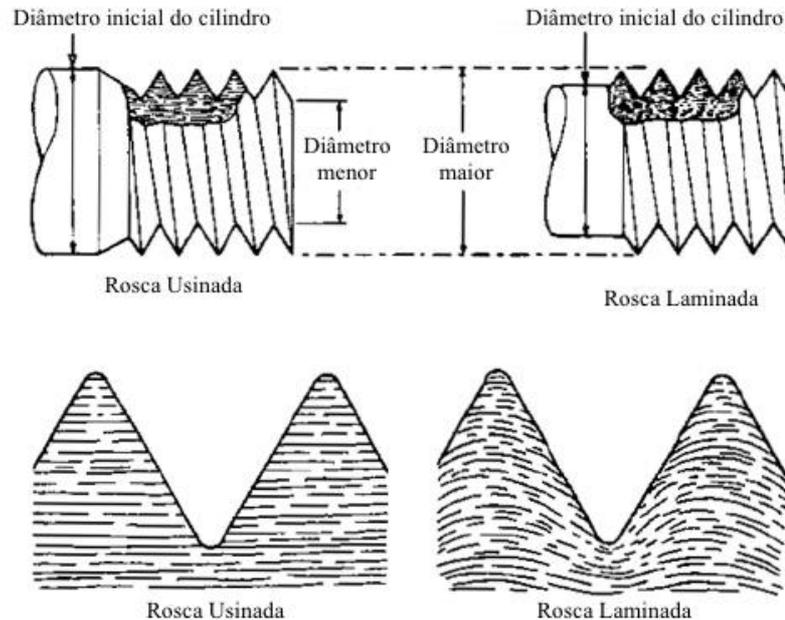
Segundo Ferraresi (1977), a operação de roscamento (ou rosqueamento) é definida como um processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de filetes, por meio da abertura de um ou vários sulcos helicoidais de passo uniforme, em superfícies cilíndricas ou cônicas de revolução. Por meio de uma grande variedade de processos pode-se manufacturar roscas, alguns deles são:

- Usinagem por torneamento ou fresamento (ambos com ferramentas de única ou múltipla aresta);
- Usinagem com ferramentas rígidas – macho rígido ou cossinete;
- Ferramentas laminadoras;
- Fundição e injeção;

Processos que envolvem a utilização de machos rígidos, fresas integrais, ferramentas de única e de múltipla aresta de corte para fabricação de roscas são os processos mais comuns para roscas internas. A escolha do melhor processo está diretamente associada à aplicação, ou seja, necessidades como elemento de transmissão ou de fixação, grau de precisão dimensional, geometria e principalmente o material a ser usinado (STEPHENSON e AGAPIOU, 2006). Um segundo fator é a quantidade de componentes a ser produzida em função da viabilidade econômica para ferramentas dedicadas ou da necessidade de ferramentas genéricas para uma gama de roscas.

Especificamente na manufatura de roscas internas, é possível utilizar uma variedade de ferramentas e de processos. No entanto, a maioria dos processos necessita de uma furação prévia ao processo de roscamento. Em seguida, dependendo das alternativas, a ferramenta pode retirar material ou deformá-lo no formato dos filetes de rosca. O processo de laminação de roscas em furos somente pode ser aplicado aos materiais dúcteis, como aços de baixa liga, aços inoxidáveis austeníticos, ligas de alumínio, etc. Já para materiais de elevada dureza (normalmente acima de 35 HRC), como é caso dos aços temperados e revenidos, a laminação não é uma alternativa exequível (STEPHENSON e AGAPIOU, 2006). Assim, as alternativas de usinagem com macho rígido, com ferramentas de fresamento (de única e de múltiplas arestas) devem ser consideradas. A figura 4 mostra a principal diferença entre a rosca laminada e a rosca usinada.

**Figura 4 – Rosca usinada e laminada.**



**Adaptado de KALPAKJIAN (1984).**

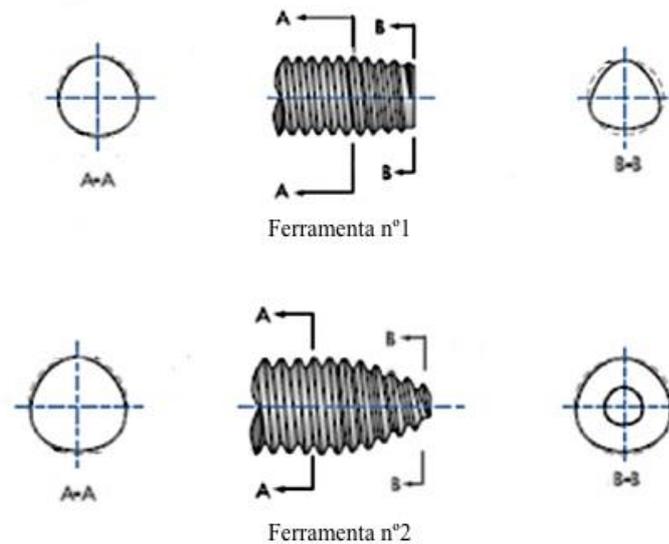
Conforme a figura 4, a rosca usinada mostra descontinuidade das fibras do material devido à retirada do material da barra inicial provocando, em alguns casos, até microtrincas. Por outro lado, na rosca laminada, as fibras são recondicionadas ao longo da peça, ocasionado pela conformação do material que geralmente resulta em uma maior resistência mecânica dos filetes de rosca (KALPAKJIAN, 1984).

O processo de fabricação de roscas por laminação evita operações de acabamento, necessária para alguns métodos tradicionais, e problemas com saída de cavaco encontrados em operações de usinagem (SMITH, 2008). Em comparação com machos rígidos, os laminadores tem grande eficácia, maior resistência, maior vida útil e permitem maior velocidade no processo de fabricação de roscas internas de pequeno diâmetro. No entanto, restrições em relação ao passo, o qual normalmente é inferior a 1,75 mm; e também a relação entre a profundidade e o diâmetro limita o processo (IVANOV e KIROV, 1997).

Outro ponto crítico para laminação de roscas é o diâmetro do pré-furo. Stéphan, Mathurin e Guillot (2012) estudaram o processo de laminação de roscas em dos tipos de material: uma liga de alumínio (liga AGS 6060) e um aço estrutural (S 235) para uma rosca M8 x 1,25 mm, ambos em chapas com espessuras de 5 mm e 8 mm, sob uma rotação no intervalo de 30 rpm a 360 rpm, o que promovia uma velocidade periférica de conformação

entre 0,75 m/min a 9,05 m/min. O objetivo foi descrever modelos analíticos exclusivamente para aquele modelo experimental, baseado em dois tipos de ferramentas foram utilizados como ilustra a figura 5.

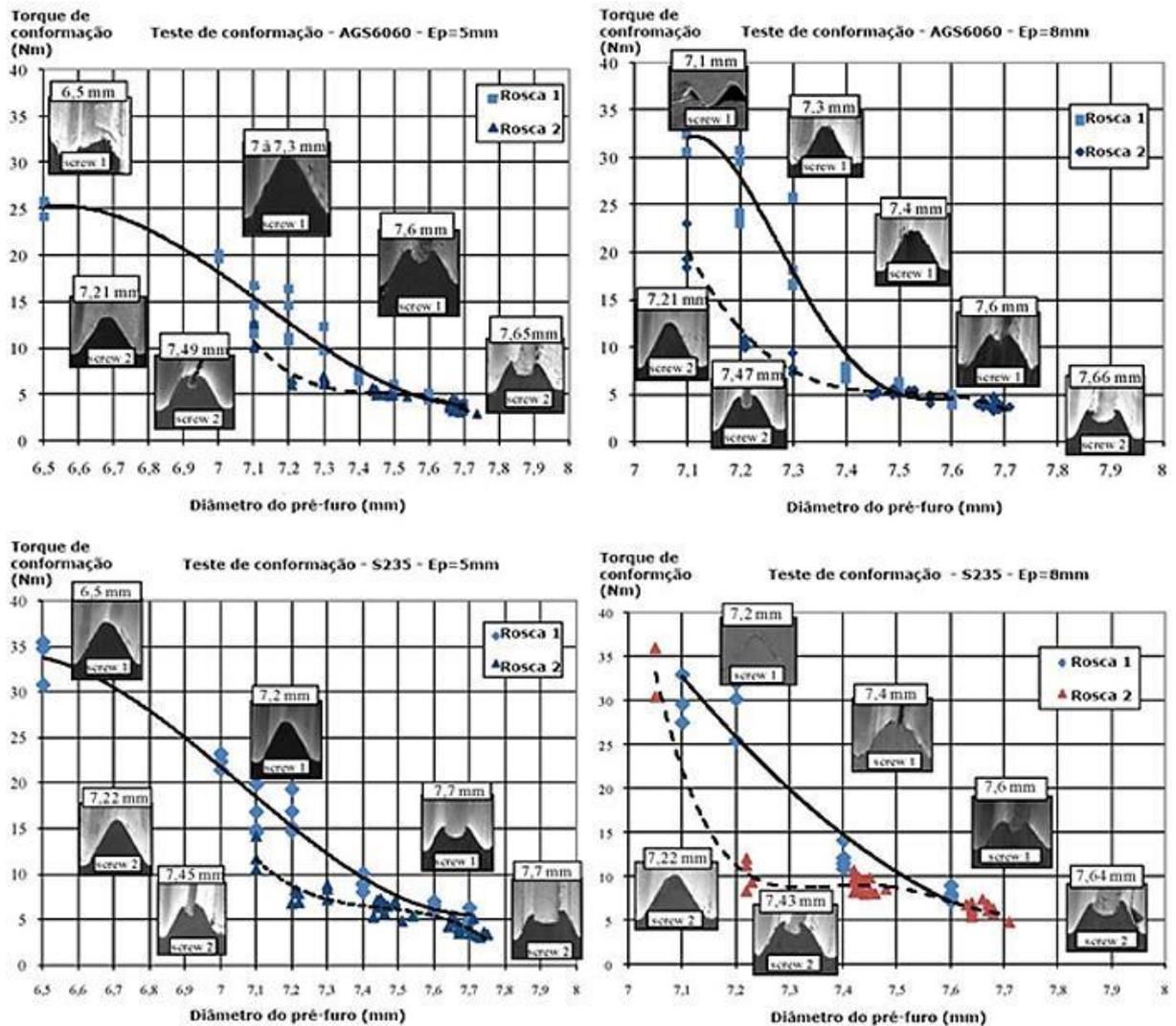
**Figura 5 – Ferramentas de laminação.**



**Adaptado de STÉPHAN, MATHURIN e GUILLOT (2012).**

A ferramenta nº 1 tinha um segmento parcial em forma de cone, enquanto que a ferramenta nº 2 tinha um perfil esférico cônico. Segundo as imagens de micrografia dos dois materiais usinados, as roscas eram completamente formadas para um diâmetro de pré-furo menor que 7,4 mm e incompletamente formadas para diâmetros de pré-furo maiores de 7,4 mm. Para a liga de alumínio AGS 6060, os filetes de rosca se desprendiam da rosca conformada em pré-furos menores que 7,4 mm, especialmente em furos mais profundos. Portanto, os resultados sugerem não escolher esse tipo de processo na manufatura de roscas com diâmetro do pré-furo inferior a 7,4 mm. Na liga de aço S 235, ainda segundo os autores, observou-se um aumento considerável de temperatura do processo em pré-furos com diâmetro inferior a 7,2 mm, no entanto, a temperatura local não foi medida. Variações inadequadas no diâmetro da rosca geraram conformação defeituosa dos filetes comprometendo a resistência mecânica. A figura 6 relaciona o diâmetro do pré-furo e o torque necessário para realizar a laminação das roscas ao formato do perfil dos filetes obtidos.

Figura 6 - Relação torque diâmetro do pré-furo com o perfil do filete de rosca.



Adaptado de STÉPHAN, MATHURIN e GUILLOT (2012).

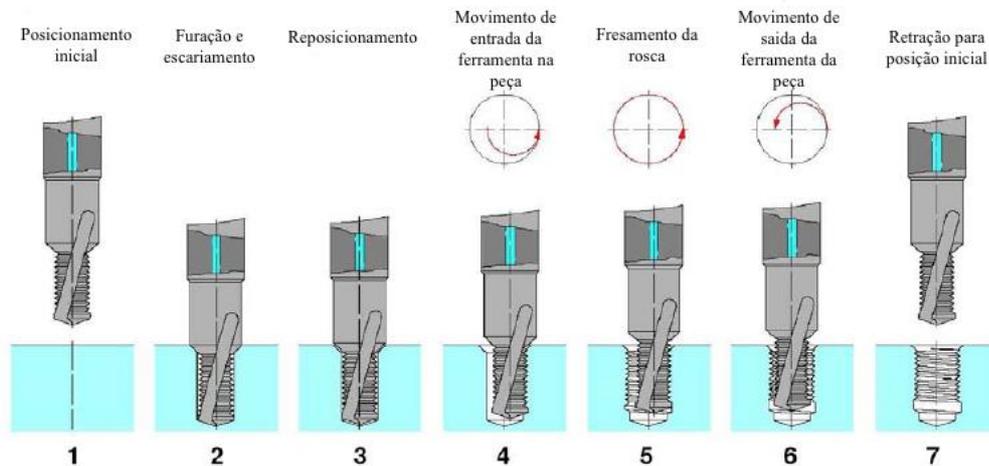
A figura 6 mostra que as curvas podem ser divididas em duas zonas: a primeira corresponde o local em que a taxa de redução do torque é muito alta enquanto o diâmetro do furo aumenta. A segunda zona é caracterizada quando os diâmetros dos furos continuam a aumentar chegando a um ponto em que a taxa de redução do torque diminui lentamente, dependendo dos parâmetros de entrada. Os resultados confirmam que o diâmetro do pré-furo, o tipo de material, e a espessura das chapas são os fatores que mais influenciam o processo de conformação de rosca. A ferramenta nº2 provou ser a mais interessante se o objetivo no processo for reduzir o torque máximo.

O processo de roscamento por machos rígidos também não difere, do ponto de vista da necessidade de controle do diâmetro dos pré-furos, dos laminadores. Segundo Müller e Soto (1999), a falta de controle no diâmetro do pré-furo pode ocasionar um desgaste

premature da aresta de corte da ferramenta, quebra da ferramenta, causando o descarte da peça usinada, além da inadequada formação da geometria dos filetes. Esses fatores também ocasionam comprometimento da rosca fabricada além de problemas no conjunto de fixação.

O fresamento de roscas também vem sendo usado em pequenos diâmetros com introdução da combinação dos movimentos de furação e fresamento do perfil da rosca, em uma operação denominada em inglês de “thrilling” ou furação/fresamento de rosca. A combinação de operações pode ser melhor compreendida com a ilustração da figura 7, a qual mostra cada passo do processo.

**Figura 7 - Processo de usinagem “thrilling”.**



**Adaptado de SMITH (2008).**

O processo de usinagem “thrilling” pode ser dividido em sete etapas:

1. A primeira fase compreende o posicionamento da ferramenta no topo da peça;
2. A ferramenta faz movimento axial para determinar a profundidade necessária do furo e caso seja necessário, um chanfro na entrada;
3. A ferramenta é paralisada para futura sincronização de movimento, mas ainda na profundidade dos filetes;
4. Na mesma coordenada vertical, a ferramenta realiza uma interpolação helicoidal ascendente, até atingir a profundidade final de corte radial;
5. Em seguida, na quarta fase, a ferramenta é movida para cima a uma dada taxa de avanço de um modo helicoidal até completar todas as revoluções necessárias. O número de

filetes gerados em uma revolução corresponde ao número de segmentos presentes na ferramenta. Se a geração dos filetes não for conseguida em uma única revolução, os passos 2 – 3 são repetidos;

6. Uma vez que os fios são gerados, a ferramenta se move para o centro do furo;

7. Finalmente, a ferramenta é retirada do furo.

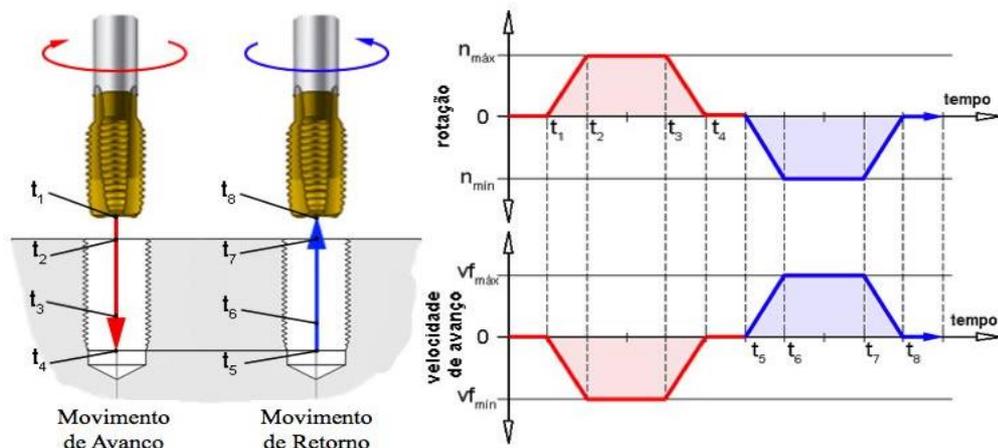
#### **2.4.1 Usinagem de roscas internas com macho rígido**

Machos de corte são ferramentas de múltiplos cortes específicas para execução de roscas internas, podendo ser utilizadas tanto manualmente quanto em máquinas como, furadeiras, tornos, centros de usinagem e rosqueadeiras. Em relação ao sistema de fixação, estas ferramentas podem ser fixas por desandadores, no caso do processo manual, ou em mandris rígidos ou flutuantes, no caso de máquinas (FERRARESI, 1977; SMITH, 2008).

O processo de usinagem de roscas internas utilizando machos rígidos é um dos mais utilizados na indústria. O roscamento interno com macho rígido de corte é classificado como um processo de corte contínuo, e geralmente é uma das últimas operações de manufatura do produto ou da peça, o que ocasiona uma operação em um componente de alto valor agregado (MÜLLER; SOTO, 1999). Segundo Bezerra (2003) e Mota (2009), é um processo de alta complexidade devido à dificuldade em sincronizar os movimentos de rotação e avanço na ferramenta.

A figura 8 mostra a cinemática do processo de roscamento com machos rígidos.

**Figura 8 - Cinemática do processo de roscamento com machos rígidos.**



**Adaptado de AHN et al. (2003).**

De acordo com a figura 8, nesse tipo de processo e para esse tipo de ferramenta, existem duas fases. A primeira, de corte (movimento de avanço), e a segunda, um movimento de retorno. Além disso, em conjunto com o movimento linear deve haver também um movimento angular sincronizado.

Ahn et al. (2003) estudaram o roscamento com altas velocidades utilizando machos M3 de aço-rápido em liga de alumínio (liga 7075). As velocidades de corte aplicadas foram de 19, 75 e 94 m/min. Nota-se que os valores de velocidade de corte são conservadores diante da usinagem de ligas de alumínio, mas em função das rotações necessárias (2000, 8000 e 10000 rpm, respectivamente), a sincronização da rotação com o movimento axial torna-se uma tarefa difícil. Os resultados demonstraram elevados valores de torque na velocidade de corte de 94 m/min quando comparado às demais velocidades. Os elevados valores de torque, junto às dificuldades de sincronização diante do aumento da velocidade de corte, inviabilizaram o processo de roscamento em função de quebras da ferramenta.

O torque necessário para esse tipo de usinagem de roscas depende diretamente de fatores como, material a ser usinado, modelo da ferramenta, comprimento da rosca, método de lubrificação, além do diâmetro de tolerância do pré-furo. Alterações na geometria da ferramenta ou nos parâmetros do processo promovem expressivas mudanças no torque necessário. E esses valores excessivos no torque são a principal causa de problemas no roscamento com machos rígidos (AGAPIOU, 1994).

Uma parcela significativa das pesquisas sobre o processo de roscamento com machos rígidos são em ferro fundido cinzento. Um dos motivos para utilização do referido material nas pesquisas é a ampla utilização em peças do segmento automotivo e agrícola (blocos de motor, transmissões, carcaças para eixos) que contém inúmeras roscas para posteriores operações de montagem. Mota (2006) estudou o comportamento de ferramentas de aço rápido (M6 x 1 mm) no processo de roscamento interno, utilizando macho rígido, em velocidades de corte de 10, 37.5, 75 m/min no ferro fundido cinzento, com condições isenta de fluido e com Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL). Foram usinadas várias roscas com três tipos de materiais para machos de corte: HSS (aço rápido), HSS-E (aço-rápido com 3% de vanádio) e HSS- PM (aço-rápido obtido pela metalurgia do pó). Também observou-se que a única condição de corte que conseguiu atingir o limite de 1000 roscas foi quando utilizou uma ferramenta de HSS-PM revestida com revestida com TiN/TiAlN e com velocidade de corte em 37,5 m/min. Nas demais condições, os testes foram encerrados antes de se atingir 1000 roscas, pois a qualidade geométrica das mesmas foi reprovada pela análise com o calibre passa-não-passa. A exceção foi a ferramenta HSS-E revestida com TiN/TiAlN utilizada com 75 m/min, que falhou catastróficamente. A pesquisa evidenciou como restritos valores de velocidade de corte devem ser utilizados nesta operação quando comparado aos demais processos de usinagem.

Ainda segundo Mota (2006), outro fator extremamente significativo para o processo de usinagem com macho rígido é a necessidade de uma maior distância entre o posicionamento da ferramenta e a superfície da peça antes do início do ciclo de usinagem, apesar da pesquisa não mencionar valores. O objetivo desta distância é sincronizar a velocidade de corte com a velocidade de avanço, principalmente com  $v_c = 75$  m/min, antes do início da usinagem. Esta conclusão fundamenta-se na dificuldade de sincronismo da rotação com o movimento axial da ferramenta.

#### **2.4.2 Usinagem de roscas com a técnica de interpolação helicoidal**

Do ponto de vista da flexibilidade de processos, o roscamento com machos rígidos institui a necessidade de trocas de ferramentas em componentes a cada diferente diâmetro, passo, tipo de tolerância das roscas, número de entradas e sentido da hélice. Conforme as normas NBR ISO 724 (2005) e NBR ISO 965-1 (2004), uma rosca interna M20 pode ter quatro valores de passo (2,5; 2,0; 1,5 e 1,0 mm) e dois graus de tolerância (G e H). O impacto que esses diferentes passos e tipos de tolerância de uma rosca M20 causariam, era a

necessidade da presença de oito machos rígidos distintos para usinar as alternativas da rosca mencionada. Considerando os diferentes diâmetros de roscas necessários em um ambiente de manufatura ou de manutenção, a opção da empresa é normalmente restringir as opções de passos e de tolerâncias com o objetivo de minimizar os gastos com ferramenta. Como resultado, prejudica-se a flexibilidade de projeto em função de restrições impostas pela utilização de um tipo de ferramenta no ambiente de manufatura.

Outro limitante à flexibilidade do processo diante do roscamento com machos rígidos é a usinagem de componentes de aço com dureza superior a 40 HRC (conhecido como aços endurecidos, após tratamentos térmicos de têmpera e revenimento). Esta situação é típica na indústria de moldes e matrizes e de manutenção. Portanto, a utilização de uma técnica que possibilite a usinagem de roscas em materiais com dureza superior a 40 HRC proporcionará um incremento considerável na competitividade para empresas do referido segmento.

Uma alternativa às restrições provenientes dos machos rígidos na usinagem de roscas internas é o fresamento de roscas com a técnica de interpolação helicoidal. A técnica consiste da união de dois movimentos: rotação e interpolação helicoidal. Com esta técnica, o corte passa de corte contínuo (utilização de machos rígidos) para corte interrompido. A alteração de corte contínuo para interrompido promovem algumas vantagens:

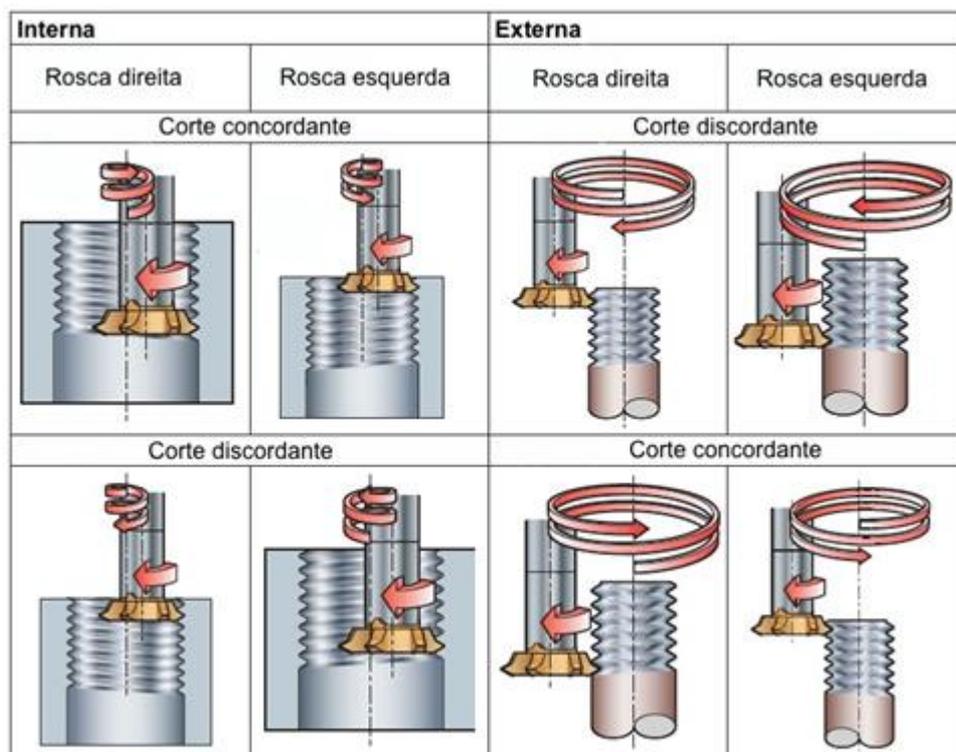
- a) o restrito comprimento de contato ferramenta-peça promove cavacos curtos, de fácil retirada do furo;
- b) menores temperaturas são alcançadas na aresta de corte, o que possibilita ausência de fluido de corte e aumento na velocidade de corte;
- c) como não há mais a necessidade de sincronização do movimento de rotação com o de avanço axial, associado ao restrito comprimento de contato ferramenta-peça, materiais com dureza superior a 40 HRC podem ser usinados com ferramentas de metal duro, similar ao conceito de Usinagem com Altas Velocidades.

Enquanto a usinagem por macho rígido requer uma ferramenta específica para cada diâmetro e passo da rosca a ser usinada, a técnica de fresamento por interpolação helicoidal pode produzir roscas internas de diversos diâmetros, passos, tolerâncias e sentido da hélice com uma única ferramenta (DEGARMO; BLACK; KOHSER, 1999). Essa técnica de fresamento permite maior velocidade de corte em comparação ao processo de usinagem com macho rígido, além de poder ser adaptada para usinagem de materiais de baixa usinabilidade

(FROMENTIN; POULACHON, 2010). As ferramentas de fresamento por interpolação helicoidal podem usinar roscas internas bem maiores que o diâmetro da ferramenta, além de permitirem a manufatura de roscas internas e externas tanto cilíndricas e como cônicas (ARAUJO et al., 2006).

Para o fresamento de uma rosca com a técnica de interpolação helicoidal, utiliza-se uma ferramenta com o perfil da rosca necessária e de diâmetro inferior ao do furo associado a movimentos simultâneos de rotação e de interpolação helicoidal (cilíndrica ou cônica). Com a técnica de interpolação helicoidal, diferentes roscas podem ser usinadas com uma combinação do passo, diâmetro da interpolação helicoidal e direção de rotação da ferramenta (SMITH, 2008). A figura 9 mostra as operações típicas dos processos de fresamento de roscas.

**Figura 9 - Operações típicas de fresamento de roscas.**



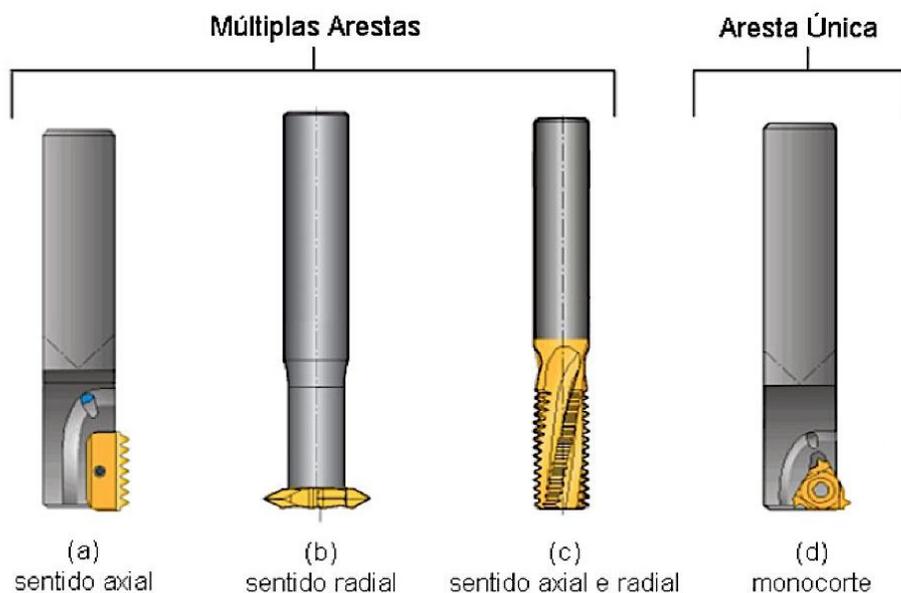
**Adaptado de SANDVIK COROMANT (2012).**

Conforme mostra a figura 9, durante o processo de fresamento, a ferramenta pode executar a usinagem em um único passo, ou seja, toda a profundidade do perfil é removida ao longo da trajetória helicoidal. É importante ressaltar que a profundidade do perfil também pode ser removida em diferentes passes com trajetória helicoidal com o objetivo de minimizar os carregamentos na aresta de corte. Assim, para uma rosca interna, com sentido de hélice à direita e utilizando o corte concordante, a ferramenta é posicionada na profundidade desejada

do furo e começa a usinar com percurso ascendente e helicoidal; ou no caso do corte discordante, a ferramenta é posicionada no topo e percorre uma trajetória helicoidal descendente até a profundidade desejada da rosca. Caso o sentido da hélice seja invertido, o posicionamento da ferramenta é invertido também, ou seja, para corte concordante, o processo inicia acima do furo e, para corte discordante, inicia na profundidade final da rosca. Do ponto de vista das roscas externas, o processo é o inverso do atribuído às roscas internas. Assim, para uma rosca com sentido de hélice à direita e com corte concordante, a ferramenta deve ser posicionada no topo e percorre uma trajetória helicoidal até o comprimento desejado.

Segundo Stephenson e Agapiou (1996), a usinagem com fresas é aplicada em roscas com diâmetros a partir de 15 mm e, principalmente, para diâmetros maiores que 30 mm. Duas configurações de ferramentas podem ser utilizadas no fresamento de roscas por interpolação helicoidal: com insertos intercambiáveis ou com ferramentas sólidas. Os insertos intercambiáveis podem ter aresta única e múltiplas arestas (tanto no sentido radial como no sentido axial). A Figura 10 mostra as diferentes configurações de ferramentas destinadas ao roscamento com interpolação helicoidal.

**Figura 10 – Configuração de ferramentas para fresamento por interpolação helicoidal.**

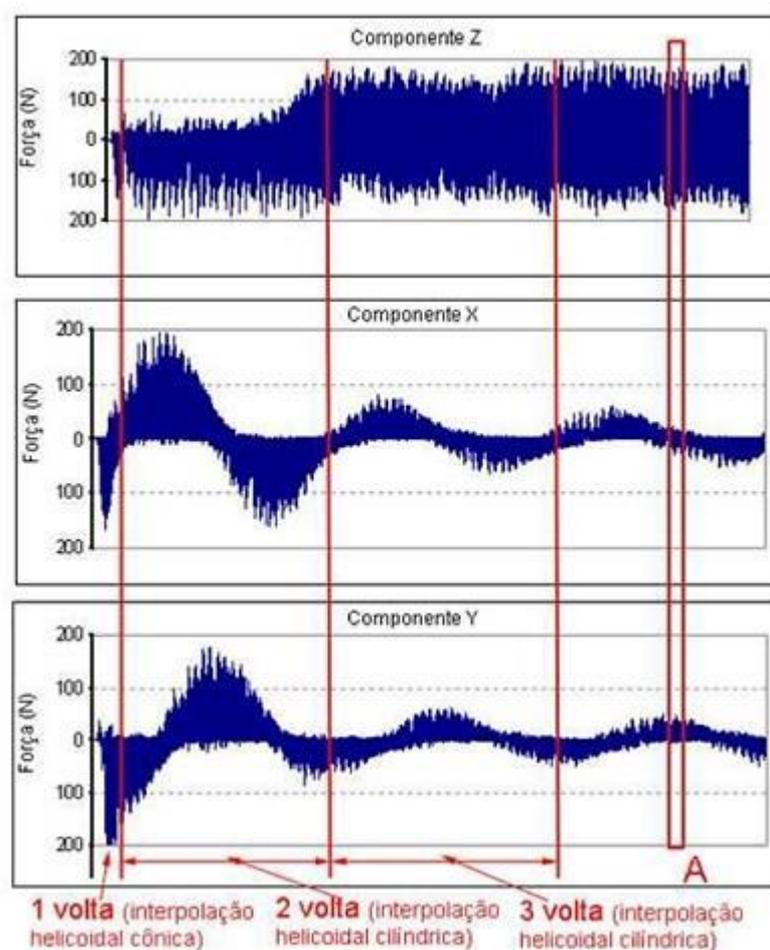


O inserto com múltiplas arestas no sentido axial é mostrado na figura 10a – usualmente com 7 a 10 arestas de corte; o inserto com múltiplas arestas no sentido radial é mostrado na figura 10b – normalmente com 3 ou 4 arestas ao longo da circunferência. A figura 10c mostra uma combinação dos dois casos anteriores – arestas no sentido radial e axial. Ainda, conforme a figura 10d, existe a configuração de ferramenta com única aresta de

corte, mas utilizando um inserto com mais do que uma aresta (as quais podem ser giradas ao atingirem um nível de desgaste e/ou avaria). As ferramentas intercambiáveis (conforme detalhes “a”, “b” e “d” da figura 10) são normalmente utilizadas em furos maiores do que 12 mm.

Bretas (2009) utilizou a técnica de fresamento de roscas por interpolação helicoidal, como alternativa a usinagem de roscas internas por macho rígido no ferro fundido vermicular, utilizando dois tipos de ferramenta de insertos intercambiáveis de metal duro: com múltiplas aresta e aresta única. O objetivo era determinar o desempenho de cada ferramenta na usinagem de roscas internas M16 x 1,5 mm com profundidade de 40 mm. Os experimentos foram realizados com duas velocidades: 85 m/min e 100 m/min. Os resultados demonstraram que a velocidade de corte tem influência significativa na vida da ferramenta, já que houve uma tendência de usinagem de um número maior de roscas com 85 m/min do que com 100 m/min. Outro resultado foi que o tipo da ferramenta tem influência significativa na quantidade de roscas usinadas, já que as ferramentas de múltiplas arestas apresentaram uma vida média superior às ferramentas de aresta única. Do ponto de vista de mecanismo de desgaste e/ou avaria, o lascamento foi o principal fator que determina o fim de vida da ferramenta. Contudo, o fator mais interessante é o comportamento da força de usinagem. Este comportamento apresenta-se de forma distinta para cada tipo de ferramenta. Para ferramenta de aresta única, a força é menor durante a entrada da ferramenta e se mantém em um nível mais elevado durante o processo. Para ferramenta de múltipla aresta, a força de usinagem apresenta um elevado valor durante a entrada da ferramenta e se mantém em níveis muito menores durante o processo, como mostra a figura 11.

**Figura 11 – Componentes da força de usinagem medidas para ferramenta de múltiplas arestas com  $v_c = 85$  m/min.**



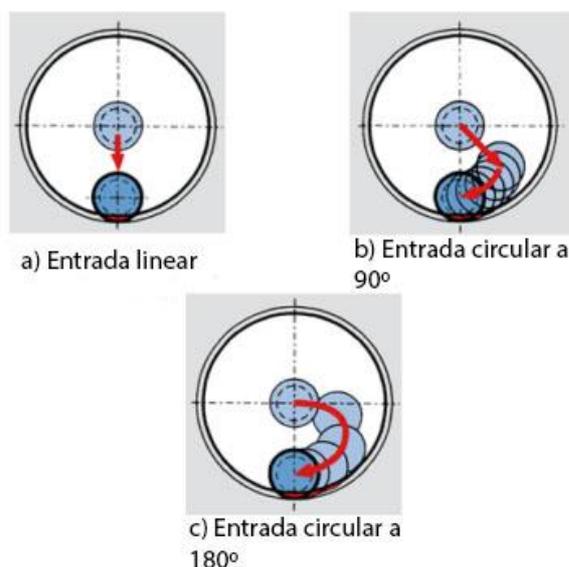
**Adaptado de BRETAS (2009).**

Ao observar a figura 11, pode-se notar que já ao início da segunda volta, os valores de força das componentes  $x$  e  $y$  são consideravelmente menores que na primeira volta, e ao início da terceira volta esses valores também decrescem. Esse decrescimento ocorre pelo fato de que na segunda volta, o processo já se encontra em fresamento por interpolação cilíndrica e todas as arestas cortantes da ferramenta encontram-se em contato com a superfície a ser usinada.

O tempo de vida da ferramenta é outro fator importante no processo de manufatura de roscas, pois a determinação dos parâmetros de usinagem corretos, para que não haja troca de ferramenta frequentemente, ou seja, prolongar o intervalo de tempo de operação. Outro ponto a ser considerado é que o mecanismo de desgaste e/ou avarias nas ferramentas não afetem a geometria da peça, nesse caso a rosca, tornando-a menos precisa ou até mesmo inserindo defeitos no perfil dos filetes (LACALLE et al., 2002).

Smith (2008) também descreve outros desafios da usinagem de roscas com a técnica de interpolação helicoidal. Como o fresamento de roscas trata-se de um processo pouco utilizado, se comparado com o roscamento com machos rígidos, pontos importantes como a escolha da máquina, estratégia de programação, principalmente para entrada da ferramenta na peça e comprimento da rosca devem ser analisados. O posicionamento radial da ferramenta de fresar roscas, ou início de usinagem da rosca, pode ser feito através de três formas básicas dentro do furo (descritas posteriormente). Algumas máquinas CNC possuem ciclos específicos para esta operação, ao passo que, máquinas de comando mais simples não detêm estes recursos, exigindo uma maior criatividade na elaboração das estratégias de programação. Com objetivo de facilitar o entendimento, a figura 12 mostra as três formas mais utilizadas para o posicionamento, quando é necessário a inserção da ferramenta no furo para iniciar a usinagem.

**Figura 12 - Posicionamento da ferramenta de fresar roscas.**



**Adaptado de SMITH (2008).**

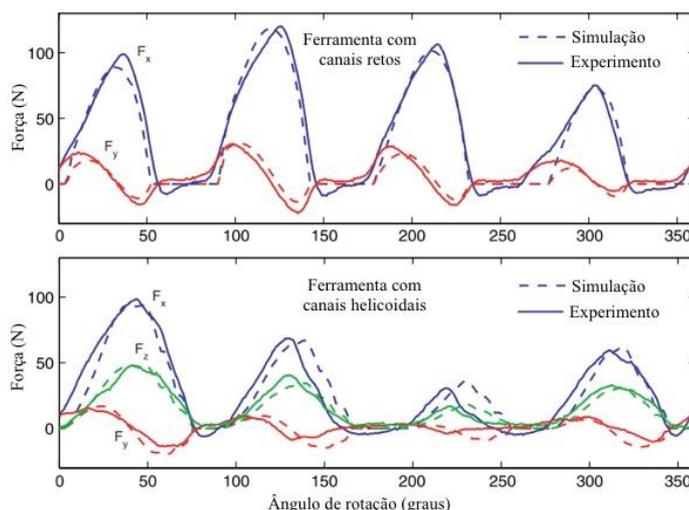
Conforme a figura 12a, uma das formas de entrada da ferramenta, posicionada abaixo da superfície do furo, é a entrada linear. Segundo Smith (2008), esta etapa do processo é caracterizada por gerar grande ângulo de contato entre o material e o diâmetro periférico da ferramenta de corte, promovendo uma situação indesejável de alto carregamento na ferramenta, o que dependendo do material, pode gerar cavacos longos. Ainda, a entrada linear não é aconselhável para roscas de precisão por deixar marcas no ponto de entrada da ferramenta. A segunda estratégia é a entrada circular com 90°, conforme a figura 12b. Esta estratégia é normalmente utilizada para grandes diferenças entre o diâmetro do furo e o

diâmetro da ferramenta utilizada. A vantagem deste sistema é a menor trajetória da ferramenta, contudo o carregamento na ferramenta ainda é considerado relativamente alto. Uma terceira opção é a entrada com semi-círculo, conforme demonstrado na figura 12c. Neste caso, o carregamento na ferramenta é relativamente menor se comparado com as estratégias anteriores devido ao pouco ângulo de contato da ferramenta durante a entrada. Entretanto, para utilizar esta estratégia o comando CNC, recomenda-se dispor funções específicas de programação. Das três opções comentadas, esta é a que possui maior tempo de ciclo, proporcional ao percurso realizado pela ferramenta. Por outro lado, proporciona o menor carregamento inicial à ferramenta. Ainda, caso seja necessário em situações específicas, maiores ângulos de entrada podem ser adotados.

Grzesik (2008), ainda afirma que umas vantagens de utilizar ferramentas de fresar roscas por interpolação é a qualidade dimensional das entidades, além de variações nos diâmetros poderem ser controladas e corrigidas sem que haja a troca da ferramenta. Contudo, a principal vantagem deste processo está na velocidade de corte e velocidade de avanço atingida. Este processo não possui velocidade de avanço vinculado ao passo da rosca. Dependendo do diâmetro da rosca, podem ser alcançadas velocidades de corte entre 100 a 400 m/min e avanços entre 0,05 a 0,25 mm/aresta.

Araujo et al. (2006) estudaram o comportamento dos sinais para o processo de roscamento através de interpolação helicoidal cilíndrica. Apesar de não detalhar a entrada da ferramenta no corpo-de-prova, o modelo matemático determinado se aproximou do sinal real obtido. Para validar o modelo, foram usinadas roscas M10 x 1,5 em alumínio 6061 com diferentes tipos de hélices de ferramentas. O sistema de aquisição utilizado foi similar ao desta pesquisa e as forças de corte estão representadas na figura 13.

**Figura 13 – Comparação do modelo com as forças de corte medidas.**



**Adaptado de Araujo et al. (2006).**

Apesar de a literatura descrever a viabilidade técnica do processo de usinar roscas com interpolação helicoidal, não há informações precisas sobre a influência do tipos de entradas, relação dos tipos de entrada com diâmetro da ferramenta, relação entre diâmetro da ferramenta e diâmetro do furo, aplicação de corte concordante e discordante, aplicação de fluido de corte, remoção de cavacos em furos não passantes, e quais procedimentos devem ser considerados na usinagem de roscas em matérias de elevada dureza, uma vez que as principais aplicações referem-se a usinagem de ferros fundidos e ligas de alumínio.

Desta forma, o capítulo posterior aborda as técnicas de fresamento de aços temperados e revenidos com objetivo de possibilitar aumentar a compreensão sobre o tema e aplicar soluções à usinagem de roscas com a técnica de interpolação helicoidal.

## **2.5 Fresamento de aços temperados e revenidos**

O fresamento de roscas tornou-se popular na última década como uma alternativa aos processos tradicionais, como a usinagem com macho rígido e a laminação, causado pela complexidade das peças a serem construídas e da flexibilidade que o processo proporciona. Ressalta-se que muitos segmentos industriais tais como indústria biomédica, aeroespacial, e talvez as maiores beneficiadas, indústria de moldes e matrizes e de manutenção, muitas vezes necessitam de soluções específicas e quantidades restritas que não justificam o aumento do inventário de ferramentas (LEE, KASTEN e NESTLER, 2013).

A usinagem de aço no estado temperado e revenido, tanto nas operações de desbaste como em acabamento, permite a racionalização do processo, pois provoca a diminuição dos tempos de preparação e diminuição de erros ocasionados pela mudança de referência da peça. Outro ponto relevante é evitar os problemas de distorções geométricas ocasionadas pelo tratamento térmico, principalmente em peças de paredes finas (NEVES, 2002). A usinagem de materiais de elevada dureza, apesar de apresentar algumas dificuldades, pode oferecer vantagens no processo e no resultado final do produto usinado, proporcionando ganho em qualidade, controle superficial e principalmente custo do processo (WANG e ZHENG, 2003). Este é um tópico de grande interesse da indústria e de pesquisas científicas (POULACHON et al., 2004). Em função da capacidade de suportar altas tensões a elevadas temperaturas, aços temperados e revenidos são comumente utilizados na manufatura de moldes e matrizes para processos tais como: fundição sob pressão, forjamento, moldagem por injeção de plástico, extrusão, etc. Os produtos oriundos destes processos são usados em larga escala na indústria automotiva, petrolífera, eletrônica e aeroespacial.

Especificamente na indústria de moldes e matrizes, um custo substancialmente proporcional à produção está diretamente envolvido aos processos de usinagem. Elevados volumes de material geralmente são retirados e processos de acabamento associados às especificações restritas de rugosidade e tolerâncias dimensionais elevam os custos de manufatura (TOH, 2006). Segundo Kita et al. (2001), por causa de avanços tecnológicos, tornou-se possível a usinagem, e principalmente o fresamento, de aços endurecidos com ferramentas de metal duro com cobertura. Mas para que haja sucesso na operação de fresamento de aços endurecidos, é necessária a escolha de parâmetros apropriados a cada situação, de tal modo que o tempo de vida da ferramenta não seja encurtado.

Convencionalmente, componentes fabricados em aços endurecidos são produzidos por usinagem desses materiais em condições de baixa dureza (recozidos) com ferramentas convencionais, terminada a usinagem, o tratamento térmico é feito na peça para que seja obtida a dureza desejada, e em seguida o acabamento ou retificação são realizados. Dificuldades como baixo índice de material removido, problemas na integridade da superfície, longas paradas para ajuste e troca de ferramenta, e junto a isso onerosos problemas de logística. E quando combinados, a usinagem do produto no estado de baixa dureza ao tratamento térmico, o processo se torna caro e demorado.

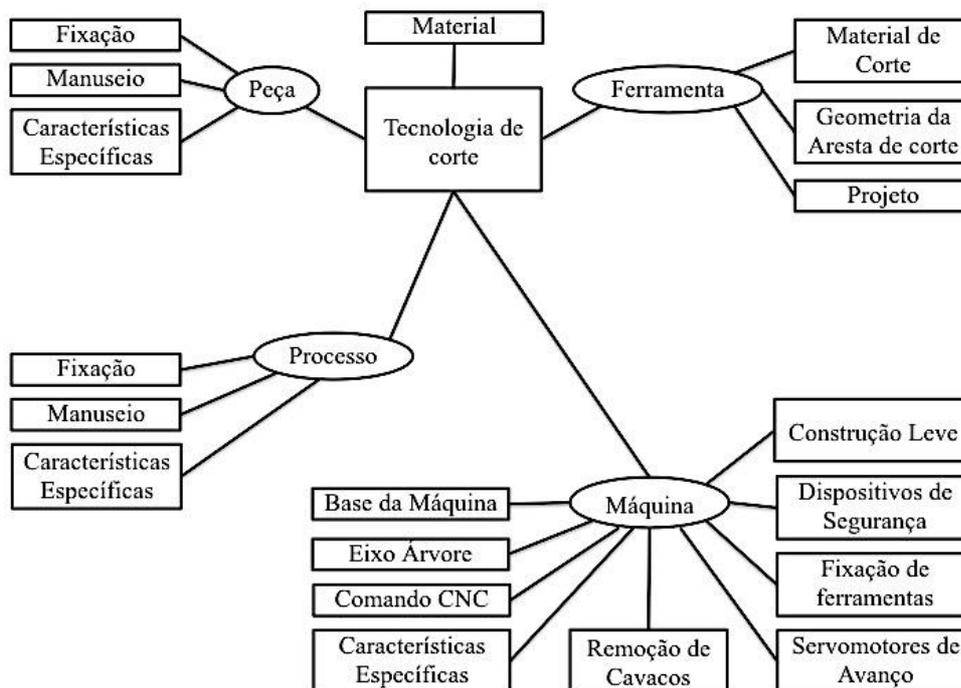
Com o objetivo de determinar os melhores procedimentos para a usinagem de componentes de elevada dureza, muitas pesquisas têm sido realizadas nas últimas décadas. As pesquisas envolvem desde o desenvolvimento de máquinas-ferramentas, estratégias de usinagem, substrato de ferramentas, coberturas, sistemas de fixação, entre outros. Assim, o capítulo posterior descreve os principais desenvolvimentos na determinação do processo de usinagem, conhecido como usinagem de altas velocidades.

## **2.6 Desenvolvimentos baseado no conceito de usinagem em altas velocidades**

A usinagem em altas velocidades é conhecida como um dos mais efetivos processos de manufatura, e em alguns casos, de prototipagem rápida, proporcionando excelente qualidade de forma e dimensão em diversos materiais. No entanto, o conceito de usinagem em altas velocidades não é especificamente definido. Normalmente, o processo é considerado de alta velocidade quando, as velocidades de corte são de cinco a dez vezes superiores às velocidades de corte convencionais e, principalmente com valores de avanço e de profundidade de corte bem menores do que aqueles utilizados nas operações convencionais. Porém, este conceito não está simplesmente relacionado à velocidade de corte. Fatores como máquina-ferramenta, ferramenta de usinagem, material e forma da peça a ser usinada, além do próprio processo a ser elaborado, interagem com o objetivo de obter resultados específicos nas operações de usinagem (SCHULZ e MORIWAKI, 1992; SHIN et al., 2003)

Tão importante quanto as velocidades de corte são as velocidades de avanço especialmente na usinagem de componentes manufaturados de aço de alta dureza que fazem uso de ferramentas de pequeno diâmetro, às vezes até delgadas, na usinagem de perfis complexos (GEIST e FINZER, 2000). No entanto, Schulz e Moriwaki (1992) afirmam que não são necessárias apenas altas velocidades de corte e de avanço para que o processo possa ser aplicado de forma eficiente. Outras variáveis no processo como, por exemplo, ferramentas de corte, características específicas da peça, fixação da máquina, entre outros como mostrado na figura 14.

**Figura 14 - Variáveis de influência no processo de HSC.**



**Adaptado de SCHULZ e MORIWAKI (1992).**

A figura 14 explica por meio de um fluxograma, que a tecnologia de corte em materiais específicos não influencia apenas o desenvolvimento de ferramentas, mas também, de uma maneira especial, o desenvolvimento de novos componentes das máquinas de usinagem (tornos e centros de usinagem) de uma maneira geral.

Deonísio (2004), Oliveira (2007), Ribeiro (2007) empregaram o conceito de usinagem em altas velocidades em aços temperados e revenidos. É possível notar nessas pesquisas que, para usinagem de materiais com dureza elevada (maior que 40 HRC), emprega-se restritos valores de profundidade de corte axial e radial. No caso das pesquisas mencionadas, valores de  $a_p$  variam de 0,1 mm até 0,5 mm, valores de  $a_e$  variam de 0,35 mm a 1,25 mm e valores de  $v_c$  variam de 300 m/min a 1000 m/min. Comparado a um processo convencional, pode-se tomar como exemplo uma operação de desbaste de um material com 35 HRC com uma ferramenta de diâmetro de 50 mm com quatro insertos, para uma velocidade de corte de 100 m/min,  $a_e = 35$  mm,  $a_p = 5$  mm e  $f_z = 0,2$  mm/dente (DORMER TOOLS, 2012). Em contrapartida, elevados valores de velocidade de avanço são utilizados.

Araújo et al. (2006) compararam um modelo de força de usinagem para o fresamento de roscas com os dados experimentais do processo. Na pesquisa são descritos movimentos da

ferramenta (alinhamento da ferramenta com o centro do furo, entrada da ferramenta no furo, movimento helicoidal da ferramenta usinando a rosca e retirada da ferramenta do furo). A técnica de interpolação helicoidal foi empregada em um corpo-de-prova de alumínio 6061, nos quais dois tipos de ferramentas helicoidais, não descritas em detalhes, para usinagem de uma rosca M10 x 1,5 mm. Os valores de rotação foram 1000 e 2000 rpm e avanço por dente foram 0,01 e 0,02 mm. Na interpretação do modelo é mostrado que os picos de força diminuem à medida que os ângulos de hélice aumentam (0°, 10° e 30°). Cortes de diferentes números de filetes (ou seja, 3, 6, 9 e 12 mm de profundidade de rosca) tem magnitude e perfis de força distintos. O experimento mostra que para profundidades axiais de 3 e 6 mm as componentes da força de usinagem são menores, porém o período de força é maior que nas profundidades 9 e 12 mm, tornando essas dimensões preferíveis do ponto de vista dinâmico. No entanto, a força média, especialmente na direção “y”, aumenta à medida que a profundidade de usinagem axial é aumentada. Assim, a ferramenta pode apresentar mais de deflexão durante a usinagem, que pode resultar em erros dimensionais.

De uma forma geral, esse é o método se utilizar a técnica de interpolação helicoidal, ou seja, restritos valores de profundidade radial e axial, lembrando que essa profundidade são as dimensões do perfil da rosca.

## **2.7 Ferramentas CAM para suporte à programação da usinagem**

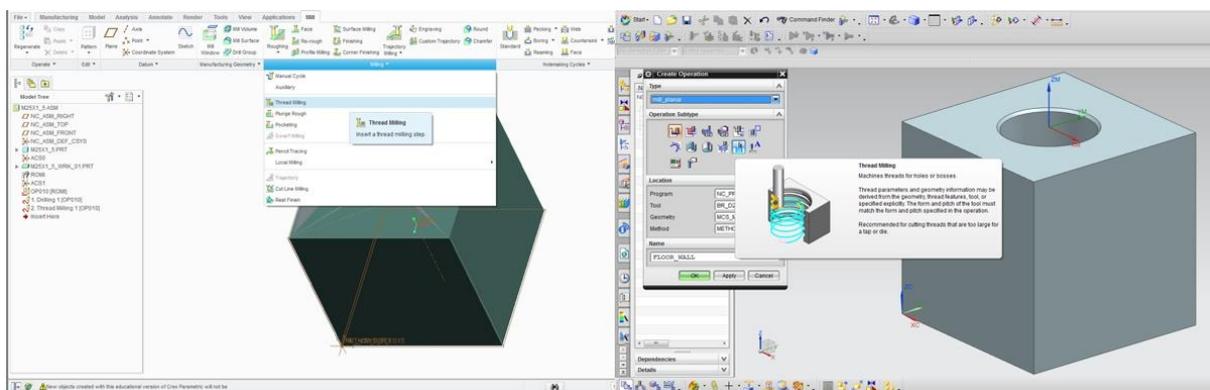
Na manufatura de roscas internas existem diferentes metodologias relacionadas à execução da usinagem com a técnica de interpolação helicoidal. Uma delas consiste em criar, após a execução da furação, uma ou mais curvas que contém a trajetória helicoidal constituída dos parâmetros geométricos de interesse da rosca, considerando os parâmetros suportados pela ferramenta na usinagem do material selecionado. A elaboração da trajetória pode ser feita em software CAM ou criada diretamente no comando numérico da máquina.

Outra metodologia incide em criar uma entidade prévia com características de uma rosca no módulo de CAD, já com todos os parâmetros fundamentais – passo, diâmetro efetivo e ângulo de flanco – pré-determinados, além do perfil e tipo da rosca. Posteriormente, no módulo de CAM informar os parâmetros de usinagem mais adequados à usinagem de um determinado material. Essa é a metodologia proposta na pesquisa, pois permite ampla flexibilidade do processo. Contudo, a utilização do recurso mencionado é pouco explorado em sistemas CAx, e a seguir é realizada um breve explanação do processo.

A metodologia de usinagem de roscas internas é basicamente constituída por cinco etapas: a) elaboração de um modelo geométrico que contém uma entidade roscada; b) elaboração da operação do fresamento de rosca; c) criação da ferramenta; d) definição dos parâmetros de usinagem; e) determinação das estratégias de usinagem. É importante considerar pequenas variações na ordem desses constituintes, ou até mesmo a fusão de alguns, de acordo com o desenvolvedor da plataforma.

A principal fonte desta revisão bibliográfica sobre os métodos de manufatura de roscas em plataforma CAM utilizada foi InfoAxis (2012). A seguir será mostrado nas imagens do processo de criação de roscas pela técnica de interpolação helicoidal em duas plataformas CAx. Vale ressaltar que o passo inicial (da criação da entidade que contém uma rosca pré-definida) já foi realizado. Inicialmente na figura 15, no módulo CAM de ambos os softwares foi criada a operação de fresamento de roscas após a criação da geometria que contém uma rosca.

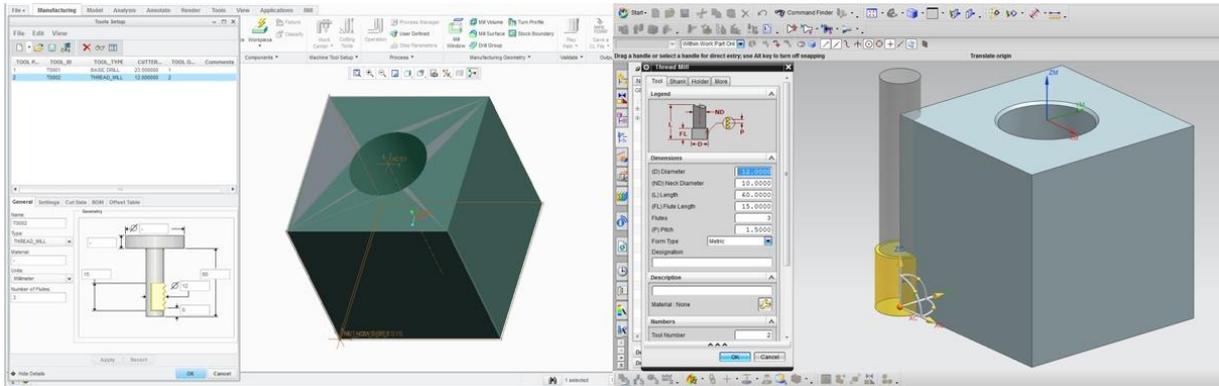
**Figura 15 – Criação da operação de fresamento de roscas internas.**



Esse tipo de operação abrange tanto roscas internas como roscas externas, independente dos parâmetros geométricos fundamentais da rosca projetada. No entanto, esses parâmetros são essenciais na criação da entidade e da ferramenta.

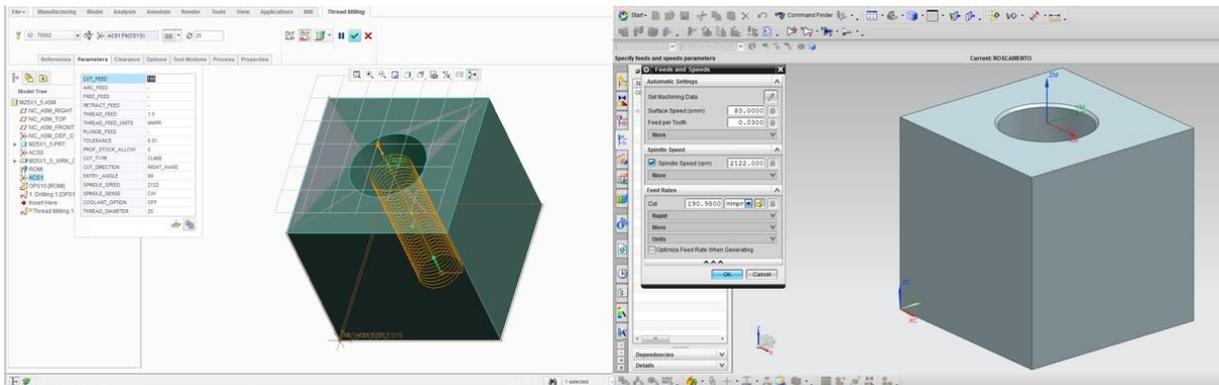
A terceira etapa do processo consiste na criação da geometria da ferramenta (virtual) com características idênticas a que será utilizada na usinagem. Essa etapa pode ser verificada na figura 16.

**Figura 16 – Criação da ferramenta de fresamento de roscas internas.**



Conforme a Figura 16, os componentes da geometria da ferramenta são requeridos, por exemplo, diâmetro de externo, diâmetro da haste, comprimento axial de corte da ferramenta, comprimento da em balanço e número de arestas cortantes. Para fresamento de roscas em alguns softwares, o passo e o formato do perfil são também requeridos. Em outros softwares essas informações adicionais são automaticamente preenchidas de acordo com a criação da entidade no módulo CAD. Dando continuidade a metodologia, após a criação das ferramentas e inserção de todas as informações para criação da mesma, faz-se necessário a definição dos parâmetros de usinagem, como mostrado na figura 17.

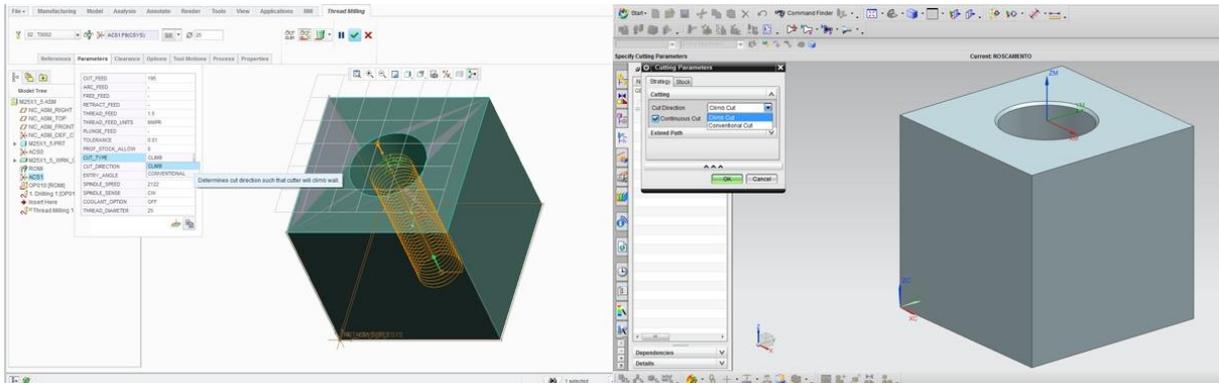
**Figura 17 – Definição dos parâmetros de usinagem no fresamento de roscas internas.**



A Figura 17 mostra a definição dos parâmetros de usinagem. Valores de velocidade de corte ( $v_c$ ), velocidade de avanço ( $v_f$ ) devem ser preenchidos, havendo uma pequena variação de software para software.

A definição das estratégias de usinagem finaliza a quinta etapa. Inicialmente o tipo de corte (concordante ou discordante) é requerido, como mostra a figura 18.

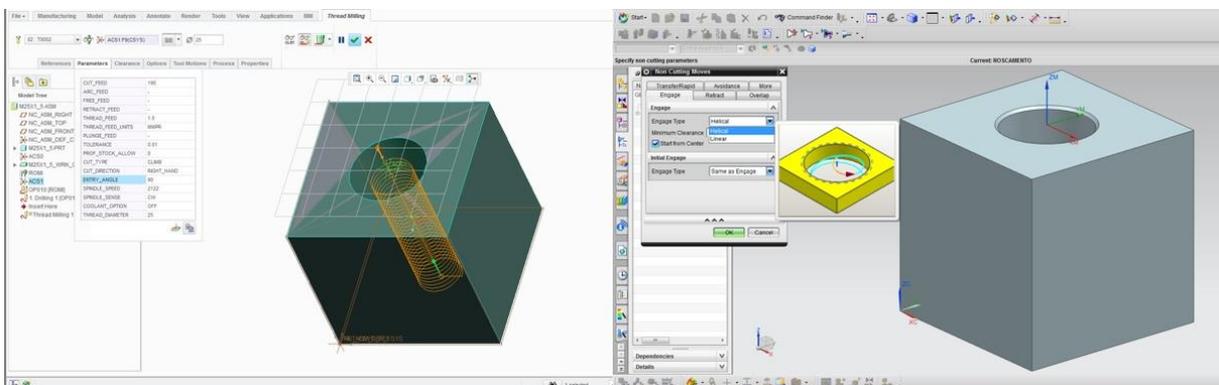
**Figura 18 – Definição da estratégia de usinagem no fresamento de roscas internas – tipo de corte.**



Na maioria dos softwares, por definição, corte discordante é adotado. No entanto, não há clara definição da literatura que essa seja a escolha adequada e, essa pesquisa estuda a comparação dos tipos de corte no item 4.5. A usinagem com corte concordante especificamente para roscas direitas promove o posicionamento da ferramenta dentro do furo e realização de movimento helicoidal ascendente. A adoção desta abordagem é mais adequada para ferramentas com arestas somente no sentido radial, de forma evitar um carregamento abrupto com ferramentas de múltiplas arestas no sentido axial. Essa é uma explicação para a adoção do corte discordante ser adotado como definição pelos softwares.

Por meio da definição do tipo de entrada é possível em alguns casos diminuir a magnitude da força de usinagem durante o instante de contato inicial da ferramenta com a peça. O tipo de entrada deve ser definido como mostra figura 19.

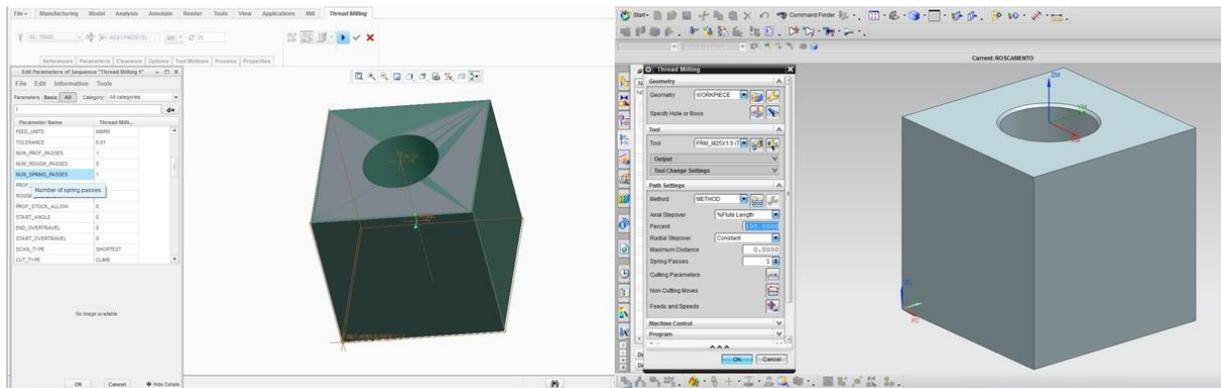
**Figura 19 - Definição da estratégia de usinagem no fresamento de roscas internas – tipo de entrada.**



O tipo de entrada da ferramenta na superfície do furo, conforme mostra a Figura 19, também é outra lacuna na literatura. Apesar de SMITH (2008) mencionar as formas possíveis

de entrada, não há informações da influência delas na vida da ferramenta, nas componentes da força de usinagem e na qualidade da rosca. O último requisito fundamental para a usinagem das roscas com a técnica de interpolação helicoidal em sistemas CAM, como abordado na figura 20, é o número de passes em que a rosca deve ser usinada.

**Figura 20 - Definição da estratégia de usinagem no fresamento de roscas internas – número de passes.**

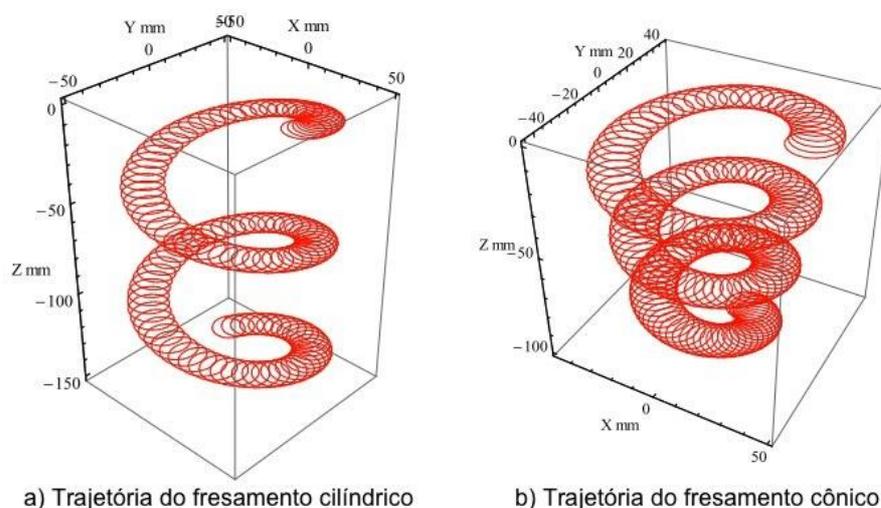


De acordo com a figura 20, este ponto se assemelha as operações de desbaste e de acabamento. Entretanto, na maioria das vezes não se faz necessário o emprego de mais de um passe nesse tipo de processo. Apenas em casos em que a ferramenta é muito delgada ou o material a ser usinado tem baixo índice de usinabilidade recomenda-se a utilização de diversos passes (STEPHENSON e AGAPIOU, 2006).

Após a definição das estratégias de usinagem, simulações virtuais da usinagem nos programas CAM são realizadas com objetivo de detectar erros no programa, colisões de ferramenta com a peça ou com dispositivos de fixação, estimar os tempos de manufatura, além de poder aperfeiçoar as taxas de avanço em determinadas circunstâncias, tais como entradas e saídas da ferramenta da geometria usinada (ZEID, 2005). Após a conferência dos itens mencionados, o programa pode ser pós-processado e transferido ao comando numérico da máquina-ferramenta.

Desafios adicionais para programação de roscas com suporte de sistemas CAM ainda podem ser mencionados. Santos (2013) estudou a modelagem de área de corte e a espessura do cavaco formado em um fresamento de rosca cônicas com perfil API, a partir da descrição da trajetória de usinagem. O autor utilizou equações paramétricas de movimento com raio variável e movimento vertical. Os resultados mostram que a trajetória de uma ferramenta para usinagem de uma rosca cônica foi desenvolvida, como ilustrado na figura 21.

**Figura 21 – Trajetória da ferramenta do fresamento de roscas cônicas e cilíndrica.**



**Adaptado de Santos (2013).**

Souza (2004) estudou a fabricação de formas complexas utilizando operações de fresamento em altas velocidades, considerando a influência de programas NC gerados por sistemas CAD/CAM e suas limitações na velocidade de avanço. Três diferentes métodos para descrever trajetórias complexas de ferramenta: interpolação linear, interpolação circular/linear e funções *spline*. Na interpolação linear observou-se grandes variações na velocidade de avanço. Na interpolação linear/circular a velocidade de avanço mostrou-se constante durante toda usinagem. E com a utilização de *splines* constatou-se que a velocidade de avanço era tão constante durante usinagem quanto na interpolação linear/circular. Posteriormente, um comportamento da velocidade de avanço mais adequado e a melhor qualidade superficial foi conseguida utilizando equações polinomiais *spline*.

Esse item mencionou a metodologia e os parâmetros básicos para criação de programas NC de roscas com a técnica de interpolação helicoidal com o suporte de softwares CAM. Como pode ser observado, a compreensão da influência e da interação de diversos fatores deve ser compreendida para se obter os melhores resultados durante a usinagem. A influência de variáveis como tipo de ferramenta, tipo de corte, forma da entrada, relação diâmetro do furo e diâmetro da ferramenta no tempo efetivo de vida, na qualidade da rosca e na força de usinagem não estão definidos na literatura, principalmente para materiais de baixo índice de usinabilidade. Essa pesquisa busca entender esses tópicos mencionados com o objetivo de suportar o desenvolvimento da técnica no ambiente de manufatura.

### 3 Procedimentos Experimentais

Os experimentos desta pesquisa foram realizados no Laboratório de Manufatura da do Núcleo Tecnologia Industrial (NTI) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), em Natal (RN); e no Laboratório para Processos Avançados e Sustentabilidade do Núcleo de Manufatura Avançada (NUMA) da EESC-USP, em São Carlos (SP). Este capítulo descreve as condições em que os ensaios foram realizados, as máquinas-ferramenta, as ferramentas de usinagem, os portas-ferramenta e os sistema de fixação, as geometrias do corpo-de-prova, as características do material usinado, o método de análise do desgaste das ferramentas, o método de análise da força de usinagem bem como o desenvolvimento do planejamento experimental.

#### 3.1 Máquinas-Ferramenta

Os experimentos de usinagem, como foco em vida de ferramenta e mecanismos de desgaste, foram realizados em um Centro de Usinagem Vertical Romi, modelo D600 com comando GE Fanuc 0i-MC, conforme mostrado na figura 22. Os principais dados da máquina ferramenta são: motor do eixo-árvore com 15 kW de potência, faixa de rotação entre 10 e 10000 rpm, magazine porta-ferramentas com 20 posições, superfície da mesa de 840 x 500 mm. Os cursos X, Y e Z são respectivamente 600 mm, 530 mm e 580 mm. A máquina está alocada no Laboratório de Manufatura do NIT na UFRN.

**Figura 22 - Máquina ferramenta utilizada nos experimentos de vida de ferramenta.**



Os experimentos com foco em força de usinagem foram realizados em um Centro de Usinagem Vertical Romi, modelo D800 com comando GE Fanuc 21i-MB, conforme

mostrado na figura 23. Os principais dados da máquina ferramenta são: motor do eixo-árvore com 15 kW de potência, faixa de rotação entre 10 e 10000 rpm, magazine porta-ferramentas com 20 posições, superfície da mesa de 914 x 500 mm. Os cursos X, Y e Z são respectivamente 800 mm, 530 mm e 580 mm. A máquina está alocada no Laboratório para Processos Avançados e Sustentabilidade da EESC-USP.

**Figura 23 - Máquina-ferramenta utilizada nos experimentos de força de usinagem.**



O objetivo em utilizar as máquinas-ferramenta com configurações próximas era minimizar o efeito do equipamento sobre os resultados, uma vez que o sistema para análise da força de usinagem (dinamômetro tipo plataforma) não estava disponível no Laboratório de Manufatura da UFRN.

### **3.2 Ferramentas e sistema de fixação de ferramentas**

Os ensaios foram realizados com ferramentas e porta-ferramentas fornecidos pelas empresas Sandvik Coromant e Roder Tools. Foram utilizados quatro tipos de ferramentas de metal duro, todas da classe ISO H15-H25, específicas para usinagem de aços endurecidos, conforme a figura 24. Estes conjuntos de ferramentas foram montados em mandris do fabricante Sandvik Coromant de modelo BT-40 com pinças, código A2B14-40 32 070, com objetivo de promover rigidez adequada à operação.

**Figura 24 - Ferramentas e porta-ferramentas utilizados nos experimentos.**



Um ponto importante a ressaltar é a utilização de metal duro como material do porta-ferramenta. O metal duro tem módulo de elasticidade de aproximadamente 2,6 maior do que os aços – 520 GPa para o metal duro e 200 GPa para o aço (BORDMAN, 1990; SANTHANAM, TIERNEY e HUNT, 1990). Isto reduz a deflexão quando submetido a um mesmo esforço mecânico, comparando-se aos aços, e aumenta a frequência natural do corpo, o que pode minimizar os riscos de usinar em harmônicos da frequência natural do sistema.

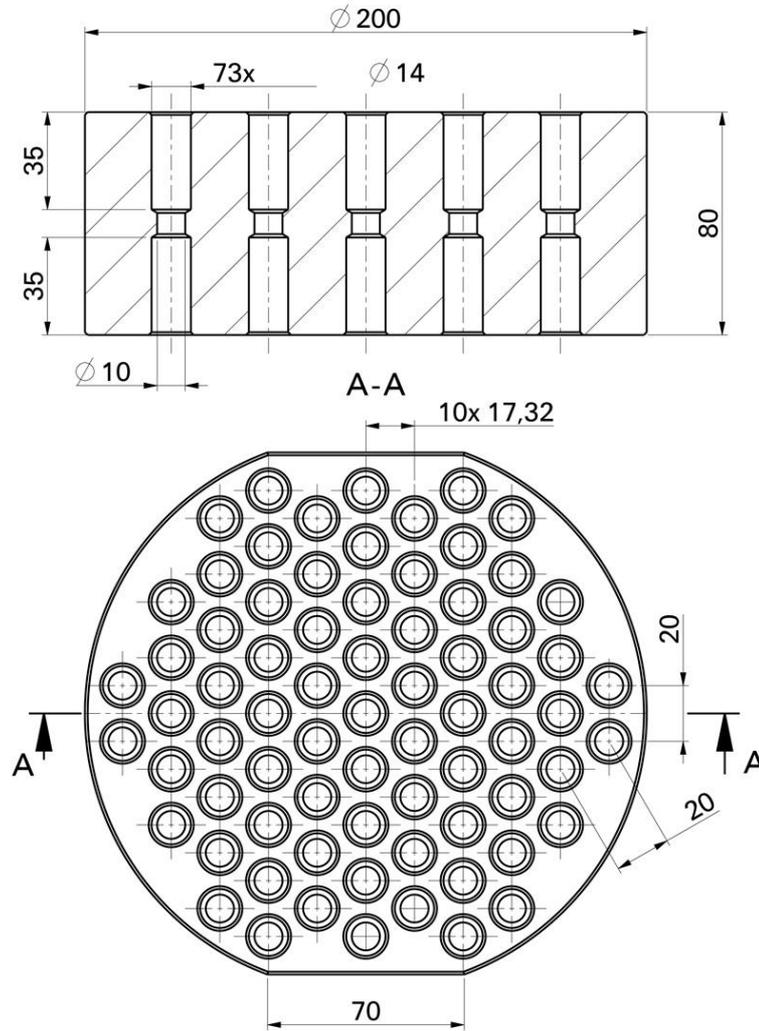
### 3.3 Geometria, material e sistema de fixação dos corpos-de-prova

Os corpos-de-prova foram construídos em aço AISI 4340 e, em seguida, temperados e revenidos para uma dureza de 40 HRC. A utilização deste material deve-se a sua significativa utilização na fabricação de peças de maior porte ou que estarão sujeitas a um maior esforço mecânico, que necessitam de alta dureza e resistência mecânica. Os componentes manufaturados a partir deste aço são normalmente utilizados na construção de máquinas e equipamentos aplicados principalmente na geração de energia, produção de autopeças, na siderurgia, produção de açúcar e álcool, na mineração e na exploração de petróleo. Estes referidos componentes possuem grande quantidade de roscas de diferentes diâmetros. Além disso, em muitos casos, as roscas são usinadas em furos não-passantes.

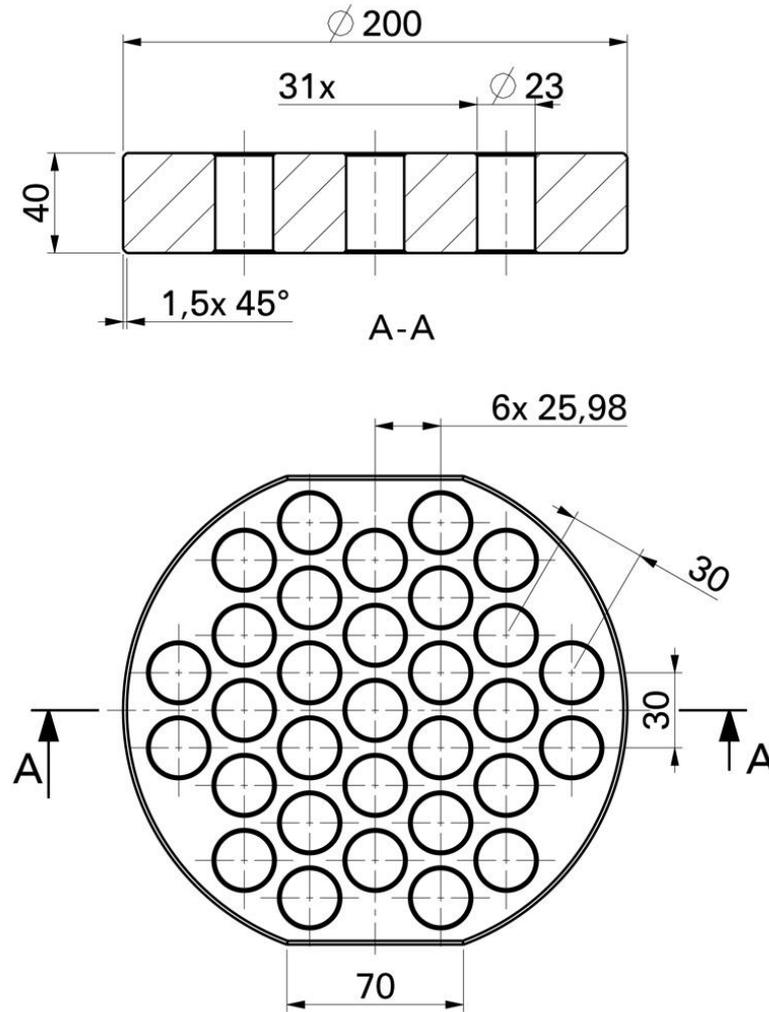
Para a realização dos ensaios de vida de ferramenta e avaliação dos mecanismos de desgaste e/ou avarias, duas geometrias de corpos-de-prova foram utilizadas em função do

melhor aproveitamento do material para as roscas M16 e M25. A figura 25 e a figura 26 mostram as características geométricas desses corpos-de-prova.

**Figura 25 - Corpo-de-prova para ensaios de vida da ferramenta com roscas M16.**



**Figura 26 - Corpo-de-prova para ensaios de vida da ferramenta com roscas M25.**



Para a realização dos ensaios de força de usinagem, outras duas geometrias de corpos-de-prova foram utilizadas em função da necessidade de fixação no dinamômetro (especificação descrita posteriormente). A figura 27 e a figura 28 mostram as características geométricas desses corpos-de-prova.

Figura 27 - Corpo-de-prova para ensaios de força de usinagem com roscas M16.

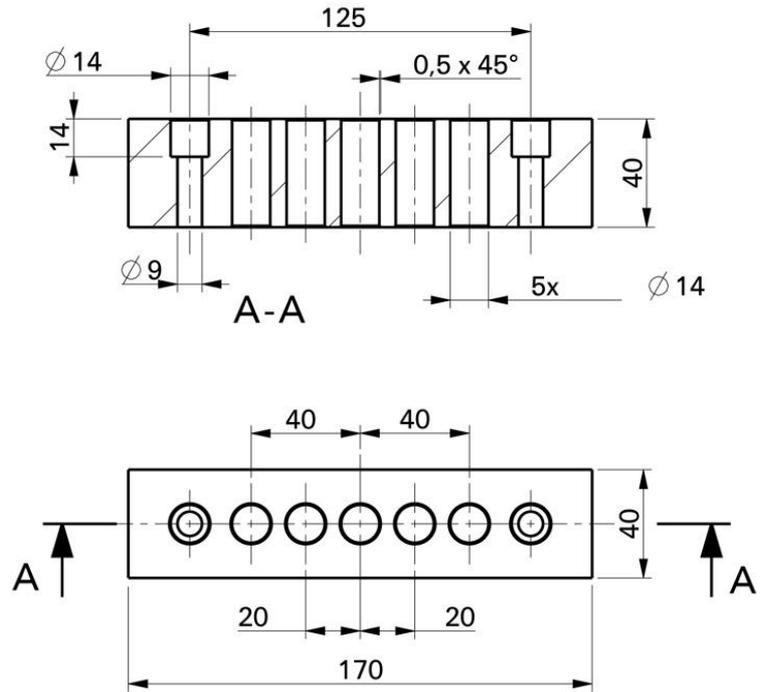
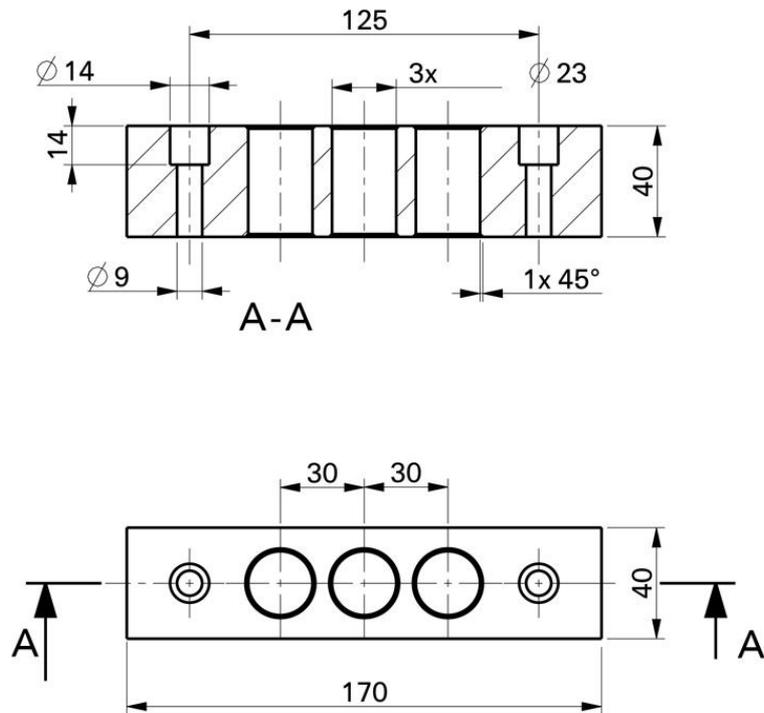


Figura 28 - Corpo-de-prova para ensaios de força de usinagem com roscas M25.



Foram usinadas roscas M16 e M25 com passo de 2 mm de classe 6H – roscas de qualidade de tolerância média, conforme a NBR ISO 965-1 (2004). Para iniciar os ensaios de roscamento, furos de diâmetro de 14 mm e 23 mm para os corpos-de-prova para roscas M16 e M25, respectivamente. Em cada furo também era usinado um chanfro de 1 x 45°, com objetivo de eliminar rebarbas, diminuir concentrações de tensões durante o tratamento térmico, e principalmente, reduzir o carregamento da aresta de corte da ferramenta no momento da entrada. Outro ponto importante a ser ressaltado é a profundidade da rosca. Com objetivo de otimizar a utilização dos corpos-de-prova, utilizou-se as profundidades de 30 mm e 36 mm, respectivamente, para as roscas M16 e M25.

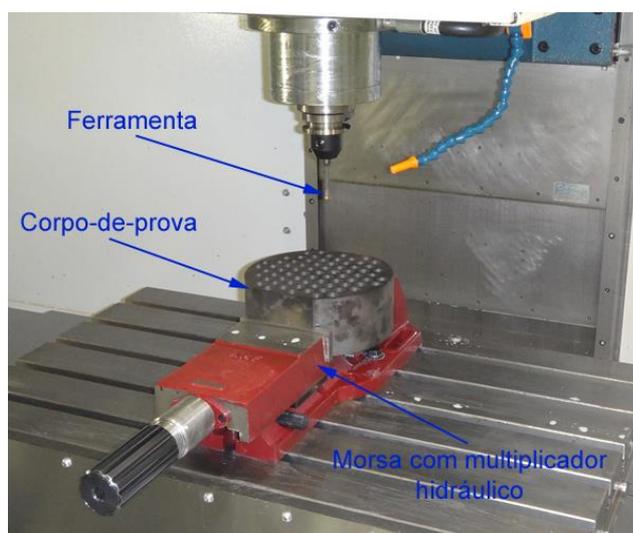
Análises de dureza foram realizadas no material usinado no Laboratório de Ensaios Mecânicos da UFRN. O ensaio de dureza foi realizado em um durômetro Werkstoffprüfmaschinen Leipzig HP 250. Definiu-se um padrão de medição o circuncentro composto por três furos do corpo-de-prova para avaliação da dureza. A média de dureza foi de 40 HRC e o desvio padrão foi de 0,95 HRC. A composição química do material está baseada no certificado de qualidade do fornecedor Gerdau de número 556693. A composição química e mostrada pela tabela 1.

**Tabela 1 – Composição química do material utilizado nos corpos-de-prova**

Elemento (% em massa)											
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	Cu	Sn	Ti
0,39	0,24	0,74	0,019	0,020	0,76	1,70	0,22	0,018	0,06	0,007	0,0025
V	Nb	B	W	Pb	Co	Ca	Zn	Sb	As	Zr	
0,005	0,004	0,0003	0,003	0,001	0,029	0,0006	0,001	0,001	0,003	0,001	

Para preservar a rigidez e a estabilidade dinâmica do sistema de fixação do corpo-de-prova, imprescindível na usinagem de materiais endurecidos, utilizou-se um sistema de fixação com uma morsa com multiplicador hidráulico com capacidade de 4 t, da empresa Industécnica. A figura 29 ilustra o sistema de fixação utilizado na pesquisa.

**Figura 29 - Sistema de fixação do corpo-de-prova.**



### 3.4 Análise do processo de usinagem

Ao longo dos ensaios de vida de ferramenta, dois pontos foram analisados no processo: a) características geométricas das roscas; b) desgaste e/ou avaria da aresta de corte na ferramenta de usinagem. A análise das características geométricas era realizada com o auxílio de calibradores passa e não-passa (P-NP). Os calibradores foram confeccionados pela empresa Neomatic, para a classe de tolerância 6H e tem certificados de calibração números 6568/13 e 6991/13 para as roscas M16 e M25, respectivamente. Os calibradores são mostrados na figura 30.

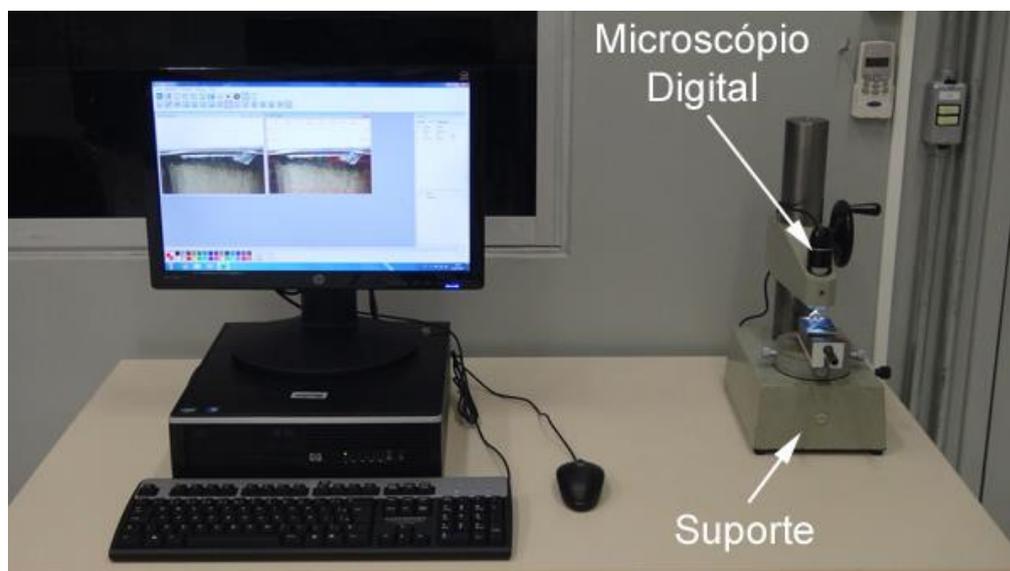
**Figura 30 - Calibradores P-NP para inspeção das roscas M16 e M25.**



A análise do desgaste e/ou avarias nas arestas de corte foi realizado com um sistema de medição baseado em um microscópio digital, modelo BW1008-500x, montado em um

suporte para relógio apalpador, modelo TGL 15043, da empresa Ausjena; e acoplado a um microcomputador utilizando uma porta USB. Para aquisição das imagens, utilizou-se o programa Micro-measure, versão 1.2, conforme a figura 31.

**Figura 31 - Sistema de análise de desgaste e/ou avaria de arestas de corte.**



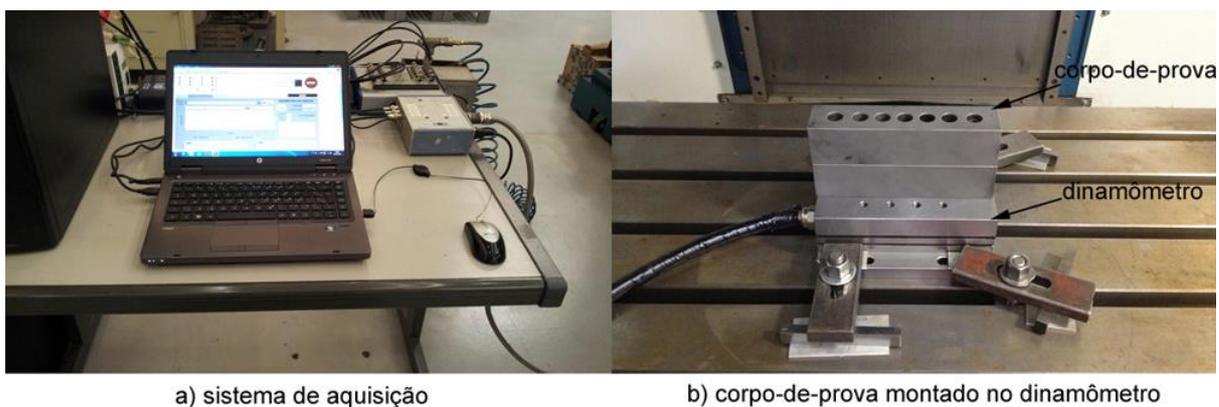
Após a determinação do fim de vida da ferramenta (critério descrito a seguir) as arestas de corte foram analisadas com auxílio de um microscópio eletrônico de varredura (MEV) da marca HITACHI, modelo TM3000, equipado com sistema EDS (Espectroscopia de Energia Dispersiva) do Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura, do Departamento de Engenharia de Materiais da UFRN. A utilização deste equipamento possibilita analisar em detalhes os mecanismos de desgaste e/ou avarias nas arestas de corte, além de identificar – de forma semi-quantitativa –, a presença de um determinado elemento químico em diferentes pontos da superfície verificada.

### **3.5 Sistema análise da força de usinagem**

Com o objetivo de entender o comportamento das componentes da força de usinagem, para cada condição e/ou ferramenta utilizada, foram realizados ensaios de usinagem sobre uma plataforma dinanométrica. Estes ensaios foram realizados no Laboratório para Processos Avançados e Sustentabilidade do Núcleo de Manufatura Avançada (NUMA) da EESC-USP, em São Carlos (SP). Utilizou-se um dinamômetro estacionário de três componentes ortogonais, baseado em células de quartzo, modelo9257BA, acoplado a uma unidade de controle modelo 5233A, ambos da marca Kistler. A aquisição dos sinais das três componentes foi realizada com um módulo de aquisição modelo BNC-2110, da marca

National Instruments, em conjunto com um microcomputador com o auxílio de um programa criado em LabView, versão 11, também desenvolvido pela empresa National Instruments. A taxa de aquisição utilizada foi de 1 kHz, ou seja, superior a 10 vezes a frequência de entrada de dentes no processo. A figura 32 mostra a montagem do sistema de aquisição (em “a”) e a fixação do corpo-de-prova na plataforma piezoelétrica e, por conseguinte, esta fixada à mesa da máquina (em “b”).

**Figura 32 - Sistema para aquisição de força de usinagem.**

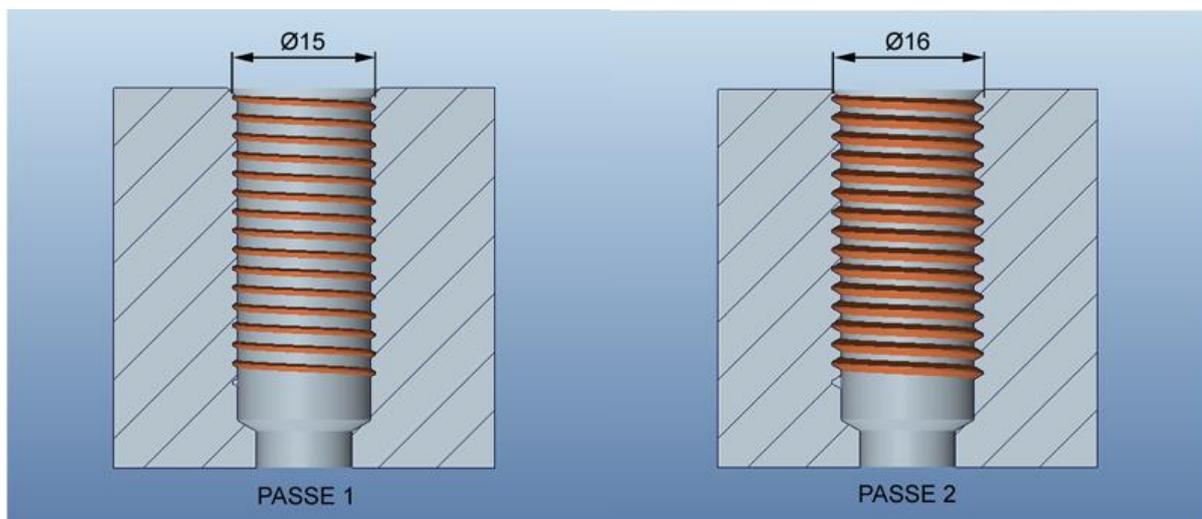


Conforme pode ser observado na Figura 32, o corpo-de-prova era fixado à plataforma piezoelétrica utilizando dois parafusos M8 x 1,5 mm nos furos das extremidades (distância de 125 mm, ver as figura 27 e figura 28). Com o propósito de aumentar a segurança no processo, utilizou-se uma placa entre o corpo-de-prova e a plataforma piezoelétrica.

### 3.6 Planejamento experimental

O principal objetivo desta pesquisa é determinar o desempenho de diferentes ferramentas para usinagem de roscas internas com a técnica de interpolação helicoidal. Para atingir este objetivo, experimentos foram conduzidos de forma aleatória em duas réplicas. Um experimento consistia na usinagem de diversas roscas em corpos-de-prova do aço AISI 4340 (40 HRC), com interrupção sistemática do processo para análise com calibrador de roscas “passa e não-passa” e determinação do valor de desgaste e/ou avaria na(s) aresta(s) de corte. Os critérios de fim para determinação do fim do ensaio eram: a) desgaste de flanco ( $VB_B$ ) = 0,20 mm e/ou b) o momento em que não era possível que o lado “passa” do calibrador de roscas entrasse na entidade usinada em função do desgaste e/ou avaria na(s) aresta(s) de corte.

A usinagem da rosca era realizada com uma estratégia em dois passes, conforme ilustra o exemplo da figura 33.

**Figura 33 - Procedimento para usinagem da rosca.**

De acordo com a figura 33, para usinar, por exemplo, uma rosca M16 x 2 mm, inicialmente usinava-se os filetes em um diâmetro de 15 mm e, posteriormente, com um segundo passe, até o diâmetro adequado para a utilização do calibrador “passa” e “não-passa” na entidade geométrica (próximo a 16 mm). No caso da rosca M25 x 2 mm, inicialmente usinava-se os filetes em um diâmetro de 24 mm e, posteriormente, em um diâmetro adequado ao calibrador correspondente (próximo a 25 mm). É importante ressaltar que o material usinado era um aço temperado e revenido e as ferramentas, conforme mencionado anteriormente, eram delgadas, fatores limitantes as elevadas profundidades de usinagem. Conforme sugere os fundamentos da usinagem de altas velocidades em aços temperados e revenidos, o procedimento é reduzir a profundidade de usinagem (e, conseqüentemente, comprimento de contato ferramenta-peça) e aumentar, na medida do possível, a velocidade de corte e a velocidade de avanço de modo minimizar o tempo de usinagem (SCHULZ e MORIWAKI, 1992).

Em função desta flexibilidade do diâmetro da rosca com a interpolação helicoidal, torna-se necessário um ajuste do diâmetro inicial para o processo. Nesta pesquisa, o ajuste do diâmetro inicial da interpolação helicoidal aproximou-se do limite superior permitido. Deste modo, incrementou-se o diâmetro da interpolação helicoidal até que permitisse o lado “não-passa” do calibrador de roscas entrar na entidade usinada. A partir desta dimensão, reduziu-se 0,02 mm na dimensão da interpolação helicoidal de modo não permitir o lado “não-passa” do calibrador entrar na rosca. A concepção de usinar a rosca próxima à máxima dimensão se deve em função do desgaste e/ou avaria nas arestas de corte da ferramenta. No caso de roscas

internas, o aumento no valor do desgaste de flanco promove a redução do diâmetro primitivo da entidade usinada.

A cinemática para usinagem das roscas era diferente para cada tipo de ferramenta (aresta única e múltiplas arestas). No caso das ferramentas de aresta única no sentido axial, o posicionamento inicial era feito a 2 mm acima da superfície do corpo-de-prova. A partir deste ponto, iniciava-se a interpolação helicoidal cilíndrica até o final da rosca e, posteriormente, a ferramenta se deslocava para o centro do furo de forma a possibilitar a saída sem contatos na superfície usinada. Para a ferramenta de múltiplas arestas no sentido axial, o posicionamento inicial era feito no centro do furo, mas com 10 mm (ou 5 filetes de rosca) abaixo da superfície do corpo-de-prova. A partir deste ponto, uma interpolação helicoidal cônica era realizada até se atingir o diâmetro da interpolação helicoidal cilíndrica. Em seguida, uma interpolação helicoidal cilíndrica era realizada até a profundidade desejada para números de filetes completos da rosca. Ao final da interpolação helicoidal cilíndrica, uma nova interpolação helicoidal cônica era realizada até o centro da entidade. O objetivo dessa segunda interpolação helicoidal cônica era permitir a saída da ferramenta.

Ainda, ensaios preliminares foram realizados com o objetivo de avaliar a viabilidade dos parâmetros de usinagem e das estratégias inicialmente planejadas em função da escassez de informação na literatura. Deste modo determinou-se com velocidade de corte ( $v_c$ ) = 80 m/min e avanço por dente de ( $f_z$ ) = 0,03 mm. Ressalta-se que a profundidade de usinagem ( $a_p$ ) = 0,5 mm era consequência dos dois passes de usinagem utilizados como estratégia para remoção do material.

Montgomery (2005) afirma que o planejamento fatorial é uma técnica eficiente para experimentos que envolvam o efeito de duas ou mais variáveis. O tipo mais simples de planejamento fatorial envolve duas variáveis em dois níveis. Além disso, cada experimento é replicado algumas vezes. Este tipo de experimento é, principalmente, indicado para análises exploratórias, nas quais se tem poucas informações da influência de cada variável e suas interações. O planejamento experimental deste trabalho está baseado na consideração descrita, pois há escassez de informações científicas sobre a usinagem de roscas por interpolação helicoidal em aços endurecidos.

A primeira fase da pesquisa teve como objetivo avaliar o desempenho das diferentes ferramentas mostradas na figura 24 na usinagem de roscas internas M16 x 2 mm (6H). A profundidade de filetes completos na rosca era de 30 mm. O tipo de corte utilizado era

discordante. Para executar esta avaliação, aplicou o planejamento fatorial mostrado na Tabela 2.

**Tabela 2 – Planejamento fatorial para fase experimental 1.**

Fator	Nível Baixo	Nível Alto
Arestas no sentido radial	Única	Múltiplas
Arestas no sentido axial	Única	Múltiplas

Baseado nos resultados da Fase Experimental 1, selecionou-se duas ferramentas para avaliar o desempenho diante da variação no tipo de corte com a usinagem de roscas internas M16 x 2 mm (6H). A profundidade de filetes completos na rosca continuou a mesma da fase anterior (30 mm). Para executar esta avaliação, aplicou o planejamento fatorial mostrado na tabela 3.

**Tabela 3 – Planejamento fatorial para fase experimental 2.**

Fator	Nível Baixo	Nível Alto
Tipo do corte	discordante	concordante
Ferramenta	Ferramenta 1	Ferramenta 2

Em uma terceira fase avaliou-se a influência do ângulo de entrada e o diâmetro da rosca no desempenho da ferramenta. Neste caso, selecionou-se uma ferramenta da fase experimental 2 para usinagem de dois tipos de roscas (M16 x 2 mm e M25 x 2 mm), ambas da classe 6H. Em função do diâmetro da rosca e da geometria dos corpos-de-prova, utilizou-se como profundidade de filetes completos 30 e 36 mm para as roscas M16 e M25, respectivamente. Para executar esta avaliação, aplicou o planejamento fatorial mostrado na tabela 4.

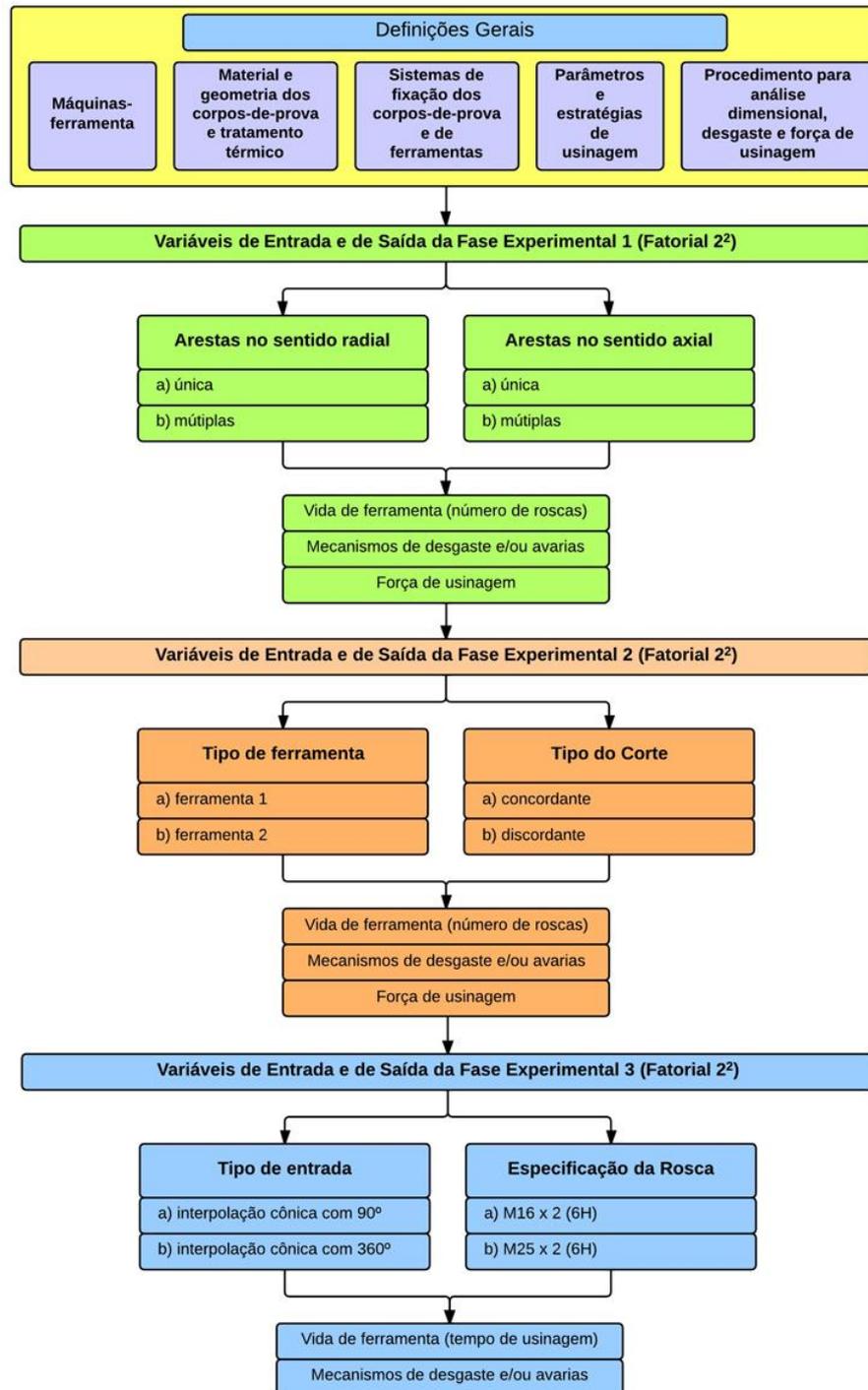
**Tabela 4 – Planejamento fatorial para fase experimental 3.**

Fator	Nível Baixo	Nível Alto
Especificação da rosca	M16 x 2 mm (6H)	M25 x 2 mm (6H)
Ângulo de Entrada	90°	360°

### 3.7 Fluxograma do planejamento experimental

Com o objetivo de facilitar a compreensão do planejamento experimental, elaborou-se o fluxograma mostrado na figura 34.

**Figura 34 – Fluxograma do Planejamento Experimental.**



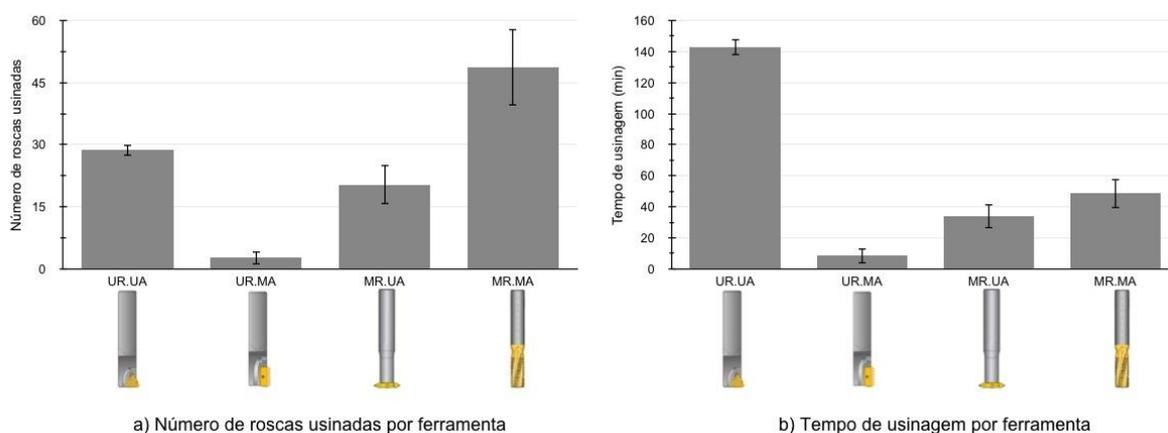
## 4 Resultados de Discussões

Neste capítulo serão descritos os resultados dos ensaios de usinagem de roscas com a técnica de interpolação helicoidal. Com o objetivo de facilitar a compreensão, o capítulo será dividido nos seguintes tópicos: Fase experimental 1, 2 e 3 - conforme item 3.6. Cada um desses tópicos foi dividido em vida de ferramenta, mecanismos de desgaste e/ou avaria e força de usinagem, além de um item de considerações parciais.

### 4.1 Fase experimental 1 – Vida de ferramenta

A figura 35 mostra os resultados de vida de ferramenta nos experimentos realizados, considerando o número de roscas na figura 35a e o tempo de usinagem na figura 35b. As colunas representam as médias obtidas nas réplicas de cada condição de usinagem e as linhas de dispersão representam o valor de mais ou menos um desvio padrão. Com o objetivo de auxiliar a compreensão, uma sigla e um desenho da ferramenta foram colocados logo abaixo de cada coluna de resultado.

**Figura 35 – Vida de ferramenta em função do número de roscas usinadas e do tempo de usinagem.**

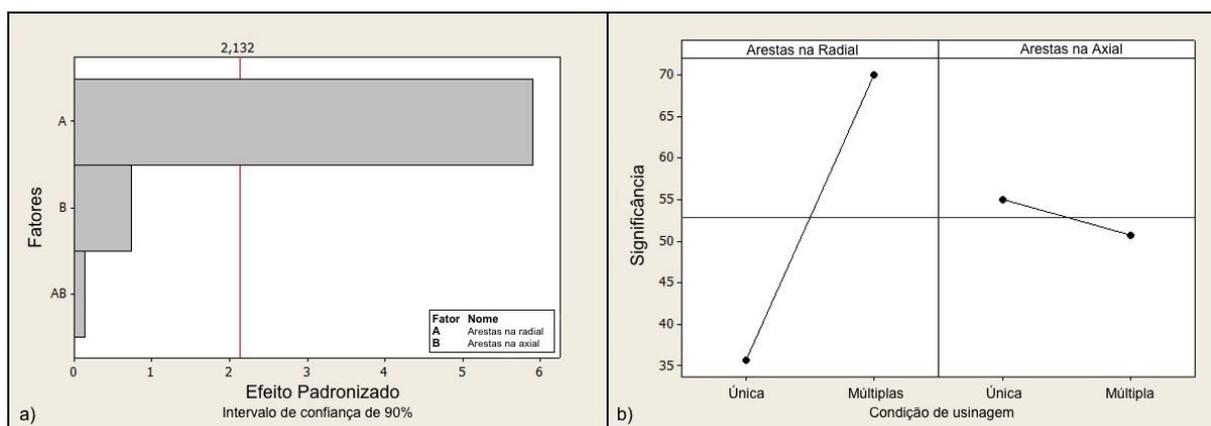


É importante ressaltar que para a determinação da vida da ferramenta, o diâmetro da interpolação helicoidal não foi alterado ao longo dos ensaios. Este recurso promove um aumento no diâmetro primitivo da rosca e um possível incremento no número de roscas usinadas. Por outro lado, o aumento deste diâmetro pode causar erros na geometria da rosca, principalmente no diâmetro maior de uma rosca interna, em função da alteração da geometria da aresta por desgaste e/ou avarias.

Ao observar a figura 35a, nota-se que a ferramenta de múltiplas arestas no sentido radial e axial apresenta uma vida superior às demais ferramentas considerando o número de roscas usinadas. Este comportamento já era previsto, pois para esse tipo de ferramenta a um posicionamento inicial no eixo “z” dentro do furo que garante um maior número de arestas usinando no momento inicial, e conseqüentemente menos voltas para usinar a rosca completa.

A análise estatística da influência e da interação dos fatores evidenciam os resultados mencionados. Ao observar o Diagrama de Pareto mostrado figura 36a, a qual utiliza um intervalo de confiança de 90%, o único fator com influência significativa é o número de arestas no sentido radial. Portanto, o número de arestas no sentido axial e a interação entre os fatores não promoveram uma influência significativa.

**Figura 36 – Diagrama de Pareto de influência dos fatores e interação dos fatores condição de usinagem, para vida da ferramenta em número de roscas.**



Ainda, ao analisar a figura 36b, a alteração do número de arestas no sentido axial tem restrita significância no número de roscas usinadas e tende a diminuir com a alteração de única aresta para múltipla aresta. Inicialmente, este resultado é contraditório ao que se espera, uma vez que uma ferramenta com múltiplas arestas deveria usinar mais roscas do que uma de única aresta. Contudo, os resultados de mecanismos de desgaste e/ou avarias e, principalmente, os resultados de força de usinagem - apresentados posteriormente - evidenciarão os fenômenos promotores do ocorrido. Por outro lado, o resultado apresentado para arestas no sentido radial é intuitivo e evidencia que a alteração de única aresta para múltipla aresta tem uma elevada significância no número de roscas usinadas.

Ao analisar o valor da velocidade de corte (80 m/min) utilizado nas condições experimentais desta pesquisa, nota-se uma diferença para os valores mencionados na literatura. Araujo e Silveira (2004) estudaram a usinagem de roscas M10 x 1,5 mm em

alumínio da série 6061 pelo processo interpolação helicoidal e a máxima velocidade de corte utilizada foi de 64 m/min. Mota (2006) estudou o processo de roscamento com machos rígidos (M6 x 1 mm) em ferro fundido cinzento e a maior velocidade de corte utilizada foi de 75 m/min. Bezerra (2003) também estudou o processo de roscamento com machos rígidos (M8 x 1,5 mm) em ferro fundido cinzento com maior velocidade de corte de 60 m/min. Apesar de Mota (2006) e Bezerra (2003) utilizarem ferramentas de aço-rápido, fator que limita a máxima velocidade de corte, a manutenção desta velocidade ao longo de toda a usinagem torna-se crítica para o processo. Isto se deve a necessidade de alterar o sentido de rotação do eixo-árvore durante a usinagem e a limitações do cabeçote reversor. Com a usinagem de roscas por interpolação helicoidal, estas limitações não existem. A única pesquisa identificada na literatura com velocidade de corte superior a dessa pesquisa foi Bretas (2009) que estudou a usinagem de roscas M16 x 1,5 mm em ferro fundido vermicular também com interpolação helicoidal (velocidades de corte de 85 a 100 m/min). Por outro lado, é importante ressaltar que todas as pesquisas citadas utilizaram materiais de menor dificuldade de usinagem do que os aços temperados e revenidos. Esta comparação mostra o potencial da usinagem de roscas por interpolação helicoidal, principalmente em função das velocidades de corte permitidas no processo.

Uma análise relacionada ao processo de formação dos filetes torna-se importante. Com a utilização de ferramentas de aresta única no sentido radial e axial (UR-UA da figura 35), a mesma aresta de corte é responsável pela formação de todos os filetes de rosca. Em outras palavras, ao atingir um determinado valor de desgaste na aresta de corte ou se ocorrer uma avaria, daquele momento em diante, todos os filetes são automaticamente comprometidos. Por outro lado, com a utilização de ferramentas de múltiplas arestas, somente nas duas primeiras voltas de formação dos filetes, mais do que uma aresta usina simultaneamente. Isto se deve ao posicionamento inicial da ferramenta abaixo da superfície do furo. Como descrito no item 3.6, após a ferramenta ser posicionada abaixo da superfície e no centro do furo, a primeira volta da ferramenta utiliza uma interpolação helicoidal cônica para atingir o diâmetro externo da rosca. Na segunda volta todas as arestas da ferramenta usinam o material com uma interpolação helicoidal cilíndrica. Entretanto, a partir da terceira volta, realizada com interpolação helicoidal cilíndrica, somente a aresta da extremidade da ferramenta é responsável pela formação dos filetes. As demais arestas apenas repassam a superfície usinada. Contudo, caso o desgaste da aresta da extremidade comprometa a geometria do filete ou, em função do desgaste e/ou avaria, a aresta seguinte torna-se

responsável pela formação do filete. Como será mostrado no item sobre desgaste e/ou avarias, este tipo de situação ocorreu frequentemente com as ferramentas de múltiplas arestas. Este fator foi determinante para o maior número de roscas usinadas por estas ferramentas.

Apesar do maior número de roscas usinadas pelas ferramentas de múltiplas arestas no sentido radial e axial, ao se analisar o custo da aresta de corte por número de roscas usinadas, a ferramenta de aresta única no sentido axial e radial promove o menor custo unitário. Isto deve-se principalmente a dois aspectos: número de arestas por inserto e custo do inserto. No inserto de aresta única existem três arestas de corte, enquanto que, a ferramenta de múltiplas arestas no sentido radial e axial é inteiriça. Contudo, o fator preponderante para o menor custo unitário por rosca usinada é o valor de cada inserto. O valor de compra do inserto de múltiplas arestas no sentido radial e axial é 18 vezes maior do que o do inserto de aresta única no sentido radial e axial. Ao se ponderar o custo da aresta de corte de cada ferramenta em relação ao número médio de roscas usinadas, tem-se que a condição de usinagem de roscas com ferramenta de aresta única e 80 m/min, o que promove o menor custo unitário. Entretanto, esta análise considera apenas o custo da aresta de corte e o número de roscas usinadas. Para determinação global do menor custo da operação, outros fatores devem ser analisados, tais como: tempo de usinagem, o valor da hora-máquina e a variedade de roscas no processo.

Do ponto de vista de tempo de manufatura, a usinagem de roscas curtas promove uma grande vantagem para as ferramentas de múltiplas arestas no sentido axial e radial, pois um número reduzido de voltas com interpolação helicoidal cilíndrica é necessário quando comparado às de aresta única. Porém, com o aumento da profundidade da rosca, esta diferença tende a ser reduzida. Paralelamente a esta análise, máquinas-ferramenta com valores de hora-máquina elevados e componentes seriados de elevada taxa de produção promovem uma vantagem para os menores tempos de usinagem, pois o menor custo da ferramenta não justifica o custo do maior tempo de usinagem.

Em contrapartida, em segmentos caracterizados por peças únicas - como é o caso da área de manutenção e de moldes - ter uma ferramenta flexível para inúmeras especificações de roscas é preponderante em relação ao tempo de usinagem. O motivo é que a ferramenta de múltiplas arestas no sentido radial e axial permite usinar apenas um valor de passo de rosca, enquanto, a ferramenta de aresta única permite uma faixa de valores de passo. A análise da viabilidade econômica destes aspectos depende de detalhes específicos do processo e produto

usinado. Assim, os dados fornecidos por esta pesquisa tornam-se subsídios para a tomada de decisão no ambiente industrial.

Considerando ainda o ambiente industrial, as operações de roscamento são caracterizadas por componentes de alto valor agregado. Estas operações frequentemente estão entre as últimas etapas do processo produtivo, nos quais o risco de quebra de uma ferramenta pode gerar a perda da peça (MÜLLER e SOTO, 1999). Neste caso, as fresas de interpolação de roscas apresentam grande vantagem, pois caso ocorra a quebra da ferramenta dentro da rosca, sua retirada é simples. Além disto, a rosca afetada poderá ser repassada e concluída sem que suas dimensões finais sejam prejudicadas. As ferramentas para usinagem de roscas por interpolação caracterizam-se pela alta flexibilidade, possibilitando a usinagem de diferentes materiais, principalmente os aços temperados e revenidos, como evidenciado nesta pesquisa. Utilizando o recurso de interpolação helicoidal, diferentes diâmetros de roscas, com qualquer grau de qualidade dimensional são fabricadas somente com a alteração de parâmetros no programa CNC. Além disto, roscas direitas e esquerdas, passantes e não-passantes, internas e externas, dependendo do comprimento útil podem ser usinadas (GRZESIK, 2008).

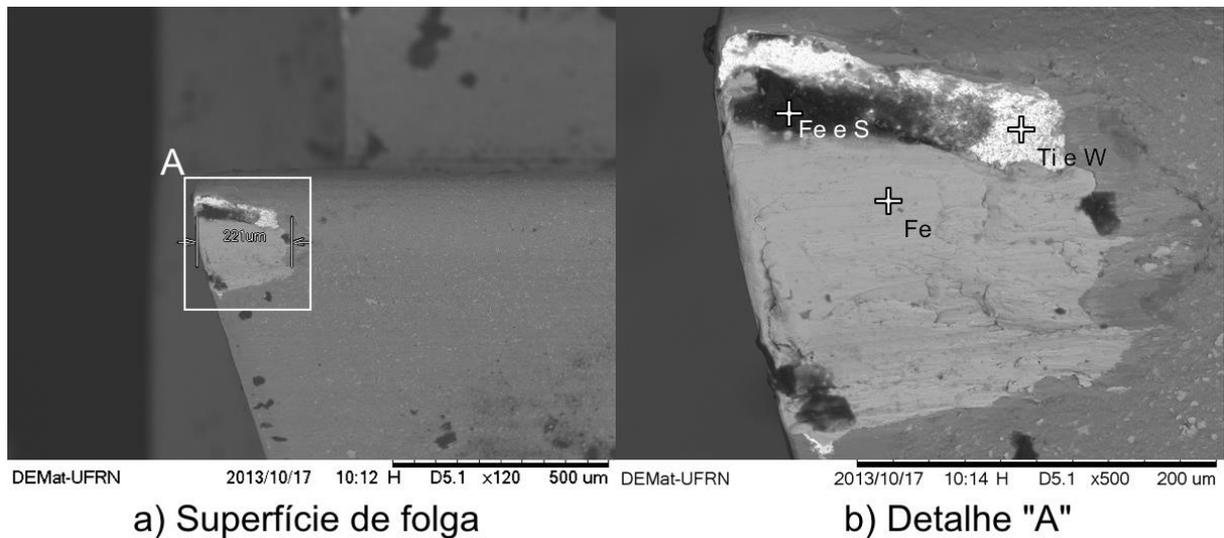
Vale ressaltar que dois critérios de definição de fim de vida da ferramenta foram adotados: a) desgaste de flanco ( $VB_B=0,20$  mm); b) limitação ao lado passa do calibrador de rosca. A vida da ferramenta era preponderantemente interrompida em função da utilização do lado Passa do calibrador. Desta forma, a compreensão dos fatores limitantes para a usinagem é fundamental e realizada com a análise dos mecanismos de desgaste e/ou avarias nas arestas de corte. Este item é descrito a seguir.

## **4.2 Fase experimental 1 - Desgaste e/ou avarias de ferramentas**

O estudo dos fenômenos tribológicos nos processos de usinagem é imprescindível na determinação do material da ferramenta de corte, das estratégias de usinagem e dos parâmetros de usinagem. Melhorias como redução nos valores de rugosidade, incrementos na vida útil da ferramenta e obtenção de estreitas tolerâncias dimensionais podem ser obtidas com o conhecimento das interações entre superfícies com movimento relativo (SHAW, 2005; TRENT e WRIGHT, 2000). Com o objetivo de determinar os tipos de avarias e mecanismos de desgaste nas ferramentas utilizadas, após atingir o critério de final de vida, preponderantemente definido pelo calibrador P-NP (passa e não-passa), análises de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foram realizadas nas arestas de corte das

ferramentas. Para facilitar a compreensão, são mostradas as imagens que melhor representam os fenômenos observados para cada ferramenta utilizada. A figura 37 mostra a superfície de folga da ferramenta de aresta única no sentido radial e axial.

**Figura 37 - Superfície de folga da ferramenta de única aresta no sentido axial e radial.**



Na figura 37a pode ser notado um lascamento na aresta de corte, o qual estendeu-se predominante pela região. Ressalta-se que, nesta pesquisa, o lascamento será denominado avaria com tamanho superior a 0,20 mm na superfície de folga (critério de fim de vida) e microlascamento as avarias com dimensões inferiores a mencionada. A análise dimensional do tamanho do lascamento evidencia uma dimensão de 221 µm. Com objetivo de promover uma melhor compreensão da região da avaria, o detalhe A foi ampliado na figura 37b. A avaria do Detalhe “A” é caracterizada por uma retirada abrupta de material da superfície de folga e por adesão de material na região central da avaria/desgaste. Na região superior do lascamento identifica-se, baseado em análises EDS, significativos teores de tungstênio e titânio (principal elemento do substrato e elemento da cobertura, respectivamente). No centro da região de avaria há elevados valores de ferro (oriundo do material usinado) possivelmente aderido sobre o lascamento. A adesão desse material na região central da avaria do detalhe “A” aparece em forma de escamas, indicando ser o somatório de adesões menores em diferentes momentos do corte. Esta análise sugere que, no final de vida da ferramenta, a cobertura da ferramenta é removida deixando o substrato exposto a adesões do material usinado. Uma terceira análise EDS indica elevados valores de Ferro e Enxofre, os quais são tipicamente caracterizados como óxidos presentes nas regiões periféricas da área de corte. Machado et al. (2009) afirmam que a isenção de impurezas e óxidos na superfície recém

formada (com lascamento) quando submetida à elevadas temperaturas favorece interação química com o material usinado ou com o oxigênio do ar. Por outro lado, riscos característicos do fenômeno de abrasão e deformações da aresta de corte características do fenômeno de deformação plástica, não foram evidenciados nessa análise inicial. Tais fenômenos foram encontrados por autores que pesquisaram processos em condições análogas (BRETAS, 2009; CHANDRASEKARAN; M'SAOUBI, 2006; GHANI; CHOUDHURY; MASJUKI, 2004)

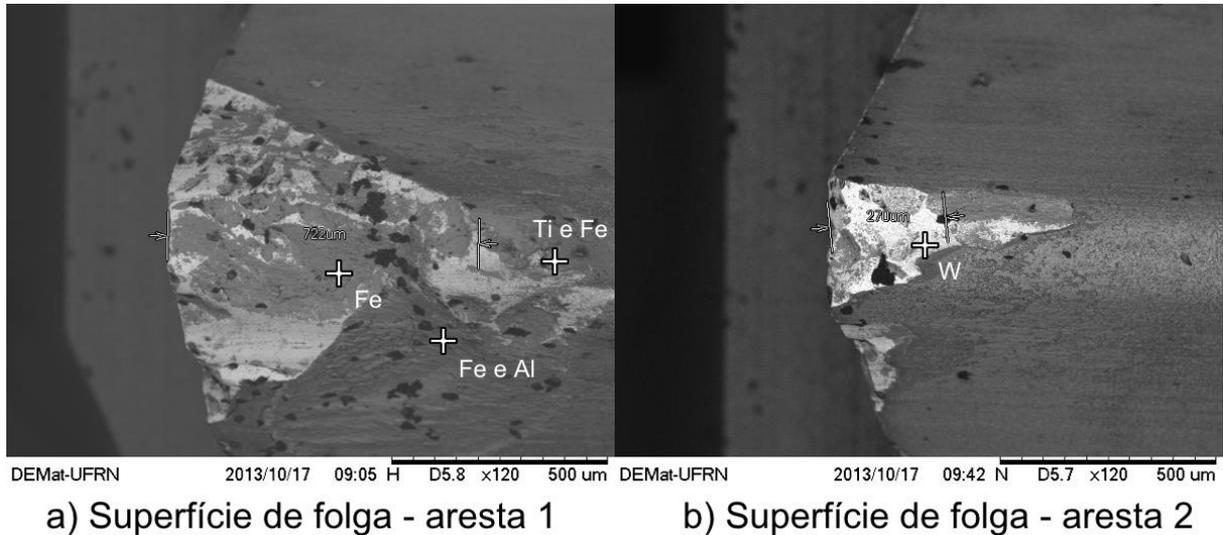
Hipóteses para ocorrência de lascamento na aresta de corte são associadas interação de três fatores: a rigidez do sistema de fixação de ferramenta, ao baixo índice de usinabilidade do material do corpo-de-prova e ao corte discordante. A cada rotação da ferramenta há um carregamento mecânico entre o final de ciclo inativo (ferramenta sem contato com a peça) e o início do ciclo ativo, gerando um carregamento compressivo. Contudo, mesmo havendo tenacidade suficiente para absorver os choques e evitar a quebra imediata, é fundamental enfatizar que a aresta de corte usinou aproximadamente 140 minutos (conforme a figura 35b) e, desta forma, foi sujeitada à elevada fadiga, levando ao surgimento de trincas e de posteriores lascamentos. Os consecutivos choques da aresta de corte com o material do corpo-de-prova de elevada faixa de dureza suportado por um porta-ferramenta delgado, conforme item 3.3, também podem promover lascamentos semelhantes ao detalhe “A” da figura 37.

Ghani, Choudhury e Masjuki (2004) realizaram experimentos de fresamento de topo no aço AISI H13, com dureza de 50HRC, utilizando ferramentas de metal duro da classe P10 com cobertura de TiN. Com velocidade de corte ( $v_c$ ) de 280 m/min, avanço por dente ( $f_z$ ) de 0,25 mm, profundidade radial de usinagem ( $a_e$ ) de 3 mm e profundidade axial de usinagem ( $a_p$ ) de 0,3 mm, os principais mecanismos de desgaste e/ou avarias identificados nas arestas de corte foram os lascamentos e as trincas de origem térmica. (Kopac, Sokovic e Dolinsek (2001) também identificaram lascamentos e quebras na aresta de corte ao usinarem uma liga de aço endurecido X38CrMoV5.1, semelhante ao aço AISI H13, com faixa de dureza 47-48 HRC, utilizando ferramentas da classe P com cobertura de TiAlN e TiN empregando os seguintes parâmetros de usinagem:  $v_c = 150$  m/min,  $f_z = 0,184$  mm,  $a_e = 0,3$  mm e  $a_p = 0,3$  mm. Uma comparação com os resultados mencionados apenas não evidencia trincas de origem térmica na figura 37.

Com a utilização da ferramenta de única aresta no sentido radial e múltiplas arestas no sentido axial, a presença de avarias também impossibilitou a passagem do calibrador passa

na entidade usinada. A figura 38 mostra a superfície de folga da ferramenta de múltiplas arestas no sentido axial e única aresta no sentido radial utilizada.

**Figura 38 - Superfície de folga da ferramenta de única aresta no sentido radial e múltiplas arestas no sentido axial.**



Conforme pode ser observado na figura 38, as imagens da superfície de folga de duas arestas sucessivas na ferramenta mostram que, novamente, o lascamento é a avaria predominante. É possível observar, principalmente na aresta mostrada na figura 31a, a presença de elevados teores de ferro na região central (provavelmente do material usinado), ferro e alumínio em um lado da região periférica (do material usinado e da cobertura) e titânio e ferro (da cobertura e do material usinado) em outra região periférica próxima ao final do lascamento de 722  $\mu\text{m}$ .

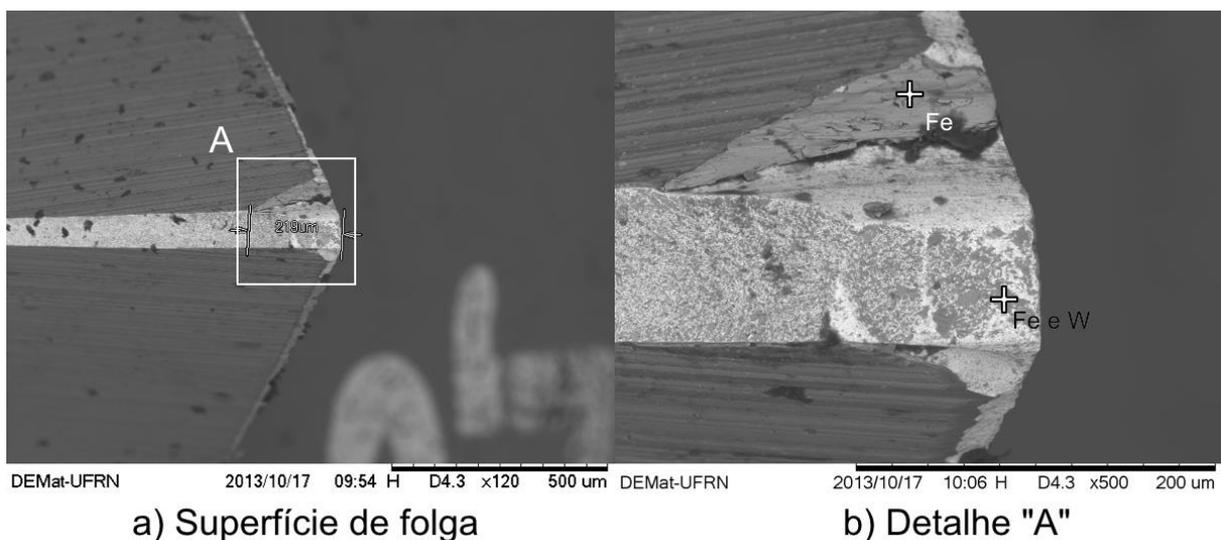
As avarias mostradas na figura 38 podem ter duas hipóteses principais para a explicação: choques com a microestrutura martensítica e os elevados carregamentos mecânicos para o processo. Apesar de a fadiga mecânica ser uma característica de operações com corte interrompido é importante lembrar que esta ferramenta foi a que proporcionou o menor tempo de usinagem (10 minutos). Uma explicação para o elevado carregamento na entrada da ferramenta é que cada rosca usinada tem de 15 filetes (30 mm de profundidade rosca e passo de 2 mm) e como o posicionamento da ferramenta para início do corte é realizado abaixo da superfície da placa, no caso de ferramentas com múltiplas arestas no sentido axial, o carregamento inicial é responsável pela formação de 5 filetes (o posicionamento é realizado 10 mm abaixo da superfície). Mesmo considerando que a primeira volta utiliza uma interpolação helicoidal é cônica, o que reduz o carregamento na entrada, os

valores são elevados considerando o material usinado. Os valores de força de usinagem para esta ferramenta serão descritos no próximo item.

Bretas (2009) utilizou a técnica de fresamento de roscas por interpolação helicoidal em ferro fundido vermicular (com dureza de aproximadamente 14 HRC) com uma ferramenta semelhante à utilizada nesse ensaio, no entanto de classe diferente (K15), com  $v_c = 80 - 100$  m/min,  $f_z = 0,05$  mm e  $a_p = 0,75$  mm. Os principais mecanismos de desgaste e/ou avarias identificados nas arestas de corte foram os lascamentos e desgaste abrasivo. Iyer, Koshy e NG (2007), também identificaram microlascamentos e quebras na aresta de corte ao usinarem furos por interpolação helicoidal em uma liga de aço D2, com dureza de 60 HRC, utilizando ferramentas da classe P com cobertura de TiAlN e TiCN/TiN, com  $v_c = 30 - 47$  m/min,  $f_z = 0,1$  mm e  $a_p = 0,66$  mm. Estes resultados são similares aos apresentados na figura 38, contudo não há evidências de desgaste abrasivo nas arestas de corte com esta ferramenta.

Com a utilização da ferramenta de múltipla aresta no sentido radial e única aresta no sentido axial, a presença de avaria também impossibilitou a passagem do calibrador passa na entidade usinada. A figura 39 mostra a superfície de folga da ferramenta de múltiplas arestas no sentido radial e única aresta no sentido axial utilizada.

**Figura 39 - Superfície de folga da ferramenta de múltiplas arestas no sentido radial e única aresta no sentido axial.**



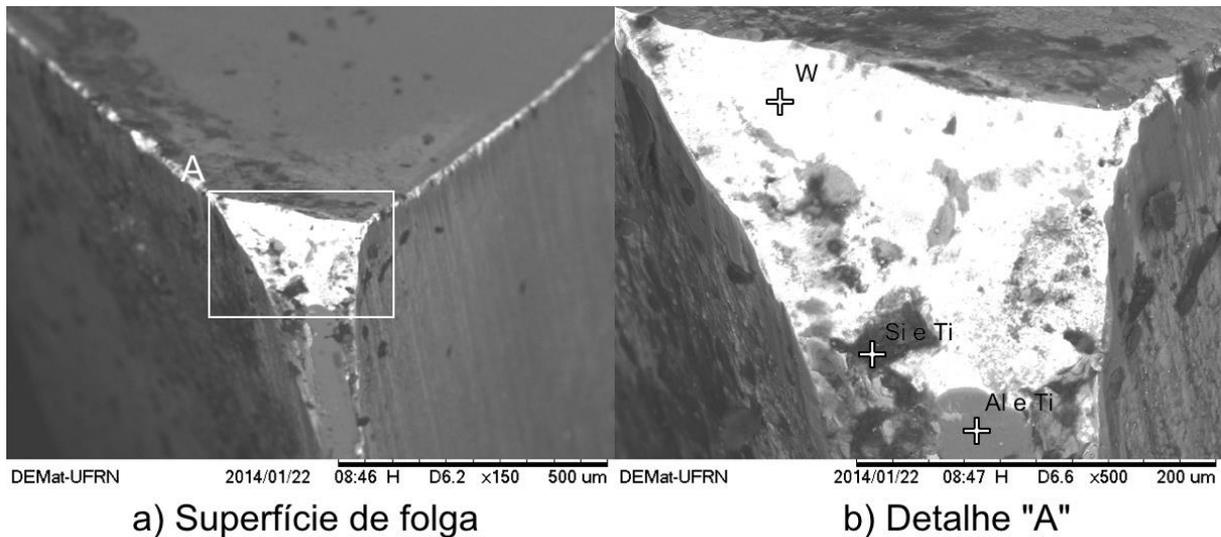
Na figura 39a pode-se notar um lascamento na aresta de corte e moderada abrasão nas laterais. É importante enfatizar que o tamanho da avaria é praticamente o critério de fim de vida da ferramenta, com dimensão de 210  $\mu\text{m}$ . Com objetivo de promover melhor análise da avaria, o detalhe "A" da figura 39a foi ampliado na figura 39b. A aresta de corte mostrada

na figura 39b é caracterizada por uma retirada abrupta de material na superfície e por adesão na região central. Na região do central lascamento identifica-se, baseado em análises EDS, significativos teores de tungstênio (principal elemento do substrato). Bem próximo à região de avaria há elevados valores de ferro (material usinado) possivelmente aderido sobre o lascamento. Normalmente trincas de origem mecânica ocorrem paralelas à aresta de corte, tanto na superfície de saída como na superfície de folga da ferramenta, culminando em lascamentos que podem condenar a ferramenta de corte. Uma característica importante das trincas de origem mecânica é que elas podem se propagar, e interagir com outras trincas, inclusive com eventuais de origem térmica, e levar ao aparecimento de lascamentos (MACHADO et al., 2009).

Chandrasekaran e M'Saoubi (2006) estudaram o fresamento de uma cavidade em aço H13 com dureza de 50 HRC utilizando ferramentas em metal duro da classe P20 com cobertura de TiCN-TiAlN-TiN, com  $v_c = 80$  m/min,  $f_z = 0,15$  mm e  $a_p = 0,3$  mm, o principal mecanismo de desgaste e/ou avaria identificado na aresta de corte foi o desgaste de flanco. Contudo, com o incremento nos parâmetros de usinagem para  $v_c = 300$  m/min,  $f_z = 0,2$  mm e  $a_p = 2$  mm, ocorreu uma alteração no mecanismo de desgaste e/ou avaria, tornando evidente a presença de microlascamento e de adesão. Esta é uma forte evidência que a adequação dos parâmetros de usinagem é fundamental para a manutenção de um mecanismo de desgaste que torne o desgaste progressivo e determinável, o que permite a troca da ferramenta em momentos pré-determinados. Contudo, os resultados com a ferramenta de múltiplas arestas no sentido radial e única aresta no sentido axial, utilizados nesta pesquisa, mostram que a busca por alternativas para um mecanismo de desgaste progressivo é imprescindível.

Com a utilização da ferramenta de múltipla aresta tanto no sentido radial como axial não ocorreram mudanças significativas para o mecanismo de desgaste e/ou avaria encontrada. A figura 40 mostra a superfície de folga da ferramenta de múltiplas arestas no sentido radial e axial utilizada. Esta ferramenta, que é inteiriça de metal duro, necessitou ser cortada próximo à sua extremidade (aproximadamente 10 mm) para a análise com MEV, uma vez que a câmara de vácuo do equipamento não permitia a entrada de toda a ferramenta. Além disso, em função da hélice na ferramenta, não é possível posicionar a superfície de saída de forma ortogonal à projeção. Este é o motivo para aparência de perspectiva na imagem e análises dimensionais realizadas com o equipamento, como, por exemplo, para determinar o tamanho do desgaste e/ou avaria, necessitariam de um fator de correção.

**Figura 40 - Superfície de folga da ferramenta de múltiplas arestas no sentido radial e axial.**



Na figura 40a pode-se notar um lascamento na aresta de corte. Com objetivo de promover melhor análise da avaria, o detalhe “A” da figura 40a foi ampliado na figura 40b. Novamente, a ampliação da avaria evidencia quebra abrupta da aresta de corte e por limitadas adesões na região central da avaria. Trata-se esta imagem como quebra abrupta, pois não houve tempo para a deposição, normalmente em camadas, de material usinado sobre o substrato exposto, mesmo diante de elevada afinidade química. Ressalta-se também que esta foi a ferramenta que possibilitou a usinagem do maior número de roscas..

Ainda na região do lascamento da figura 40b identifica-se, baseado em análises EDS, significativos teores de tungstênio (principal elemento do substrato). Também identifica-se em regiões mais periféricas a presença de um ponto com elevados teores de silício e de titânio (o primeiro presente no material usinado e o segundo na cobertura da ferramenta) e outro ponto com elevados teores de alumínio e titânio (ambos da cobertura da ferramenta). O resultado de maior vida de ferramenta mostra forte associação com a geometria da ferramenta utilizada, já que além de possuir maior número de arestas cortantes tanto no sentido radial quanto no sentido axial possui também organização das arestas em hélice, promovendo a distribuição do carregamento de forma gradual ao longo do corte. Detalhes do carregamento serão discutidos no próximo item.

Uma análise global dos mecanismos de desgaste e/ou avaria evidencia que o lascamento das arestas de corte foi determinante para a interrupção do processo. Em muitos casos, a dimensão do lascamento é muito maior do que o critério de fim de vida determinado

para desgaste e/ou avaria. Este fato se deve à abrupta ocorrência da avaria, pois o valor do desgaste e/ou avaria era monitorado ao longo do processo com um microscópio óptico com o objetivo de identificar a progressão do valor do desgaste na superfície de folga. Contudo, quando a falha ocorria também impossibilitava a utilização do lado “passa” do calibrador de rosca. O aumento da rigidez do sistema de fixação de ferramenta não é viável tecnicamente, pois o porta-ferramenta deve ser delgado com o objetivo de permitir a usinagem de roscas de pequenos diâmetros e relativas profundidades. Ainda, os parâmetros de usinagem são reduzidos quando comparados aos da literatura para materiais similares. Contudo, um ponto pode modificar o mecanismo de desgaste e/ou avaria: o tipo de corte. Para realizar a usinagem da rosca (com hélice à direita) no sentido descendente é necessário utilizar o corte discordante. Este tipo de corte promove elevada pressão específica de corte na entrada da ferramenta, pois o valor da espessura do cavaco é próximo à zero. Outro agravante para os elevados valores de pressão específica de corte é a usinagem de aços temperados e revenidos. Portanto, uma hipótese para evitar os lascamentos nas arestas de corte é a utilização de corte concordante para a usinagem de roscas com interpolação helicoidal. Em contrapartida, a aplicação desse tipo de corte não é adequada para algumas ferramentas testadas nesta fase experimental.

### **4.3 Fase experimental 1 - Força de usinagem**

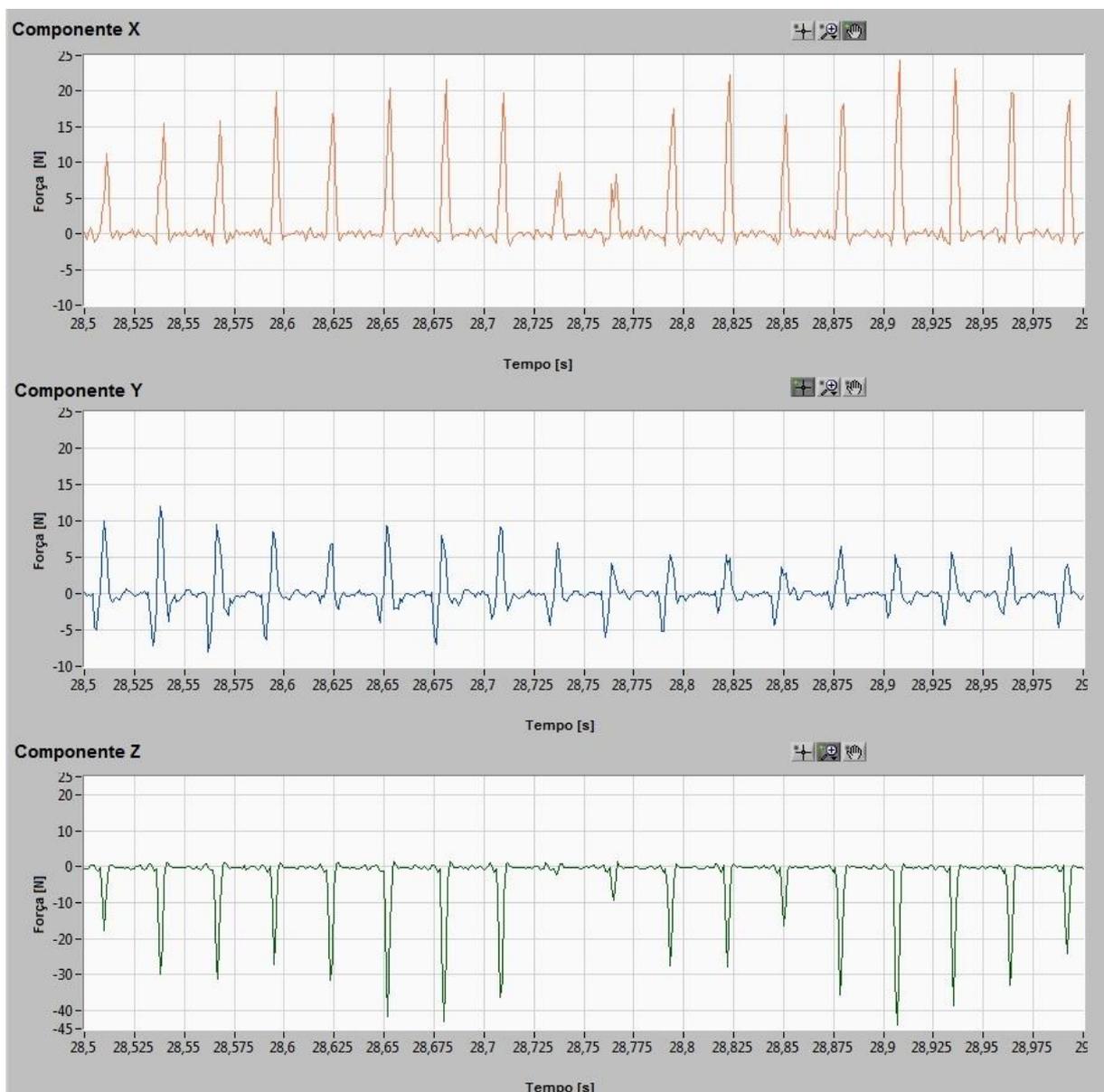
Os esforços de corte são influenciados por uma série de fatores (material da peça, material e geometria da ferramenta, parâmetros de usinagem, condições de refrigeração e lubrificação). Portanto o conhecimento do comportamento e da ordem de grandeza dos esforços de corte nos processos de usinagem é de fundamental importância, pois eles afetam a qualidade do produto, o controle da temperatura de corte e a taxa de desgaste nas arestas (MACHADO et al., 2009).

O comportamento das componentes da força de usinagem, principalmente na entrada da ferramenta, possui características distintas para cada caso utilizado nesta pesquisa. Com a utilização das ferramentas de aresta única no sentido axial (tanto com aresta única ou múltipla no sentido radial), as componentes da força de usinagem mostram um incremento gradual em suas componentes na primeira volta até atingir a estabilização nas demais voltas. Por outro lado, com a utilização das ferramentas de múltipla aresta no sentido axial (tanto com aresta única ou múltipla no sentido radial), as componentes da força de usinagem tendem a um valor máximo na primeira volta e, posteriormente, ocorre uma redução do valor até um patamar bem inferior durante a continuidade do processo. A representação do comportamento das

componentes da força de usinagem, para cada caso e durante todo o processo, é mostrada no Anexo 1. Contudo, como em cada eixo há mudança de sentido e de magnitude em função do movimento de translação da ferramenta, a análise do tempo total monitorado não permite considerações objetivas. Neste sentido, um trecho representativo de 500 ms foi retirado do sinal. O local de onde foi retirado do sinal global pode ser identificado com a escala de tempo (em segundos) no eixo das ordenadas. A escolha do trecho representativo sempre considerou um valor de pico na componente da força de usinagem no eixo “x”.

A figura 41 mostra o trecho representativo dos valores das componentes da força de usinagem para a ferramenta de única aresta no sentido radial e axial.

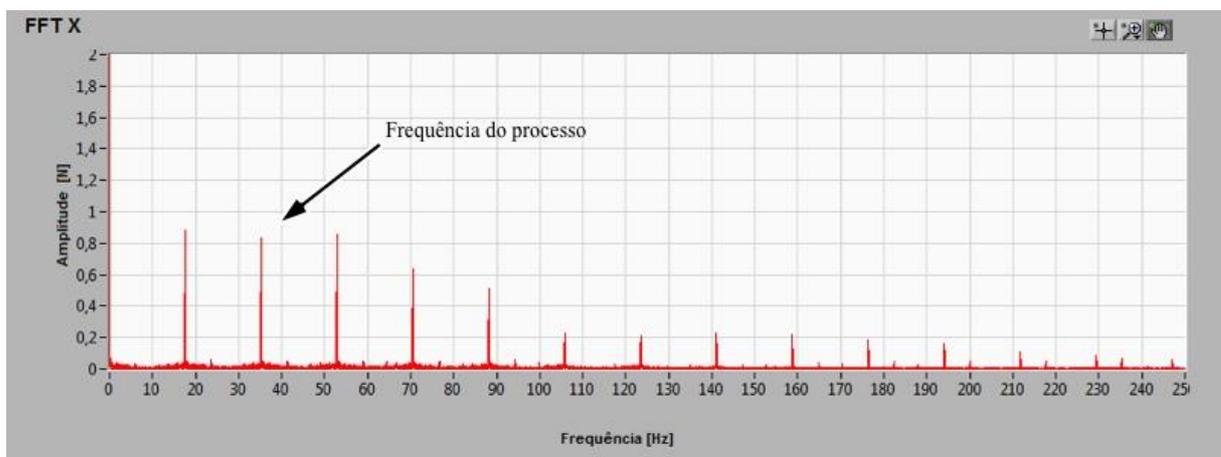
**Figura 41 – Forças medidas para ferramenta de aresta única no sentido axial e radial.**



A orientação dos eixos pode ser correlacionada com a geometria da figura 27: o eixo “x” corresponde ao eixo horizontal, o eixo “y” corresponde ao eixo vertical e o eixo “z” corresponde ao eixo que contém a linha de centro do furo. Outro ponto importante a ser ressaltado é que o sinal negativo significa apenas mudança no sentido da força tendo como referência a regra da mão direita. Finalmente, o monitoramento das componentes da força de usinagem representa o segundo passe (ver figura 33) em função dos maiores valores das componentes.

Assim, observa-se na figura 41 que as componentes “x”, “y” e “z” comportam-se de forma cíclica durante a usinagem. Para o eixo “x” observa-se que o sinal comporta-se acima da linha de referência “0”, identificando os períodos ativos (contato ferramenta-peça) e passivos (em que não há contato ferramenta-peça). Em relação ao eixo “y”, o comportamento é similar, considerando a diferença de magnitude e de sentido. A componente do eixo “z” mostra os picos em um único sentido do eixo. Com relação à frequência do processo, durante o intervalo 500 ms, nota-se que a aresta de corte toca o material usinado dezoito vezes com a condição de  $v_c = 80$  m/min, ou seja, a 2122 rpm. Isto está diretamente relacionado com o intervalo de cada passe da aresta de corte da ferramenta no corpo-de-prova, o que segundo a figura 41, tem uma frequência de 35 Hz e o tempo efetivo de contato é de 7 ms. Esses dados podem ser confirmados ao observar a FFT no eixo “x” para a ferramenta de única aresta no sentido radial e axial na figura 42.

**Figura 42 – FFT da força de usinagem no eixo x da ferramenta de única aresta no sentido radial e axial.**



Para se determinar a força de usinagem durante um momento da operação, adotou-se o ponto mais representativo da força no eixo “x” e valores correspondentes nos componentes “y” e “z”. Como referência, utilizou-se o ponto onde a intensidade da componente “x” é de 17

N, conseqüentemente as forças nos eixos “y” e “z” são 3 e 5 N, respectivamente. Como a força de usinagem é normalmente decomposta em seus três principais componentes:

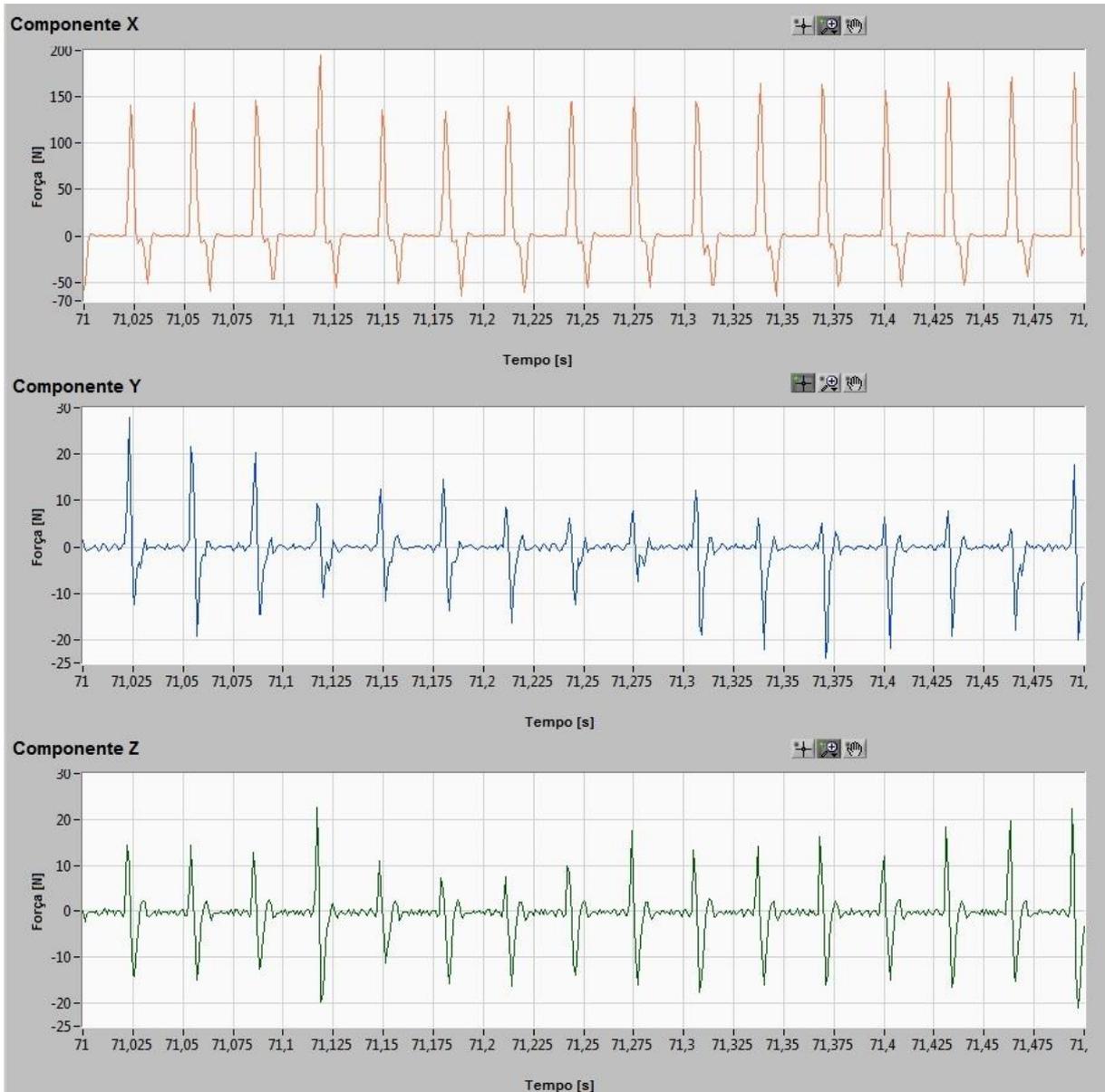
$$F_U = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}$$

Equação 2  
(ALTINTAS, 2000)

Utilizando os valores de referência na equação 2 tem-se que a intensidade da força de usinagem é de 18 N. Bretas (2009) utilizou uma ferramenta semelhante com  $v_c = 80 - 100$  m/min,  $f_z = 0,05$  mm e  $a_e = 0,75$  mm, atingindo valores de força de usinagem em torno de 40 N. No entanto, esses parâmetros representam a usinagem da rosca em um único passe e em outro material (ferro fundido vermicular). Por um lado, a pressão específica de corte tende a ser maior com um aço temperado e revenido, mas como a área usinada do aço temperado e revenido é muito menor os resultados da força de usinagem definidos por Bretas são aproximadamente o dobro.

A figura 43 mostra o trecho representativo dos valores das componentes da força de usinagem com a ferramenta de única aresta no sentido radial e múltiplas arestas no sentido axial.

**Figura 43 - Forças medidas para ferramenta de única aresta no sentido radial e múltiplas arestas no sentido axial.**



Observa-se na figura 43 que as componentes “x” e “y” comportam-se de forma semelhante à ferramenta de única aresta no sentido radial e axial (forma cíclica). Os sinais mostram os períodos ativos (contato ferramenta-peça) e passivos (em que não há contato da ferramenta-peça) da ferramenta em relação aos furos. A componente “z”, também mostra as forças nos dois sentidos do eixo caracterizadas principalmente por forças de compressão e tração realizadas na superfície do corpo-de-prova. É importante lembrar que várias arestas tocam o material usinado ao mesmo tempo no sentido axial e interação entre as arestas de corte e as superfícies previamente usinadas forma uma hipótese para os esforços trativos.

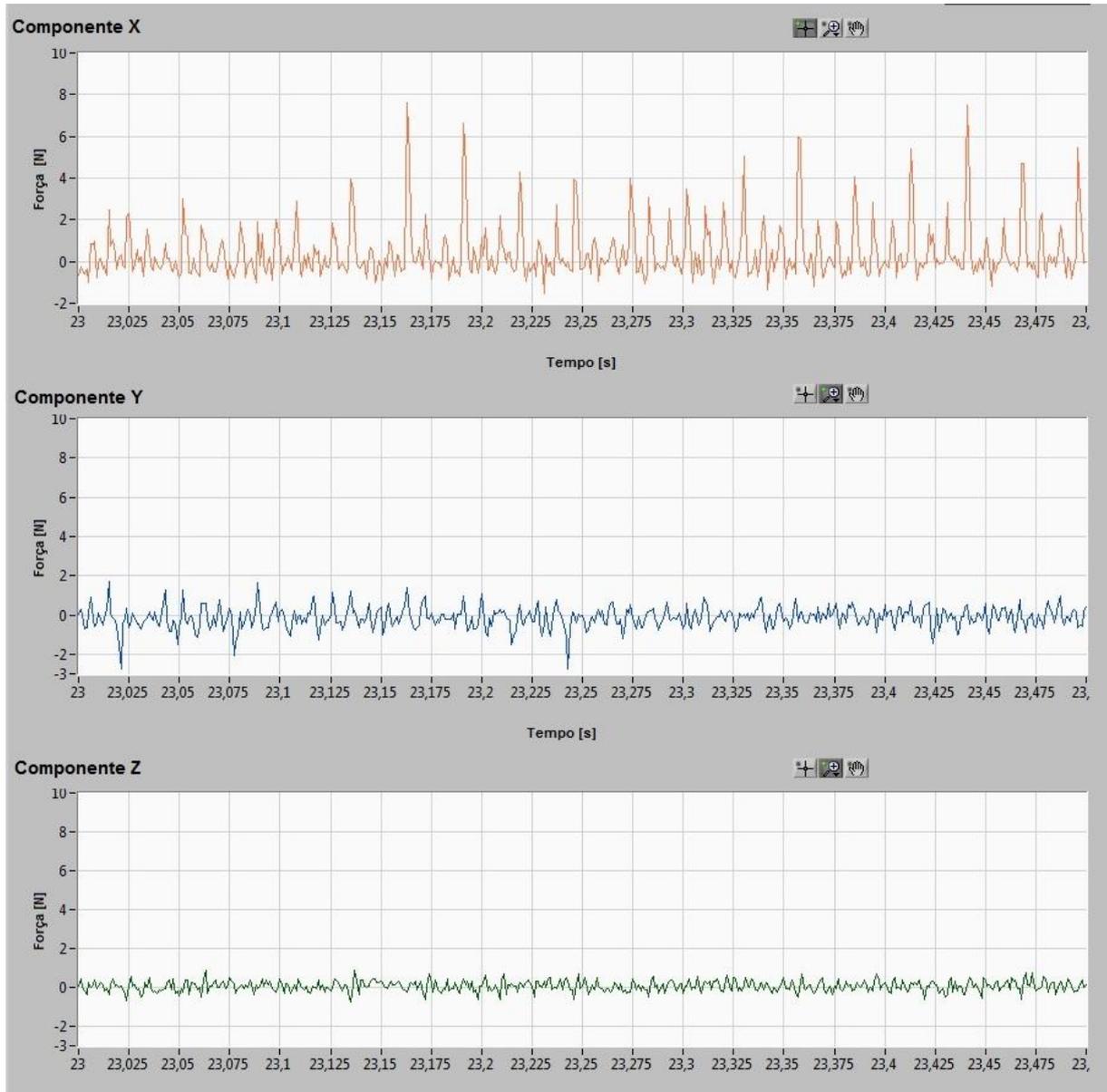
Durante o intervalo de tempo de 500 ms, nota-se que a ferramenta toca o material usinado dezesseis vezes com a condição de  $v_c = 80$  m/min, a ferramenta gira a 1914 rotações por minuto. Isto está diretamente relacionado com o intervalo de cada passe da aresta de corte da ferramenta no corpo de prova, o que segundo a figura 43 tem uma frequência de 31 Hz e o tempo de contato ferramenta/peça, ou seja, o tempo efetivo de contato é de 14 ms.

Para se determinar a força de usinagem durante um momento da operação, adotou-se o ponto mais representativo da força no eixo “x” e traçou-se uma linha passando pelas componentes “y” e “z”. Como referência, utilizou-se o ponto onde a intensidade da componente “x” é de 160 N, conseqüentemente as forças nos eixos “y” e “z” são 15 e 2,5 N respectivamente. Utilizando os valores de referência na equação 2 tem-se que a intensidade da força de usinagem é de 160,7 N.

Araujo e Silveira (2004) criaram um modelo de previsão de forças de usinagem em fresamento de roscas com uma ferramenta semelhante à utilizada nesse caso. Com  $v_c = 44$  m/min,  $f_z = 0,05$  mm, para uma rosca de 20 mm de profundidade, determinou-se valores de força de usinagem por volta de 150 N. No entanto, os valores de profundidade radial de corte ( $a_e$ ) e o tipo de material usinado não são mencionados. Apenas os valores de pressão específica de corte para cada eixo, os quais levam a supor que o modelo foi testado em materiais supostamente dúcteis, como por exemplo, alumínio ou bronze ( $K_f = 900$  N/mm<sup>2</sup>,  $K_n = 500$  N/mm<sup>2</sup> e  $K_z = 100$  N/mm<sup>2</sup>). Essa abordagem difere da literatura convencional, onde é disposto apenas um valor de energia específica de corte para cada material.

A figura 44 mostra a força em cada componente descrita para a usinagem da rosca com ferramenta de múltiplas arestas no sentido radial e única aresta no sentido axial. Vale ressaltar que este trecho é o mais representativo da usinagem, em que pode-se detectar valores máximos de força no eixo x.

**Figura 44 - Forças medidas para ferramenta de múltiplas arestas no sentido radial e única aresta no sentido axial.**



Observa-se na figura 44 que as componentes “x” e “y” comportam-se aparentemente de forma diferente das ferramentas apresentadas nos ensaios de força até agora, porém ainda mantendo o comportamento cíclico. Os sinais estão dispostos acima e abaixo da linha de referência “0” das componentes “x” e “y”, os quais demonstram os períodos ativos (em que ocorre contato ferramenta-peça) e os períodos passivos (em que não há contato) são dificilmente notados já que a frequência em que essa operação ocorre é no mínimo três vezes maior que as ferramentas anteriores. A componente “z”, também mostra as forças nos dois sentidos do eixo caracterizadas principalmente por forças de compressão e tração realizadas na superfície do corpo-de-prova, inferiores a 1 N.

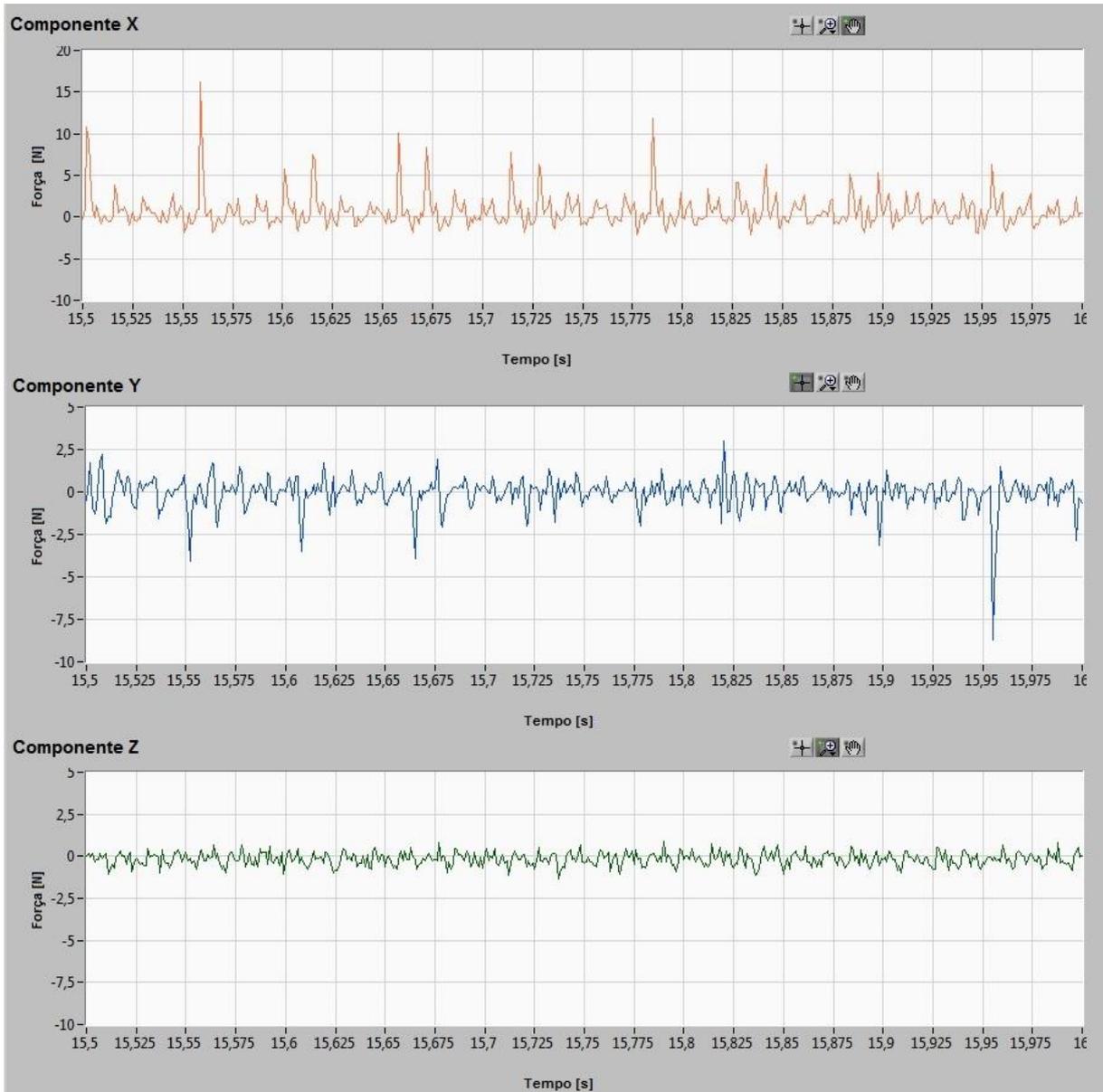
Após os picos de forças, observam-se pequenas variações no eixo “x”, as quais representam o tempo em que a ferramenta gira sem usinar, não havendo contato com o material do furo. Durante o intervalo de tempo 500 ms, nota-se que a ferramenta toca o material do corpo de prova cinquenta e quatro vezes com a condição de  $v_c = 80$  m/min, a ferramenta gira a 2158 rpm. Isto está diretamente relacionado com o intervalo de cada passe da aresta de corte da ferramenta no corpo-de-prova, que segundo a figura 44 tem uma frequência de 108 Hz e o tempo de contato ferramenta/peça, ou seja, o tempo efetivo contato é de 5 ms. Como a ferramenta tem três arestas no sentido radial isso implica as três arestas totalizam 15 ms de contato com a peça para cada volta.

Para se determinar a força de usinagem durante um momento da operação, adotou-se o ponto mais representativo da força no eixo “x” e obtiveram-se os valores correspondentes às componentes “y” e “z”. Como referência, utilizou-se o ponto onde a intensidade da componente “x” é de 4 N, conseqüentemente as forças nos eixos “y” e “z” são 0 e 0,5 N respectivamente. Utilizando os valores de referência na equação 2 tem-se que a intensidade da força de usinagem é de 4 N.

Atualmente restritas pesquisas vêm sendo efetuadas a respeito desse assunto. Algumas interessadas apenas na criação de modelos de força, não entrando nos méritos de qualidade dimensional e utilização da técnica em produção, como, por exemplo, Araujo, Fromentin e Poulachon (2013), Araujo, Silveira (2004) e Araujo et al. (2006) e outras mais abrangentes como, por exemplo, Bretas (2009). No entanto, na literatura que trata a respeito do assunto não foi encontrada nenhuma simulação ou experimento que utilizasse uma ferramenta semelhante.

A figura 45 mostra a força em cada componente descrita para a usinagem da rosca com ferramenta de múltiplas arestas no sentido radial e axial. O trecho referem-se ao período mais representativo da usinagem, em que detecta-se os valores máximos no eixo “x”.

**Figura 45 - Forças medidas para ferramenta de múltiplas arestas no sentido radial e axial.**



Observa-se na figura 45 que as componentes “x” e “y” comportam-se aparentemente de forma semelhante à ferramenta de múltiplas arestas no sentido radial e única aresta no sentido axial (forma cíclica). Os sinais estão dispostos acima e abaixo da linha de referência “0” das componentes “x” e “y”, os quais demonstram os períodos ativos (em que ocorre ferramenta-peça) e os períodos passivos (em que não há contato) são dificilmente notados já que a frequência em que essa operação ocorre é no mínimo quatro vezes maior que as ferramentas de única aresta no sentido radial. A componente “z”, também mostra as forças nos dois sentidos do eixo caracterizadas principalmente por forças de compressão e tração realizadas na superfície do corpo-de-prova, inferiores a 2 N.

Após os picos de forças, observam-se pequenas variações no eixo “x”, as quais representam o tempo em que a ferramenta gira sem usinar, não havendo contato com o material do furo. Diferente das ferramentas anteriores, os picos descritos na figura 45 não podem ser assumidos como instantes em que a aresta de corte entrou em contato com a peça, pois a geometria dessa ferramenta contém um ângulo de hélice que pode resultar em contato simultâneo de mais de uma aresta com o corpo-de-prova.

Para se determinar a força de usinagem durante um momento da operação, adotou-se o ponto mais representativo da força no eixo “x” e obtiveram-se os valores das componentes “y” e “z”. Como referência, utilizou-se o ponto onde a intensidade da componente “x” é de 10 N, conseqüentemente as forças nos eixos “y” e “z” são 0,25 e 0,2 N respectivamente. Utilizando os valores de referência na equação 2, tem-se que a força de usinagem é de 10 N.

Dois pontos chamam atenção nos resultados apresentados por Araujo et al., 2006, conforme a figura 13. O primeiro é a diferença nos valores de  $F_x$  e  $F_y$ , pois caso estejam no mesmo plano deveriam promover valores similares. Os resultados apresentados por Araujo et al., 2006 divergem dos encontrados nesta pesquisa. Contudo, é importante mencionar que o material, os parâmetros de usinagem e a estratégia de usinagem são diferentes dos apresentados nesta pesquisa.

#### **4.4 Fase experimental 1 – Considerações parciais**

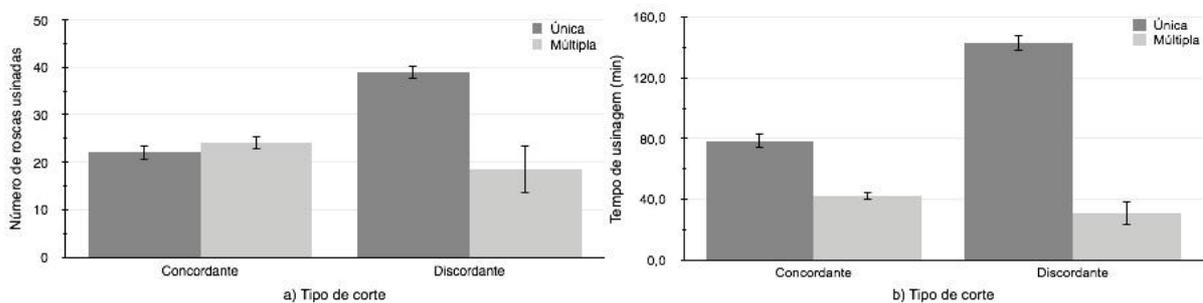
Os resultados descritos na fase experimental 1 evidenciam a viabilidade técnica da usinagem de roscas em aço temperado e revenido (40 HRC de dureza) com a técnica de interpolação helicoidal. As quatro configurações de ferramenta permitiram a usinagem de roscas, mas com desempenho distinto. Como esperado a ferramenta de múltiplas arestas no senti axial e radial proporcionou o maior número de roscas, mas também é a ferramenta mais dispendiosa e menos flexível. A ferramenta de única aresta no sentido radial e múltiplas arestas no sentido axial promoveu a menor vida de ferramenta e as maiores magnitudes de força de usinagem. As ferramentas com resultados mais significativos, em termos de roscas usinadas, foram a ferramenta de única aresta no sentido axial e radial e, em seguida, a ferramenta múltiplas arestas no sentido radial e única aresta no sentido axial. Essas também são as ferramentas mais flexíveis para a usinagem de roscas com a técnica de interpolação helicoidal. A análise estatística de vida de ferramenta confirma que o fator mais influente é o número de arestas na radial.

Contudo, o resultado mais preocupante é o mecanismo de desgaste e/ou avaria: os lascamentos ocorridos em todas as condições de usinagem. Essa é uma evidência da instabilidade do processo e pode ter diferentes causas: rigidez da ferramenta, tipo de corte, parâmetros usinagem inadequados. Como os parâmetros estão baseados na literatura e a rigidez da ferramenta não pode ser alterada, optou-se por testar, em uma fase experimental 2, o tipo de corte (discordante e concordante) com as duas ferramentas mais flexíveis em termos de geometria de rosca (única aresta no sentido axial e radial e múltiplas arestas no sentido radial e única aresta no sentido axial). A utilização das outras ferramentas para o corte concordante também seria inadequado, considerando que a ferramenta deve ser posicionada no ponto mais profundo do furo e realizar movimento ascendente. Neste caso, um grande número de dentes entraria em contato com o material usinado, promovendo elevados carregamentos para o sistema. As demais ferramentas também possibilitam a usinagem de roscas cônicas, foco de interesse futuro de pesquisa para a indústria do petróleo.

#### 4.5 Fase experimental 2 – Vida de ferramenta

Baseado nas considerações parciais da fase experimental 1, duas ferramentas foram escolhidas para ensaios do tipo de corte. A figura 46 mostra os resultados de vida de ferramenta considerando o número de roscas (na figura 46a) e o tempo de usinagem (na figura 46b). As colunas representam as médias obtidas nas réplicas de cada condição de usinagem e as linhas de dispersão representam o valor de mais ou menos um desvio padrão.

**Figura 46 - Vida de ferramenta em função do número de roscas usinadas e do tempo de usinagem.**

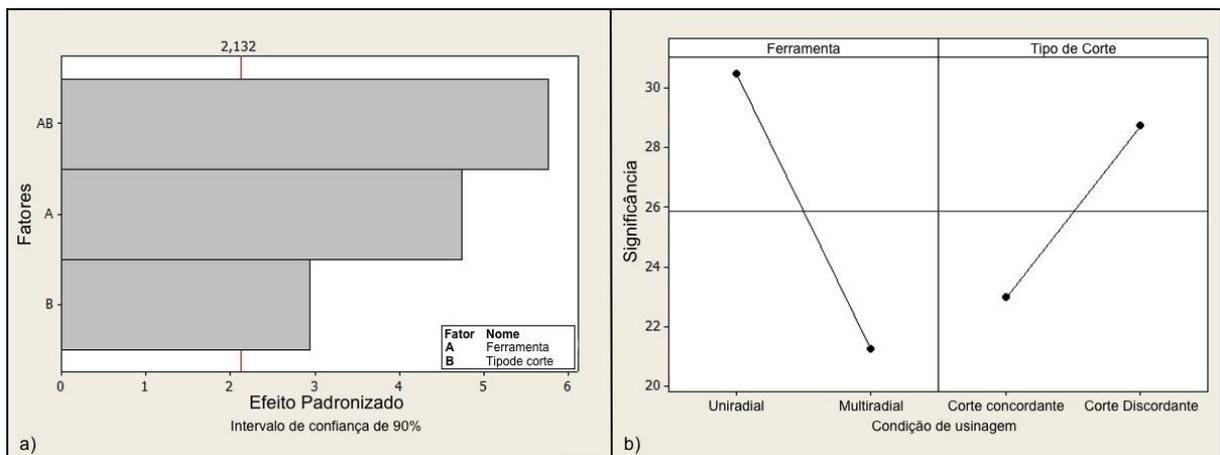


Ao observar a figura 46a, nota-se que a ferramenta de única aresta no sentido radial e axial apresenta a maior vida considerando o número de roscas usinadas. No entanto, sob as condições de corte discordante, análises em MEV e EDS evidenciaram um mecanismo de desgaste e/ou avarias indesejáveis ao processo, tornando o corte uma alternativa à estabilidade do mecanismo de desgaste. Este ponto será discutido com maior ênfase no próximo item. A

alteração do tipo de corte (corte concordante e corte discordante) promoveu um comportamento diferente para cada ferramenta. No caso da ferramenta de única aresta na radial (lembrado que as ferramentas têm somente uma aresta na axial), a alteração do corte concordante para discordante promove um aumento no número de roscas usinadas. Por outro lado, a ferramenta de múltiplas arestas na radial, a mesma alteração promoveu uma leve redução no número de roscas usinadas. O comportamento mencionado para número de roscas também é válido para tempo de usinagem, conforme observado na figura 46b.

A análise estatística da influência e da interação dos fatores evidenciam os resultados mencionados. Ao observar o Diagrama de Pareto mostrado figura 47a, a qual utiliza um intervalo de confiança de 90%, todos os fatores têm influência significativa. Portanto, o número de arestas no sentido radial, o tipo de corte e a interação entre os fatores promoveram uma influência significativa no processo.

**Figura 47 - Diagrama de Pareto de influência dos fatores e interação dos fatores condição de usinagem, para vida da ferramenta em número de roscas.**



Do ponto de vista do efeito padronizado, o tipo de ferramenta, ou seja, o número de arestas no sentido radial é mais significativo do que o tipo de corte. Contudo, a significância da interação é a mais representativa que os dois anteriores. Ao analisar a figura 47b, a qual considera uma significância global dos resultados, a alteração do número de arestas no sentido radial tem grande significância no número de roscas usinadas. O comportamento tende a diminuir com a alteração de única aresta para múltipla aresta, como mencionado anteriormente. Inicialmente, este resultado é contraditório ao que se espera, uma vez que uma ferramenta com múltiplas arestas deveria usinar mais roscas do que uma de única aresta.

Da mesma forma, ao alterar de corte concordante para discordante, ocorre um aumento na significância do processo. Tal fato já era esperado, pois de acordo com a literatura referente à usinagem de aços endurecidos é preferível a utilização de corte discordante a corte concordante.

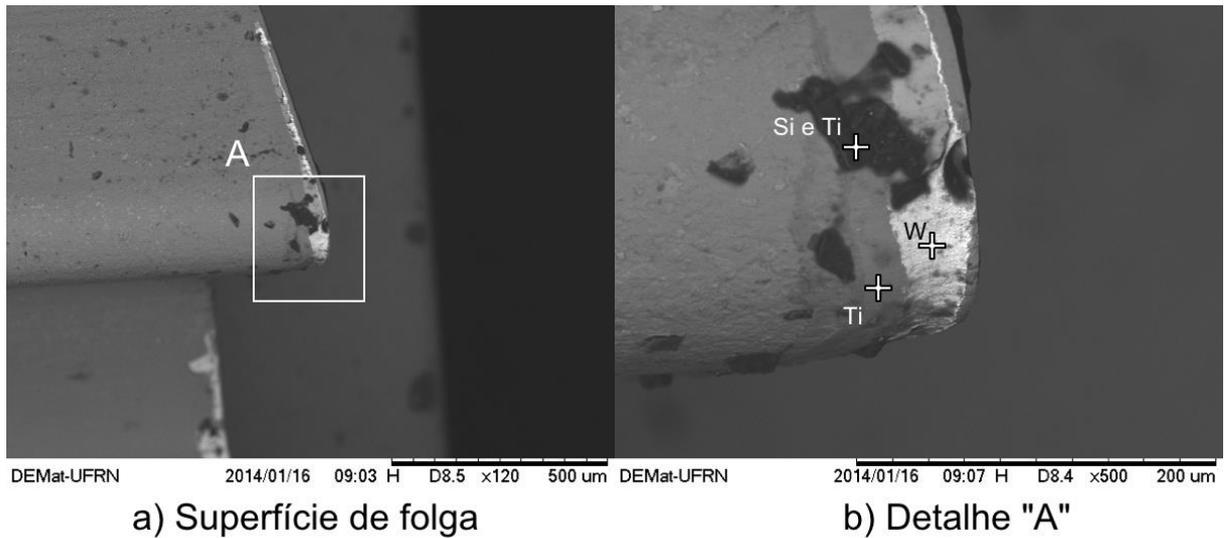
Analisando o número de roscas, os resultados de vida de ferramenta sugerem a utilização do corte discordante. Porém, estes resultados foram obtidos com lascamento nas arestas de corte. A alteração do tipo de corte mostra um aspecto positivo para o tipo de corte concordante: um mecanismo de desgaste com crescimento gradual. Estes resultados são apresentados no próximo item.

#### **4.6 Fase experimental 2 – Desgaste e/ou avarias de ferramentas**

Com o objetivo de determinar os tipos de mecanismos de desgaste e/ou avarias e nas ferramentas utilizadas na fase experimental 2, após atingir o critério de final de vida, preponderantemente definido pelo calibrador P-NP (passa e não-passa), análises de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foram realizadas nas arestas de corte das ferramentas. Para facilitar a compreensão, são mostradas as imagens que melhor representam os fenômenos observados para cada ferramenta utilizada. Vale ressaltar que serão apresentadas as imagens referentes ao corte concordante, uma vez que imagens representativas do corte discordante foram apresentadas na fase experimental 1. Ressalta-se que no caso do corte discordante, conforme pode ser observados nas figura 37 e figura 39, o principal mecanismo de desgaste e/ou avaria foi o lascamento da aresta de corte.

A figura 48 mostra a superfície de folga da ferramenta de aresta única no sentido radial e axial utilizada no ensaio de vida de ferramenta.

**Figura 48 - Superfície de folga da ferramenta de única aresta no sentido axial e radial.**



a) Superfície de folga

b) Detalhe "A"

Na figura 48a pode ser notado uma provável deformação plástica da aresta de corte. Tal suposição está baseada na deformação da cunha de corte da ferramenta ampliada no detalhe “A” (figura 48b). No centro da região do detalhe “A” nota-se a remoção do revestimento da superfície de folga, comprovado por análises em análises EDS, onde há significativos teores de tungstênio (principal elemento do substrato). Esta análise sugere que, no final de vida da ferramenta, a cobertura da ferramenta é removida deixando o substrato exposto. Esse tipo de fenômeno também foi observado no trabalho de Ávila (2003), no qual investigou o uso de ferramentas de metal duro com diferentes recobrimentos no torneamento de aço ABNT 4340 temperado e revenido.

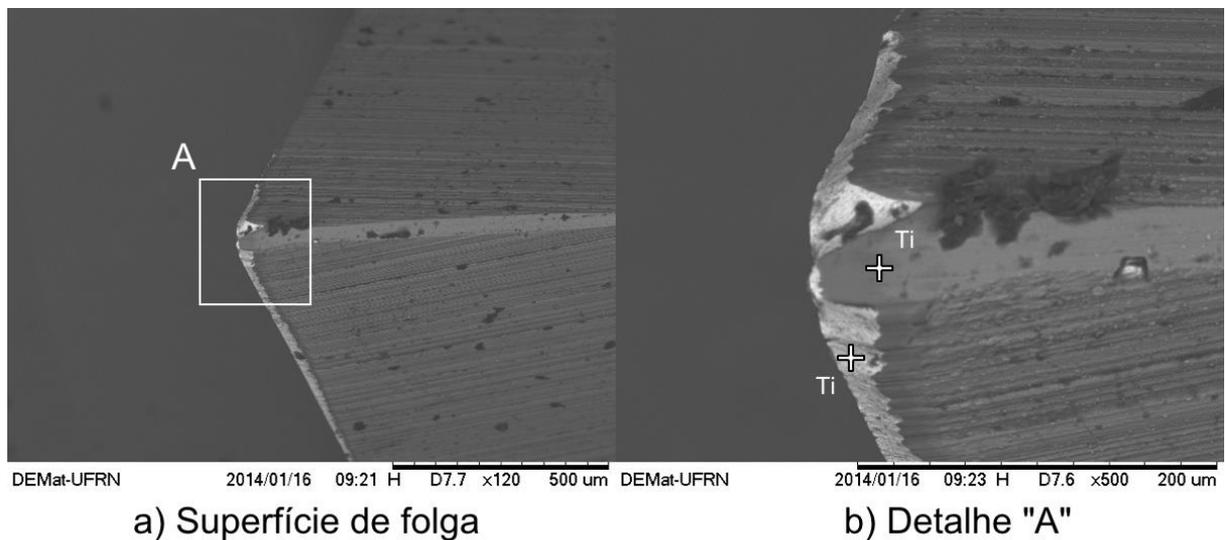
Hipóteses para ocorrência de deformação plástica na aresta de corte são associadas às combinações de altas tensões de compressão e a usinagem de material de alta dureza. Esses fatores associados às altas temperaturas na superfície de saída podem causar a deformação plástica da aresta de corte da ferramenta de metal duro. Geralmente, ocorrem em altas velocidades de corte e de avanço e levam a uma falha catastrófica da aresta de corte (TRENT e WRIGHT, 2000). As tensões compressivas são máximas na aresta de corte e decrescem exponencialmente até zero, no ponto em que o cavaco perde contato com a superfície de saída (final da zona de escorregamento). A extremidade da aresta de corte é a região em que a cunha é menos resistente, e dependendo da tensão promovida pelo material da peça, a ferramenta pode não suportar os carregamentos e entrar em colapso. É importante observar que o processo de carregamento do compressivo na ponta da ferramenta de corte atua como um processo de cisalhamento na superfície de folga da ferramenta. Essa é a hipótese

apresentada para explicar o fato ocorrido na figura 48b. Assim, o processo de desgaste, na realidade, ocorre também por cisalhamento (STEPHENSON e AGAPIOU, 2006).

A identificação do mecanismo de desgaste mencionado - abrasão na superfície de folga e deformação plástica da cunha de corte - evidencia um ponto positivo do corte concordante: não há uma avaria repentina na aresta de corte que inviabiliza a utilização do calibrador passa na geometria da peça. Desta maneira, de forma mais segura, há a possibilidade de interrupção do processo antes de uma rosca seja usinada com uma geometria inadequada à utilização do calibrador.

Com a utilização da ferramenta de múltiplas arestas no sentido radial e única aresta no sentido axial com emprego do corte concordante, a presença de desgaste abrasivo na superfície de folga também impossibilitou a passagem do calibrador passa na entidade usinada. A figura 49 mostra a superfície de folga da ferramenta de múltiplas arestas no sentido radial e única aresta no sentido axial utilizada.

**Figura 49 - Superfície de folga da ferramenta de múltiplas arestas no sentido radial e única aresta no sentido axial.**



Na figura 49a pode-se notar a ausência dos lascamentos descritos na fase experimental 1 (ver a figura 39). Na aresta de corte está evidente a presença de desgaste abrasivo nas arestas laterais e na cunha da ferramenta. Com objetivo de promover melhor análise da avaria, o detalhe "A" da figura 49a foi ampliado na figura 49b. A aresta de corte mostrada na figura 49b é caracterizada pela presença de vários sulcos paralelos entre si, que foram formados na direção do fluxo de material tanto do cavaco quanto da peça. É importante ressaltar que os valores de desgaste de flanco são muito inferiores ao critério de fim de vida

por desgaste de flanco ( $VB_B = 0,20$  mm). Esta comparação pode ser realizada utilizando a escala da legenda na figura. Na região central do desgaste abrasivo identificam-se, baseado em análises EDS, significativos teores de titânio (principal elemento da cobertura). Neste caso, atribui-se a esse ponto a presença de pontos da cobertura na região de desgaste abrasivo, uma vez que o elemento esperado para a região era o tungstênio (principal constituinte do substrato). Também há elevados valores de titânio em uma região central da aresta de corte e presume-se que neste ponto a cobertura não foi removida.

Uma análise dos mecanismos de desgaste e/ou avarias identificou uma diferença significativa entre corte concordante e discordante para usinagem de roscas por interpolação helicoidal. Enquanto para o corte discordante a principal avaria identificada foi o lascamento, no corte concordante o mecanismo de desgaste predominante foi o desgaste abrasivo na superfície de folga. Contudo, com o desgaste abrasivo na superfície de folga, o valor do desgaste de flanco é muito inferior ao determinado como fim de vida da ferramenta e o processo foi interrompido pela impossibilidade da utilização do lado passa do calibrador. Como as ferramentas são delgadas, um pequeno acréscimo na força de usinagem em função do desgaste pode aumentar expressivamente o valor da deflexão. Por outro lado, como não há um forte comprometimento da geometria da aresta de corte (como no caso do lascamento), uma solução simples para continuar com o processo é aumentar o diâmetro de interpolação helicoidal (alterando o corretor de desgaste no comando numérico da máquina-ferramenta). Entretanto, como mencionado no procedimento experimental, esta alternativa não foi utilizada com o objetivo de comparar o processo em condições idênticas de utilização.

#### **4.7 Fase experimental 2 – Força de usinagem**

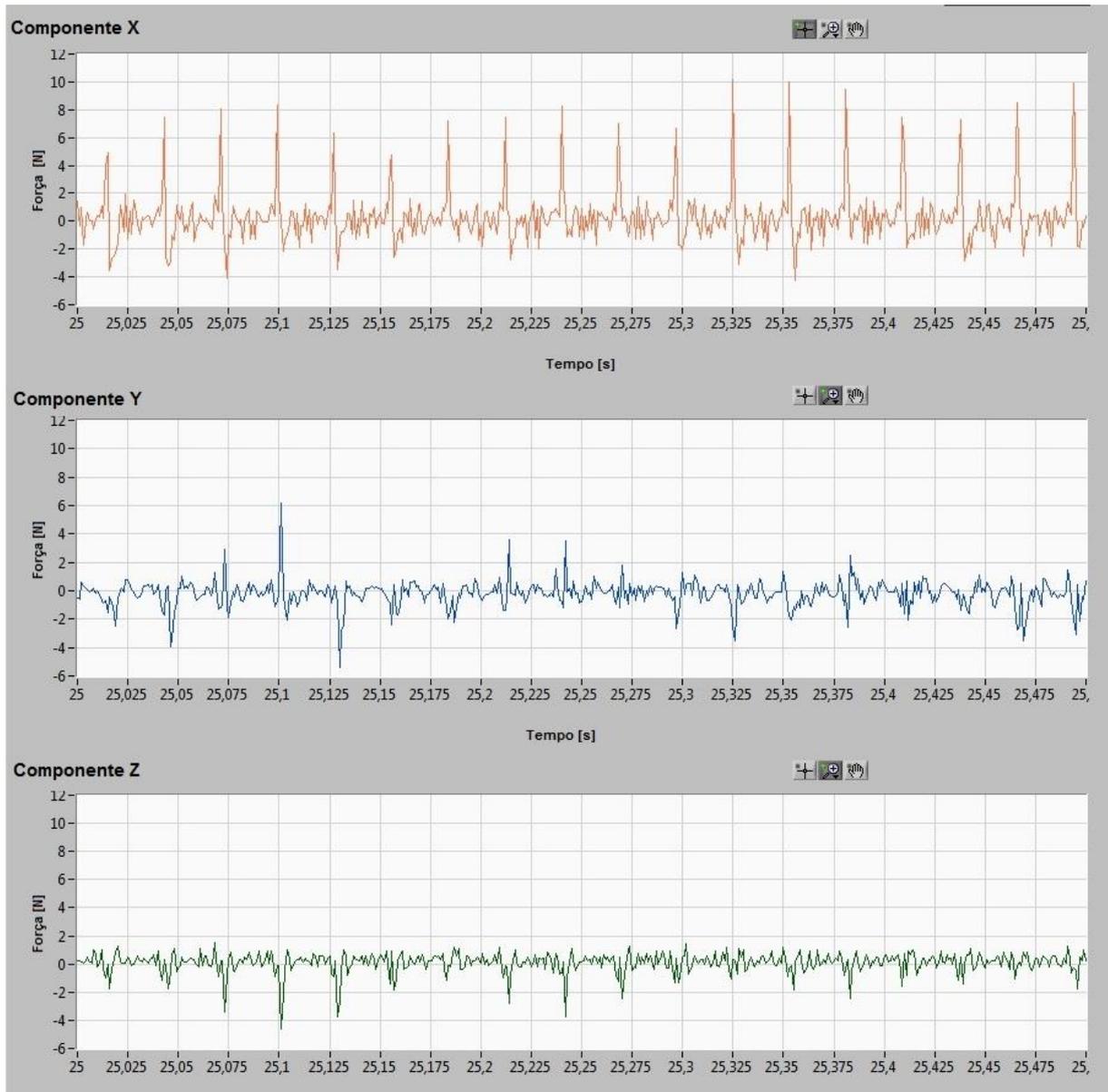
O comportamento dos esforços de corte, principalmente na entrada da ferramenta, possui características distintas se comparados aos ensaios realizados na fase experimental 1. Com a utilização do corte concordante, as entradas das ferramentas são realizadas com  $0^\circ$ , ou seja, forma linear ao eixo x. Com a utilização desse tipo de entrada, são observados que os valores das componentes da força de usinagem, inicialmente, são consideravelmente maiores, se comparados ao processo de interpolação helicoidal cônica. Os sinais descritos nesse item são ampliações de regiões que melhor representam as situações de usinagem. Apenas essas ampliações serão mostradas nesse item, deixando as representações dos sinais completos ilustradas no Anexo 1. Os fatores que determinam o comportamento serão descritos ao longo de cada análise deste item. Além disso, com o objetivo de facilitar a compreensão dos

fenômenos ocorridos durante a usinagem, a força de usinagem foi dividida em três componentes ortogonais. Posteriormente, realizou-se a comparação da resultante (força de usinagem) para cada condição utilizada.

Para melhor compreensão da cinemática do processo de usinagem de roscas com as ferramentas mencionadas, dividiu-se o tempo de operação em quatro estágios. A primeira etapa é o posicionamento rápido da ferramenta no centro do furo a uma distância de 4 mm acima da superfície do corpo-de-prova. O segundo estágio é posicionamento da ferramenta no furo, a 30 mm abaixo da superfície do corpo-de-prova. O terceiro estágio é a movimentação linear no eixo “x” até a profundidade de usinagem. E o quarto estágio envolve a interpolação helicoidal cilíndrica até a saída do furo. Neste caso, esta etapa conclui o roscamento em uma altura de 4 mm acima da superfície do corpo-de-prova.

A figura 50 mostra a força em cada componente descrita para a usinagem da rosca com ferramenta de única aresta no sentido radial e axial. Este o trecho é o mais representativo da usinagem, em que pode-se detectar valores máximos de força no eixo “x”.

**Figura 50 - Forças medidas para ferramenta de aresta única no sentido axial e radial.**



Observa-se na figura 50 que as componentes “x”, “y” e “z” comportam-se de forma cíclica durante a usinagem. Os sinais estão dispostos acima e abaixo da linha de referência “0” das componentes “x” e “y”, os quais demonstram os períodos ativos (contato ferramenta-peça) e passivos (em que não há contato) da ferramenta em relação aos furos. A componente “z”, mostra as forças aparentemente em um único sentido do eixo caracterizado principalmente por forças de tração realizadas na superfície do corpo-de-prova.

Após os picos de forças, observam-se pequenas inversões no eixo “x”, as quais representam a inércia do movimento de corte durante a operação, não havendo contato com o material do furo. Durante o intervalo de tempo de 500 ms, nota-se que a ferramenta toca o

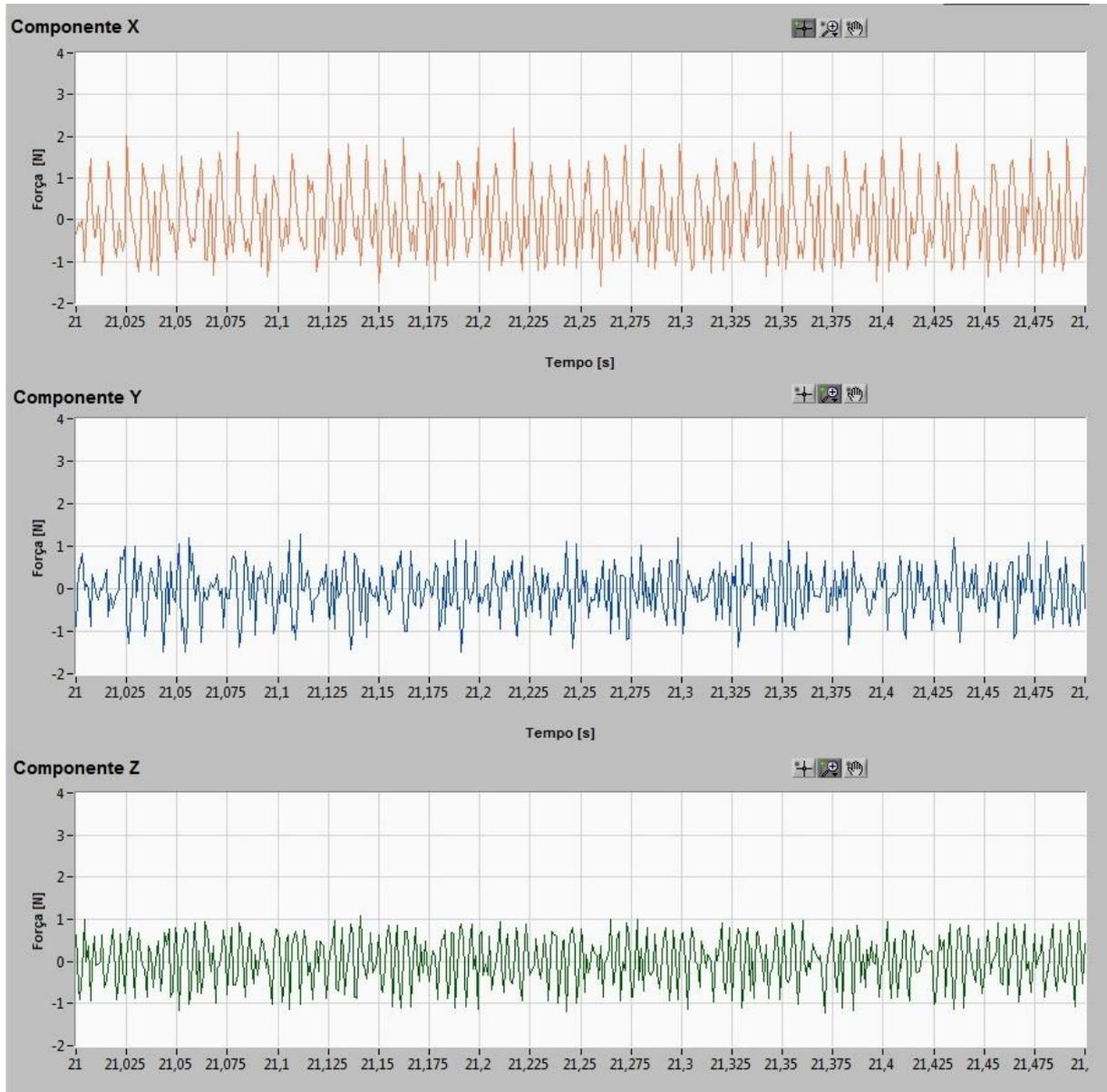
material do corpo de prova dezoito vezes com a condição de  $v_c = 80$  m/min, a ferramenta gira a 2122 rotações por minuto. Isto está diretamente relacionado com o intervalo de cada passe da aresta de corte da ferramenta no corpo de prova, que segundo a figura 50 tem uma frequência de 35 Hz e o tempo de contato ferramenta/peça, ou seja, o tempo efetivo contato por volta da ferramenta é de 7 ms.

Para se determinar a força de usinagem durante um momento da operação, adotou-se o ponto mais representativo da força no eixo “x” e obtiveram-se os pontos referentes às componentes “y” e “z”. Como referência, utilizou-se o ponto onde a intensidade da componente “x” é de 8 N, conseqüentemente as forças nos eixos “y” e “z” são 1 e 0 N respectivamente. Utilizando os valores de referência na equação 2 tem-se que a intensidade da força de usinagem é de 8 N.

Os ensaios anteriores mostraram valores de força de usinagem cerca de 120% maiores. Quando esses valores são comparados à pesquisa Bretas (2009), ocorre acréscimo de 250% sob as condições de corte concordante. Mas vale salientar que Bretas (2009) realizou a usinagem das roscas em um único passe em ferro fundido vermicular, implicando em uma área de usinagem maior juntamente com uma pressão específica de corte diferente, e conseqüentemente uma força de usinagem maior.

A figura 51 mostra a força em cada componente descrita para a usinagem da rosca com ferramenta de múltiplas arestas no sentido radial e única aresta no sentido axial. Menciona-se novamente que este é o trecho mais representativo da usinagem, em que pode-se identificar os valores máximos de força no eixo “x”.

**Figura 51 - Forças medidas para ferramenta de múltiplas arestas no sentido radial e única aresta no sentido axial.**



Observa-se na figura 51 que as componentes “x” e “y” comportam-se aparentemente de forma diferente das ferramentas apresentadas nos ensaios de força até agora, porém ainda mantém comportamento cíclico. Os sinais estão dispostos acima e abaixo da linha de referência “0” das componentes “x” e “y”, os quais demonstram os períodos ativos (contato ferramenta-peça) e os períodos passivos (em que não há contato) são dificilmente notados já que a frequência em que essa operação ocorre é no mínimo três vezes maior que as ferramentas anteriores. A componente “z”, também mostra as forças nos dois sentidos do eixo caracterizadas principalmente por forças de compressão e tração realizadas na superfície do corpo-de-prova, não maiores que 1 N.

Após os picos de forças, observam-se variações muito pequenas no eixo “x”, as quais representam o tempo em que a ferramenta gira sem usinar, não havendo contato com o material do furo. Durante o intervalo de tempo de meio segundo, nota-se que a ferramenta toca o material do corpo de prova cinquenta e quatro vezes com a condição de  $v_c = 80$  m/min, a ferramenta gira a 2158 rotações por minuto. Isto está diretamente relacionado com o intervalo de cada passe da aresta de corte da ferramenta no corpo de prova, que segundo a figura 51 tem uma frequência de 108 Hz e o tempo de contato ferramenta/peça, ou seja, o tempo efetivo de corte por volta por aresta é de 5 ms, como a ferramenta tem três arestas no sentido radial isso implica as três arestas totalizam 15 ms de contato com a peça para cada volta.

Para se determinar a força de usinagem durante um momento da operação, adotou-se o ponto mais representativo da força no eixo “x” e traçou-se uma linha passando pelas componentes “y” e “z”. Como referência, utilizou-se o ponto onde a intensidade da componente “x” é de 1,5 N, conseqüentemente as forças nos eixos “y” e “z” são 0,5 e 0,5 N respectivamente. Utilizando os valores de referência na equação 2 tem-se que a intensidade da força de usinagem é de 1,6 N.

Assim, utilizando o corte concordante a ferramenta de múltiplas aresta no sentido radial teve valores de força de usinagem em torno de 5 vezes menor que a ferramenta de única aresta no sentido (lembrando que as duas ferramentas têm apenas uma aresta no sentido axial). Este fato implica em um corte mais suave e com velocidade de rotação 3 vezes superior à ferramenta de única aresta, uma vez que utilizam o mesmo avanço por dente ( $f_z = 0,03$  mm).

#### **4.8 Fase experimental 2 – Considerações parciais**

A utilização do corte concordante promoveu como principal mecanismo de desgaste a abrasão na superfície de folga das arestas de corte para a usinagem de roscas com interpolação helicoidal. Uma hipótese para explicar essa mudança é o fato de no corte concordante a energia específica de corte ser maior no momento inicial do corte, e diminuir com a progressão do corte. Por outro lado, conforme a análise estatística e, principalmente influenciado pela ferramenta de aresta única no sentido radial, ocorre uma redução no número de roscas usinadas com o corte concordante a ser comparado pelo corte discordante. Contudo, como mencionado anteriormente, o fato de não ocorrer lascamento na aresta de corte e a geometria da mesma continuar muito próxima à inicial, é possível realizar um incremento no

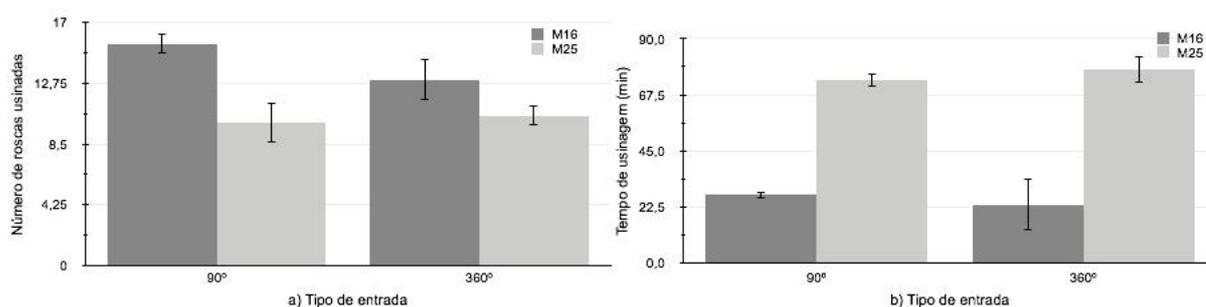
diâmetro da interpolação helicoidal e aumentar a quantidade de roscas usinadas sem comprometimento geométrico. Apesar desse procedimento não ter sido realizado na pesquisa experimental, é um procedimento rápido para ser executado em ambiente industrial.

Contudo, dois outros pontos tornaram-se dúvidas neste ponto da pesquisa: a) qual o impacto da relação entre diâmetro do furo e diâmetro da ferramenta para vida da ferramenta; b) caso a entrada da ferramenta não seja feita de forma linear - como a executada na Fase Experimental 2 - haverá uma alteração significativa no tempo de usinagem (vida de ferramenta) em função de uma entrada suavizada. Com o objetivo de entender as dúvidas mencionadas, realizou-se a Fase Experimental 3 utilizando a ferramenta de múltiplas arestas no sentido radial e única aresta no sentido axial.

#### 4.9 Fase experimental 3 – Vida de ferramenta

A figura 52 mostra os resultados de vida de ferramenta nos experimentos da fase Experimental 3, considerando o número de roscas na figura 52a e o tempo de usinagem na figura 52b. As colunas representam as médias obtidas nas réplicas de cada condição de usinagem e as linhas de dispersão representam o valor de mais ou menos um desvio padrão. Ressalta-se que todos os experimentos desta fase foram realizados com a ferramenta com múltiplas arestas no sentido radial e única aresta no sentido axial.

**Figura 52 - Vida de ferramenta em função do número de roscas usinadas e do tempo de usinagem.**

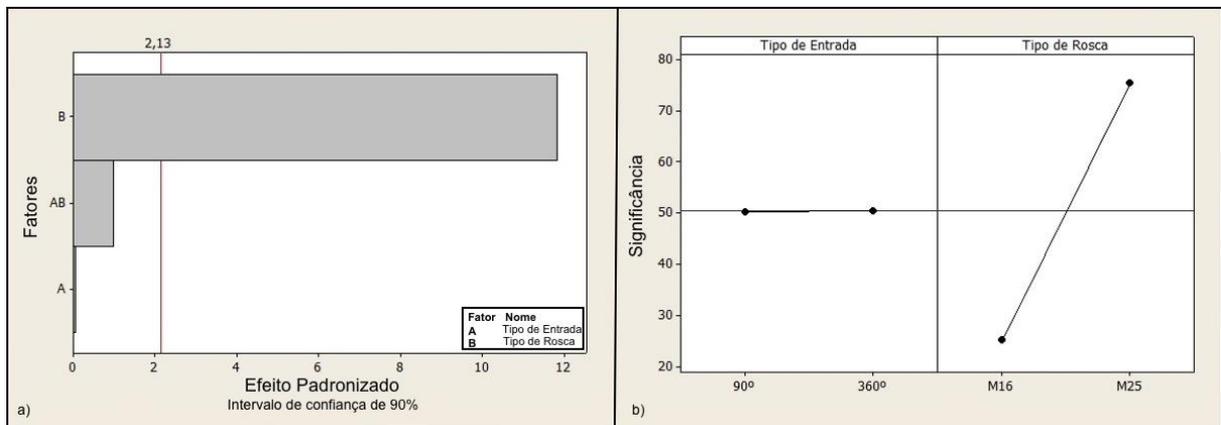


Ao observar a figura 52a, nota-se que a vida da ferramenta apresenta um maior número de roscas usinadas quando utilizadas para as roscas M16. Contudo, comparação do número de roscas não é um indicador coerente para este caso, pois o comprimento de contato é diferente em cada caso. A informação presente na figura 52a está disponível para efeitos de comparação com os resultados de fases anteriores. Neste caso, o parâmetro adequado para comparação é o tempo de usinagem, conforme a figura 52b.

Uma análise da figura 52b evidencia a o aumento da relação entre diâmetro do furo e diâmetro da ferramenta promove um acréscimo no tempo de usinagem. Ainda, segundo a mesma figura, não há uma grande diferença em termos de tempo de usinagem para as entrada a 90° e 360°.

A análise estatística da influência e da interação dos fatores evidenciam os resultados mencionados. Ao observar o Diagrama de Pareto mostrado na figura 53a, a qual utiliza um intervalo de confiança de 90%, o fator de maior influência é o tipo da rosca usinada. Portanto, o diâmetro de interpolação promove uma influência significativa no processo.

**Figura 53 - Diagrama de pareto de influência dos fatores e interação dos fatores condição de usinagem, para vida da ferramenta em número de roscas.**

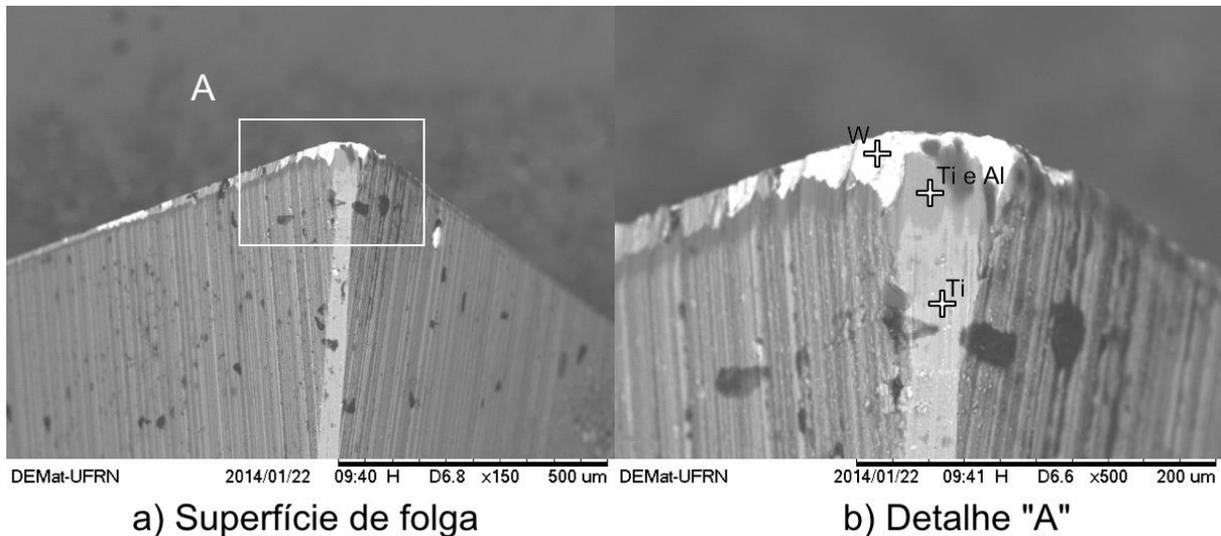


Ainda, ao analisar a figura 53b, a alteração do tipo de entrada não é tão significante quando comparado à mudança do tipo de rosca. Uma hipótese para explicar a alteração do tempo de usinagem com a alteração da relação entre diâmetro do furo e diâmetro da ferramenta é o comprimento de contato durante a fase ativa da aresta de corte. Quando a relação mencionada é menor - ou seja, como no caso da rosca M16, uma vez que o diâmetro da ferramenta é fixo - um maior comprimento de contato efetivo ocorre. Com o aumento da relação - ou seja, como no caso da rosca M25 - o comprimento de contato diminui. É importante enfatizar que o motivo da redução do comprimento de contato é simplesmente o aumento do raio do furo e pode-se imaginar que um raio do furo igual ao raio da ferramenta promoveria um comprimento de contato de 360°. Portanto, redução no comprimento de contato durante a fase ativa permite um maior tempo global de usinagem.

#### 4.10 Fase experimental 3 – Desgaste e/ou avarias de ferramentas

Com o objetivo de determinar os tipos de avarias e mecanismos de desgaste nas ferramentas utilizadas na fase experimental 3, após atingir o critério de final de vida, preponderantemente definido pelo calibrador P-NP (passa e não-passa), análises de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foram realizadas nas arestas de corte das ferramentas. Para facilitar a compreensão, são mostradas as imagens que melhor representam os fenômenos observados para cada ferramenta utilizada. A figura 54 mostra a superfície de folga da ferramenta utilizada no ensaio de vida de ferramenta para usinagem de uma rosca M16 com entrada a 90°.

**Figura 54 - Superfície de folga da ferramenta para uma rosca M16 com entrada a 90°.**

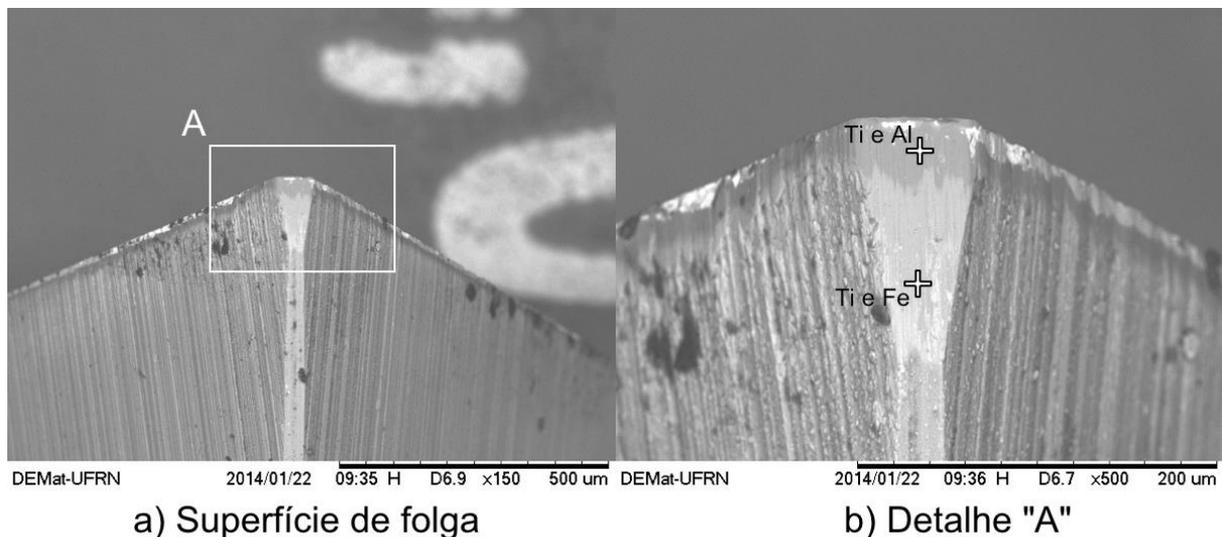


Na figura 54a pode-se notar a ausência de lascamentos descritos na fase experimental 1, porém fenômenos de desgaste e/ou avaria semelhantes aos descritos na fase experimental 2 foram identificados. Agora na aresta de corte é evidente a presença de desgaste abrasivo nas arestas laterais e na cunha da ferramenta. Com objetivo de promover melhor análise do desgaste, o detalhe “A” da figura 54a foi ampliado na figura 54b. A aresta de corte mostrada na figura 54b é caracterizada pela presença de vários sulcos paralelos entre si, que foram formados na direção da velocidade de corte. Na região central do desgaste abrasivo identificam-se, baseado em análises EDS, significativos teores de titânio e alumínio (principal elemento da cobertura). Na região desgaste de flanco há elevados valores de tungstênio (principal elemento do substrato).

Como no caso da fase experimental 2, é importante ressaltar que os valores de desgaste de flanco são muito inferiores ao critério de fim de vida por desgaste de flanco ( $VB_B = 0,20$  mm). Esta comparação pode ser realizada utilizando a escala da legenda da figura. Este ponto também evidencia que um maior número de roscas ainda pode ser usinado, no caso de aplicação em ambiente industrial do processo, com o aumento do diâmetro da interpolação helicoidal da ferramenta.

A figura 55 mostra a superfície de folga da ferramenta utilizada no ensaio de vida de ferramenta para usinagem de uma rosca M16 com entrada a  $360^\circ$ .

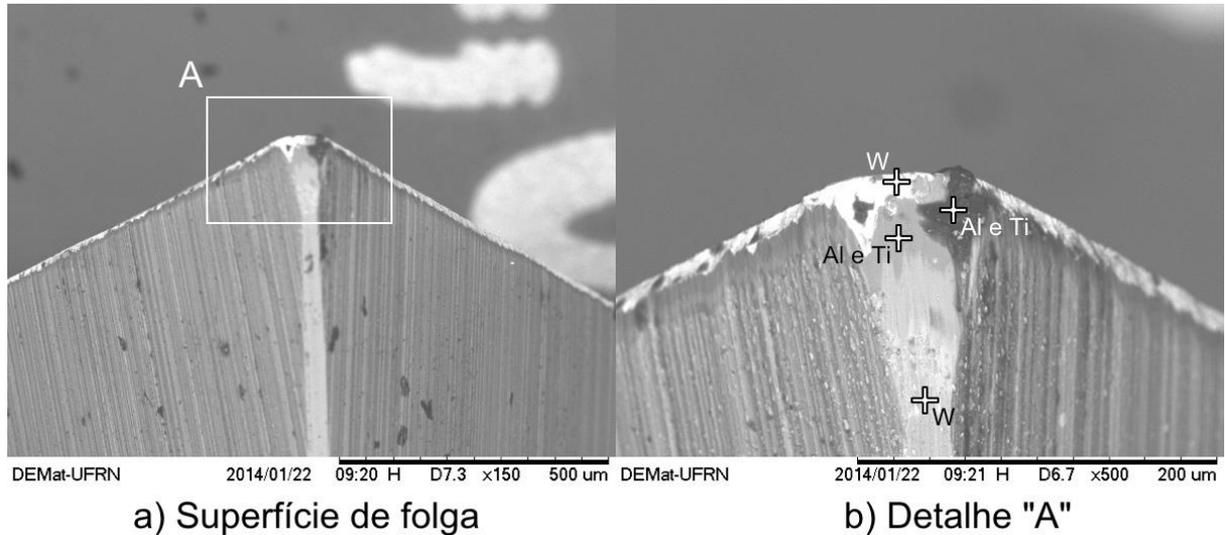
**Figura 55 - Superfície de folga da ferramenta para uma rosca M16 com entrada a  $360^\circ$ .**



Na figura 55a verificam-se restritos valores de desgaste de flanco e distribuídos uniformemente ao longo da aresta de corte. Com o objetivo de melhorar a compreensão da aresta de corte, o detalhe “A” da figura 55a foi ampliado na figura 55b. Na ampliação é evidente a presença de desgaste abrasivo nas arestas laterais. A aresta de corte mostrada na figura 55b é caracterizada pela presença de alguns sulcos paralelos entre si, que foram formados na direção da velocidade de corte. Na região central do desgaste abrasivo identificam-se, baseado em análises EDS, significativos teores de titânio e alumínio (principal elemento da cobertura). E localizado logo abaixo da região de avaria há elevados valores de titânio e alumínio também foram detectados. Essas análises EDS evidenciam que não houve fenômenos de desgaste e/ou avaria na região central cunha da ferramenta.

A figura 56 mostra a superfície de folga da ferramenta de aresta única no sentido radial e axial utilizada no ensaio de vida de ferramenta para usinagem de uma rosca M25 x 2 6H com entrada a 90°.

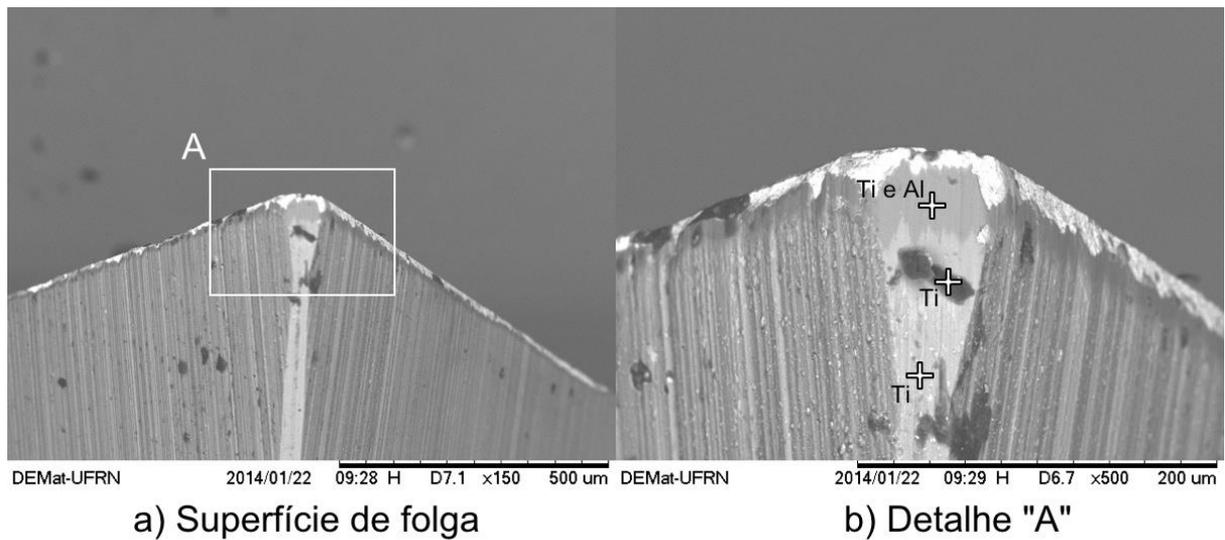
**Figura 56 - Superfície de folga da ferramenta para uma rosca M25 com entrada a 90°.**



Na figura 56a pode-se notar a ausência de lascamentos. Novamente, a aresta de corte evidencia a presença de desgaste abrasivo nas arestas laterais e na cunha da ferramenta. Com objetivo de promover melhor análise da avaria, o detalhe "A" da figura 56a foi ampliado na figura 56b. A aresta de corte mostrada na figura 56b é caracterizada pela presença de vários riscos abrasivos. Na região central do desgaste abrasivo identificam-se, baseado em análises EDS, significativos teores de titânio e alumínio (principal elemento da cobertura). Na região central há elevados valores de tungstênio (principal elemento do substrato).

A figura 57 mostra a superfície de folga da ferramenta no ensaio de vida de ferramenta para usinagem de uma rosca M25 com entrada a 360°.

**Figura 57 - Superfície de folga da ferramenta para uma rosca M25 com entrada a 360°.**



Na aresta de corte mostrada na figura 57 é evidente a presença de desgaste abrasivo nas arestas laterais, mas na cunha de corte os fenômenos de desgaste e/ou avarias são significativamente menores se comparados a figura 56a. Com objetivo de promover melhor análise da avaria, o detalhe “A” da figura 57a foi ampliado na figura 57b. A aresta de corte mostrada na figura 57b é caracterizada pela presença de alguns sulcos paralelos entre si. Na região central do desgaste abrasivo identificam-se, baseado em análises EDS, significativos teores de titânio e alumínio (principal elemento da cobertura). E localizado logo abaixo da região de avaria também há elevados valores de titânio também foram detectados.

Comparando os mecanismos de desgaste e/ou avarias nos dois tipos de entrada (90° e 360°) e diâmetro da rosca (M16 e M25) não é possível identificar diferenças significativas. Ressalta-se que em todos os casos, o processo foi interrompido pela impossibilidade de utilizar o lado passa do calibrador na entidade usinada. Os valores de desgaste de flanco encontram-se distantes do valor estipulado para o critério de fim de vida por desgaste ( $VB_B = 0,20$  mm). Uma hipótese para este fato é a geometria delgada da ferramenta, a qual sob um pequeno aumento da força de usinagem, em função do aumento do desgaste de flanco da ferramenta, sofreu deflexão e diminuiu o diâmetro da rosca. Contudo, uma solução simples para aumentar o número de roscas usinadas é a alteração do diâmetro da interpolação helicoidal. Ressalta-se que esta solução não é viável quando a ferramenta apresenta avaria na forma de lascamento, pois a microgeometria da aresta de corte é fortemente alterada e pode causar problemas com a geometria da rosca, principalmente no maior diâmetro usinado.



## 5 Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

Baseado nos resultados obtidos - em termos de vida de ferramenta, análises dos mecanismos de desgaste e/ou avarias nas arestas de corte e ensaios de força de usinagem - para roscas internas com o fresamento utilizando interpolação helicoidal em aço AISI 4340 com 40 HRC, realiza-se as seguintes conclusões:

a) o tipo da ferramenta tem influência significativa na quantidade de roscas usinadas, com os melhores resultados para a ferramenta de múltiplas arestas tanto no sentido radial quando axial;

b) o lascamento e desgaste abrasivo são os principais mecanismos de desgaste e/ou avaria para o corte discordante e concordante, respectivamente;

c) o comportamento da força de usinagem é distinto para cada tipo de ferramenta, tendendo a elevados valores para ferramentas de aresta única no sentido radial e múltiplas arestas no sentido axial e os menores valores para ferramenta de múltiplas arestas no sentido radial e única aresta no sentido axial;

d) a aumento da relação entre diâmetro do furo e diâmetro da ferramenta promove um aumento no tempo de usinagem;

e) o tipo de entrada da ferramenta no furo durante a usinagem não produz mudança significativa na quantidade de roscas usinadas.

Apresentam-se as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- testar conceito de ferramenta em materiais que apresentam tendência a formação de aresta postiça de corte em machos rígidos, como o alumínio, com o objetivo de melhorar a qualidade superficial da rosca usinada;

- utilizar da técnica de interpolação helicoidal de roscas com suporte de robôs industriais objetivando aumentar a flexibilidade e diminuir o custo do processo;

- utilizar do corte discordante para o primeiro passe (desbaste) e corte concordante para o segundo passe (acabamento) na usinagem de roscas por interpolação helicoidal com o objetivo de minimizar o tempo de ciclo;

-testar ferramentas de usinagem de materiais ultraduros (por exemplo, o nitreto de boro cúbico policristalino- PCBN) com o objeto de aumentar os parâmetros de usinagem mesmo diante de materiais com elevada dureza.

## 6 Referências

- AGAPIOU, J. S. Evaluation of the Effect of High Speed Machining on Tapping. **Journal of Engineering for Industry - Transactions of ASME**, v. 116, n. April 1992, p. 457–462, 1994.
- AGOSTINHO, O. L.; RODRIGUES, A. C. DOS S.; LIRANI, J. **Tolerâncias, Ajustes, Desvios e Análise de Dimensões**. 1. ed. São Paulo: EDGARD BLUCHER, 1977. p. 132
- AHN, J. H. et al. Effects of Synchronizing Errors on Cutting Performance in the Ultra-High-speed Tapping. **Annal of the CIRP**, v. 52, n. 1, p. 53–56, 2003.
- ALTINTAS, Y. **Manufacturing Automation**. 1. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. p. 283
- ARAUJO, A. C. et al. A model for thread milling cutting forces. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 46, n. 15, p. 2057–2065, dez. 2006.
- ARAUJO, A. C.; FROMENTIN, G.; POULACHON, G. Analytical and experimental investigations on thread milling forces in titanium alloy. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 67, p. 28–34, abr. 2013.
- ARAUJO, A. C.; SILVEIRA, J. L. Force Prediction in Thread Milling. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Science & Engineer**, v. 26, n. 1, p. 82–88, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5876 - Roscas - Terminologia**. Rio de Janeiro ABNT, , 1988.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11701 CB - 206 - Roscas Tipos e Aplicações** Rio de Janeiro ABNT, , 1990.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 965-1 - Rosca Métrica ISO de Uso Geral - Tolerâncias Parte 1: Princípios e Dados Básicos** Rio de Janeiro ABNT, , 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 724 - Rosca métrica ISO de uso geral - Dimensões Básicas** Rio de Janeiro ABNT, , 2005.
- ÁVILA, R. F. **Desempenho de Ferramentas de Metal Duro Revestido com Ti-N, Ti-C-N e Ti-C-N (PAPVD) no Torneamento do Aço ABNT 4340 Temperado e Revenido**. Tese de Doutorado. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, 2003.
- BEZERRA, A. A. **Estudo do desgaste no roscamento com alta velocidade em ferro fundido**. Tese de Doutorado. São Carlos: Universidade de São Paulo, 2003.
- BORDMAN, B. Fatigue Resistance of Steels. In: **Metals Handbook**. 10. ed. Novelty: ASM International, 1990. p. 673–688.
- BRETAS, R. A. **Análise da Usinagem de Roscas por Interpolação Helicoidal no Ferro Fundido Vermicular**. Dissertação de Mestrado. Joinville: Instituto Superior Tupy, 2009.

- BUDYNAS, R. G.; NISBETT, J. K. **Shigley's Mechanical Engineering Design**. 8. ed. New York: McGraw-Hill, 2010.
- CHANDRASEKARAN, H.; M'SAOUBI, R. Improved Machinability in Hard Milling and Strategies for Steel Development. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 55, n. 1, p. 93–96, jan. 2006.
- DEGARMO, E. P.; BLACK, J. T.; KOHSER, R. A. **Materials and Processes in Manufacturing**. New Jersey: Prentice-Hall, 1999.
- DEONISIO, C. C. C. **Estudo do fresamento do aço D2 endurecido em altas velocidades de corte**. Tese de Doutorado. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2004.
- DORMER TOOLS. **Catálogo de informações gerais**, 2012.
- FARAGO, F. T.; CURTIS, M. A. **Handbook of Dimensional Measurement**. 3rd Editio ed. New York: Industrial Press Inc., 1994.
- FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. 3<sup>a</sup> ed. ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 1977. p. 751
- 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, n. 1-4, p. 81–87, 7 jan. 2010.
- GEIST, J.; FINZER, T. I. Influência dos parâmetros de usinagem HSC na programação NC. **Máquinas e Metais**, p. 30–49, abr. 2000.
- GHANI, J. A.; CHOUDHURY, I. A.; MASJUKI, H. H. Wear mechanism of TiN coated carbide and uncoated cermets tools at high cutting speed applications. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 153-154, p. 1067–1073, nov. 2004.
- GRZESIK, W. **Advanced Machining Processes of Metallic Materials: Theory, Modelling and Applications**. 1. ed. Amsterdam: Elsevier, 2008. p. 478
- HUNSICKER, R. J. et al. Automatic Vision Inspection and Measurement System for External Screw Threads. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 13, n. 5, p. 370–384, 1994.
- INFOAXIS. **Milling with Creo Parametric 2.0 - Teoria**. São Paulo: InfoAxis Solutions, 2012. p. 322
- IVANOV, V.; KIROV, V. Rolling of internal threads: Part 1. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 72, n. 2, p. 214–220, dez. 1997.
- IYER, R.; KOSHY, P.; NG, E. Helical milling: An enabling technology for hard machining precision holes in AISI D2 tool steel. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 47, n. 2, p. 205–210, fev. 2007.
- KALPAKJIAN, S. **Manufacturing Processes for Engineering Materials**. 3rd editio ed. Chicago: Addison Wesley Pub., 1984. p. 372–374

KITA, Y. et al. Basic study of ball end milling on hardened steel. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 111, p. 240–243, 2001.

KOPAC, J.; SOKOVIC, M.; DOLINSEK, S. Tribology of coated tools in conventional and HSC machining. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 118, n. 1-3, p. 377–384, dez. 2001.

LACALLE, D. et al. Improving the surface finish in high speed milling of stamping dies. v. 123, p. 292–302, 2002.

LEE, C. S.; KIM, S. S.; CHOI, J. S. Operation sequence and tool selection in flexible manufacturing systems under dynamic tool allocation. **Computers & Industrial Engineering**, v. 45, n. 1, p. 61–73, jun. 2003.

LEE, S. W.; KASTEN, A.; NESTLER, A. Analytic Mechanistic Cutting Force Model for Thread Milling Operations. **Procedia CIRP**, v. 8, p. 546–551, jan. 2013.

LIRA, V. M. **Otimização de parâmetros de corte na usinagem de roscas em tornos CNC**. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2000.

MACHADO, Á. R. et al. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 1. ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 2009. p. 367

MERKAC, T. P.; ACKO, B. Comparising measuring methods of pitch diameter of thread gauges and analysis of influences on the measurement results. **Measurement**, v. 43, n. 3, p. 421–425, abr. 2010.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. 6. ed. New York: Wiley and Sons, 2005. p. 643

MOTA, P. R. DA. **Investigação do Comportamento de Ferramentas de Aço-Rápido no Processo de Rosqueamento Interno em Alta Velocidade de Corte**. Dissertação de Mestrado. Uberlândia: UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA, 2006.

MOTA, P. R. DA. **Estudo do Processo de Rosqueamento com Macho de Corte de Metal Duro em Ferro Fundido Vermicular**. Tese de Doutorado. Uberlândia: UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA, 2009.

MÜLLER, P.; SOTO, M. Usinagem sem Refrigeração de Furos e Roscas. **4º Seminário Internacional de Alta Velocidade**, p. 127–131, 1999.

NEVES, D. **Uma Contribuição ao Fresamento de Matrizes com Fresa de Topo Esférico**. Dissertação de Mestrado. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2002.

NORTON, R. L. **Machine Design - Norton.pdf**. 3ª ed. ed. Worcester: Pearson, 2006.

OBBERG, E. et al. **Machinery's Handbook**. 27. ed. New York: Industrial Press Inc., 2004.

OLIVEIRA, A. J. **Análise do desgaste de ferramentas no Fresamento com Alta Velocidade de aços endurecidos**. Tese de Doutorado. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2007.

POULACHON, G. et al. Wear behavior of CBN tools while turning various hardened steels. **WEAR**, v. 256, p. 302–310, 2004.

RIBEIRO, J. L. S. **Fresamento do Aço Vhsuper nos Estados Recozido e Temperado com Metal Duro e Cermet**. Tese de Doutorado. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.

SANDVIK COROMANT. **Threading Application Guide**, 2012.

SANTHANAM, A. T.; TIERNEY, P.; HUNT, J. L. Cemented Carbides. In: **Metals Handbook**. 10. ed. [s.l.] ASM International, 1990. p. 950–977.

SANTOS, L. A. **Modelagem da Área de Corte no Fresamento de Rosca Cônica API**. Trabalho de Conclusão de Curso. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013.

SCHULZ, H.; MORIWAKI, T. High-speed Machining. **Annals of the CIRP**, v. 41, n. 2, p. 637–643, 1992.

SHAW, M. C. **Metal Cutting Principles**. 2. ed. New York: Oxford University Press, 2005. p. 603

SHIN, B. S. et al. A new rapid manufacturing process for multi-face high-speed machining. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 22, n. 1-2, p. 68–74, 1 set. 2003.

SMITH, G. T. **Cutting tool technology: industrial handbook**. 1st Ed. ed. Southampton: Springer, 2008.

SOUZA, A. F. **Contribuições ao fresamento de geometrias complexas aplicando a tecnologia de usinagem com altas velocidades**. Tese de Doutorado. São Carlos: Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia de São Carlos, 2004.

STÉPHAN, P.; MATHURIN, F.; GUILLOT, J. Experimental study of forming and tightening processes with thread forming screws. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 212, n. 4, p. 766–775, abr. 2012.

STEPHENSON, D. A.; AGAPIOU, J. S. **Metal Cutting Theory and Practice**. 2. ed. New York: Taylor & Francis Group, 2006.

TOH, C. K. Materials & Design Cutter path strategies in high speed rough milling of hardened steel. v. 27, p. 107–114, 2006.

TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. **Metal Cutting**. 4. ed. Woburn: Butterworth-Heinemann, 2000. p. 439

WANG, J. J. J.; ZHENG, M. Y. On the machining characteristics of H13 tool steel in different hardness states in ball end milling. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 22, n. 11-12, p. 855–863, 1 dez. 2003.

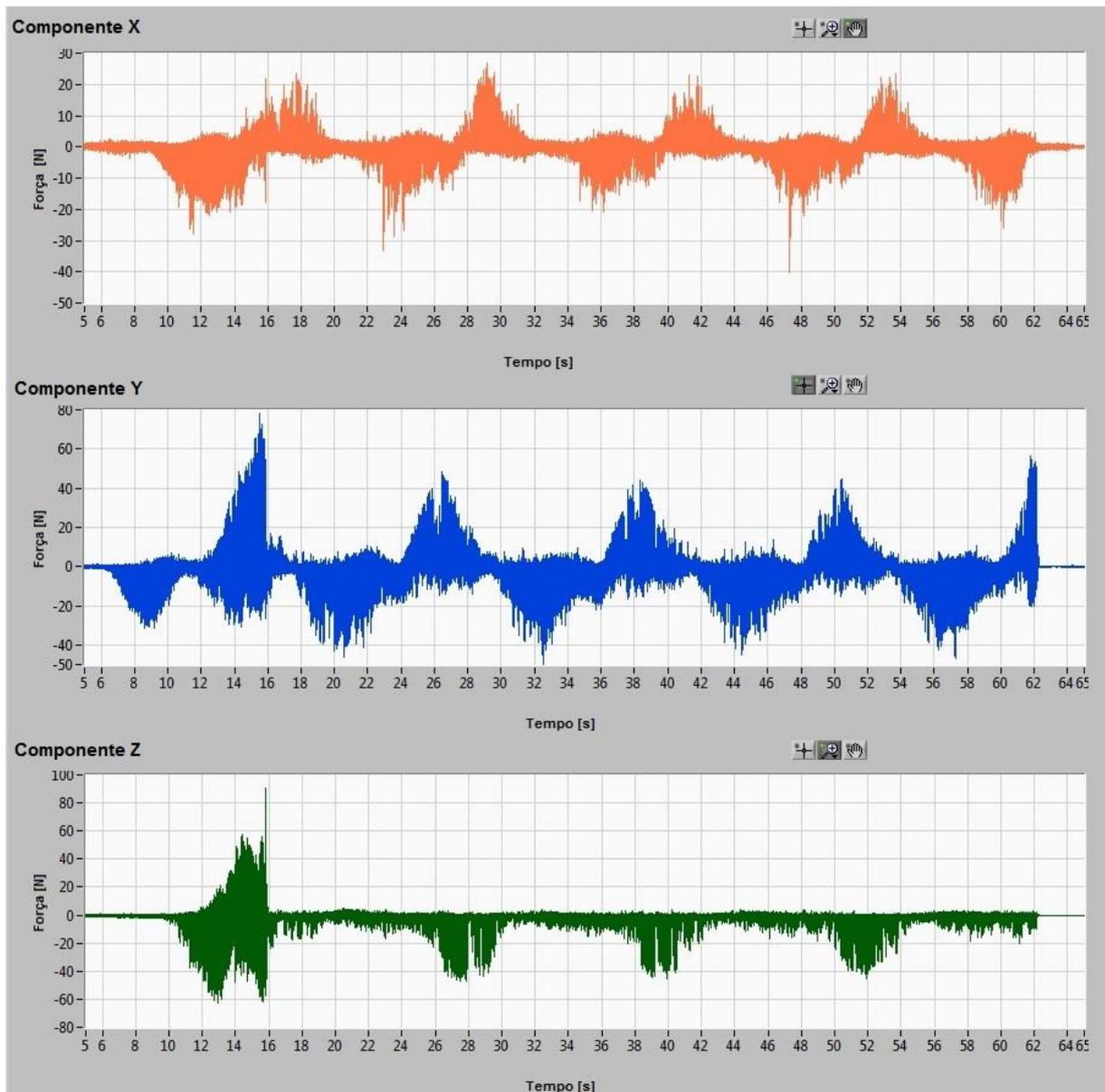
ZEID, I. **Mastering CAD/CAM**. 1<sup>a</sup> ed ed. New York: McGraw-Hill, 2005.

## Anexo 1

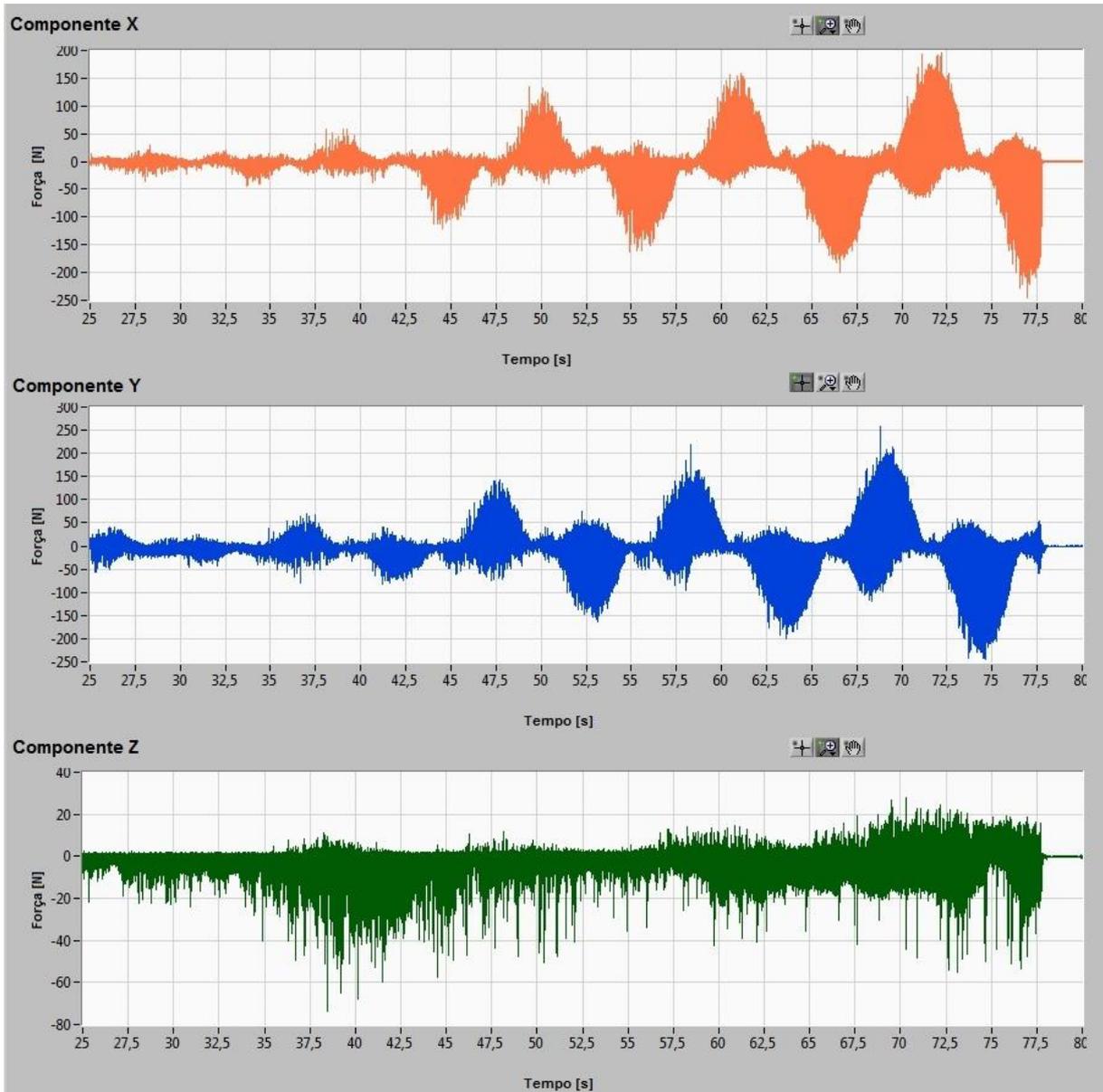
### Comportamento das componentes da força de usinagem – Fase experimental 1

Neste trabalho, para analisar o comportamento das forças de usinagem na fase experimental 1, foi utilizando apenas um trecho dos sinais ilustrados nas figuras a seguir:

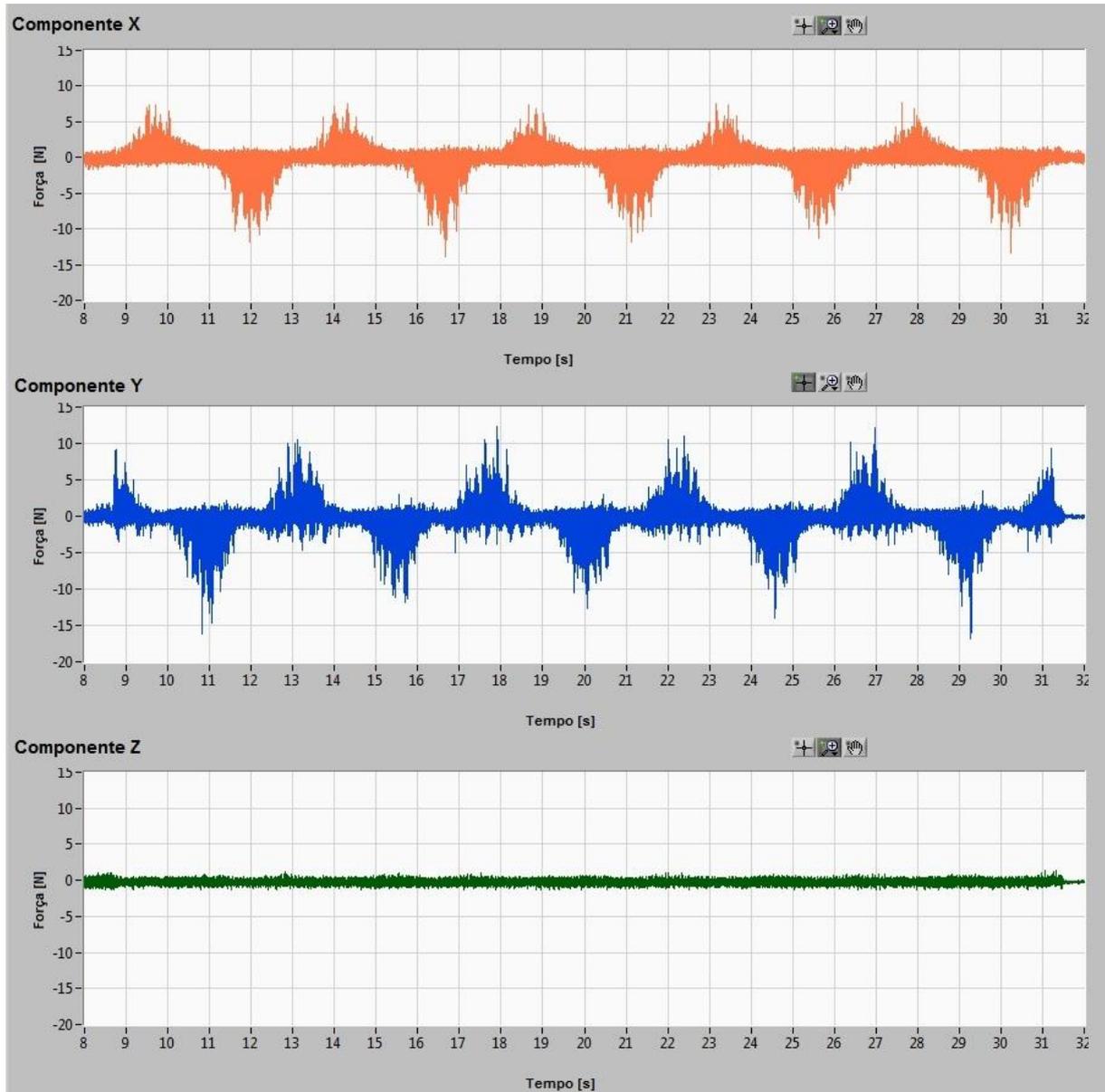
**Figura 58 - Forças medidas para ferramenta de aresta única no sentido axial e radial para todo ensaio.**



**Figura 59 – Forças medidas para ferramenta de única aresta no sentido radial e múltiplas arestas no sentido axial para todo ensaio.**



**Figura 60 – Forças medidas para ferramenta de múltiplas arestas no sentido radial e única aresta no sentido axial para todo ensaio.**



**Figura 61 – Forças medidas para ferramenta de múltiplas arestas no sentido radial e axial para todo ensaio.**

