



FABIANO DOS SANTOS CORREA

**Estudos dos esforços de corte e vida de
ferramenta no faceamento do aço inoxidável
15-5 PH utilizando fresas com insertos
intercambiáveis de metal duro**

97/2013

CAMPINAS
2013



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

FABIANO DOS SANTOS CORREA

**Estudos dos esforços de corte e vida de
ferramenta no faceamento do aço inoxidável
15-5 PH utilizando fresas com insertos
intercambiáveis de metal duro**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, na Área de Engenharia de Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Amauri Hassui

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO
FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELO
ALUNO FABIANO DOS SANTOS CORREA E
ORIENTADA PELO PROF. DR. AMAURI HASSUI

A handwritten signature in blue ink, reading "Amauri Hassui", is written over a horizontal line.

ASSINATURA DO ORIENTADOR

**CAMPINAS
2013**

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

C817e Correa, Fabiano dos Santos, 1977-
Estudos dos esforços de corte e vida de ferramenta no faceamento do aço inoxidável 15-5 PH utilizando fresas com insertos intercambiáveis de metal duro / Fabiano dos Santos Correa. – Campinas, SP : [s.n.], 2013.

Orientador: Amauri Hassui.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Fresamento. 2. Ferramenta de corte. 3. Aço inoxidável. I. Hassui, Amauri, 1967-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Cutting forces studies and tool life in a facemilling operation of 15-5 PH stainless steel using cutters with carbide interchangeable inserts

Palavras-chave em inglês:

Milling

Cutting tool

Stainless steel

Área de concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Titulação: Mestre em Engenharia Mecânica

Banca examinadora:

Amauri Hassui [Orientador]

Olívio Novaski

Renato Goulart Jasinevicius

Data de defesa: 30-08-2013

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Mecânica

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO

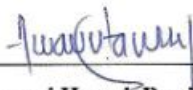
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO

**Estudos dos esforços de corte e vida de
ferramenta no faceamento do aço inoxidável
15-5 PH utilizando fresas com insertos
intercambiáveis de metal duro**

Autor: Fabiano dos Santos Correa

Orientador: Amauri Hassui

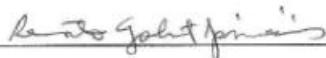
A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:



Prof. Dr. Amauri Hassui, Presidente
Faculdade de Engenharia Mecânica - UNICAMP



Prof. Dr. Olívio Novaski
Faculdade de Engenharia Mecânica - UNICAMP



Prof. Dr. Renato Goulart Jasinevicius
Escola de Engenharia de São Carlos - USP

Campinas, 30 de agosto de 2013.

Dedicatória

Dedico este trabalho às pessoas queridas e importantes na minha vida: familiares, amigos, professores, alunos e em especial a minha companheira, a quem devo tudo que sou e construí ao longo de toda vida.

Agradecimentos

Primeiramente agradeço a Deus pela existência e por manter a perseverança no caminho de toda minha vida.

À minha família pelo apoio imprescindível em todos os momentos, sobretudo nos mais difíceis.

Ao Prof. Dr. Amauri Hassui pela oportunidade de desenvolver este trabalho, pelos ensinamentos, pelas orientações, pelos recursos disponibilizados e inestimável confiança na concretização do presente trabalho.

Ao Prof. Dr Renato Goulart Jasinevicius pela inenarrável contribuição em vários momentos na vida acadêmica e principalmente por contribuir na jornada inicial deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Anselmo Eduardo Diniz pela disponibilização do laboratório, equipamentos de usinagem e ensinamentos, sobretudo em sala de aula.

Ao técnico Aristides Magri pelo imprescindível apoio e disponibilidade na realização dos ensaios de usinagem, sem os quais este trabalho não poderia ser realizado. Além dos bons momentos de descontrações.

Ao Daniel Suyama, pela ajuda e apoio em laboratório na realização de ensaios e medições que foram necessárias.

A minha eterna companheira, Sandra Lopes, pelo apoio crítico e incondicional. A minha filha, pelos momentos de descontração. Ambas foram combustíveis na busca por novos desafios.

Aos companheiros e amigos de sala: Rodolfo, Silvia, Rodrigo, Henrique, Neimar, Daniel e Vanderlei que, de uma forma ou outra, sempre estavam dispostos a contribuir.

Aos funcionários: Claudinete, Bruna, Marcos, Vera, Jane, André e Eduardo pela disponibilização indispensável na realização e conclusão do trabalho.

A CAPES pelo apoio financeiro.

Aos parceiros Sandvik, Villares e Blaser pelo fornecimentos de todos os insumos usados.

Enfim, agradeço a todos que, de uma forma ou outra, tiveram certa parcela de contribuição na concretização de todo o trabalho.

"A dúvida é o principio da sabedoria"

Aristóteles

"O que sabemos é uma gota e o que
ignoramos é um oceano"

Isaac Newton

Resumo

A vida da ferramenta juntamente com o tempo gasto para acertos quando a mesma é substituída pode representar uma significativa parcela do custo total do produto. Desta forma, a redução destes custos é de fundamental importância para o processo. Quando se utiliza ferramentas de metal duro com coberturas, ou ferramentas com geometria definida, o desgaste mais comum que determina sua vida útil é o desgaste de flanco (V_B). Este trabalho tem como principais objetivos estudar os esforços existentes na usinagem de fresamento de topo com insertos intercambiáveis redondos do aço inoxidável aeronáutico 15-5 PH e relacioná-los com o tempo de vida das ferramentas testadas. Analisar estes esforços no regime do tempo e da frequência a fim de verificar as principais forças responsáveis pelas possíveis vibrações do sistema. Tais vibrações podem ter grande parcela na contribuição dos desgastes e avarias das ferramentas. Todos os ensaios deste trabalho mantiveram constante a largura fresada (a_e) de 14 mm, o corte em movimento predominantemente discordante e assimétrico com $a_e > D/2$ (diâmetro da fresa), a profundidade de corte (a_p) de 1 mm e fluido de corte em abundância. Para os parâmetros que variaram tem-se a velocidade de corte (v_c) de 195 m/min e 170 m/min, os avanços por dente da fresa (f_z) de 0,15 mm/dente e 0,25 mm/dente além de duas geometrias diferentes de insertos. Nas análises dos esforços foi utilizada a RMS para melhor interpretação da magnitude destes esforços. Observou-se que o aumento do avanço faz os esforços aumentarem, o mesmo aumento de esforços se deu para geometrias positivas (com quebra-cavaco) quando comparadas as geometrias neutras. No entanto, para as velocidades de corte usadas não se teve uma correlação significativa nos esforços. Para a vida da ferramenta, a v_c teve influência direta na vida, o que era de se esperar, os avanços f_z maiores apresentaram um comportamento inverso na vida. O maior contribuinte para o desgaste da ferramenta foi o alto atrito causado pelos esforços elevados, medidos na entrada do dente, onde a espessura do cavaco inicia-se com zero. Este comportamento do cavaco é um fenômeno comum ao corte discordante. Dentre os mecanismos de desgastes constatados, o predominante foi o desgaste conhecido como aderência (*attrition*).

Palavras chave: fresamento, ferramenta de corte, aço inoxidável

Abstract

Tool life along with the setup time whenever it is changed may represent a big amount of the total cost of the product. This way, reducing these costs plays a fundamental role in the process. When using coated carbide tools, or designed geometry tools, the most common type of wear that determines the end of a tools life is flank wear (V_B). This work has as main goals evaluate the machining forces in round inserts face milling of aerospace stainless steel 15-5 PH and relate these forces with the tool life. Evaluate the forces in time and frequency domain to check the main responsible for vibrations of the machining system. The vibrations may contribute in tool wear and failure. In all the tests, cutting width (a_e) of 14 mm, up milling an asymmetric cut (with radial immersion of $a_e > D/2$), cutting depth (a_p) of 1 mm and cutting fluid conditions were kept constant. Cutting speed (v_c) of 170 m/min and 195 m/min, feed per tooth (f_z) of 0.15 mm/tooth and 0.25 mm/tooth, and two different insert geometries were the tests inputs. For analysis, the RMS value was used for better understanding of forces magnitude. It was observed that an increase in feed per tooth causes an increase of forces. The same behavior occurred for positive geometries (with chipbreaker) than for neutral geometry. However, the relationship between cutting speeds and forces was not significant. In tool life, cutting speed had high influence (as expected). High feed per tooth showed an inverse impact in tool life, increasing tool life. The main factor for tool wear was the high friction caused by high forces, measured in the beginning of the cut, when chip width was zero. This behavior of the chip is common in up milling. Attrition was the main mechanism of wear among all types observed.

Keywords: milling, cutting toll, stainless steel

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Diagrama do tratamento completo de precipitação (ZANUTO, 2013)	6
Figura 2.2 - Desenvolvimento da estrutura no tratamento completo de precipitação (SANTOS, 2006).....	7
Figura 2.3 - Fotomicrografia do aço inoxidável 15-5 PH na forma precipitado: ampliação de 500x (SILVA, 2011).....	7
Figura 2.4 - Fotomicrografia do aço inoxidável 15-5 PH na forma precipitado: ampliação de 1000x (SILVA, 2011).....	8
Figura 2.5 - Operação de fresamento (SANDVIK, 2012).....	10
Figura 2.6 - Tipos fundamentais de Fresamento: (a) Fresamento tangencial - periférico (b) fresamento frontal - faceamento	11
Figura 2.7 - Tipos de fresamentos: (a) fresamento de rosca (b) tornofresamento, (c) fresamento em contorno, (d) fresamento de canais e (e) alargamento de furos existentes (SANDVIK, 2012).....	11
Figura 2.8 - Movimentos de corte: (a) movimento concordante (b) movimento discordante (SANDVIK, 2102)	12
Figura 2.9 - Seção do cavaco no fresamento tangencial (DINIZ, MARCONDES E COPINNI, 2010).....	13
Figura 2.10 - Instantes do corte no fresamento de faceamento (SANDVIK, 2012).....	14
Figura 2.11 - Posicionamentos da aresta de corte no fresamento concordante: (a) a_e maior que $D/2$ (b) a_e igual $D/2$ (c) a_e menor que $D/2$ - D é o diâmetro da fresa (SANDVIK, 2012).....	15
Figura 2.12 - Posicionamentos da aresta de corte no fresamento discordante: (a) a_e maior que $D/2$ (b) a_e igual $D/2$ (c) a_e menor que $D/2$ - D é o diâmetro da fresa (SANDVIK, 2012).....	15

Figura 2.13 - Forças radiais no corte simétrico no fresamento de topo ocasionando vibrações (SANDVIK)	16
Figura 2.14 - Direção dos movimento de corte no fresamento: Velocidade efetiva (v_e), velocidade de corte (v_c) e velocidade de avanço (v_f) (NBR 6162, 1989).....	18
Figura 2.15 - Avanço por dente (f_z) (NBR 6162, 1989).....	19
Figura 2.16 - Largura de usinagem a_p , penetração de trabalho a_e e penetração de avanço a_f no fresamento tangencial (NBR 6162, 1989).....	20
Figura 2.17 - Esquema das influências diretas que os esforços de corte possui em outras variáveis	20
Figura 2.18 - Ferramentas com diferentes ângulos de posição alterando o ângulo da força de usinagem (SANDVIK, 2012)	22
Figura 2.19 - Variação da força de corte para: (a) fresamento discordante , (b) fresamento concordante e (c) fresamento simétrico (adaptado de ALTINTAS, 2000)	23
Figura 2.20 - Forças no fresamento: Força tangencial (F_t) e Força radial (F_r) as quais tem suas direções variadas com o ângulo ϕ (Adaptado de WAN, 2012).....	26
Figura 2.21 - Espessura mínima do cavaco e deformação elástica do material (adaptado de SOORAJ, 2011).....	27
Figura 2.22 - variação do h mínimo para o corte do material: (a) h menor que o mínimo (b) h maior que o mínimo, mas existe deformações (c) h suficientemente maior (ARAI, 2008).....	28
Figura 2.23 - Simulações das deformações plásticas através do Método Elementos Finitos para diferentes valores de h : (a) $h = 5 \mu\text{m}$, (b) $h = 10 \mu\text{m}$, (c) $h = 15 \mu\text{m}$ e (e) $h = 20 \mu\text{m}$ (Vosough, 2011).....	29
Figura 2.24 - Fresa com inserto redondo: (a) fresa removendo material (b) orientações das forças de usinagem (SANDVIK, 2012)	30

Figura 2.25- Equações: (a) equação para obtenção do ângulo de posição (κ) (b) equação da espessura máxima do cavaco em função do fz (SANDVIK, 2012)	31
Figura 2.26 - Equações para cálculo de diâmetro efetivo e velocidade de corte para insertos redondos (SANDVIK, 2012).....	32
Figura 2.27 - Tipos de desgastes de ferramenta	33
Figura 2.28 - Tipos de avarias na ferramenta de corte: (a) microlascamentos da aresta de corte e (b) trincas térmica (SANDVIK, 2012)	33
Figura 3.1 - Centro de usinagem 3 eixos, usado nos ensaios de fresamento.....	34
Figura 3.2 - Montagem utilizado microscópio óptico para medição do desgaste das ferramentas	35
Figura 3.3 - Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).....	36
Figura 3.4 - Morsa para fixação da peça e medição dos esforços nas direções x,y e z	37
Figura 3.5 - Resposta em frequência do dinamômetro Kistler 9257B	38
Figura 3.6 - Micrografia do aço inoxidável 15-5 PH na forma solubilizado: ampliação 250x	40
Figura 3.7 - Visualização do esquema dos ensaios realizados no corpo de prova	40
Figura 3.8 - Fixação do corpo de prova para teste de vida da ferramenta.....	41
Figura 3.9 - Corpo de prova para aquisição dos esforços de corte (medidas em mm).....	41
Figura 3.10 - Fresa de topo código Sandvik R300-25T12-10L.....	42
Figura 3.11- Inseto redondo código Sandvik R300-1032 (adaptado, SANDVIK, 2012)	43
Figura 3.12 - Representação esquemática do ensaio com martelo instrumentado (QUINTANA e CIURANA, 2011).....	44
Figura 3.13- Estratégia de entrada com avanço reduzido (ZANUTO, 2012).....	45

Figura 3.14 - Esquema cinemático do corte frontal, faceamento de topo e posicionamento da fresa, em que predomina o corte discordante	47
Figura 3.15 - Ferramenta de corte com dois insertos: imagem da ferramenta	48
Figura 3.16 - Entrada direta com grande espessura de cavaco na saída (SANDVIK, 2012)	49
Figura 3.17 - Esquema das orientações dos eixos X, Y e Z e os pontos de aquisições dos esforços de corte	50
Figura 3.18 - Espectro da força (Newton): (a) Neutra/Novo e (b) Neutra/Fim ambas com v_c 195mm/min e f_z de 0,25mm/dente.....	51
Figura 3.19 - Espectro da forças com entrada reduzida: (a) Neutra/Novo e (b) Neutra/Fim ambas com v_c 195mm/min e f_z de 0,25mm/dente	52
Figura 3.20 - Espectro da forças com entrada rolagem: (a) Neutra/Novo e (b) Neutra/Fim ambas com v_c 195mm/min e f_z de 0,25mm/dente	53
Figura 3.21 - Comportamento das forças, respectivamente, F_x F_y e F_{xy} para 10 ciclos no ensaio 03 (Positiva/Fim - 170 m/min / 0,15 mm/dente)	54
Figura 3.22 - Geometria do corte e componentes das forças de corte no fresamento de faceamento	54
Figura 3.23 - Espectro da força (Newton): (a) Neutra/Nova e (b) Neutra/Fim ambas com v_c 195mm/min e f_z de 0,15mm/dente.....	89
Figura 3.24 - Espectro da força (Newton): (a) Neutra/Nova e (b) Neutra/Fim ambas com v_c 170mm/min e f_z de 0,25mm/dente.....	89
Figura 3.25 - Espectro da força (Newton): (a) Neutra/Nova e (b) Neutra/Fim ambas com v_c 170mm/min e f_z de 0,15mm/dente.....	90
Figura 3.26 - Espectro da força (Newton): (a) Positiva/Nova e (b) Positiva/Fim ambas com v_c 195mm/min e f_z de 0,15mm/dente.....	90

Figura 3.27 - Espectro da força (Newton): (a) Positiva/Nova e (b) Positiva/Fim ambas com v_c 195mm/min e f_z de 0,25mm/dente.....	91
Figura 3.28 - Espectro da força (Newton): (a) Positiva/Nova e (b) Positiva/Fim ambas com v_c 170mm/min e f_z de 0,15mm/dente.....	91
Figura 3.29 - Espectro da força (Newton): (a) Positiva/Nova e (b) Positiva/Fim ambas com v_c 170mm/min e f_z de 0,25mm/dente.....	92
Figura 4.1 - Função resposta em frequência do porta ferramenta na direção y (0 a 10 kHz).....	55
Figura 4.2 - Função resposta em frequência do porta ferramenta na direção x (0 a 10 kHz).....	56
Figura 4.3 - Função resposta em frequência do porta ferramenta na direção y (0 a 1,5 kHz).....	57
Figura 4.4 - Função resposta em frequência do porta ferramenta na direção x (0 a 1,5 kHz).....	57
Figura 4.5 - Comportamento da forças atuantes nos ensaios, fresamento po faceamento com fresa de dois insertos	58
Figura 4.6 - RMS da força na direção X para a 4 condições testadas e 2 geometrias (Neutra e Positiva).....	59
Figura 4.7 - RMS da força na direção Y para as 4 condições testadas e 2 geometrias (Neutra e Positiva).....	60
Figura 4.8 - RMS da força na direção XY para as 4 condições testadas e 2 geometrias (Neutra e Positiva).....	61
Figura 4.9 - Comportamento das forças F_x e F_y para insertos Neutra/Fim de vida v_c de 195 m/min e f_z de 0,25 mm/dente	62
Figura 4.10 - Comportamento das forças F_x e F_y para insertos Neutra/Novo v_c de 170 m/min e f_z de 0,25 mm/dente	63

Figura 4.11 - Marcas deixada na peça devido as deformações provocada pela ferramenta na entrada da mesma a cada 180° - transição de dois passos	63
Figura 4.12 - RMS da força tangencial, para as 4 condições testadas e 2 geometrias (Neutra e Positiva).....	64
Figura 4.13 - RMS da força radial para as 4 condições testadas e 2 geometrias (Neutra e Positiva)	65
Figura 4.14 - Espectro de frequência da F_r : (a) Positiva/Novo (b) Positiva/Fim ambas nas condições de v_c 195 m/min e f_z 0,15 mm/dente	66
Figura 4.15 - Espectro de frequência da F_r : (a) Positiva/Novo (b) Positiva/Fim ambas nas condições de v_c 195 m/min e f_z 0,25 mm/dente	67
Figura 4.16 - Espectro de frequência da F_r : (a) Positiva/Novo (b) Positiva/Fim ambas nas condições de v_c 170 m/min e f_z 0,15 mm/dente	67
Figura 4.17 - Espectro de frequência da F_r : (a) Positiva/Novo (b) Positiva/Fim ambas nas condições de v_c 170 m/min e f_z 0,25 mm/dente	67
Figura 4.18 - Espectro de frequência da F_r filtrada 250 Hz :(a) Positiva/Novo (b) Positiva/Fim ambas nas condições de v_c 195 m/min e f_z 0,15 mm/dente.....	68
Figura 4.19 - Espectro de frequência da F_r filtrada 250 Hz: (a) Positiva/Novo (b) Positiva/Fim ambas nas condições de v_c 195 m/min e f_z 0,25 mm/dente.....	69
Figura 4.20 - Espectro de frequência da F_r filtrada 250 Hz (a) Positiva/Novo (b) Positiva/Fim ambas nas condições de v_c 170 m/min e f_z 0,15 mm/dente.....	69
Figura 4.21 - Espectro de frequência da F_r filtrada 250 Hz (a) Positiva/Novo (b) Positiva/Fim ambas nas condições de v_c 170 m/min e f_z 0,25 mm/dente.....	69
Figura 4.22 - Espectro de frequência da F_t : (a) Positiva/Novo (b) Positiva/Fim ambas nas condições de v_c 195 m/min e f_z 0,15 mm/dente	70

Figura 4.23 - Espectro de frequência da F_t : (a) Positiva/Novo (b) Positiva/Fim ambas nas condições de v_c 195 m/min e f_z 0,25 mm/dente	70
Figura 4.24 - Espectro de frequência da F_t : (a) Positiva/Novo (b) Positiva/Fim ambas nas condições de v_c 170 m/min e f_z 0,15 mm/dente	71
Figura 4.25 - Espectro de frequência da F_r : (a) Positiva/Novo (b) Positiva/Fim ambas nas condições de v_c 170 m/min e f_z 0,25 mm/dente	71
Figura 4.26 - Espectro de frequência da F_t filtrada 250 Hz: (a) Positiva/Novo (b) Positiva/Fim ambas nas condições de v_c 195 m/min e f_z 0,15 mm/dente	72
Figura 4.27 - Espectro de frequência da F_t filtrada 250 Hz: (a) Positiva/Novo (b) Positiva/Fim ambas nas condições de v_c 195 m/min e f_z 0,25 mm/dente	72
Figura 4.28 - Espectro de frequência da F_t filtrada 250 Hz: (a) Positiva/Novo (b) Positiva/Fim ambas nas condições de v_c 170 m/min e f_z 0,15 mm/dente	72
Figura 4.29 - Espectro de frequência da F_t filtrada 250 Hz: (a) Positiva/Novo (b) Positiva/Fim ambas nas condições de v_c 170 m/min e f_z 0,25 mm/dente	73
Figura 4.30 - Espectro de frequência da F_r filtrada 250 Hz: (a) Neutra/Novo (b) Neutra/Fim ambas nas condições de v_c 195 m/min e f_z 0,15 mm/dente	73
Figura 4.31 - Espectro de frequência da F_r filtrada 250 Hz: (a) Neutra/Novo (b) Neutra/Fim ambas nas condições de v_c 195 m/min e f_z 0,25 mm/dente	74
Figura 4.32 - Espectro de frequência da F_r filtrada 250 Hz: (a) Neutra/Novo (b) Neutra/Fim ambas nas condições de v_c 170 m/min e f_z 0,15 mm/dente	74
Figura 4.33 - Espectro de frequência da F_r filtrada 250 Hz: (a) Neutra/Novo (b) Neutra/Fim ambas nas condições de v_c 170 m/min e f_z 0,25 mm/dente	74
Figura 4.34 - Espectro de frequência da F_t filtrada 250 Hz: (a) Neutra/Novo (b) Neutra/Fim ambas nas condições de v_c 195 m/min e f_z 0,15 mm/dente	75

Figura 4.35 - Espectro de frequência da F_t filtrada 250 Hz: (a) Neutra/Novo (b) Neutra/Fim ambas nas condições de v_c 195 m/min e f_z 0,25 mm/dente	75
Figura 4.36 - Espectro de frequência da F_t filtrada 250 Hz: (a) Neutra/Novo (b) Neutra/Fim ambas nas condições de v_c 170 m/min e f_z 0,15 mm/dente	76
Figura 4.37 - Espectro de frequência da F_t filtrada 250 Hz: (a) Neutra/Novo (b) Neutra/Fim ambas nas condições de v_c 170 m/min e f_z 0,25 mm/dente	76
Figura 4.38 - Principais instantes do desgaste progressivo da ferramenta de corte	77
Figura 4.39 - Evolução do desgaste V_B para ferramentas de geometria positiva por volume em milímetros cúbicos usinado por aresta.....	78
Figura 4.40 - Rebarba na lateral da peça ocasionada pelo corte discordante	79
Figura 4.41 - MEV + EDS da composição da ferramenta desgastada - Para v_c de 195 m/min e f_z de 0,25 mm/dente - Inseto de geometria positiva	80
Figura 4.42 - MEV + EDS da composição da ferramenta desgastada - Para v_c de 195 m/min e f_z de 0,15 mm/dente - Insetos de geometria positiva	81
Figura 4.43 - MEV + EDS da composição da ferramenta desgastada - Para v_c de 195 m/min e f_z de 0,25 mm/dente - Inseto de geometria negativa.....	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Composição química do aço inoxidável 15-5 PH (SAE, 2006).....	5
Tabela 3.1- Constantes do dinamômetro para a faixa de medição utilizada	37
Tabela 3.2 - Parâmetros de corte e geometria de ferramentas utilizados nos ensaios	47
Tabela 3.3 - Parâmetros de frequências e pontos de aquisição para as velocidades de corte utilizadas: 195 m/mim e 170 m/min	51

Lista de Abreviaturas e Siglas

Letras latinas

A - Área	[mm ²]
a_e - Largura fresada	[mm]
a_p - Profundidade de corte	[mm]
D - Diâmetro	[mm]
D_{cap} - Diâmetro efetivo de corte	[mm]
f_z - Avanço por dente	[mm/dente]
(F_x, F_y, F_{xy}, F_z) Componentes da força de usinagem	[N]
F_a - Componente axial da força de usinagem	[N]
F_r - Componente radial da força de usinagem	[N]
F_t - Componente tangencial da força de usinagem	[N]
h - Espessura de cavaco	[mm]
h_{ex} - Espessura de cavaco máxima	[mm]
K_{ac} - Coeficiente da força axial	[N/mm ²]
K_{rc} - Coeficiente da força radial	[N/mm ²]
K_{tc} - Coeficiente da força tangencial	[N/mm ²]
(K_{ae}, K_{re}, K_{te}) – Constantes da aresta de corte	[N/mm ²]
iC - Diâmetro do inserto	[mm]
j - Distância de ajustagem	[mm]
k_s - Pressão específica de corte	[N/mm ²]
n - Rotação	[rpm]
V_B - Desgaste de flanco médio	[mm]
v_c - Velocidade de corte	[m/min]
v_f - Velocidade de avanço	[mm/min]
v_e - Velocidade efetiva de corte	[mm/min]
(X, Y,Z) - Coordenadas do dinamômetro	
(x,y,z) - Coordenadas do centro de usinagem	
z - Número de dentes da fresa	

Letras gregas

β - Ângulo da aresta de corte	[°]
φ_0 - Ângulo de contato	[°]
κ_r - Ângulo de posição da aresta principal	[°]

Abreviações

EDS - Espectrometria de Energia Dispersiva de Raio-X

MEV - Microscopia Eletrônica de Varredura

PH - Endurecimento por Precipitação

UNS - *Unified Numbering System*

Siglas

DEF – Departamento de Engenharia de Fabricação

DEMA – Departamento de Engenharia de Materiais

FEM – Faculdade de Engenharia Mecânica

ISO – *International Organization for Standardization*

NBR – Norma Brasileira

SAE – *Society of Automotive Engineers*

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 - Objetivos	1
1.2 - Justificativas.....	2
1.3 - Estrutura do trabalho	2
2 - REVISÃO DA LITERATURA.....	4
2.1 - Aços inoxidáveis	4
2.1.1 - Aço inoxidável 15-5 PH.....	4
2.1.2 - Tratamento térmico de endurecimento por precipitação.....	5
2.1.3 - Usinabilidade dos Aços Inoxidáveis	8
2.2 - Fresamento	9
2.2.1 - Fresamento concordante e discordante	12
2.2.2 - Fresamento do tipo faceamento	14
2.2.3 - Grandezas físicas no processo de fresamento	16
2.2.4 - Forças de corte na usinagem	20
2.2.5 - Determinação experimental da força de usinagem	21
2.2.6 - Forças de corte no fresamento.....	22
2.2.7 - Espessura mínima do cavaco.....	26
2.2.8 - Características de insertos redondos	29
2.2.9 - Vida, desgaste e avarias da ferramenta de corte	32
3 - MATERIAIS E MÉTODOS	34
3.1 - Equipamentos.....	34
3.1.1 - Máquina-ferramenta.....	34

3.1.2 - Microscópio óptico.....	35
3.1.3 - Microscópio eletrônico.....	35
3.1.4 - Dinamômetro.....	36
3.1.5 - Análise modal.....	38
3.2 - Materiais	38
3.2.1 - Corpos de prova	38
3.2.2 - Ferramentas	42
3.2.3 - Fluido de corte.....	43
3.3 - Planejamento e procedimentos experimentais	43
3.3.1 - Análise modal experimental.....	43
3.3.2 - Ensaios preliminares para determinação dos parâmetros de corte	44
3.3.3 - Ensaios de vida das ferramentas	48
3.3.4 - Verificação dos mecanismos de desgastes	49
3.3.5 - Medição dos esforços de corte	49
4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES	55
4.1 - Análise modal experimental	55
4.2 - Medição dos esforços de corte	58
4.3 - Análise da vida das ferramentas de corte.....	76
4.4 - Mecanismos de desgastes	79
5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	83
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85
ANEXO A - Espectros das forças.....	89

1. INTRODUÇÃO

No mundo moderno, cada vez mais, novos materiais são desenvolvidos para atender às novas e diversas necessidades. O aço inoxidável 15-5 PH possui uma ampla variedade de aplicações na indústria aeroespacial, tais como a estrutura do trem de aterrissagem de aviões e a carenagem do flap de aviões. A elevada resistência mecânica e dureza aliada a uma excelente resistência à corrosão desse material, também faz com que ele tenha diversas aplicações industriais como tambores de armas, peças de válvulas, juntas, eixos e engrenagens (DAHL E MARTIN, 2001).

No entanto, a usinabilidade do aço inoxidável 15-5 PH é de certo modo baixa devido às suas propriedades citadas anteriormente. Há relativamente poucos estudos sobre os parâmetros de corte e comportamento da usinagem deste material, sobretudo no fresamento, por ser um processo de grande versatilidade e capacidade de proporcionar peças de variadas formas geométrica. O fresamento é um dos processos que apresenta maior complexidade devido à grande quantidade de variáveis envolvidas no processo, como máquinas-ferramenta, estratégias de corte, parâmetros de cortes entre outros (ZANUTO, 2012).

O estudo dos esforços de corte no fresamento do aço inoxidável 15-5 PH e as relações destes com a vida da ferramenta ajuda a entender os fenômenos envolvidos durante a sua usinagem.

1.1 - Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo geral estudar os esforços de usinagem no faceamento do aço inoxidável 15-5 PH utilizando fresa com inserto intercambiável redondo de metal duro. O estudo deve contribuir para o desenvolvimento da tecnologia na usinagem de metais. Além disso, pode-se mencionar como principais objetivos específicos:

- Avaliar a influência dos parâmetros de corte e da geometria da ferramenta nos esforços de corte no fresamento do aço inoxidável 15-5 PH;

- Correlacionar os esforços de corte com o tempo de vida das ferramentas testadas procurando entender estas correlações;
- Analisar os principais tipos e mecanismos de desgastes apresentados na ferramenta de corte causado pelo material usinado ou as possíveis avarias provocadas pelos impactos inerentes ao processo de fresamento.

1.2 - Justificativas

As justificativas do presente trabalho são fundamentadas no pouco estudo sobre as condições mais adequadas de usinagem do aço inoxidável 15-5 PH, contudo, com o passar do tempo vem continuamente aumentando o seu campo de aplicabilidade, sobretudo no setor aeronáutico.

Ao estudar e entender os esforços de corte da ferramenta no fresamento é possível compreender a origem dos desgastes e avarias de uma ferramenta, a qual terá sua vida afetada diretamente pelos mecanismos de desgastes.

Como a vida da ferramenta é importante para o custo de fabricação de um determinado produto, que demanda processos de usinagem, ter um maior tempo de vida da ferramenta é fundamental na redução dos custos finais na fabricação destes produtos. Estes custos afetam diretamente a competitividade das empresas no mundo globalizado em que elas estão inseridas.

De modo geral, o presente trabalho é uma contribuição para a literatura acadêmica à medida que estudos dos esforços e relações destes com a vida da ferramenta foram apresentados e correlacionados, apresentando-se como fomentos para novas pesquisas.

1.3 - Estrutura do trabalho

Este trabalho foi estruturado e formatado seguindo as diretrizes para apresentação de dissertações da FEM, Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de

Campinas, procurando produzi-lo de forma a proporcionar uma leitura objetiva e concisa. Para tanto este documento é composto pelas seguintes partes:

Introdução: Neste 1º capítulo apresenta-se um breve contexto sobre o processo de fresamento e a importância do material utilizado nos ensaios, o 15-5 PH. Também são apresentados os objetivos desse trabalho e sua estrutura;

Revisão da Literatura: No 2º capítulo apresenta-se a revisão das literaturas abordadas no trabalho que se faz necessário para um melhor entendimento do assunto estudado. São abordados neste tópico os temas relacionados ao material usinado, o aço inoxidável 15-5 PH, suas aplicabilidades, os processos de fresamento e suas particularidades entre outros;

Materiais e Métodos: No 3º capítulo é feita uma descrição detalhada dos materiais, equipamentos e procedimentos experimentais realizados nos ensaios;

Resultados e discussões: Neste 4º capítulo apresentam-se as análises e as discussões dos resultados obtidos no trabalho;

Conclusões e sugestões para trabalhos futuros: Tem-se, neste 5º capítulo a sintetização das considerações extraídas dos resultados e análises dos resultados obtidos no capítulo anterior. Ainda, neste capítulo têm-se as sugestões de alguns apontamentos que podem ser trabalhados futuramente como uma extensão deste trabalho realizado;

Referências Bibliográficas: No último capítulo estão listadas todas as referências citadas no presente trabalho, para uma possível consulta que venha posteriormente ser realizada.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 - Aços inoxidáveis

Aços inoxidáveis são aços de alta liga tendo como principais elementos o níquel e o cromo, sendo este último em porcentagem mínima de 11% (ASM HANDBOOK, 1997). O cromo tem duas atribuições quando ligado com o aço: a primeira é se combinar com o carbono, formando carbonetos de cromo muito duros; A segunda é acrescentar resistência à corrosão no aço e resistência à oxidação em altas temperaturas (ROSS, 1992).

Estes aços possuem excelente resistência à corrosão e à oxidação, devido a ação passivadora principalmente do cromo e do níquel, que formam um filme de óxido contínuo, aderente e estável na superfície, protegendo contra ambientes corrosivos (MARIANO et al., 2007).

A adição de cromo acima de 11% é ainda o método mais eficiente de adição de elementos de liga em materiais metálicos para proteção contra corrosão. Poucos aços inoxidáveis possuem mais do que 30% de cromo ou menos do que 50% de ferro. Outros elementos de liga tais como o molibdênio, cobre, titânio, alumínio, silício, nióbio, nitrogênio, enxofre e selênio, podem ser acrescentados para adicionar características especiais a esses aços (AK STEEL, 2011).

De maneira geral, quanto maior a quantidade de elementos passivadores na liga, maior será a sua resistência à corrosão, desde que esses se encontrem em solução na matriz, pois caso estes se combinem formando precipitados como carbonetos, nitretos, e/ou fases intermetálicas, seu efeito passivador diminuirá proporcionalmente à formação destas fases (MARIANO et al., 2007).

2.1.1 - Aço inoxidável 15-5 PH

Segundo o fabricante AK Steel (2011) o aço inoxidável 15-5 PH é a versão sem ferrita do 17-4 PH. Este aço apresenta como principais elementos de liga em sua composição o cromo (15% em massa) e o níquel (5% em massa), o que lhe dá o código 15-5, além de poder passar

pelo tratamento térmico de endurecimento por precipitação, o que lhe dá o código PH. A Tabela 2.1 apresenta a composição química deste aço inoxidável, segundo a Society of Automotive Engineers (SAE), que o coloca sob a designação UNS 15500.

Tabela 2.1 - Composição química do aço inoxidável 15-5 PH (SAE, 2006)

Carbono	Manganês	Fósforo	Enxofre	Silício	Cromo	Níquel	Cobre	Co + Ta
0,07% Max.	1,0% Max.	0,04% Max.	0,03% Max.	1,0% Max.	14,0% 15,5%	3,5% 5,5%	2,5% 4,5%	0,15% 0,45%

O 15-5 PH é um aço inoxidável tratável por precipitação do tipo martensítico, que possui grande alongamento, boa resistência à corrosão e boas propriedades mecânicas em altas temperaturas. Uma vantagem deste material é que possibilita a diminuição de empenamentos e distorções com tratamentos térmicos em curtos tempos e baixas temperaturas (AK STEEL, 2011). A martensita é do tipo substitucional, endurecida posteriormente por precipitados intermetálicos (CASTELETTI et al., 2008).

Este material proporciona excelentes propriedades mecânicas para aplicações onde são requeridos altos níveis de alongamento, dureza e resistência à corrosão, além de ser mais barato do que as ligas de alto teor de níquel não ferrosas. As principais aplicações desse material estão na indústria aeronáutica (principalmente), química, petrolífera, processamento de alimentos e papéis (AK STEEL, 2011).

2.1.2 - Tratamento térmico de endurecimento por precipitação

O tratamento térmico de envelhecimento por precipitação, que segundo Nunes e Kreischer (2010), consiste em promover o endurecimento da liga pela precipitação de micropartículas de uma fase mais dura. Este tratamento é comum quando o diagrama de equilíbrio de fases possui uma variação apreciável de solubilidade com o aumento da temperatura ou que ocorra a formação de intermetálicos.

Uma vantagem deste tratamento em relação ao de têmpera que se pode destacar é o fato de o mesmo apresentar distorções muito menores por não ser resfriado tão bruscamente, além de

variações dimensionais previsíveis (MESQUITA e BARBOSA, 2005). O tratamento térmico por precipitação é constituído na verdade por dois tratamentos térmicos: primeiramente deve-se aplicar a solubilização, para posteriormente promover a precipitação (ZANUTO, 2012).

O tratamento térmico de solubilização consiste em provocar a dissolução da fase β (soluto), inicialmente localizada nos contornos de grão, de modo a se obter novamente uma estrutura monofásica composta apenas de fase α . O segundo tratamento térmico a ser realizado é o de precipitação. Nesta etapa, visa-se promover a formação da segunda fase β na forma de partículas finas e dispersas homogeneamente no interior dos grãos cristalinos, e não mais concentradas apenas nos contornos de grão (SANTOS, 2006). A Figura 2.1 representa o diagrama de temperatura pelo tempo do tratamento completo, sendo solubilização mais precipitação (CALLISTER, 2008).

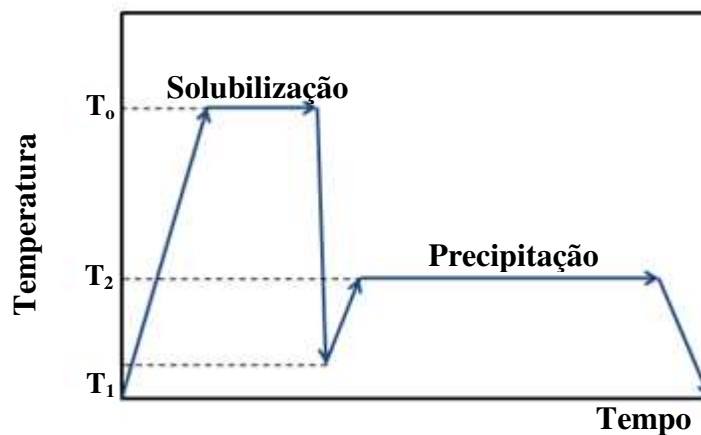


Figura 2.1 - Diagrama do tratamento completo de precipitação (ZANUTO, 2013)

O endurecimento por precipitação também é designado de envelhecimento, devido a forte dependência com o tempo, que geralmente é longo, uma vez obtidos os precipitados otimizados, a peça deve ser resfriada imediatamente para se evitar o crescimento excessivo desses precipitados com a conseqüente deterioração das propriedades obtidas, como o super-envelhecimento (SANTOS, 2006). A microestrutura representativa de todo o processo pode ser visualizada na Figura 2.2.

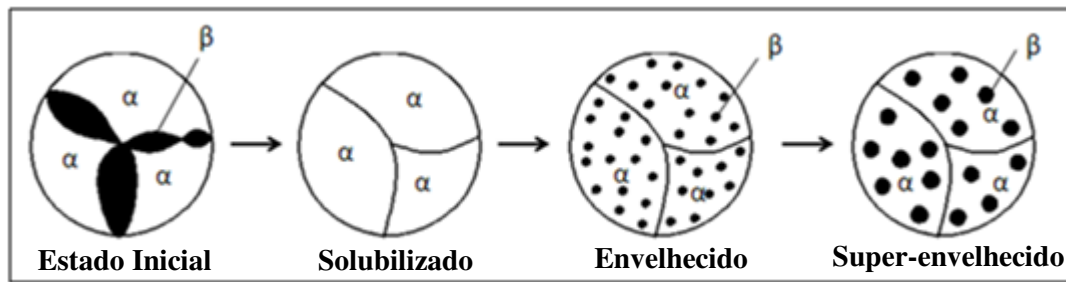


Figura 2.2 - Desenvolvimento da estrutura no tratamento completo de precipitação (SANTOS, 2006)

Nas Figura 2.3 e Figura 2.4, podem-se observar as fotomicrografias obtidas através do ataque com o reagente Marble, que revela a microestrutura martensítica em ripas, a fase mais escura, sendo ela a característica do aço com baixo teor de carbono. Podem-se observar também os pontos de precipitados nas fases, ocasionado devido ao tratamento térmico de envelhecimento, indicados pela setas (Figura 2.4). Estes precipitados são responsáveis pelo endurecimento do aço inoxidável 15-5 PH (SILVA, 2011).



Figura 2.3 - Fotomicrografia do aço inoxidável 15-5 PH na forma precipitado: ampliação de 500x (SILVA, 2011)

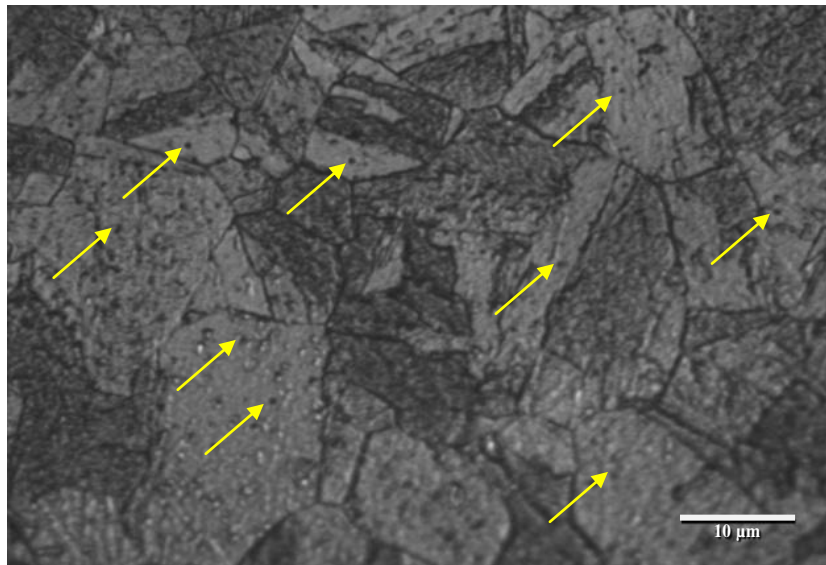


Figura 2.4 - Fotomicrografia do aço inoxidável 15-5 PH na forma precipitado: ampliação de 1000x (SILVA, 2011)

2.1.3 - Usinabilidade dos aços inoxidáveis

Em geral, os aços inoxidáveis possuem baixa usinabilidade quando comparados aos materiais como alumínio e aços de baixo carbono. Esta baixa usinabilidade é diretamente proporcional ao teor de cromo na liga, uma vez que, o cromo é o elemento que propicia aos aços inoxidáveis as principais características mecânicas: dureza e resistência à corrosão.

A usinabilidade destes aços, segundo a ASM Handbook (1997), é caracterizada por um comportamento “pastoso” durante o corte, mostrando uma tendência de formar cavacos longos e flexíveis que aderem à ferramenta ou formam aresta postiça de corte, além de dificultarem a remoção dos mesmos. Isso pode resultar em uma reduzida vida da ferramenta e acabamento superficial inadequado.

Esta baixa usinabilidade é consequência da composição necessária para que estes aços apresentem propriedades de elevada resistência mecânica e à corrosão (BELEJCHACK, 1997). Segundo Gennari e Machado (1999), esta baixa usinabilidade é uma das suas principais características cuja determinação se dá pelas seguintes propriedades:

- Alta ductilidade;
- Elevadas taxas de encruamento;
- Baixa condutividade térmica;
- Elevada tensão de ruptura;
- Tendência à aderência à ferramenta;
- Elevado coeficiente de atrito.

Dentre os aços inoxidáveis, o 15-5 PH, é designado com aço inoxidável austenítico de liga tipicamente difícil de usinar. Muitas tentativas têm sido realizadas para melhorar a usinabilidade destes aços. Pode-se citar a adição de aditivos, tais como o enxofre o selênio e o telúrio (KRABBE, 2006).

A usinabilidade dos aços inoxidáveis endurecíveis dependem do tipo de liga e do nível de dureza. Para o caso dos aços PH martensíticos, estes são frequentemente mais fáceis de ser usinados na condição “solubilizada” devendo ser tratado após a usinagem com a finalidade de se obter o desejado nível de resistência (ASM HANDBOOK, 1997).

No caso destes aços serem usinados, na condição endurecida, a velocidade de corte diminuiria muito em função do tratamento da peça. Como este tipo de tratamento não causa danos superficiais à peça, o tratamento se torna muito viável após a usinagem (KRABBE, 2006).

2.2 - Fresamento

Fresamento é um processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de superfícies quaisquer com o auxílio de uma ferramenta geralmente multicortante. Para tanto, a ferramenta gira e a peça se desloca segundo uma trajetória qualquer (FERRARESI, 1970).

A ferramenta chamada fresa (Figura 2.5) é provida de arestas cortantes dispostas simetricamente em torno de um eixo. O movimento de corte é proporcionado pela rotação da fresa ao redor do seu eixo. O movimento de avanço é geralmente proporcionado pela própria peça, fixada na mesa da máquina, o qual obriga a peça a passar sob a ferramenta em rotação, dando-lhe forma e dimensão desejadas (DINIZ, MARCONDES E COPINNI, 2010).

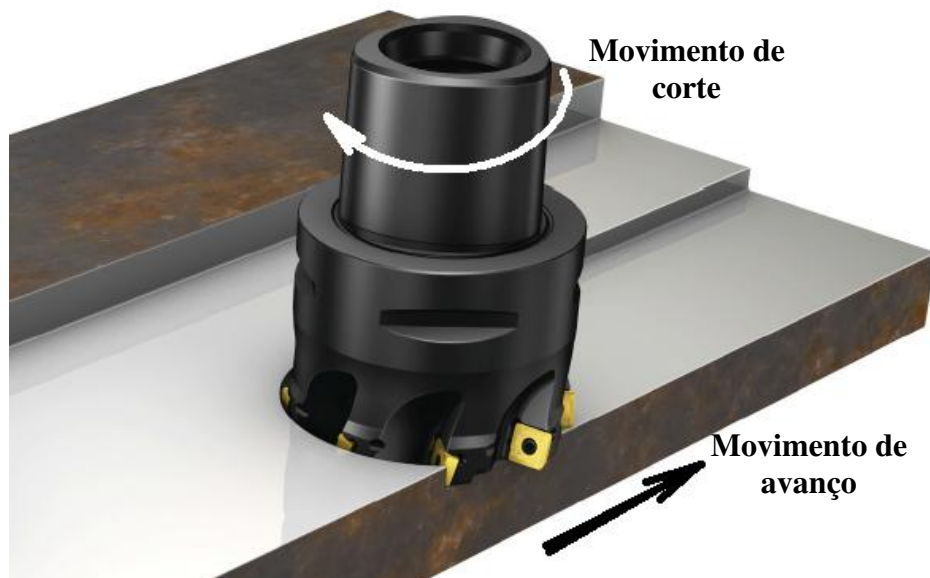


Figura 2.5 - Operação de fresamento (SANDVIK, 2012)

O fresamento é tido hoje como uma das mais importantes operações de usinagem, devido à sua grande versatilidade e condições de oferecer uma gama enorme de formas geométricas à peça que se deseja obter, uma vez que se caracteriza pelo avanço de uma ferramenta (fresa) em praticamente qualquer direção (KRABBE, 2006). A consequência desta grande flexibilidade é que muitas variáveis são incorporadas ao processo, tornando um grande desafio otimizá-las.

As operações de fresamento podem ser divididas em dois tipos, segundo Ferraresi (1977) e Diniz, Marcondes e Coppini (2010): fresamento tangencial e fresamento frontal. O fresamento tangencial, conhecido também como fresamento periférico, é o processo em que o eixo de rotação da ferramenta está paralelo à superfície usinada. Por outro lado, no fresamento frontal, também chamado de faceamento, o eixo da ferramenta está perpendicular à superfície usinada. Na Figura 2.6, podem ser observados estes dois tipos fundamentais de fresamentos.

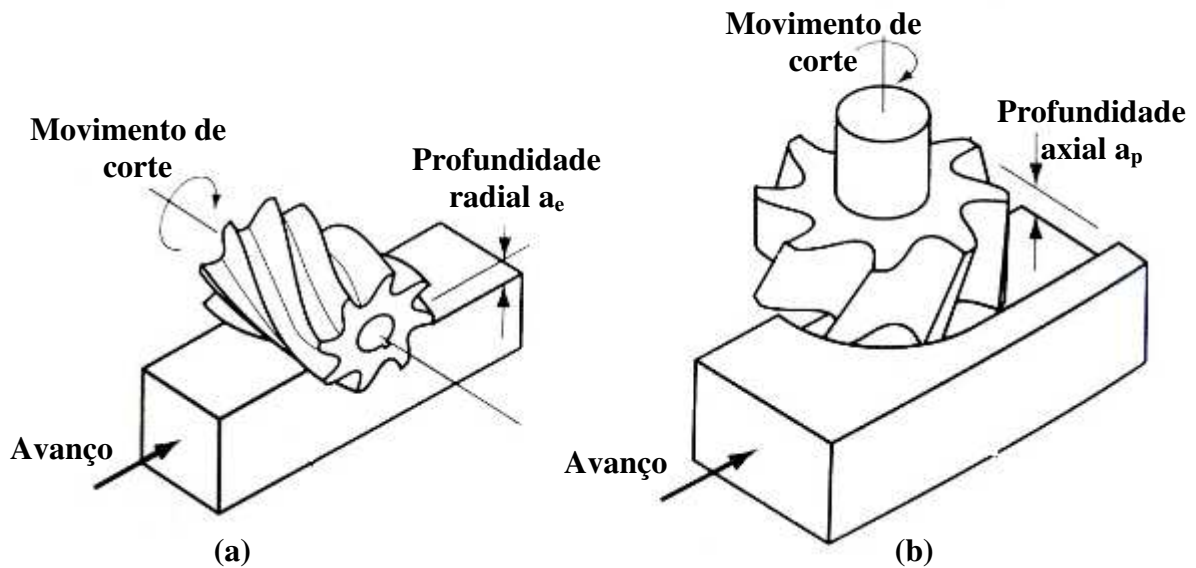


Figura 2.6 - Tipos fundamentais de Fresamento: (a) Fresamento tangencial - periférico (b) fresamento frontal - faceamento

O fresamento costuma ser dividido em faceamento, fresamento de cantos a 90°, canais e perfis. No entanto, com o desenvolvimento de máquinas e *software*, o número de métodos cresceu e o tornofresamento, o fresamento de rosca, usinagem em rampa circular e o fresamento trocoidal, entre outros, tornaram-se muito comuns nas operações atuais. Na Figura 2.7 são ilustrados alguns destes fresamentos (SANDVIK, 2012).

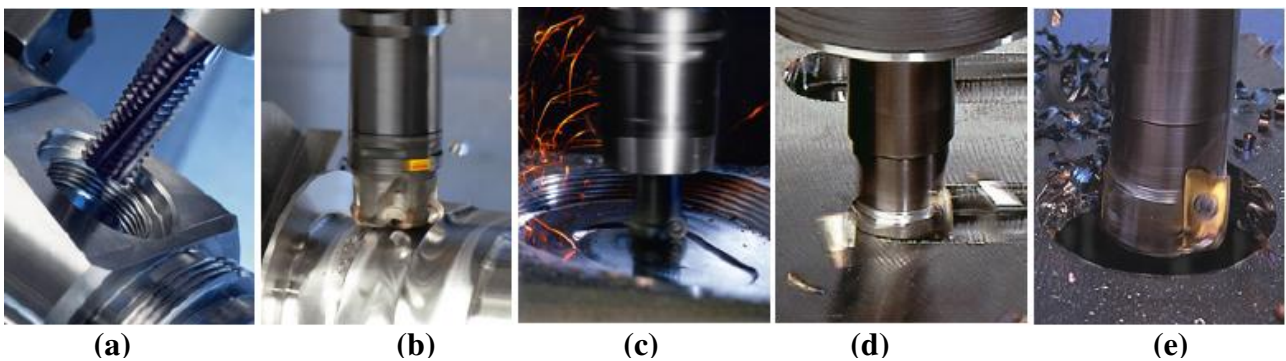


Figura 2.7 - Tipos de fresamentos: (a) fresamento de rosca (b) tornofresamento, (c) fresamento em contorno, (d) fresamento de canais e (e) alargamento de furos existentes (SANDVIK, 2012)

2.2.1 - Fresamento concordante e discordante

De acordo com o movimento dado pela mesa da máquina, ou pelo cabeçote, o fresamento pode ser classificado como concordante ou discordante. Estes dois movimentos podem ser observados na Figura 2.8.

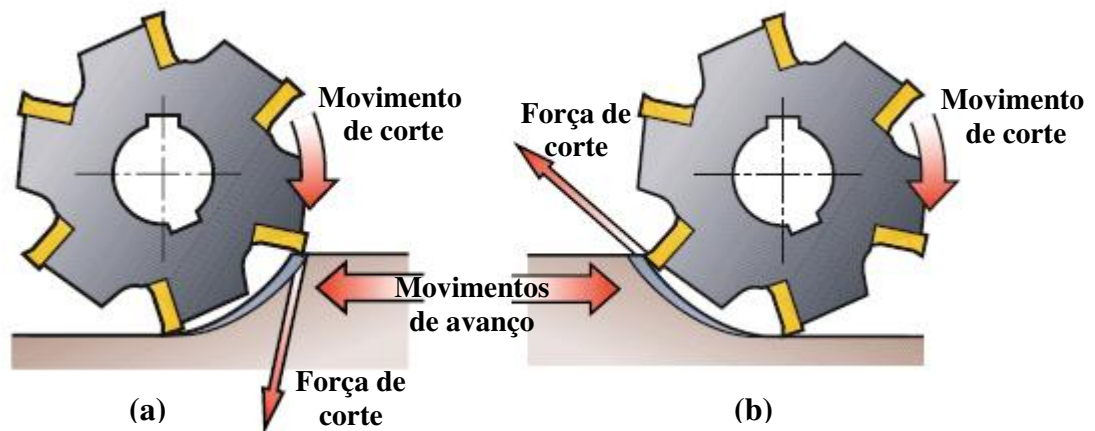


Figura 2.8 - Movimentos de corte: (a) movimento concordante (b) movimento discordante (SANDVIK, 2102)

Sempre que a espessura do cavaco (h), que varia ao longo do corte no fresamento, for menor na entrada da ferramenta do que a espessura do cavaco na saída, o corte é classificado como discordante. Por outro lado, se a espessura do cavaco (h) na entrada do dente da ferramenta for maior que o h na sua saída, o corte é classificado como concordante (DINIZ, MARCONDES E COPINNI, 2010).

No fresamento discordante, a espessura do cavaco aumenta progressivamente de zero até um valor máximo, indicado na Figura 2.9. Assim, quando a aresta toca a peça, ela é forçada para dentro da peça, criando um excessivo atrito, e conseqüentemente, deformação plástica e altas temperaturas (o que incentiva muito o desgaste da ferramenta). Além disso, frequentemente o contato é realizado com uma superfície encruada, causada pelo corte do dente anterior. Quando a pressão da aresta cortante atinge um valor capaz de vencer a tensão de ruptura do material, a ferramenta penetra a peça (DINIZ, MARCONDES E COPINNI, 2010).

De acordo com Diniz (2010), além de forçar a peça contra a mesa da máquina no fim do corte de um dente, a força gerada tende a arrancar a peça da mesa. Isso implica numa alternância da direção da força de corte que tende a produzir vibrações indesejadas, prejudicando o acabamento superficial e a tolerância da peça fresada.

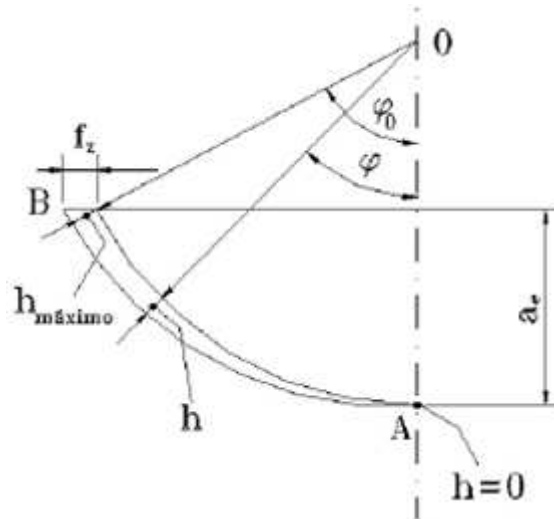


Figura 2.9 - Seção do cavaco no fresamento tangencial (DINIZ, MARCONDES E COPINNI, 2010)

No fresamento concordante, ainda de acordo com Diniz (2010), esses inconvenientes são sanados, uma vez que a componente de força perpendicular tem sempre o mesmo sentido. Os inconvenientes neste caso estão no fato da aresta penetrar a peça sempre com espessura de cavaco máxima, criando uma alta energia de impacto, que diminui a vida da ferramenta, no caso de se usinar peças com camada superficial endurecida.

Outro inconveniente está no fato da força de usinagem na direção de avanço estar no mesmo sentido de avanço da mesa, gerando muita vibração em sistemas de avanço da máquina que possuem muita folga, como nas fresadoras convencionais que utilizam sistema porca e fuso, problema não encontrado nos fusos de esferas re-circulantes (DINIZ, MARCONDES E COPINNI, 2010).

2.2.2 - Fresamento do tipo faceamento

O fresamento do tipo faceamento é a operação mais comum no fresamento e pode ser realizado usando uma ampla gama de diferentes ferramentas. As fresas com um ângulo de posição de 45° são usadas com mais frequência. Mas as fresas com pastilhas (insertos) redondas, as fresas para cantos a 90° , as fresas de facear e de disco também são usadas em determinadas condições (SANDVIK,2012).

Para tornar o entendimento didático, os fenômenos envolvidos durante o corte, na operação de fresamento por faceamento, podem ser divididos em três instantes diferentes. A entrada do corte (1), o ângulo de contato (2) e a saída do corte (3), como podem ser visualizados na Figura 2.10.

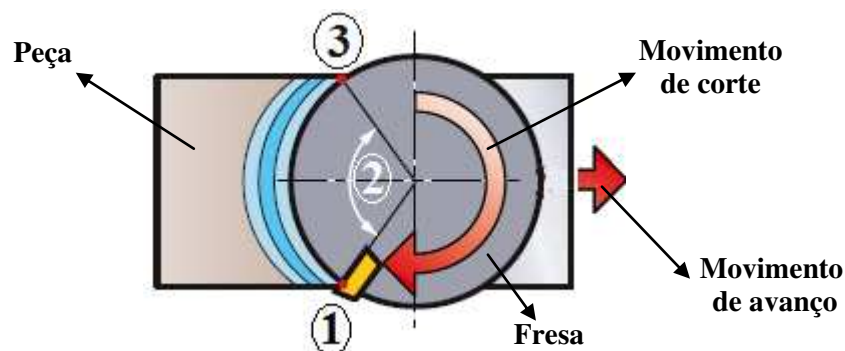


Figura 2.10 - Instantes do corte no fresamento de faceamento (SANDVIK, 2012)

Em relação ao ponto 1: *entrada da ferramenta no corte*, é importante que a linha de centro da fresa esteja dentro da largura fresada da peça. Caso o centro da fresa esteja fora da largura fresada (a_e), ilustrado na Figura 2.11c, o corte começa com a parte mais externa da pastilha (inserto) tocando a peça. Nesta situação, pode ocorrer a quebra da aresta de corte da ferramenta. No caso da Figura 2.11a o centro da ferramenta está dentro da largura fresada. Nesta situação o contato inicial é feito com a parte interior do inserto, onde a seção é mais resistente para suportar o choque (DINIZ, MARCONDES E COPINNI, 2010).

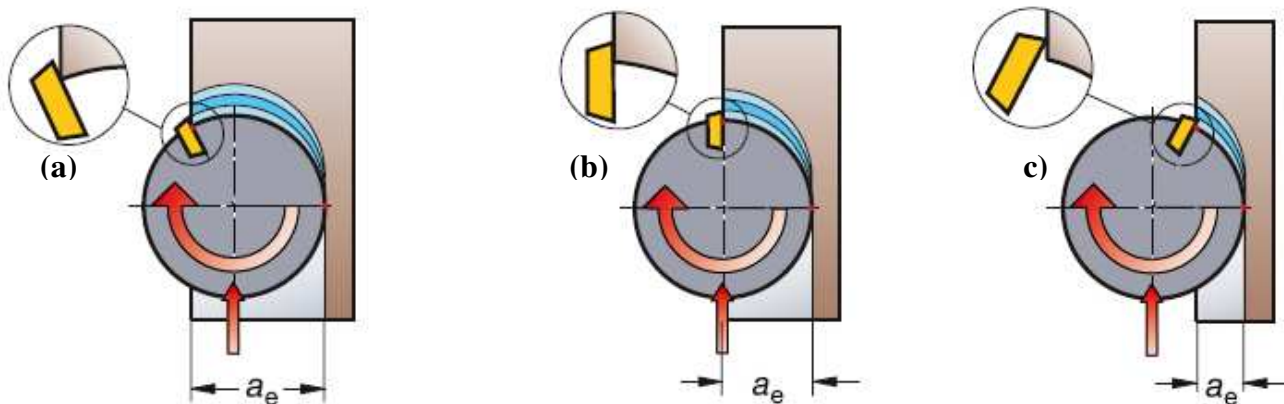


Figura 2.11 - Posicionamentos da aresta de corte no fresamento concordante: (a) a_e maior que $D/2$ (b) a_e igual $D/2$ (c) a_e menor que $D/2$ - D é o diâmetro da fresa (SANDVIK, 2012)

Em relação ao ponto 3: *saída da ferramenta do corte*, não será encontrado grandes problemas neste tipo de corte. Assim as posições “b” e “c” da Figura 2.11 não são favoráveis em relação a posição “a” devidos aos fatores já citados.

Os casos descritos anteriormente foram para situações em que o movimento de corte caracterizava um fresamento concordante. Na Figura 2.12 são apresentadas as possíveis situações para o corte discordante ou predominantemente discordante como pode ser observado na Figura 2.12.

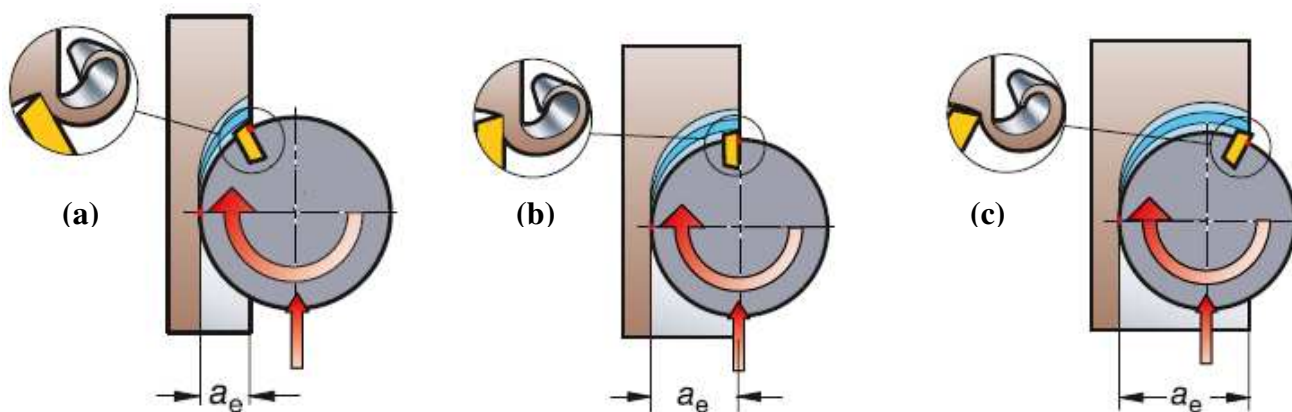


Figura 2.12 - Posicionamentos da aresta de corte no fresamento discordante: (a) a_e maior que $D/2$ (b) a_e igual $D/2$ (c) a_e menor que $D/2$ - D é o diâmetro da fresa (SANDVIK, 2012)

Para este tipo de corte, predominantemente discordante, o ponto 1: *entrada da ferramenta no corte*. o maior cuidado que deve-se ter é na entrada onde $h=0$. Esta entrada de dente é acompanhada de um grande atrito como citado anteriormente neste capítulo.

Para o ponto 3: *saída da ferramenta do corte*, poderá haver uma súbita diminuição dos esforços de corte. É importante que a espessura de corte (h) neste momento seja a menor possível, uma vez que esta súbita diminuição pode resultar em rebarba em aços e lascamento de canto de peças em ferro fundido. Ademais, pode causar trinca por fadiga mecânica devido à variação brusca de sollicitação sobre a ferramenta, que ocorre várias vezes por segundo. Desta forma, as posições “a” e “c” da Figura 2.12 são favoráveis em relação a “b”, que tem espessura de corte máxima neste momento (DINIZ, MARCONDES E COPINNI, 2010).

As possíveis posições da fresa, citadas anteriormente, são para o corte assimétrico. Para o corte simétrico, ilustrada na Figura 2.13, pode-se ter vibrações de acordo com Diniz (2010). Este fenômeno ocorre devido a maior variação do sentido das forças radiais de corte. A medida que a aresta de corte penetra na peça, as forças radiais vão variar de sentido, isso pode acarretar estas vibrações, que por sua vez pode ocasionar a avaria prematura da aresta. Isso é amenizado no corte assimétrico em que esta variação da força radial é menor.

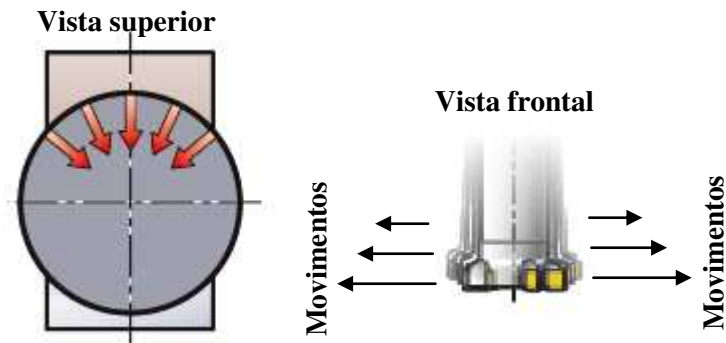


Figura 2.13 - Forças radiais no corte simétrico no fresamento de topo ocasionando vibrações (SANDVIK)

2.2.3 - Grandezas físicas no processo de fresamento

O princípio usado em toda máquina-ferramenta para obter a superfície desejada é providenciar um movimento relativo apropriado entre a peça e a ferramenta, escolhida

adequadamente. Desta forma, para o estudo da usinagem, é necessária a definição das grandezas físicas no processo de corte. A norma NBR 6162 apresenta estes conceitos. A seguir são apresentadas algumas definições básicas extraídas dessa norma.

- **Velocidade efetiva** (v_e) (m/min)

Velocidade instantânea do movimento efetivo, no ponto de corte escolhido, como pode ser visto pela Figura 2.14.

- **Velocidade de corte** (v_c) (m/min)

É a velocidade instantânea do ponto selecionado sobre a aresta, no movimento de corte, em relação à peça. No fresamento, o movimento de corte é proporcionado pela rotação da ferramenta. A velocidade de corte é, então, uma velocidade tangencial ilustrado na Figura 2.14 e dada pela Equação 2.1.

$$V_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad \text{Equação 2.1}$$

onde,

D = diâmetro da fresa

n = rotações por minuto (rpm)

- **Velocidade de avanço** (v_f) (mm/min)

É a velocidade relativa do movimento entre a ferramenta e a peça que, juntamente com o movimento de corte, possibilita uma remoção contínua, ou intermitente, do cavaco, durante várias rotações, ou curso, da ferramenta. A velocidade de avanço pode se dada pela Equação 2.2 e é ilustrada pela Figura 2.14.

$$V_f = f_z \cdot n \cdot z \quad \text{Equação 2.2}$$

onde,

f_z = avanço por dente / z = número de dente

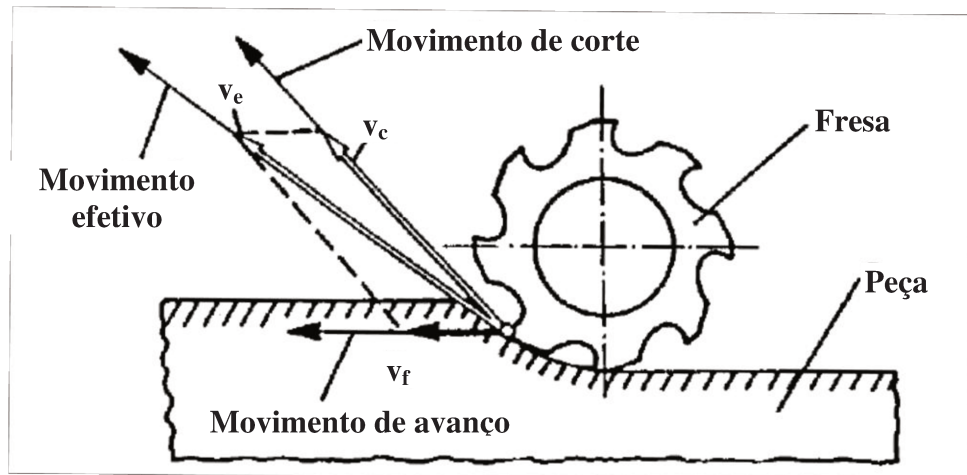


Figura 2.14 - Direção dos movimento de corte no fresamento: Velocidade efetiva (v_e), velocidade de corte (v_c) e velocidade de avanço (v_f) (NBR 6162, 1989)

- **Avanço por dente (f_z) (mm/dente)**

É o percurso de avanço por dente, aresta de corte por volta ou curso da ferramenta, medido na direção do avanço. Corresponde à distância entre duas superfícies consecutivas em usinagem, medida na direção do avanço. O avanço por dente é mostrado na Figura 2.15 e é dado pela Equação 2.3.

$$f_z = \frac{f}{z}$$

Equação 2.3

onde, f = avanço por rotação ou curso

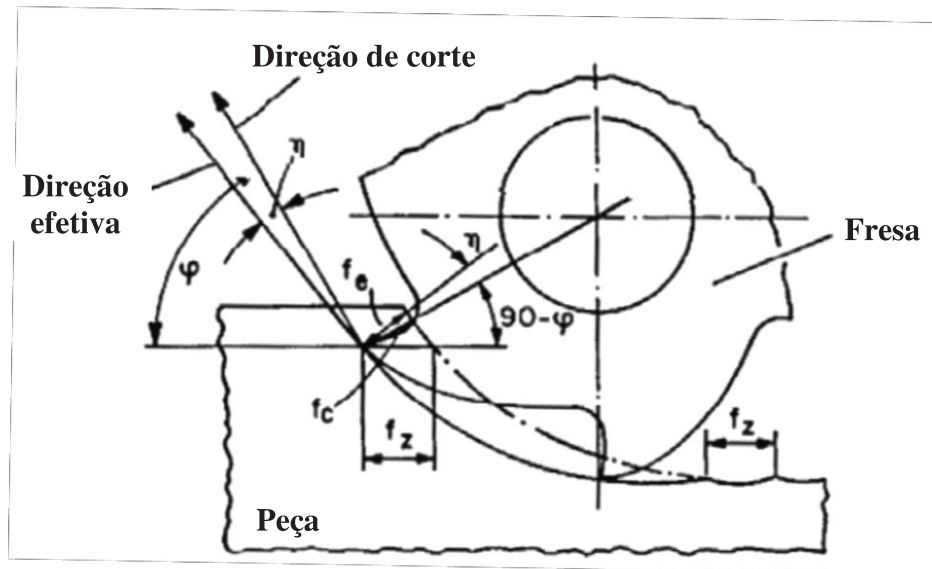


Figura 2.15 - Avanço por dente (f_z) (NBR 6162, 1989)

- **Profundidade de usinagem (a_p) (mm)**

É a quantidade que a ferramenta penetra na peça, medida perpendicularmente ao plano de trabalho (na direção do eixo da fresa). No fresamento frontal, a_p corresponde à profundidade de usinagem e no fresamento tangencial, à largura de corte, ilustrado na Figura 2.16.

- **Penetração de trabalho (a_e) (mm)**

É a quantidade que a ferramenta penetra na peça, medida no plano de trabalho e perpendicular à direção de avanço (Figura 2.16).

- **Penetração de avanço (a_f) (mm)**

É a quantidade que a ferramenta penetra na peça, medida no plano de trabalho e perpendicular à direção de avanço (Figura 2.16).

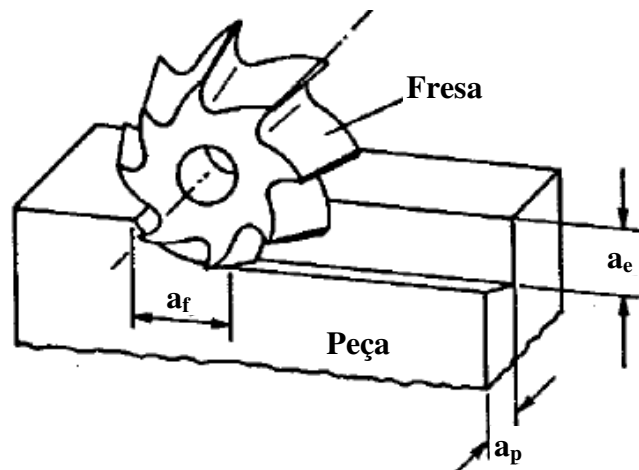


Figura 2.16 - Largura de usinagem a_p , penetração de trabalho a_e e penetração de avanço a_f no fresamento tangencial (NBR 6162, 1989)

2.2.4 - Forças de corte na usinagem

De acordo com Diniz (2010), o conhecimento do comportamento e da ordem de grandeza dos esforços de corte nos processos de usinagem é de fundamental importância, uma vez que eles afetam diretamente parâmetros importantes, ilustrados no esquema da Figura 2.17.

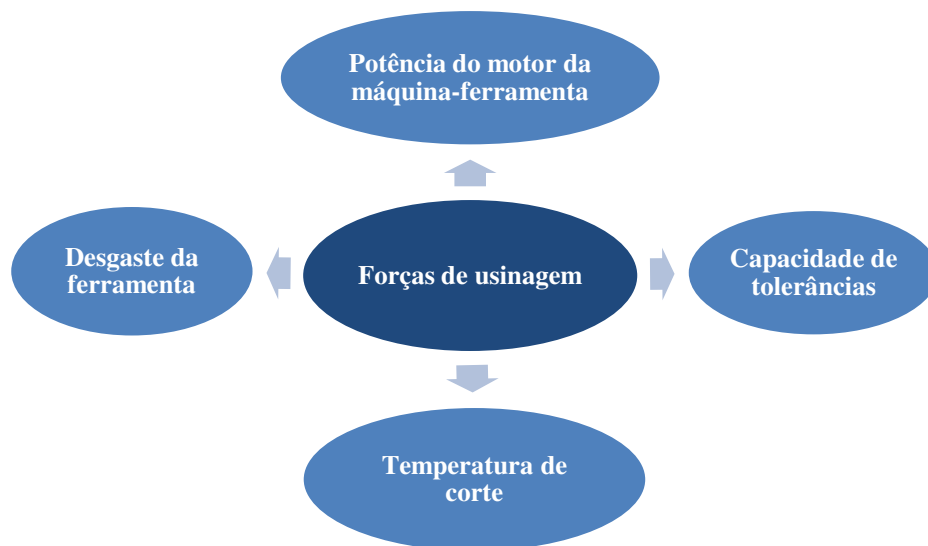


Figura 2.17 - Esquema das influências diretas que os esforços de corte possui em outras variáveis

Com o advento das novas máquinas-ferramenta é fundamental compreender estas forças de corte geradas para um perfeito monitoramento e diagnóstico do processo. A modelagem destas forças em relação aos parâmetros do processo, na maioria das vezes, é o elemento chave para planejamento, otimização e automação das operações de usinagem (ZHENG, 1996).

Existem pelo menos duas abordagens no estudo dos esforços de corte, sendo que a primeira é teórica, partindo da fenomenologia da formação do cavaco, enquanto a segunda é empírica, em que esforços de corte são equacionados utilizando-se coeficientes retirados de procedimentos experimentais (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2010).

2.2.5 - Determinação experimental da força de usinagem

Seja do ponto de vista prático, quanto do ponto de vista experimental, de acordo com Machado (2009), para a medição da força de usinagem no fresamento necessita de ter uma exatidão e uma precisão que dependem da necessidade. Para estudos detalhados de formação de cavacos ou de estabilidade dinâmica da máquina-ferramenta, a medição do componente dinâmico é necessária. Para isso, utilizam-se dinamômetros que devem atender aos requisitos descritos abaixo: (FERRARESI, 1977)

Sensibilidade: é a relação entre a grandeza indicada pelo dinamômetro e a que está sendo medida. Na maioria dos dinamômetros utilizados, tem-se como grandeza lida a tensão Volts, fornecida pelo sensor em uso. Esse sinal é proporcional à força e a sensibilidade é dada em Volts por Newtons de força;

Precisão: a precisão do dinamômetro está associada à sua capacidade de reproduzir o valor da grandeza medida o mais próximo possível do valor real;

Rigidez: o dinamômetro não deve influenciar a grandeza que está sendo medida, no caso os esforços de corte. Esta rigidez está associada à frequência natural de vibração do dinamômetro, parâmetro de extrema importância para as medições dinâmicas;

Exatidão: o dinamômetro deve ser capaz de reproduzir as medições sem distorções, ou seja, para as medições no tempo, não devem ocorrer atrasos em relação ao fenômeno, nem alterações por conta da variação da frequência;

Insensibilidade em relação à temperatura e à umidade: o aparelho deve ser capaz de medir com aceitáveis variações de temperatura e umidade, que são normalmente presentes nos processos de usinagem;

Mínimo efeito cruzado: a excitação de força em um eixo do dinamômetro não deve interferir nos demais eixos, sob o efeito de superestimar valores reais em apenas um eixo.

2.2.6 - Forças de corte no fresamento

Força de usinagem no fresamento é a força total que atua sobre uma cunha cortante durante a usinagem, sendo considerada a força que atua em direção e sentido sobre a ferramenta (FERRARESI, 1970).

A princípio, nem a direção nem o sentido da força de usinagem são conhecidos, tornando-se impossível medi-la. Desta forma, não se trabalha com a força de usinagem propriamente, mas com suas componentes segundo diversas direções conhecidas (DINIZ, MARCONDES E COPINNI, 2010).

A componente da força de usinagem num plano ou numa direção qualquer é obtida mediante a projeção da força de usinagem sobre esse plano ou direção, isto é, mediante uma projeção ortogonal (FERRARESI, 1970). No fresamento do tipo faceamento a direção da força de usinagem, depende da geometria do inserto, mais precisamente do ângulo de posição, como pode ser observado na Figura 2.18.

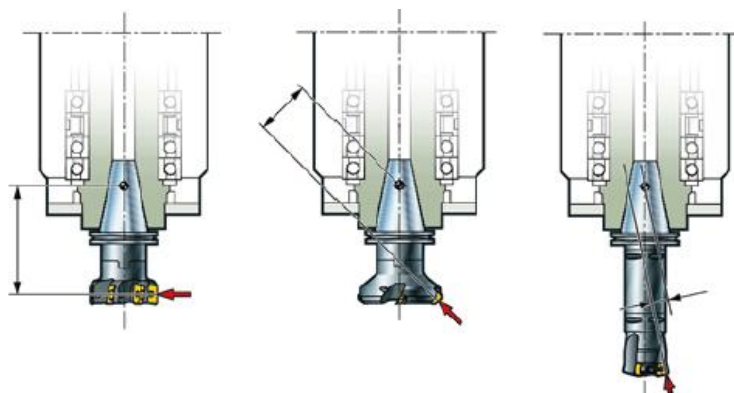


Figura 2.18 - Ferramentas com diferentes ângulos de posição alterando o ângulo da força de usinagem (SANDVIK, 2012)

Na Figura 2.19, Altintas (2000) nos mostra graficamente o comportamento das forças de corte. Pode-se observar a variação cíclica da força de corte durante a operação de fresamento com uma fresa de 4 dentes, $a_p = 2 \text{ mm}$, $f_z = 0,1 \text{ mm}$ e $a_e = D/2$. A Figura 2.19a mostra a variação da força para o fresamento discordante, a Figura 2.19b, para o fresamento concordante, e a Figura 2.19c para o fresamento simétrico.

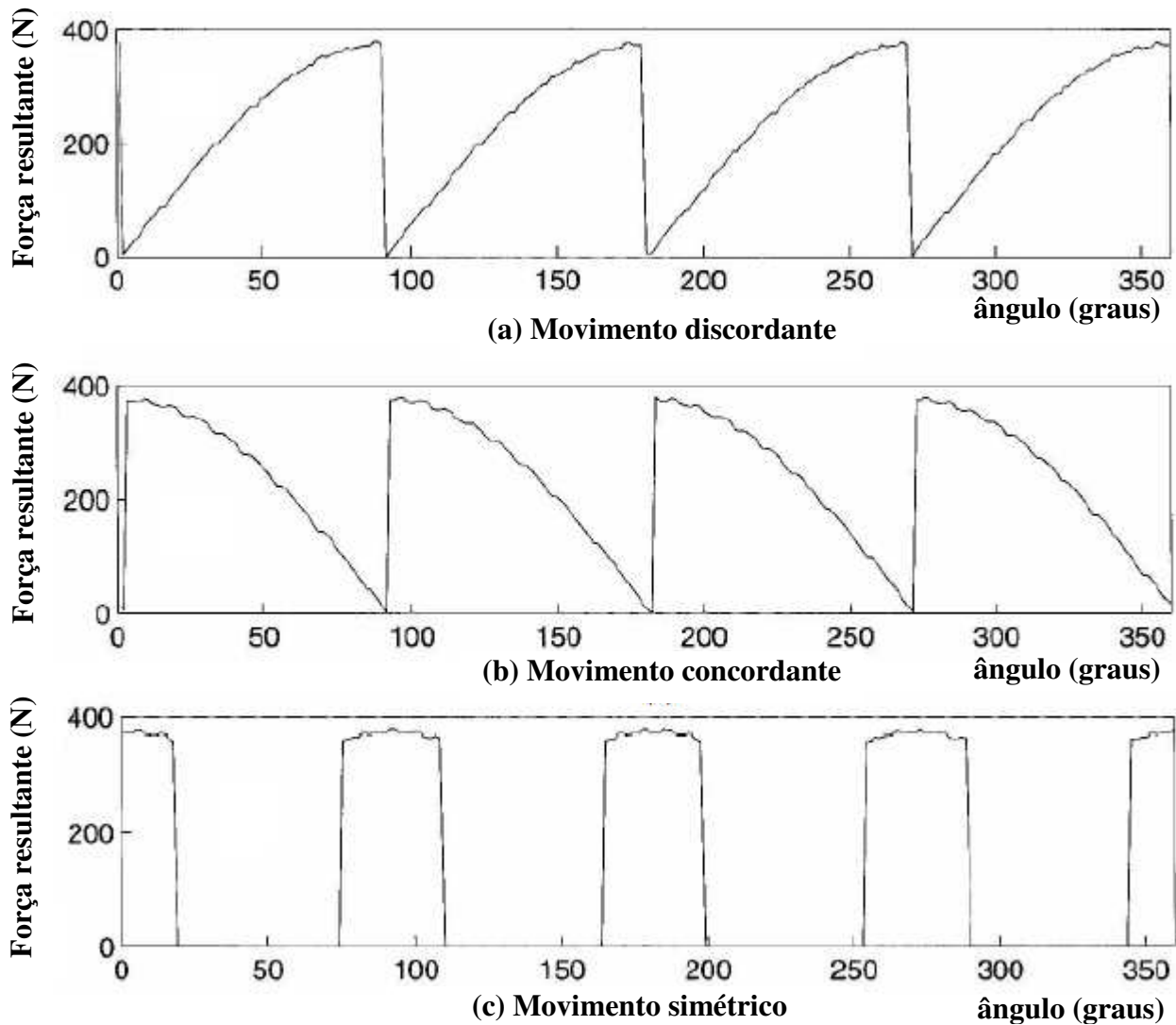


Figura 2.19 - Variação da força de corte para: (a) fresamento discordante, (b) fresamento concordante e (c) fresamento simétrico (adaptado de ALTINTAS, 2000)

Neves (2002) realizou experimentos que confirmaram que o parâmetro de usinagem que mais influencia a força de corte é a largura fresada (a_e). No entanto, parâmetros como

profundidade de usinagem, avanço por dente e até mesmo sentido da usinagem influenciam nos valores dos esforços de corte.

No fresamento é possível decompor a força de usinagem em três componentes principais: força tangencial (F_t), força radial (F_r) e força axial (F_a). Essas componentes podem ser escritas em função da área variável do cavaco $b \cdot h(\varphi)$ e do comprimento de contato da ferramenta (b) como segue na Equação 2.4:

$$\begin{aligned} F_t(\varphi) &= K_{tc} \cdot b \cdot h(\varphi) + K_{te} \cdot b \\ F_r(\varphi) &= K_{rc} \cdot b \cdot h(\varphi) + K_{re} \cdot b \\ F_a(\varphi) &= K_{ac} \cdot b \cdot h(\varphi) + K_{ae} \cdot b \end{aligned} \quad \text{Equação 2.4 - (adaptado de ALTINTAS, 2000)}$$

Onde φ é o ângulo de contato instantâneo da ferramenta, K_{tc} , K_{rc} e K_{ac} são os coeficientes da força de corte relacionados ao cisalhamento nas direções tangencial, radial e axial, respectivamente, e K_{te} , K_{re} e K_{ae} são constantes da aresta de corte. Fazendo a mudança de coordenadas tem-se a Equação 2.5:

$$\begin{aligned} F_x(\varphi) &= -F_t \cos(\varphi) - F_r \sin(\varphi) \\ F_y(\varphi) &= +F_t \sin(\varphi) - F_r \cos(\varphi) \\ F_z(\varphi) &= +F_a \end{aligned} \quad \text{Equação 2.5 - (adaptado de ALTINTAS, 2000)}$$

Conhecer a geometria da ferramenta ajuda a prever como deverá se comportar a distribuição destas forças. Medir esta força de corte na prática é medir suas componentes isoladamente em direções conhecidas. Assim, a força de corte pode ser expressa em relação a uma pressão específica de corte (k_s) e a área da seção de corte (A), como mostra a Equação 2.6

$$F_c = k_s \cdot A \quad \text{Equação 2.6 (DINIZ, MARCONDES E COPINNI, 2010)}$$

Conhecer a área da seção de corte é relativamente simples de acordo com Kull (2013), com o inconveniente que no fresamento ela varia ao longo do arco de contato. O problema maior está na determinação da pressão específica de corte, uma vez que ela varia com muitos parâmetros, entre estes os quais tem-se:

Material da peça: De modo geral, quando a dureza da peça aumenta, o K_s também aumenta, mas isso não pode ser tomado como uma regra, uma vez que materiais com durezas semelhantes podem ter valores de pressão específica de corte muito diferentes devido aos elementos químicos que melhoram sua usinabilidade (DINIZ, MARCONDES E COPINNI, 2010).

Material da ferramenta: Quando se varia o material da ferramenta entre as diversas classes de metal duro adequadas para usinagem de aços, a variação dos esforços de corte é praticamente desprezível (NAKAYAMA E ARAI, 1976).

Geometria da ferramenta: O ângulo de saída é o mais importante, quanto a geometria da ferramenta. A diminuição do K_s ocorre à medida que o valores deste ângulo aumentam, uma vez que a deformação do cavaco diminui. Esta influência é mais marcante quando se usina materiais dúcteis (DINIZ, MARCONDES E COPINNI, 2010).

Secção de corte: A pressão específica de corte diminui com a área da secção de corte. Essa diminuição do K_s é devida principalmente ao aumento do avanço f_z . Durante o processo de formação do cavaco, parte do volume de material deformado da peça não se transforma em cavaco, mas sim escorrega entre a peça e a superfície de folga da ferramenta, gera o chamado fluxo lateral de cavaco (SHAW, 1984).

Velocidade de Corte: A área da secção de corte não depende da velocidade de corte e a pressão específica de corte somente é afetada pela velocidade quando existe formação de aresta postiça de corte (KULL, 2013)

Estado de afiação da ferramenta: No desgaste de flanco, a pressão específica aumenta à medida que o desgaste cresce, devido ao aumento do atrito peça-ferramenta (DINIZ, MARCONDES E COPINNI, 2010).

Os processos tradicionais de avaliação da força de corte, para o fresamento, baseiam-se em curvas empíricas para a determinação das forças médias ou máximas, pois a geometria de corte é bem complexa (ENGIN e ALTINTAS, 2001).

Para melhor análise dos esforços de corte as componentes da força de usinagem, F_x , F_y e F_z deve ser capturada pelo dinamômetro, e depois transformadas em força tangencial (F_t), força radial (F_r) e força axial (F_a), em função do ângulo instantâneo de contato (ϕ), seguindo a Equação 2.7. A força tangencial (F_t) e força radial (F_r) estão representadas esquematicamente pela Figura 2.20. Observe que inicialmente se tem a F_{t0} , que é a força tangencial inicial, assim como a F_{r0} ,

Força radial inicial. Estas, por sua vez, estão em constante mudança de direção e módulo em função do tempo devido a variação do ângulo φ .

$$\begin{Bmatrix} F_t \\ F_r \\ F_a \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{sen}(\varphi) & -\text{cos}(\varphi) & 0 \\ \text{cos}(\varphi) & \text{sen}(\varphi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{Bmatrix} \quad \text{Equação 2.7 - (Adaptado de ALTINTAS 2000)}$$

com $0 \leq \varphi \leq \frac{2\pi}{z}$, onde z é o número de dente da fresa.

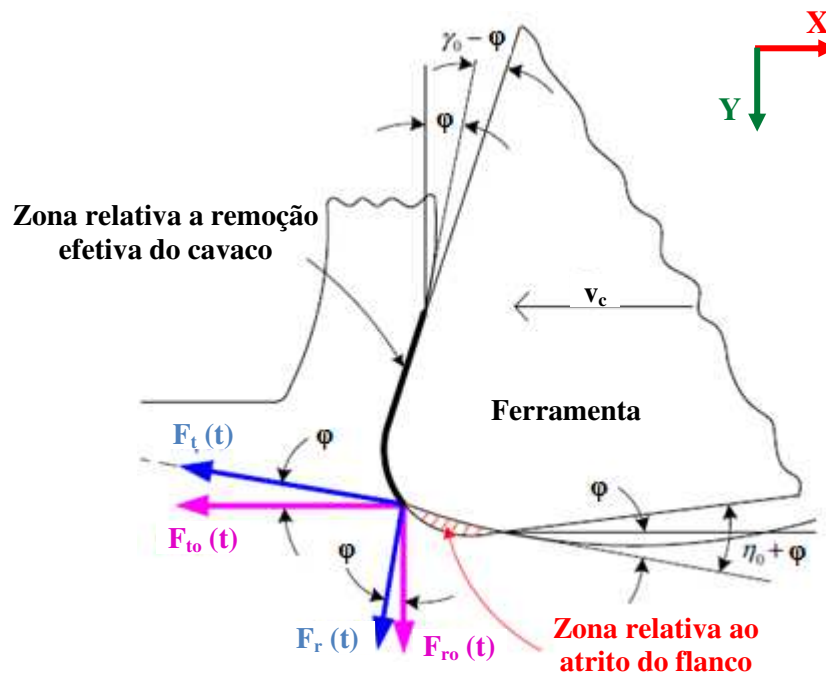


Figura 2.20 - Forças no fresamento: Força tangencial (F_t) e Força radial (F_r) as quais tem suas direções variadas com o ângulo φ (WAN, 2012)

2.2.7 - Espessura mínima do cavaco

O raio da aresta de corte da ferramenta e os valores de avanço por dente evidenciam o fenômeno da espessura mínima do cavaco. Tal fenômeno é muito comum no fresamento frontal discordante, quando a espessura do cavaco varia de zero, no início do corte, até um valor máximo

que depende do avanço por dente, como foi ilustrado anteriormente no subtítulo 2.2.1 pela Figura 2.9.

O conceito de espessura mínima do cavaco implica em que a profundidade de corte, ou avanço por dente, seja maior que certo valor de espessura para o cavaco se formar. Quando a espessura do cavaco não deformado (h), ilustrado na Figura 2.21 é menor que uma espessura crítica mínima, deformações elásticas ocorrem e a ferramenta não remove nenhum material. Deste modo, quando a espessura de cavaco não deformado ultrapassar um valor mínimo, então o cavaco é formado pelo cisalhamento do material, mas ainda há alguma deformação elástica provocada pela ferramenta (SOORAJ, 2011).

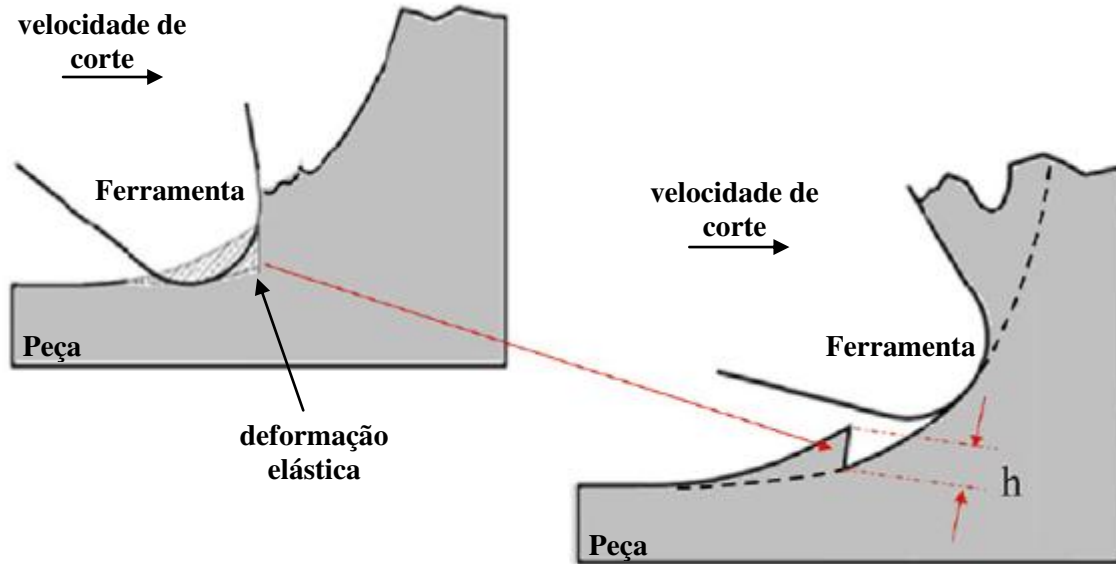


Figura 2.21 - Espessura mínima do cavaco e deformação elástica do material (SOORAJ, 2011)

Normalmente a profundidade de corte fica menor que a profundidade desejada, devido à deformação elástica. No entanto, quando o aumento da espessura do cavaco não deformado é superior a espessura mínima, a deformação elástica diminui significativamente e a profundidade de corte é removida quase que totalmente, na forma de cavaco (CHAE, PARK E FREIHEIT, 2006).

É devido a esta deformação elástica ocorrida no início do corte discordante e por conta das deformações plásticas, muitas vezes, acompanhada de encruamento, dependendo do material, que

se têm elevados atritos até que a espessura mínima seja suficientemente capaz de provocar o cisalhamento do material da peça.

Na Figura 2.22a pode-se notar que quando h é menor que a espessura mínima nesta situação não há remoção de material. Na Figura 2.22b o h é maior que a espessura mínima, no entanto, ainda existe boa parte do material que sofre deformações tanto elásticas quanto plásticas. Por último, na Figura 2.22c é apresentado o caso em que o h mínimo é suficientemente grande para que ocorra total cisalhamento do material, não ocorrendo neste caso deformações expressivas. De acordo com Özel, Liu e Dhanorker (2007), um raio de aresta menor causará a formação antecipada do cavaco resultante em corte do material.

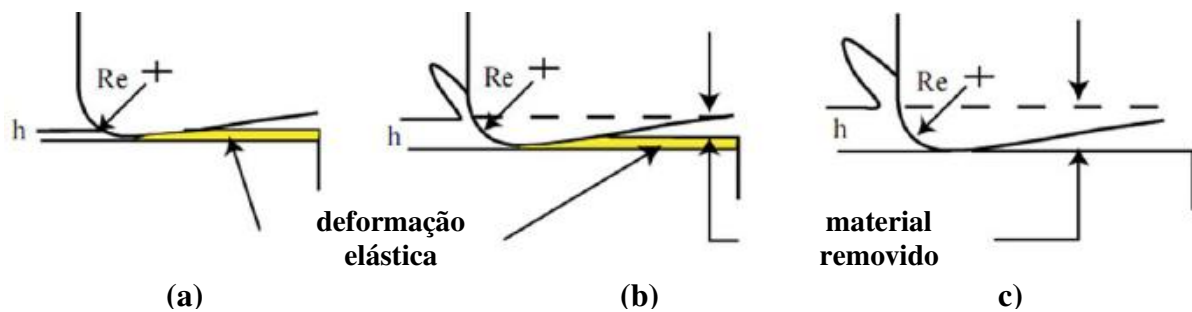


Figura 2.22 - variação do h mínimo para o corte do material: (a) h menor que o mínimo (b) h maior que o mínimo, mas existe deformações (c) h suficientemente maior (ARAI, 2008)

Para as deformações plásticas Vosough (2011) obteve resultados a partir de gráficos do método de elementos finitos (FEM). Simulações podem ser visualizadas na Figura 2.23. Estas simulações FEM foram realizadas em 2D e, com um raio de ferramenta teórico de 1 mm. (VOSOUGH, 2011)

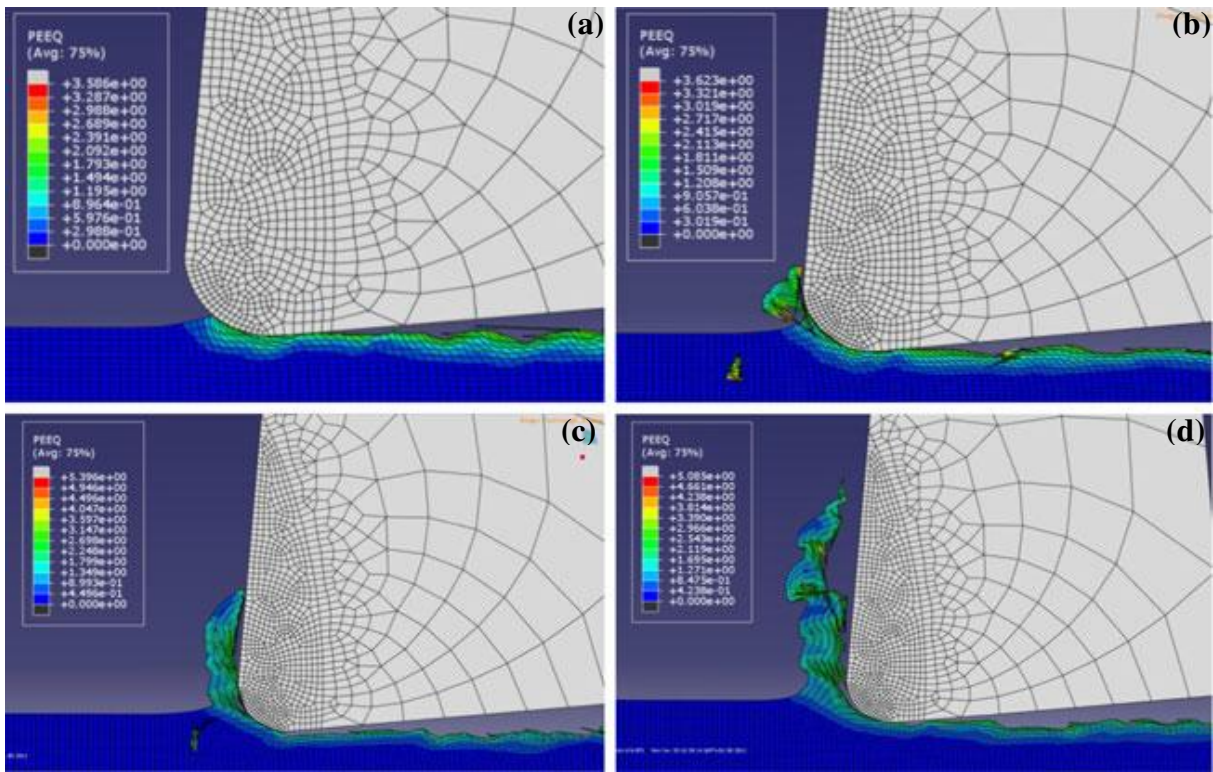
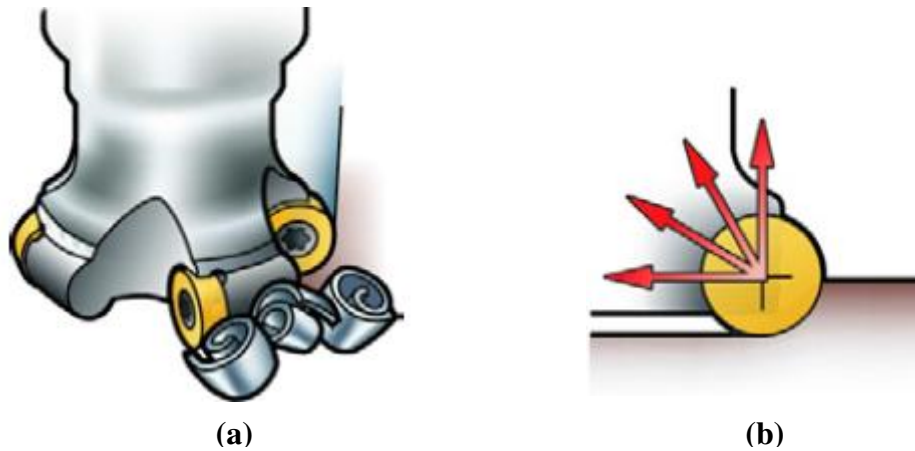


Figura 2.23 - Simulações das deformações plásticas através do Método Elementos Finitos para diferentes valores de h : (a) $h = 5 \mu\text{m}$, (b) $h = 10 \mu\text{m}$, (c) $h = 15 \mu\text{m}$ e (e) $h = 20 \mu\text{m}$ (Vosough, 2011)

2.2.8 - Características de insertos redondos

Insertos redondos apresentam algumas características que merecem destaque. Este tipo de ferramenta é indicada para uma ampla gama de operações, gerando uma ação de corte leve, com entradas e saídas suaves, resultando em baixas forças de corte e baixo calor gerado, permitindo a utilização de altos avanços quando baixas velocidades de corte são utilizadas de acordo com seu fabricante.

As fresas com insertos redondos R300, Figura 2.24a, ou fresas com um raio de canto grande, possuem as seguintes características (SANDVIK, 2012):



**Figura 2.24 - Fresa com inserto redondo: (a) fresa removendo material
(b) orientações das forças de usinagem (SANDVIK, 2012)**

- Fresas eficientes para desbaste em uso geral;
- O raio de canto oferece uma aresta de corte muito robusta.
- Capacidade de alta taxa de avanço devido a cavacos mais finos gerados ao longo da aresta de corte;
- Adequados para usinagem de ligas de titânio e ligas resistentes ao calor;
- Dependendo das variações de profundidade de corte, a_p , o ângulo de posição muda de zero até 90° , alterando a direção da força de corte ao longo do raio da aresta, ilustrado pela Figura 2.24b.

Como neste tipo de inserto o ângulo de posição depende da profundidade de corte, ilustrado pela Figura 2.25a e Figura 2.25b, as equações para se calcular o ângulo de posição (κ_r) e a espessura máxima de cavaco (h_{ex}) estão descritas abaixo:

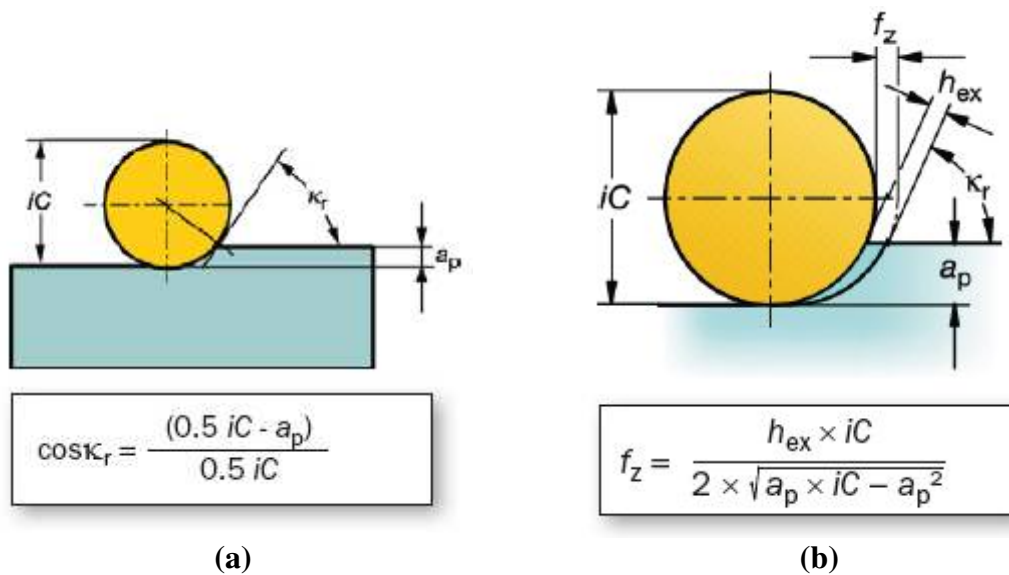
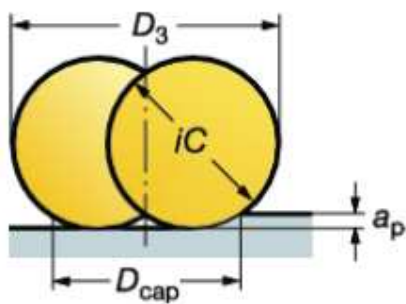


Figura 2.25- Equações: (a) equação para obtenção do ângulo de posição (κ_r) (b) equação da espessura máxima do cavaco em função do f_z (SANDVIK, 2012)

A espessura máxima do cavaco (h_{ex}) é de fundamental importância, pois caso ela seja muito pequena pode representar a causa mais comum de um desempenho insatisfatório do processo, resultando em baixa produtividade, além de afetar negativamente a vida útil da ferramenta e a formação de cavacos. Por outro lado, quando h_{ex} é muito grande pode sobrecarregar a aresta de corte, o que pode levar à avarias da ferramenta (SANDVIK, 2012).

O melhor desempenho com um inserto redondo é obtido quando o ângulo de posição (κ_r) fica abaixo dos 60° , isto significa que a profundidade de corte (a_p) não deve exceder 25% do diâmetro do inserto (iC). Para baixa relação a_p/iC , o avanço pode ser aumentado consideravelmente para se aumentar a espessura de cavaco. Além disto, o grande raio de ponta torna a aresta de corte muito robusta (SANDVIK, 2012).

Outro cuidado que deve-se tomar com os insetos é na determinação da velocidade de corte, uma vez que a mesma varia de acordo com a profundidade de corte, uma vez que o diâmetro muda. Desta forma, deve-se achar o diâmetro efetivo (D_{cap}) antes de se calcular a velocidade de corte. Na Figura 2.26 são apresentadas as equações para sua determinação.



$$D_{\text{cap}} = D_3 - iC + \sqrt{iC^2 - (iC - 2 \times a_p)^2}$$

$$v_c = \frac{\pi \times n \times D_{\text{cap}}}{1000} \text{ m/min}$$

Figura 2.26 - Equações para cálculo de diâmetro efetivo e velocidade de corte para insertos redondos (SANDVIK, 2012)

2.2.9 - Vida, desgaste e avarias da ferramenta de corte

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2010), a vida da ferramenta é o tempo em que a mesma trabalha efetivamente (deduzidos os tempos passivos), até perder sua capacidade de corte, dentro de um critério previamente estabelecido. Atingido este tempo, a ferramenta deve ser reafiada ou substituída. Sendo que o percurso de corte (l_c) e o percurso de avanço (l_f), além do volume do cavaco removido podem ser utilizados para expressar a vida da ferramenta.

Diversos são os tipos de desgastes e avarias que acontecem em uma ferramenta de usinagem, antes de defini-los, é importante diferenciá-los. Desgaste é a perda contínua e microscópica de partículas de ferramenta devido à ação de corte. As demais ocorrências são chamadas de avarias (DINIZ, MARCONDES E COPPINI, 2010).

Os principais tipos de desgaste são o frontal (ou de flanco), que é o mais comum, ocorrendo na superfície de folga da ferramenta devido ao contato entre ferramenta e peça, o desgaste de entalhe, que ocorre nos extremos de contato entre a superfície de folga e a peça, sendo atribuído principalmente ao fenômeno de oxidação da ferramenta. Portanto, muito incentivado pelo aumento de temperatura e velocidade de corte, e o desgaste de cratera, que acontece na superfície de saída da peça devido o contato entre cavaco e ferramenta, como pode ser observado na Figura 2.27 (DINIZ, MARCONDES E COPPINI, 2010).

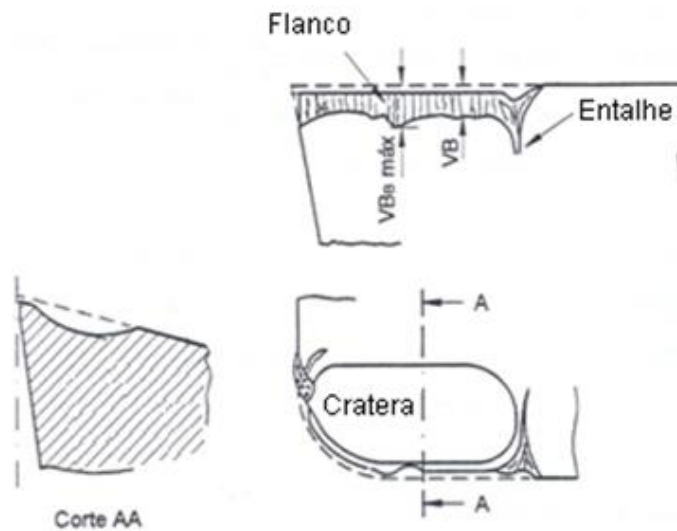


Figura 2.27 - Tipos de desgastes de ferramenta (DINIZ, MARCONDES E COPPINI, 2010)

Na Figura 2.28 podem-se observar 3 tipos principais de avarias de acordo com Diniz, Marcondes e Coppini (2010):

- O lascamento que, diferentemente do desgaste frontal de cratera, é a retirada de partículas grandes subitamente da ferramenta;
- As trincas que aparecem devido a variações de temperaturas ou esforços mecânicos, podendo ser perpendicular (térmicas) ou paralela (mecânica) a aresta de corte;
- A quebra que pode ocorrer inesperadamente ou devido ao aumento excessivo dos desgastes.

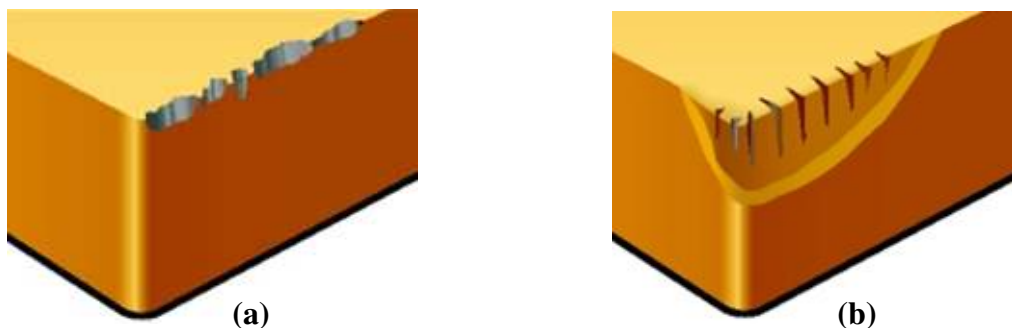


Figura 2.28 - Tipos de avarias na ferramenta de corte: (a) microlascamentos da aresta de corte e (b) trincas térmica (SANDVIK, 2012)

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A descrição detalhada de todos os experimentos realizados é de fundamental importância para a compreensão do trabalho científico e a reprodução dos testes. Nesse capítulo são apresentados os equipamentos, os materiais e a metodologia utilizada no presente trabalho.

3.1 - Equipamentos

3.1.1 - Máquina-ferramenta

A máquina utilizada nos ensaios deste trabalho é um centro de usinagem vertical, com 3 eixos, marca Mori Seiki, modelo SV-40 (Figura 3.1). Controlado por um CNC GE Fanuc 18M, rotação máxima de 12.000 RPM e potência de trabalho de 22,4 kW.



Figura 3.1 - Centro de usinagem 3 eixos, usado nos ensaios de fresamento

3.1.2 - Microscópio óptico

A medição dos desgastes foi realizada com um microscópio estereoscópico trinocular Quimis Q714ZT2 equipado com uma câmera fotográfica digital Moticom® 2000 de 2.0 megapixels. O microscópio proporcionava ampliação de 20x. A análise das imagens foi feita por meio do aplicativo Motic Images Plus 2.0. A montagem utilizada pode ser observada na Figura 3.2.

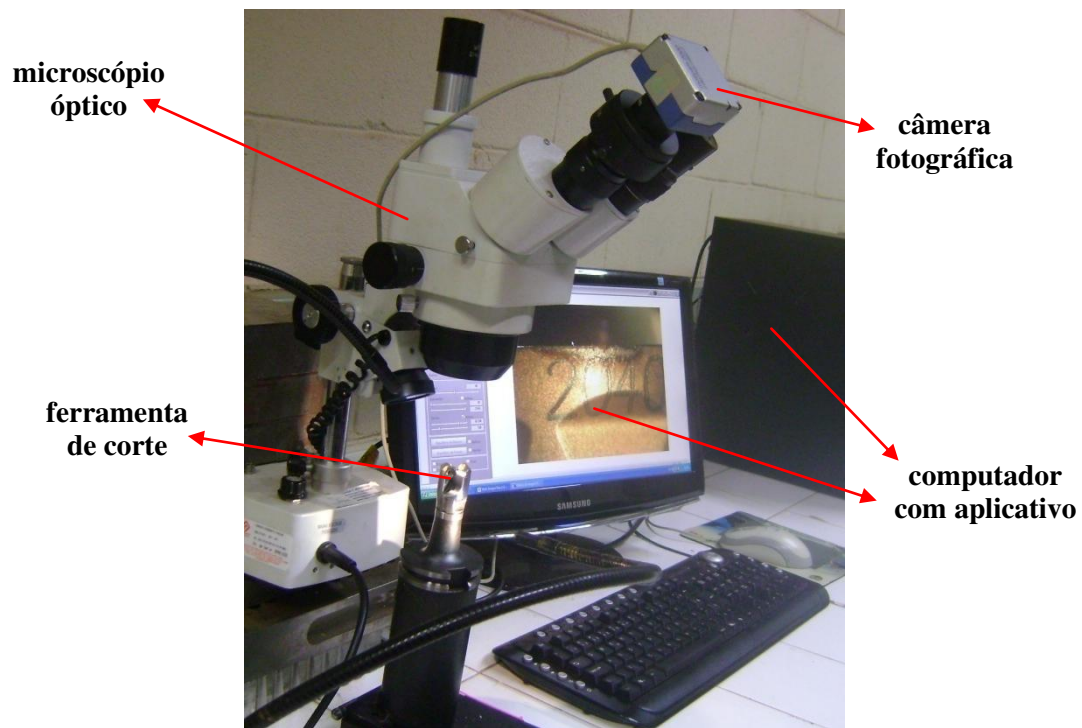


Figura 3.2 - Montagem utilizado microscópio óptico para medição do desgaste das ferramentas

3.1.3 - Microscópio eletrônico

Ao fim dos ensaios de fresamento as ferramentas desgastadas foram analisadas em um microscópio eletrônico de varredura ZEISS modelo EVO MA15 pertencente ao Departamento de

Engenharia de Materiais da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP. O microscópio possui o recurso de espectrometria de energia dispersiva (EDS), que permite a identificação semi-quantitativa dos elementos químicos presentes na superfície analisada. Esta análise foi feita a fim de se tentar compreender os mecanismos de desgastes das ferramentas. Uma imagem deste microscópio pode ser observada na Figura 3.3.



Figura 3.3 - Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)

3.1.4 - Dinamômetro

As forças nas direções X, Y e Z foram medidas utilizando-se um dinamômetro piezoelétrico estacionário marca Kistler modelo 9257B, fixado na mesa da máquina-ferramenta. O dinamômetro foi ligado a um condicionador de sinais Kistler modelo 5019B, conectado a um computador equipado com o programa National Instruments LabVIEW® 8.5 por meio de uma placa de aquisição A/D National Instruments PCI-6025E. Na aquisição das forças foi utilizada uma morsa fixada na base do dinamômetro piezoelétrico, ilustrado na Figura 3.4.

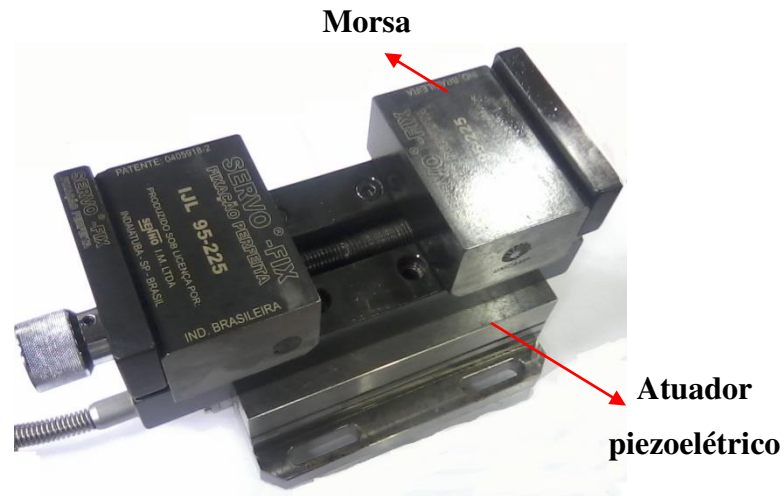


Figura 3.4 - Morsa para fixação da peça e medição dos esforços nas direções x,y e z

As sensibilidades do dinamômetro em cada eixo, correspondente às faixas de medição utilizadas estão listadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1- Constantes do dinamômetro para a faixa de medição utilizada

Direções	Faixa de medição (kN)	Sensibilidade (pC/N)
X	0 a 5	-7,919
Y	0 a 5	-7,916
Z	0 a 10	-3,722

De acordo com Ventura, 2010, para se evitar a faixa correspondente às frequências naturais do aparelho (Figura 3.5), que podem causar o aparecimento de oscilações e frequências não ligadas ao processo e a fim de se obter uma banda de frequência suficientemente larga, com uma quantidade de pontos não muito elevada, levando em conta uma faixa a partir da frequência de rotação da ferramenta, respeitando-se ainda o Teorema de Nyquist (Braun, 1986), utilizou-se uma taxa de aquisição de 2000 Hz.

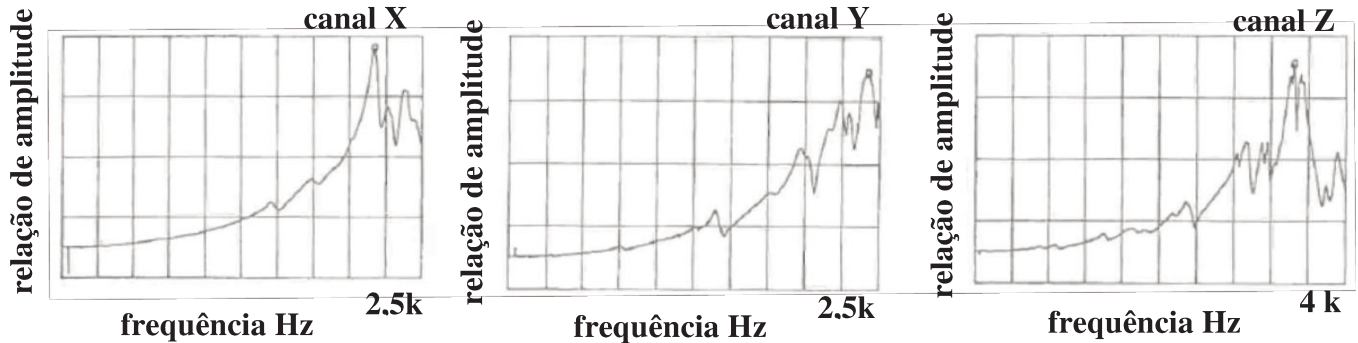


Figura 3.5 - Resposta em frequência do dinamômetro Kistler 9257B

O condicionador de sinais foi utilizado como um filtro passa-baixa com frequência de corte de 1 kHz, além de exercer a função de um amplificador, cuja taxa de conversão foi ajustada para 400 N/V.

3.1.5 - Análise modal

A análise modal realizada foi a análise das ferramentas acopladas à máquina para verificação das frequências naturais do sistema, nas condições em que os ensaios de vida foram realizados. A excitação foi executada com um martelo instrumentado tipo 8206-001 da Brüel & Kjaer, conectado a um analisador de sinais PHOTON+ da Brüel & Kjaer, que possui função de condicionador e placa de aquisição de sinais e é controlado pelo aplicativo RT Pro Sinal Analysis software BZ-8007 da LDS.

3.2 - Materiais

3.2.1 - Corpos de prova

O material utilizado neste estudo é o aço inoxidável martensítico endurecível por precipitação UNS – S15500 (15-5 PH), no estado solubilizado. Segundo o fabricante AK Steel

(2011), este material geralmente é fornecido na condição “A”, ou seja, tendo passado apenas pelo processo de solubilização, estando assim pronto para fabricação e posteriormente, sendo endurecido pelo usuário. Oito classes de tratamentos foram padronizadas pelo fabricante, com diferentes tempos e temperaturas, conforme podem ser verificados na tabela abaixo:

Tabela 3. 2 - Tabela da propriedades do tratamento de endurecimento do aço inoxidável 15-5 PH

Condição	Temperatura de aquecimento	Tempo na temperatura	Resfriamento
A	1038°C±14°C	Solubilização	Ar frio até menor de 32°C
H900	482°C±8°C	1 Hora	Ar frio
H925	496°C±8°C	4 horas	Ar frio
H1025	552°C±8°C	4 horas	Ar frio
H1075	579°C±8°C	4 horas	Ar frio
H1100	593°C±8°C	4 horas	Ar frio
H1150	621°C±8°C	4 horas	Ar frio
H1150M	760°C±8°C	2 horas	Ar frio
	+ 621°C±8°C	4 horas	Ar frio
H1150D	621°C±8°C	4 horas	Ar frio
	+ 621°C±8°C	4 horas	Ar frio

Para a caracterização do material realizou-se a metalografia. O material se encontra na forma solubilizado, Figura 3.6. O exame metalográfico revelou que o material possui microestrutura composta de pacotes de martensita em forma de ripas, características de ligas FeNi com teores de níquel de 5%. confirmando a afirmativa de Silva (2011). O ataque utilizado para revelar a microestrutura do aço inoxidável 15-5 PH, foi o reagente metalográfico Marble (10 ml H₂O + 10 ml HCL + 4 g CuSO₄)

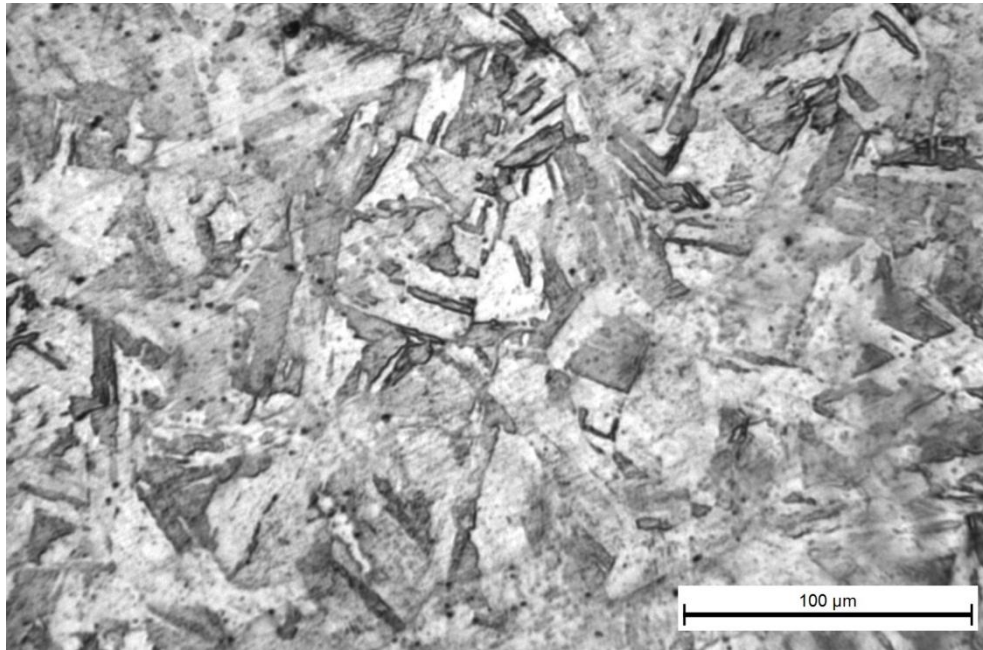


Figura 3.6 - Micrografia do aço inoxidável 15-5 PH na forma solubilizado: ampliação 250x

De acordo com AK Steel (2011), fabricante do aço inoxidável 15-5 PH, a dureza na condição "A", solubilizado, é de 35 Rockwell C. As dimensões do material para realização dos testes de vida da ferramenta podem ser observadas na Figura 3.7.

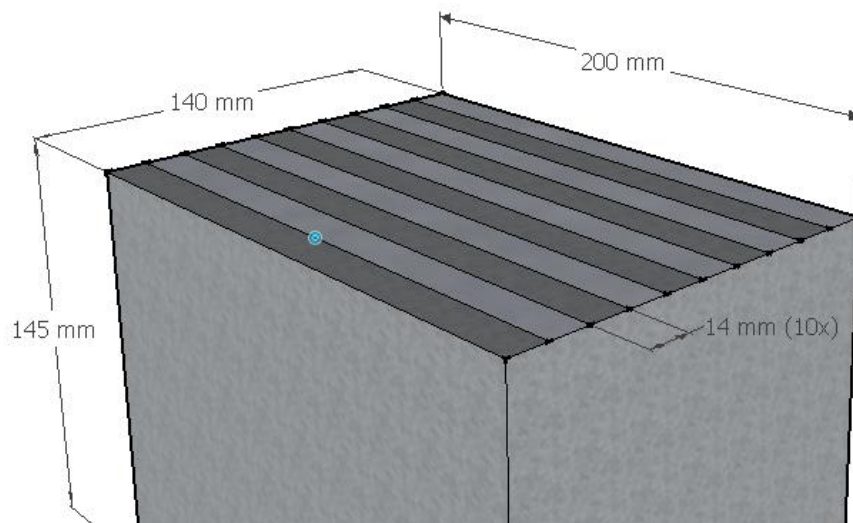


Figura 3.7 - Visualização do esquema dos ensaios realizados no corpo de prova

Este corpo de prova foi fixado pelas laterais por uma morsa presa sobre a mesa do centro de usinagem como pode ser observado na Figura 3.8. Neste corpo de prova foram feitos os ensaios de teste de vida da ferramenta de corte.

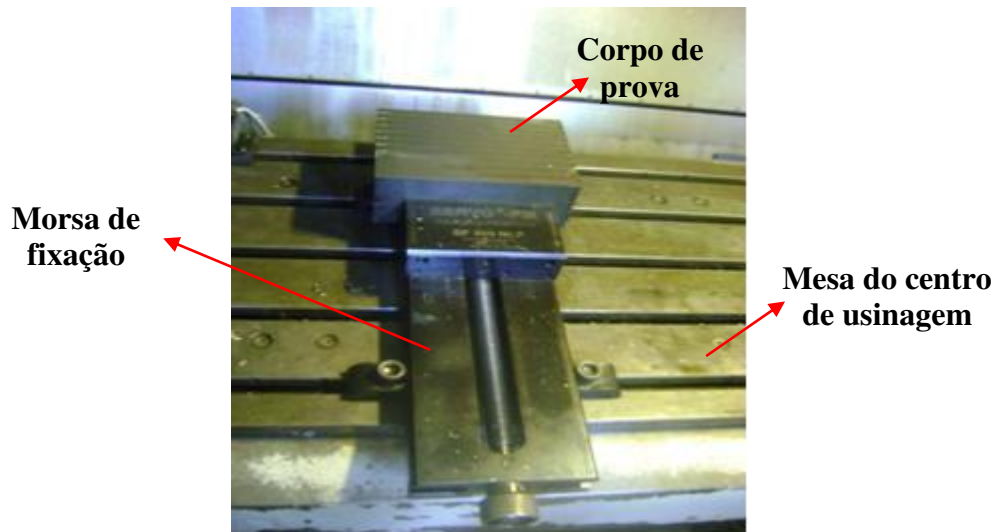


Figura 3.8 - Fixação do corpo de prova para teste de vida da ferramenta

O corpo de prova para os ensaios de força é do mesmo material, aço inoxidável 15-5 PH solubilizado, nas dimensões conforme Figura 3.9.

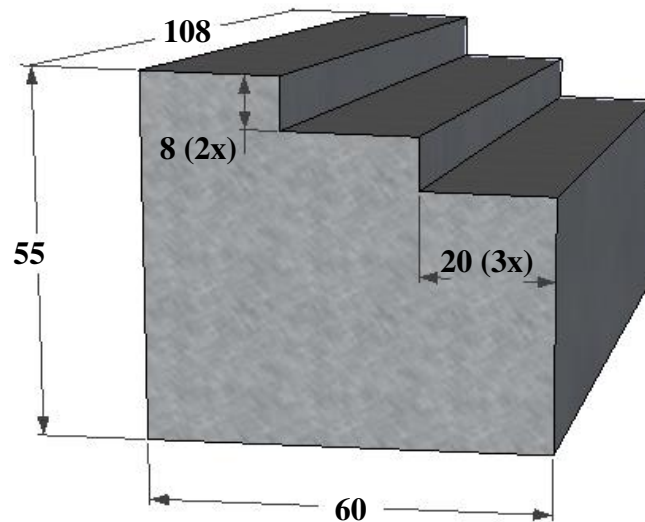


Figura 3.9 - Corpo de prova para aquisição dos esforços de corte (medidas em mm)

3.2.2 - Ferramentas

A fresa utilizada é uma fresa de topo da Sandvik código R300-25T12-10L, diâmetro de 25 mm, com 2 insertos intercambiáveis redondos, fixação tipo “Weldon” no cone 392.140T-40 12 058, conforme Figura 3.10, indicada para altos avanços e condição de semi-acabamento de acordo com seu fabricante.

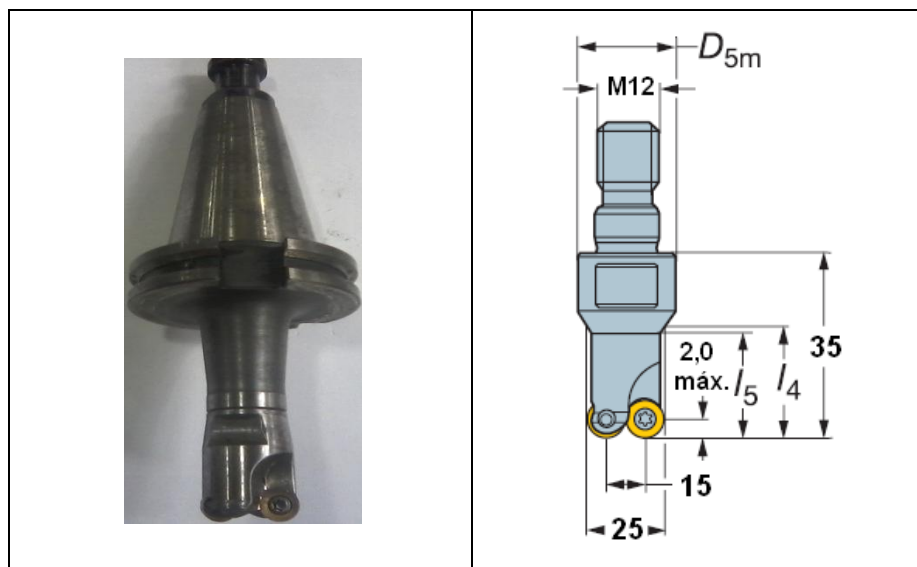
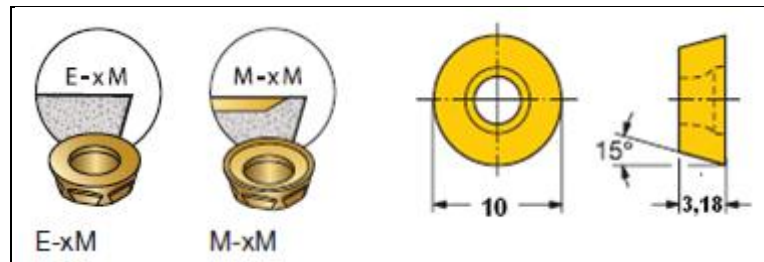


Figura 3.10 - Fresa de topo código Sandvik R300-25T12-10L

Os insertos utilizados foram de metal duro com geometria redonda e \varnothing 10 mm. Os códigos Sandvik dos insertos utilizados foram: R300-1032 M-MM e R300-1032 E-MM, a classe de ambas as geometrias foi a GC2040 (ISO M40), com cobertura MT CVD indicada para materiais com tendência abrasiva. As geometrias E são consideradas neutras e a M positiva, como pode ser observado pela Figura 3.11.



**Figura 3.11- Inserto redondo código Sandvik R300-1032
(SANDVIK, 2012)**

Nota-se que tanto o inserto de geometria E, considerada de geometria neutra, quanto o inserto M, considerada de geometria positiva possuem ângulo de folga de 15° . Ambos com raios de 10 mm e espessura de 3,18 mm.

3.2.3 - Fluido de corte

Em todos os experimentos de usinagem utilizou-se como fluido de corte óleo miscível de base vegetal da marca Vasco 1000®, fornecido pela Blaser Swissslube, em uma concentração de 10% brix e vazão de aproximadamente 45 l/min.

3.3 - Planejamento e procedimentos experimentais

3.3.1 - Análise modal experimental

Como primeira etapa deste trabalho, a análise modal foi feita no porta-ferramenta fixado na máquina-ferramenta, para identificar a frequência natural e os principais harmônicos desse sistema. Esta análise foi feita nas duas direções x e y. A posição em que o acelerômetro foi fixado e a posição em que a excitação foi feita foram iguais em todos os ensaios. A taxa de aquisição de

sinais utilizada foi de 20 kHz. A representação esquemática da análise modal com martelo instrumentado está mostrada na Figura 3.12.

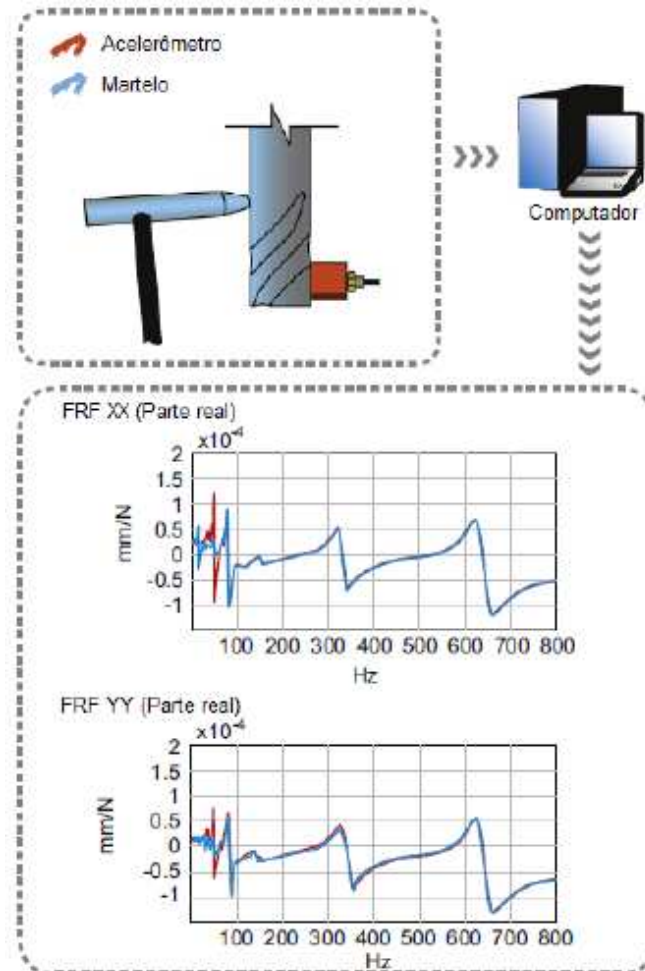


Figura 3.12 - Representação esquemática do ensaio com martelo instrumentado (QUINTANA E CIURANA, 2011)

3.3.2 - Ensaios preliminares para determinação dos parâmetros de corte

A segunda etapa do trabalho experimental constituiu da execução dos ensaios preliminares a fim de determinar os parâmetros de corte como v_c e avanço por dente f_z que seriam utilizados nos ensaios para análises propriamente ditos.

A velocidade de corte indicada pelo fabricante da ferramenta para usinagem de aços inoxidáveis é de 140 m/min e o avanço por dente para a_p de 1 mm é de 0,25 mm/dente. Além disso, tinha-se como referência, Krabbe (2006) e Teixeira (2006) que utilizaram v_c de 80 a 100 m/min e f_z de 0,1 a 0,133 mm/dente.

Nos ensaios preliminares, optou-se pela segurança e iniciou-se os testes com o valor mínimo de avanço recomendado pelo fabricante de 0,15 mm/dente e velocidade de corte recomendada de 140 m/min. Por se tratar de uma ferramenta com insertos redondos, o diâmetro efetivo que esteve em corte não foi o mesmo que o diâmetro externo da fresa. Devido a forma arredondada do inserto a profundidade de corte é que determina este diâmetro efetivo.

Com base neste conhecimento, para se determinar a rotação da ferramenta foi necessário fazer o cálculo do diâmetro efetivo para o a_p de 1 mm, obtendo-se o valor de 21 mm, para isso, utilizou-se a equação da Figura 2.26 citada anteriormente.

Para estes ensaios foi utilizada a estratégia de entrada de avanço reduzido, na qual nos primeiros 10 mm de corte, aproximadamente metade do diâmetro efetivo da fresa, o avanço frontal (v_f) era reduzido em 50% do seu valor conforme a Figura 3.13. Este recurso foi utilizado inicialmente por ser a estratégia mais difundida quando se deseja reduzir trepidações na entrada de corte da peça, evitando-se lascamentos ou quebras de insertos.

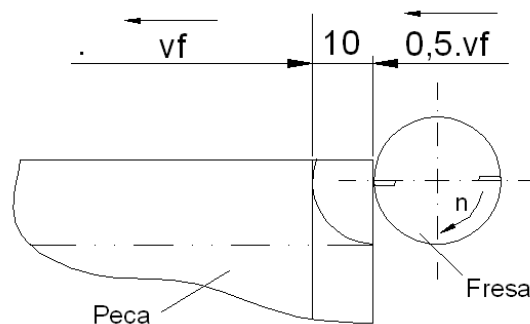


Figura 3.13- Estratégia de entrada com avanço reduzido (ZANUTO, 2012)

Apesar dos receios iniciais em termos da usinabilidade deste material, os resultados obtidos quanto a vida da ferramenta foram altos como pode ser observados no primeiro e segundo ensaio, o que possibilitou que se aumentasse o parâmetro de usinagem v_c . Na Tabela 3.3 podem-se observar os tempos de vida obtidos para os ensaios preliminares.

Tabela 3.3 - Condições utilizadas nos testes preliminares

Ensaio	v_c (mm/min)	f_z (mm/dente)	Número de passes	Comprimento usinado (mm)	Tempo de usinagem (min)
1	140	0,15	70	14,2	29,2
2	140	0,25	110	22,3	27,7
3	170	0,15	90	18,3	30
4	170	0,25	110	22,3	22,5
5	195	0,15	30	6,1	9
6	195	0,25	70	14,2	12,5

Para estes primeiros ensaios realizados, pode-se observar que o tempo de usinagem, de um modo geral, diminui conforme os parâmetros de usinagem aumentam. No entanto, como os parâmetros de usinagem utilizados variam para cada ensaio, um mesmo tempo de usinagem para um ensaio pode representar diferentes comprimentos usinados, desse modo, um volume de cavaco removido diferente. Desta forma, optou-se na análise dos resultados em medir este volume de cavaco removido por aresta como parâmetro de vida da ferramenta, ao invés do tempo de usinagem propriamente dito.

Através dos resultados de tempo obtidos pelos primeiros testes (ensaio 1 e ensaio 2) decidiu-se trabalhar em velocidades maiores a das recomendadas pelo fabricante, devido ao tempo de vida elevado da ferramenta na condição de velocidade de corte de 140 m/min. Deste modo, as velocidades adotadas foram de 170 m/min e 195 m/min, esta última pode ser uma opção possível quando se deseja aumentar a produtividade de um processo. Como se trabalhou com apenas duas velocidades de corte, não foi respeitada a norma ISO, em que diz que a variação de v_c deve ser de 1,12 para determinação da vida da ferramenta. Caso contrário, a velocidade superior a 170 m/min deveria ser de 190,5 m/min.

Desse modo, para todos os ensaios realizados neste trabalho, os parâmetros de corte mantidos constantes foram a profundidade de corte (a_p de 1 mm), a largura fresada (a_e de 14 mm), a utilização de fluido de corte em abundância da marca Blaser B-Cool 655, o sentido de corte da ferramenta que é predominantemente discordante, ilustrado na Figura 3.14 e o tipo de entrada e saída da ferramenta a qual foi entrada reduzida, como mencionada anteriormente.

A escolha pelo corte discordante para execução dos ensaios se deu para evitar os choques provocados na entrada do dente, caso o corte fosse concordante. Esses impactos na entrada,

corroborar para a quebra do inserto, uma vez que o material usinado possui altas resistências mecânicas.

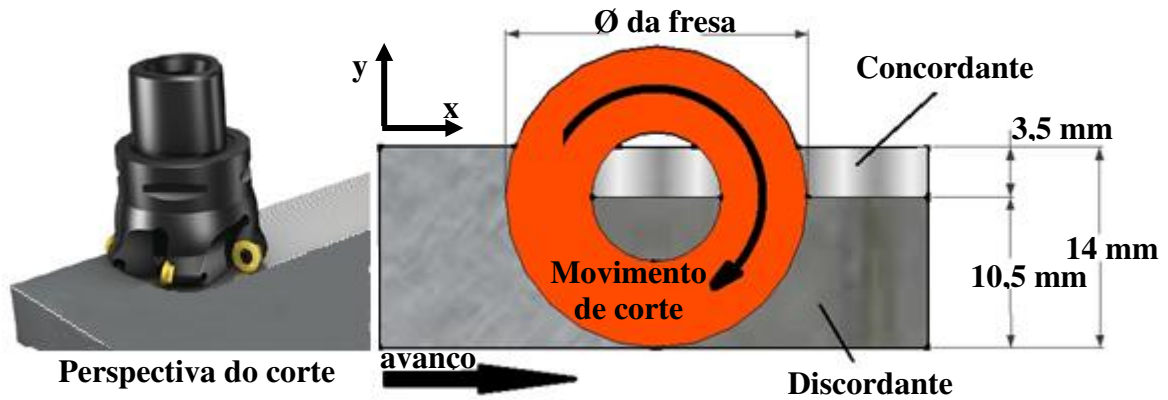


Figura 3.14 - Esquema cinemático do corte frontal, faceamento de topo e posicionamento da fresa, em que predomina o corte discordante

Os parâmetros variados foram a velocidade de corte (v_c de 170 e 195 m/min), o avanço por dente (f_z de 0,15 e 0,25 mm/dente) e geometria da ferramenta, sendo uma geometria neutra e outra de geometria positiva. Estes parâmetros estão ilustrados pela Tabela 3.4. Para cada ensaio realizado, conforme a Tabela 3.4, fez-se uma réplica.

Tabela 3.4 - Parâmetros de corte e geometria de ferramentas utilizados nos ensaios

	v_c (m/min)	f_z (mm/dente)	Vida da ferramenta	Geometria da ferramenta	a_p (mm)	a_e (mm)	$\phi 0$ (°)	$\chi r, máx$ (°)
Ensaio 01	195	0,25	FIM	POSITIVA	1,0	14,0	109,5	36,9
Ensaio 02	170	0,15						
Ensaio 03	170	0,25						
Ensaio 04	195	0,15						
Ensaio 05	170	0,15	NOVA	NEUTRA				
Ensaio 06	170	0,25						
Ensaio 07	195	0,15						
Ensaio 08	195	0,25						
Ensaio 09	170	0,15	FIM	NEUTRA				
Ensaio 10	170	0,25						
Ensaio 11	195	0,15						
Ensaio 12	195	0,25						
Ensaio 13	170	0,15	NOVA	POSITIVA				
Ensaio 14	170	0,25						
Ensaio 15	195	0,15						
Ensaio 16	195	0,25						

3.3.3 - Ensaio de vida das ferramentas

A terceira etapa do trabalho experimental foi analisar o desgaste de flanco V_B , parâmetro utilizado para determinar o fim de vida da ferramenta. Esse desgaste foi medido no microscópio óptico a cada 10 passes de usinagem quando o processo era interrompido. O ensaio era considerado terminado quando o valor medido era igual ou superior a 0,3 mm em pelo menos uma das arestas de corte da ferramenta, uma vez que tinha-se dois insertos, como ilustrado na Figura 3.15.



**Figura 3.15 - Ferramenta de corte com dois insertos:
imagem da ferramenta**

Da mesma forma que na entrada da ferramenta se reduziu o avanço, na saída do passe de cada usinagem a velocidade de avanço também era reduzida em 50% nos últimos 10 mm, até que a ferramenta se encontrasse completamente fora da peça. Este recurso foi utilizado para se diminuir as grandes variações dos esforços de corte na região de entrada e saída da ferramenta.

Estas variações dos esforços de corte são ocasionadas, sobretudo, pela variação da espessura inicial (h) do cavaco, na entrada e saída da ferramenta, quando o a_e não assumiu seu valor máximo. Esta variação da espessura pode ser observada na Figura 3.16. Com entrada e saída reduzidas a probabilidade de lascamentos ou micro-lascamentos são menores. Desta forma as avarias das ferramentas passa a ser menores que a ocasionadas pela entrada direta da ferramenta (sem diminuição da velocidade de avanço).

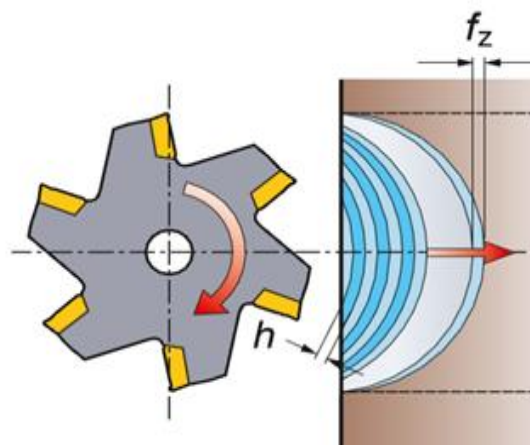


Figura 3.16 - Entrada direta com grande espessura de cavaco na saída (SANDVIK, 2012)

3.3.4 - Verificação dos mecanismos de desgastes

A quarta etapa do trabalho experimental foi executada após a realização dos ensaios de vida das ferramentas. As ferramentas desgastadas foram observadas em um microscópio eletrônico de varredura (MEV). As regiões desgastadas foram fotografadas e realizou-se a análise de espectrometria de energia dispersiva (EDS).

A análise de EDS permite a identificação semi-quantitativa dos elementos químicos na superfície de interesse, possibilitando verificar, por exemplo, a ocorrência de aderência de material da peça na ferramenta ou o nível de exposição do substrato da ferramenta.

Portanto, esse recurso possibilita a formulação de hipóteses para a determinação dos mecanismos de desgaste da ferramenta. As ferramentas desgastadas que passaram por esta análise foram as que tiveram as condição de v_c de 195 m/min e f_z de 0,25 mm/dente e 0,15 mm/dente, para as duas geometrias de insertos testados.

3.3.5 - Medição dos esforços de corte

A quinta e última etapa do trabalho experimental foi a medição dos esforços de corte nas mesmas condições descritas anteriormente na Tabela 3.4. A taxa de aquisição utilizada foi de 2

kHz, com filtro passa baixa analógico com frequência de corte de 1 kHz. Durante o corte, a ferramenta avançava na direção paralela ao eixo x da máquina-ferramenta, sendo que entre um teste e outro a ferramenta era deslocada na direção Y no valor do a_e de 14 mm.

Para a velocidade de corte de 195 m/mim, tem-se uma frequência de 49,25 Hz de revolução da fresa (sabendo que o diâmetro efetivo de corte é de 21 mm, e não 25 mm que é o diâmetro da fresa), deste modo a frequência de entrada de dente é 98,5 Hz, uma vez que a fresa possui 2 dentes. Para a velocidade de 170 m/min a frequência de revolução é de 42,93 Hz, com frequência de entrada de dentes de 85,9 Hz.

Como a taxa de aquisição é de 2 kHz, tem-se $2000/49,25 \sim 40,6$, sendo a quantidade de pontos em uma volta (360°) da fresa. Desta forma, a cada $360/40,6 = 8,9^\circ$ foi a aquisição de um ponto. Calculando o ângulo de contato para esta fresa, obteve-se um ângulo de $109,5^\circ$. As orientações dos eixos X,Y e Z, sentido de corte, avanço e pontos de aquisição são ilustrados na Figura 3.17.

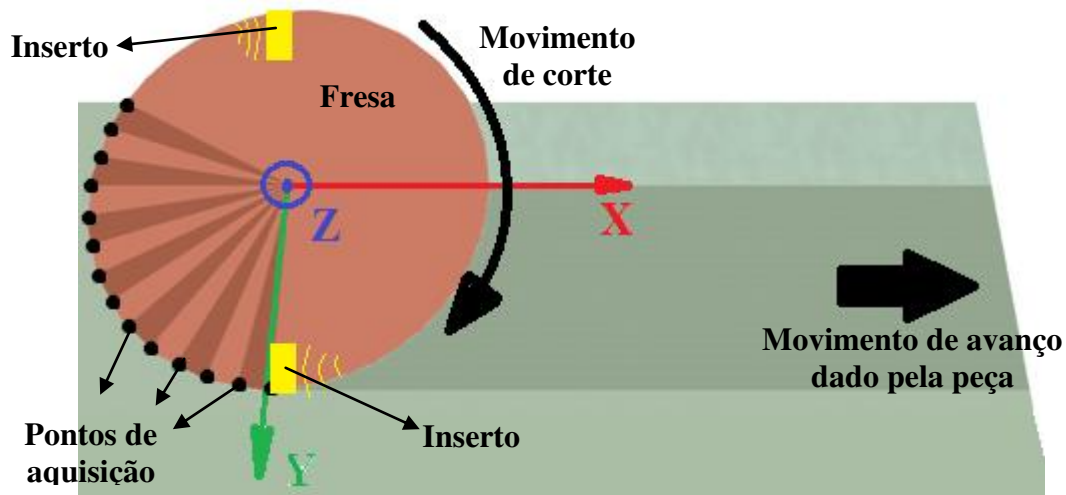


Figura 3.17 - Esquema das orientações dos eixos X, Y e Z e os pontos de aquisições dos esforços de corte

Analogamente o mesmo pode ser feito para a velocidade de corte de 170 m/min. Desta forma chega-se em $2000/42,93 = 46,6$ pontos. Portanto tem-se a aquisição de 1 ponto a cada $7,7^\circ$. A Tabela 3.5 resume as frequências das duas velocidades de corte (170 m/min e 195 m/min) com as quais se trabalhou.

Tabela 3.5 - Parâmetros de frequências e pontos de aquisição para as velocidades de corte utilizadas: 195 m/min e 170 m/min

Velocidade de corte	Frequência de rotação	Frequência de entrada de dente	Número de pontos (360°)	Ângulo a cada ponto
195 m/min	49,25 Hz	98,5 Hz	40,6 pontos	8,9°
170 m/min	42,93 Hz	85,9 Hz	46,6 pontos	7,7°

Os valores de TS e SC (parâmetros do condicionador de sinais) são determinados através de tabela do fabricante (Kistler) em função da grandeza da força de corte, sendo que o valor de SC foi ajustado posteriormente, experimentalmente.

Neste ensaio utilizou-se um par de inserto novo e outro par de inserto em que um deles teve seu desgaste V_B igual ou maior que a 0,300 mm. Este ensaio ocorreu em cada degrau do corpo de prova. Neste teste, as entradas da ferramenta na peça foram as entradas diretas, pois aqui o foco é qualificar e quantificar os esforços depois e antes da entrada e saída da ferramenta. Tais medições podem ser ilustrada pela Figura 3.18, as condições usada neste caso são para v_c de 195 m/min e f_z de 0,25 mm/dente.

Observa-se que tanto nos insertos novos, quanto nos insertos com V_B de 0,3 mm, aqui denominadas insertos Fim, os esforços na entrada e saída das ferramentas são acompanhados de picos, mais evidenciados na direção do eixo x. No Anexo A deste trabalho, estão todas as outras condições de corte realizadas para consulta.

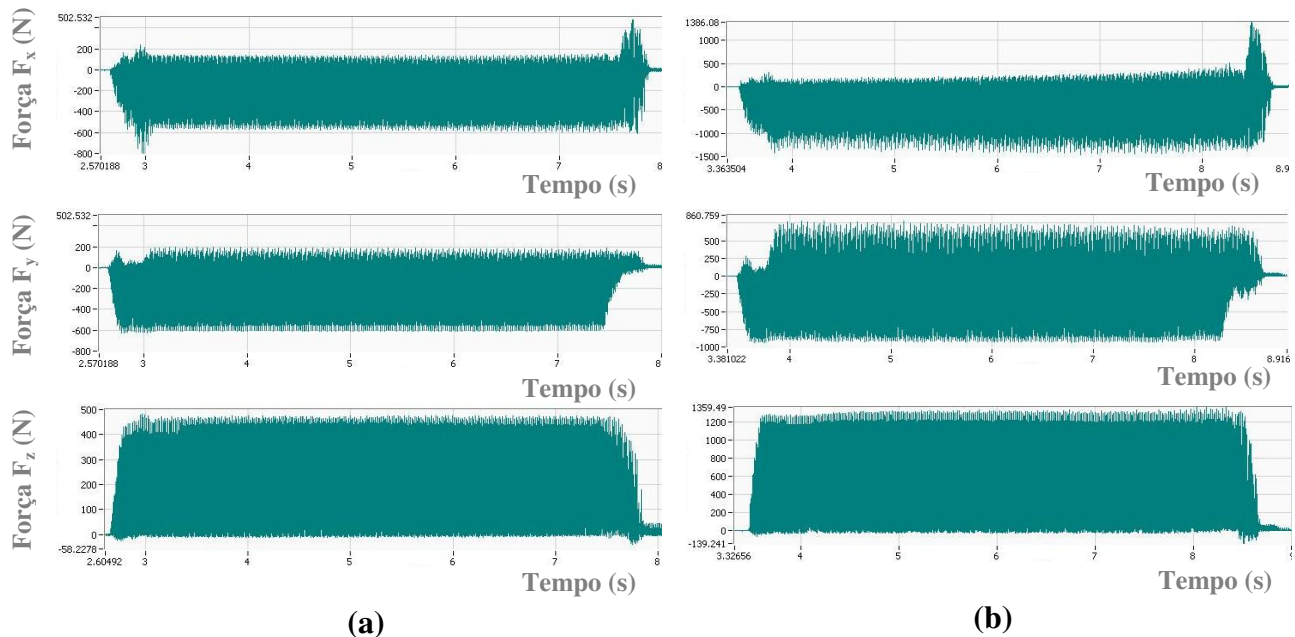


Figura 3.18 - Espectro da força (Newton): (a) Neutra/Novo e (b) Neutra/Fim ambas com v_c 195mm/min e f_z de 0,25mm/dente

Os picos das forças evidenciados na entrada e saída da ferramenta, sobretudo na direção x, são devido à entrada direta da fresa na peça. Quando se utiliza alguma estratégia de diferente entrada da ferramenta, como entrada reduzida, os gráficos não apresentam tais picos na entrada nem na saída. Na Figura 3.19 tem-se um exemplo de entrada reduzida. Observa-se como são reduzidos os esforços nas entradas.

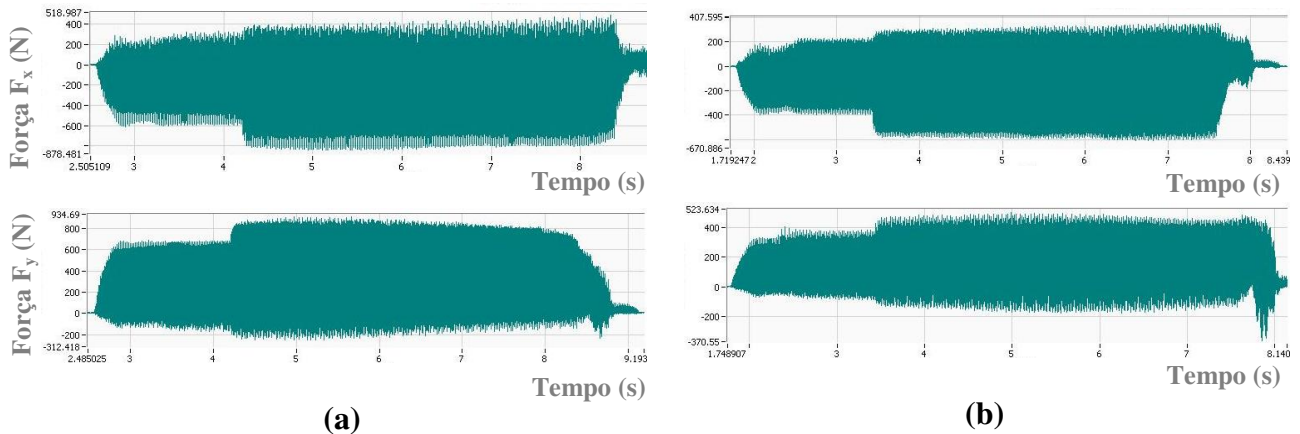


Figura 3.19 - Espectro da forças com entrada reduzida: (a) Neutra/Novo e (b) Neutra/Fim ambas com v_c 195mm/min e f_z de 0,25mm/dente

Outra forma de se reduzir estes picos nas entradas e saídas é a estratégia do tipo rolagem. Este tipo de estratégia consiste em entrar na peça seguindo uma trajetória circular, no sentido anti-horário, mas isso não resolve o problema da espessura de cavaco na saída do corte.

Quando a espessura do cavaco na saída do inserto da peça é bem pequeno, reduz-se vibrações causadas pela redução brusca de esforços de corte, uma vez que a ferramenta ainda não está apoiada na peça. Na Figura 3.20 são ilustradas as forças ocasionadas por este tipo de estratégia de entrada

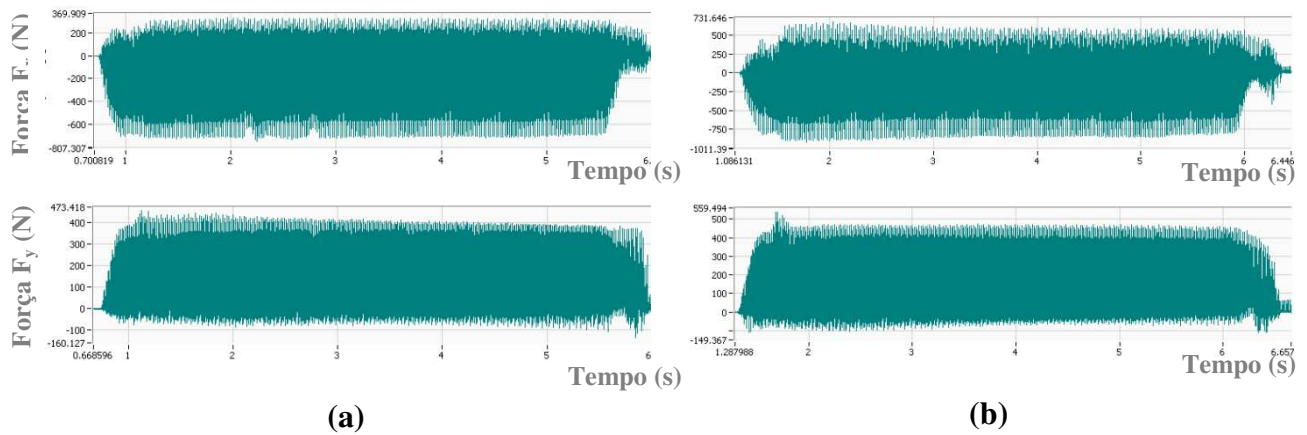
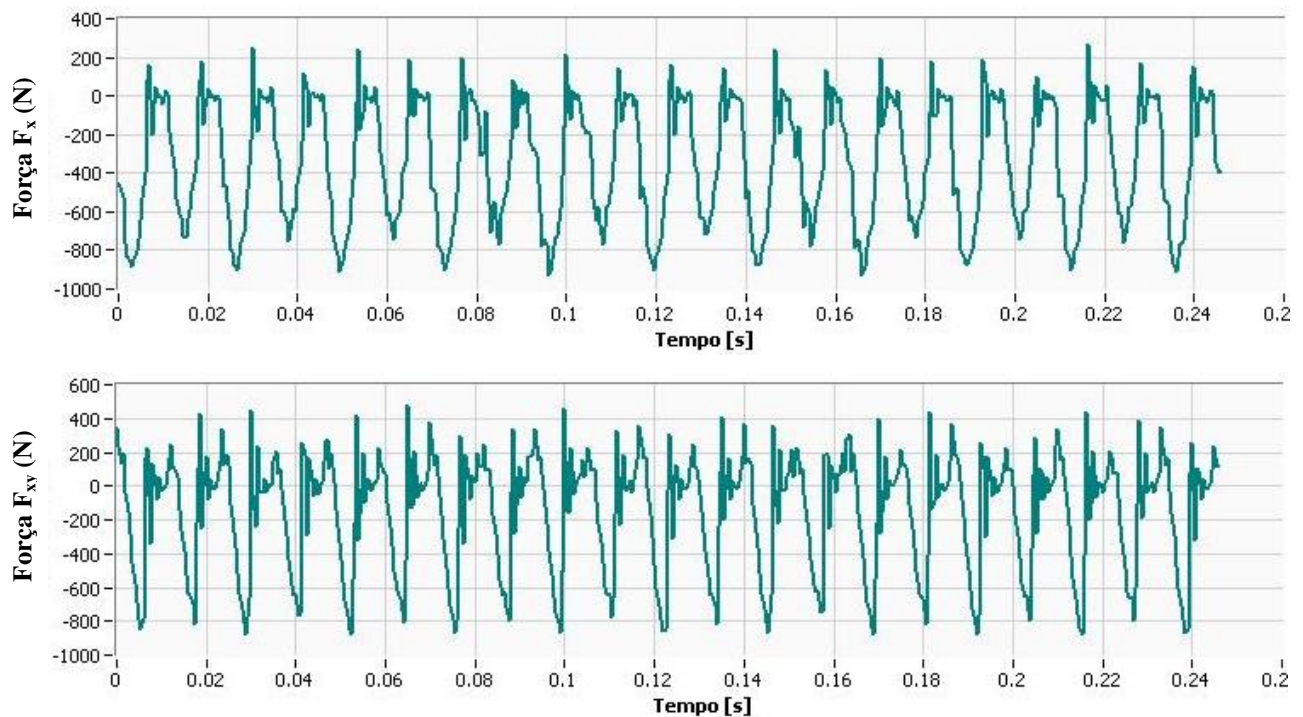


Figura 3.20 - Espectro da forças com entrada rolagem: (a) Neutra/Novo e (b) Neutra/Fim ambas com v_c 195mm/min e f_z de 0,25mm/dente

Para as análises das medições dos esforços de corte, pegou-se apenas 10 ciclos, dentro do corte, tendo o cuidado de certificar-se que não se estava na entrada nem na saída da ferramenta. Um exemplo destes ciclos está ilustrado na Figura 3.21. O referido exemplo é do ensaio 03. Para análise mais abrangente destas forças, os valores utilizados foram a RMS destes 10 ciclos.



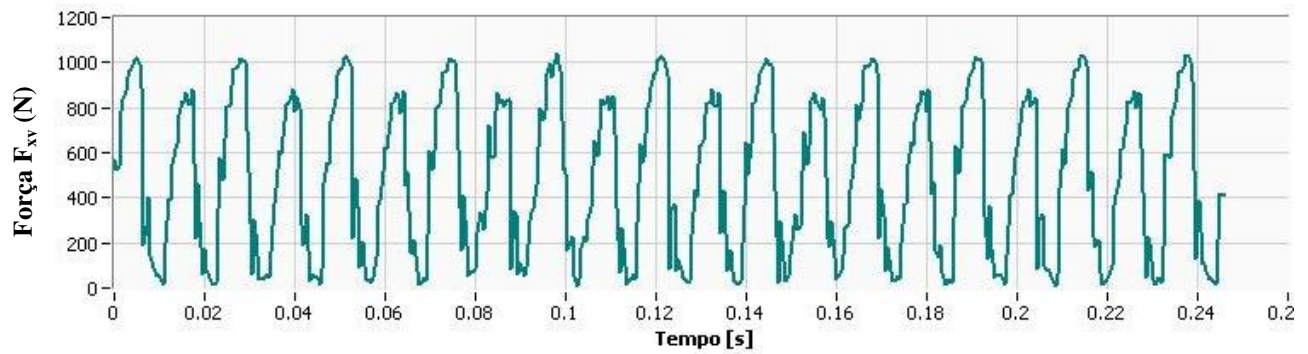


Figura 3.21 - Comportamento das forças, respectivamente, F_x , F_y e F_{xy} para 10 ciclos no ensaio 03 (Positiva/Fim - 170 m/min / 0,15 mm/dente)

Foram analisadas ainda as forças tangenciais (F_t) e as forças radiais (F_r), representadas na Figura 3.22, ambas obtidas pela Equação 2.7, citada anteriormente.

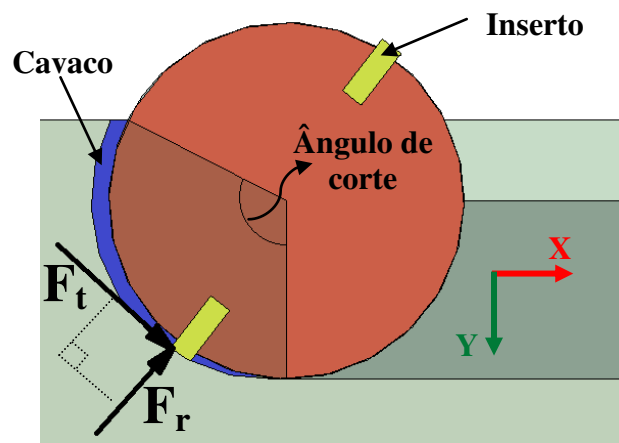


Figura 3.22 - Geometria do corte e componentes das forças de corte no fresamento de faceamento

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 - Análise modal experimental

Antes de iniciar os ensaios de fresamento foi realizado a análise modal experimental do porta-ferramenta a fim de se identificar as frequências naturais de vibração do sistema. Na Figura 4.1 tem-se a função resposta em frequência do porta-ferramenta. A faixa de frequências de 0 a 10 kHz apresenta a função resposta em frequência do porta-ferramenta correspondentes às direções y.

Na Figura 4.2 é apresentada a função resposta em frequência do porta-ferramenta correspondente na direção x. De acordo com a resposta em frequência tem-se uma frequência natural em torno de 2480 Hz para ambas as direções (x e y).

A análise da resposta em frequência dos corpos de provas não foi feita uma vez que este sistema é considerado de alta rigidez. Kull (2013) realizou ensaios em condições bem semelhantes a do presente trabalho e obteve frequências naturais dos corpos de prova acima de 10 kHz.

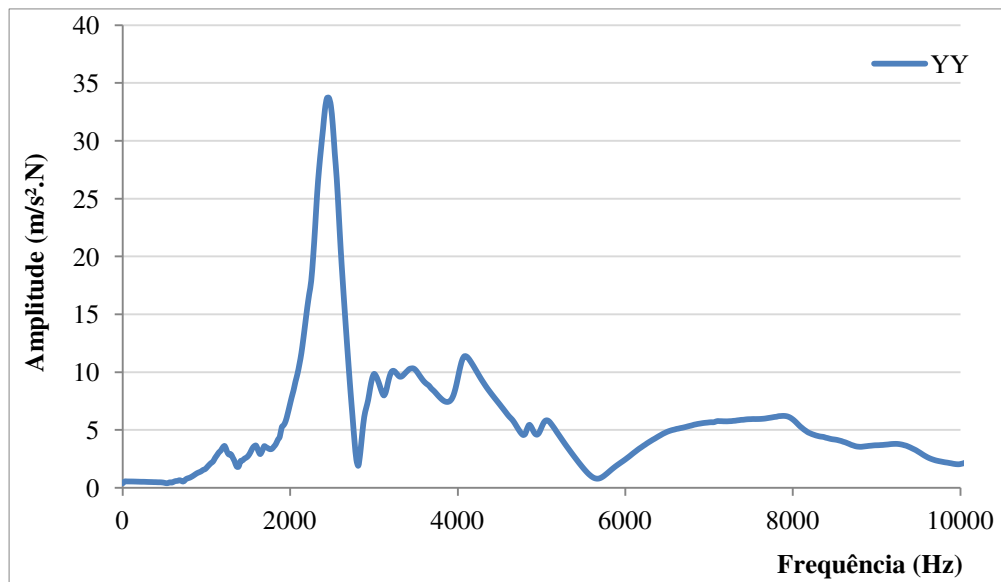


Figura 4.1 - Função resposta em frequência do porta ferramenta na direção y (0 a 10 kHz)

Ainda de acordo com Kull (2013), as fresas apresentaram frequências naturais na faixa de 3000 a 4500 Hz. Deste modo, a frequência natural da barra utilizada neste trabalho não deve ser menor que estes valores.

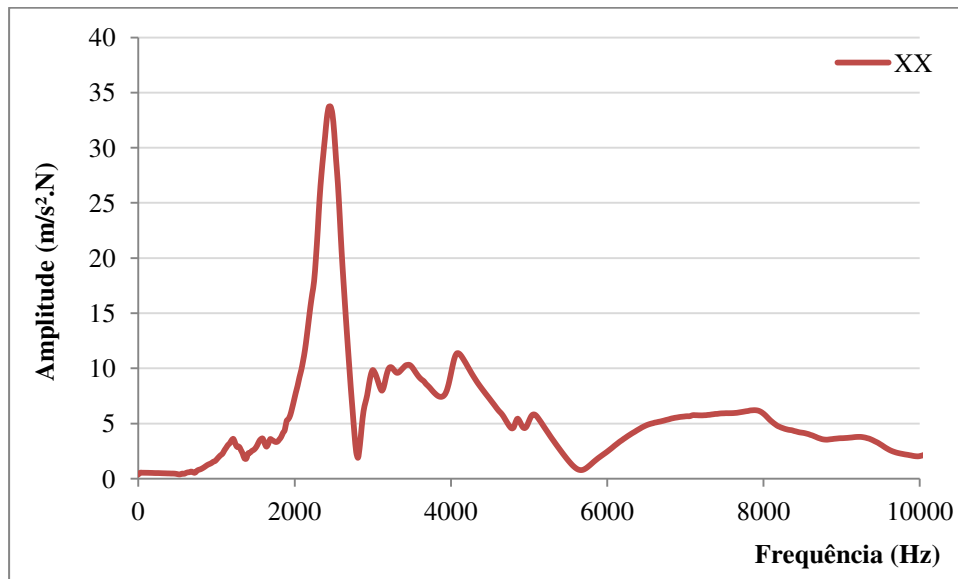


Figura 4.2 - Função resposta em frequência do porta ferramenta na direção x (0 a 10 kHz)

Para melhor análise, verificou-se a faixa de frequência de 0 a 1500 Hz para evidenciar o primeiro pico mostrado pelos gráficos da Figura 4.1 e Figura 4.2 no intuito de se identificar as primeiras excitações que poderiam contribuir para vibração no sistema.

De acordo com estes gráficos nota-se que a frequência está em torno de 1200 Hz. No entanto, nesta frequência as excitações estão em pequenas amplitudes como observado na Figura 4.3 e na Figura 4.4.

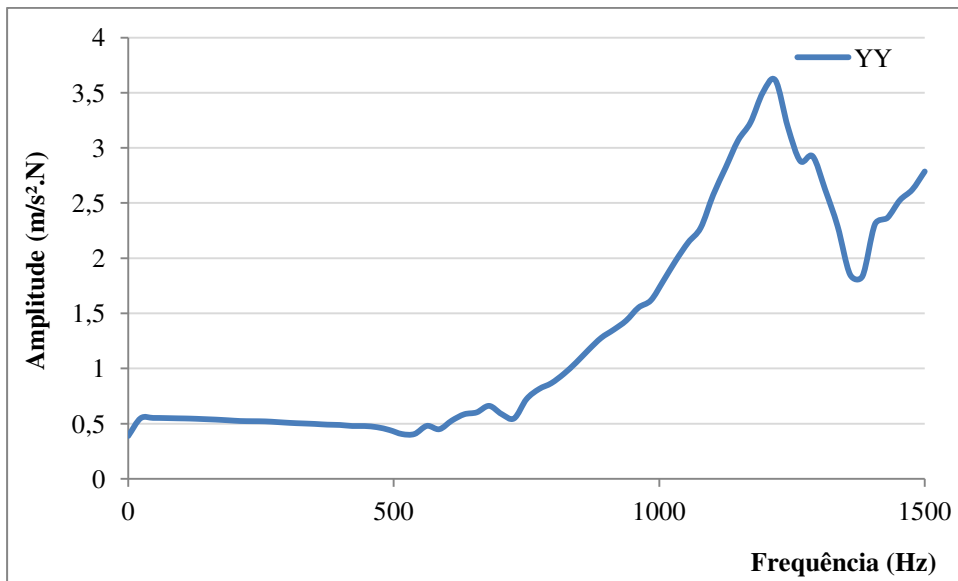


Figura 4.3 - Função resposta em frequência do porta ferramenta na direção y (0 a 1,5 kHz)

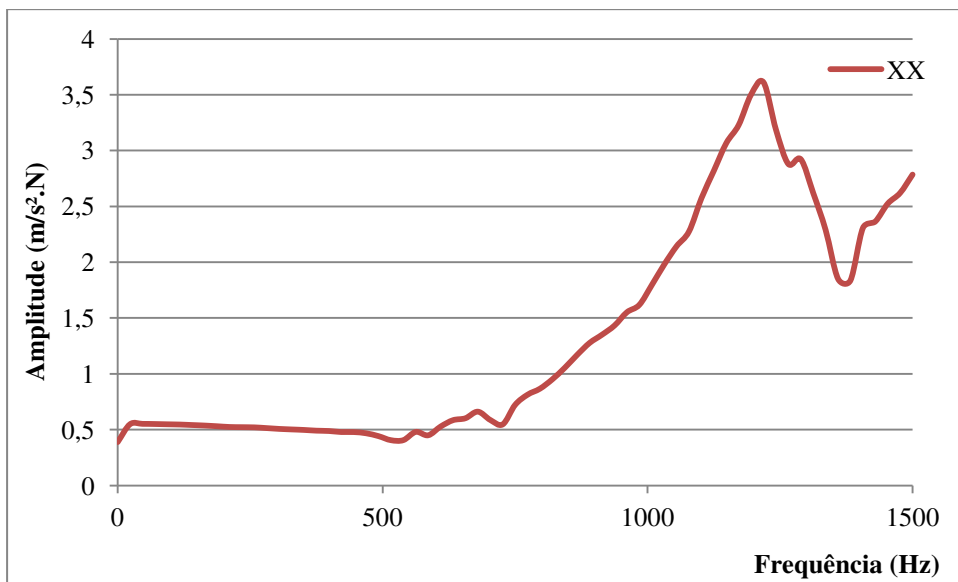


Figura 4.4 - Função resposta em frequência do porta ferramenta na direção x (0 a 1,5 kHz)

As frequências tanto de rotação da fresa quanto de entrada do dente estão em torno de 100 Hz. Deste modo, dificilmente haverá excitações nas frequências acima de 1500 Hz que viria propiciar vibração no sistema porta-ferramenta.

4.2 - Medição dos esforços de corte

Tomando como base as orientações ilustradas pela Figura 3.17 e Figura 3.22 no gráfico da Figura 4.5 é ilustrado mais detalhadamente os esforços atuantes no inserto. Neste gráfico observa-se o comportamento das forças atuantes no eixo X (F_x), força atuante em Y (F_y), força resultante no plano XY (F_{xy}), força tangencial (F_t), força radial (F_r) e o ângulo que varia de 0 a 180°, uma vez que a fresa possui dois dentes. Na análise do gráfico, pode-se obter as seguintes observações:

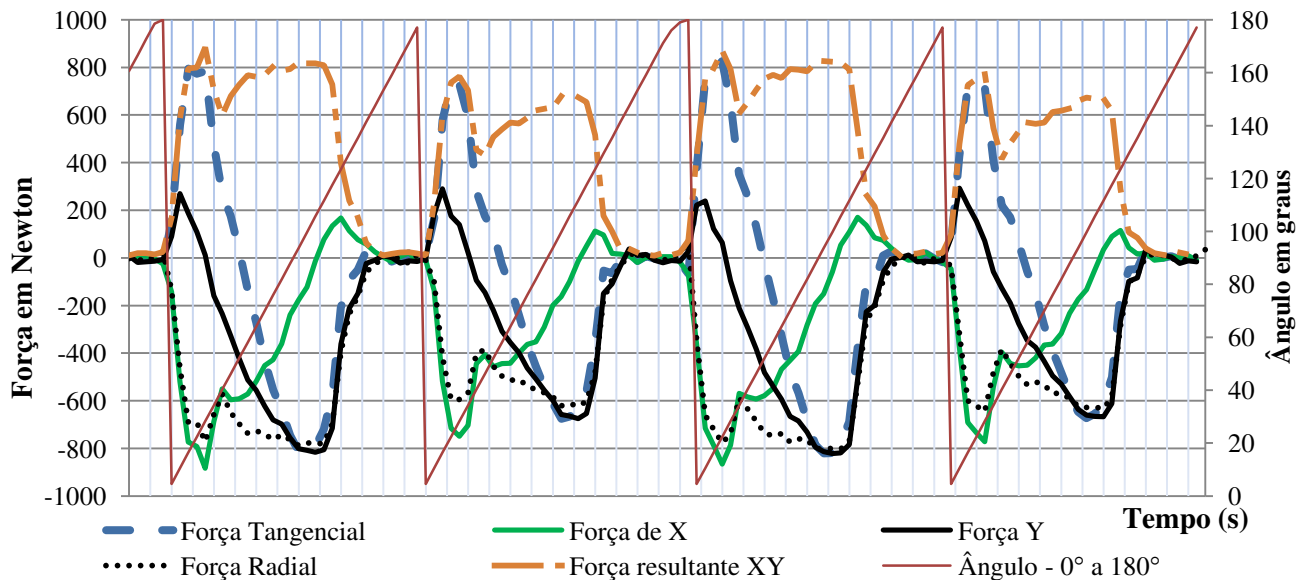


Figura 4.5 - Comportamento da forças atuantes nos ensaios, fresamento por faceamento com fresa de dois inserts

- No início do corte, a primeira força a aparecer é a componente na direção X. Sendo que as forças em X e Y foram as forças medidas pelo dinamômetro. As outras forças foram geradas por cálculo tomando estas como base;
- Quando o ângulo atinge em torno de 90°, tem-se os picos das forças, tangencial, resultante em XY, radial e força na direção Y;
- Existe um desbalanceamento de um inserto para outro, uma vez que as intensidades das forças variam a cada 180°, mas se repetem a cada dois ciclos. Esta variação da intensidade das forças é intensificada devido ao sacrifício de um inserto, em que um deles,

normalmente, apresenta desgaste maior que o outro. A tendência, com o tempo, é que esses desgastes sejam equalizados;

- É nítido o período de tempo em que não há arestas em contato, uma vez que o ângulo de contato é em torno de 110° enquanto o ângulo entre as arestas é de 180° ;
- Existe uma variação progressiva (aumento) dos esforços de corte em função da espessura do cavaco removido.

Na Figura 4.6, Figura 4.7 e Figura 4.8, pode-se observar a RMS das forças F_x , F_y e F_{xy} (força resultante no plano XY) para as diferentes condições mencionadas anteriormente e ilustradas na Tabela 3.1.

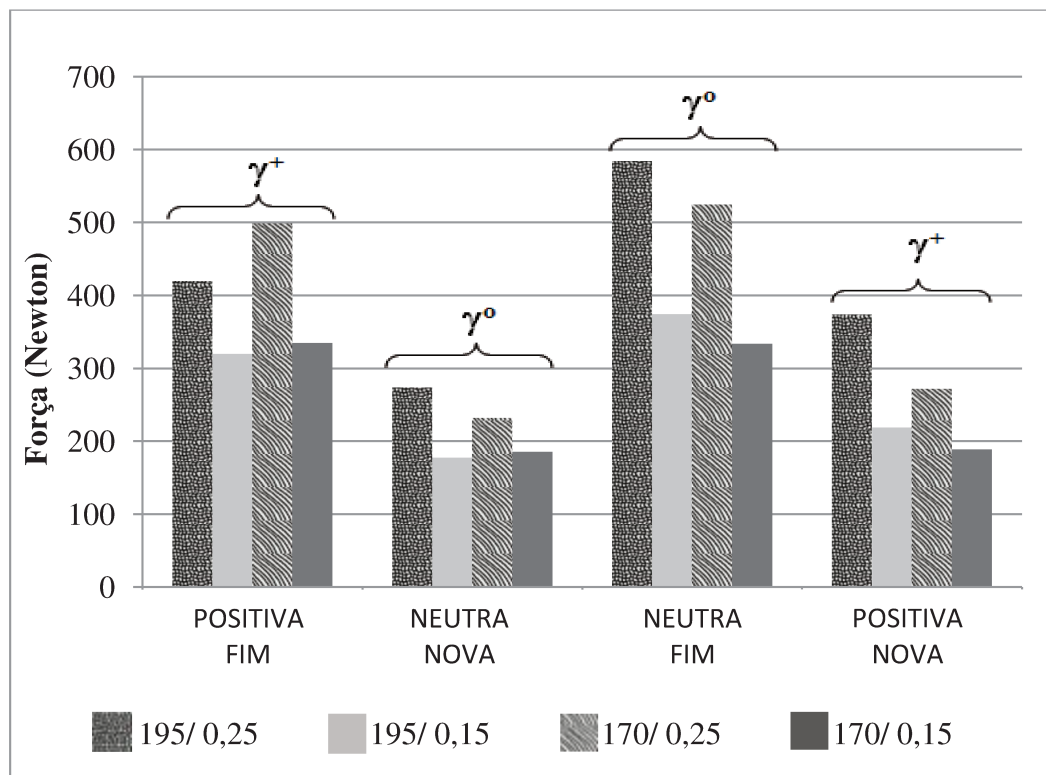


Figura 4.6 - RMS da força na direção X para a 4 condições testadas e 2 geometrias (Neutra e Positiva)

Observa-se pela análise dos gráficos que com o aumento de f_z houve, em todos os casos, o aumento dos esforços de corte, nas três forças analisadas, tanto na condição de inserto novo, quanto para os insertos em fim de vida. Este aumento dos esforços também foi observado,

quando se aumentou o f_z , para as duas geometrias de insertos testados. Isso está de acordo com a teoria que diz que a força de corte está diretamente relacionada com a espessura do cavaco.

Outra observação que pode-se retirar dos gráficos é que a ferramenta gasta (no fim de vida) possui esforços de corte mais intensos. Este comportamento foi observado para as três forças analisadas. Comportamento também observado para as duas geometrias testadas. Esse resultado também é corroborado pela teoria, uma vez que as ferramentas desgastadas apresentam maior superfície de atrito e, no caso desse trabalho, maior coeficiente de atrito, uma vez que houve muita adesão de material da peça à superfície de saída.

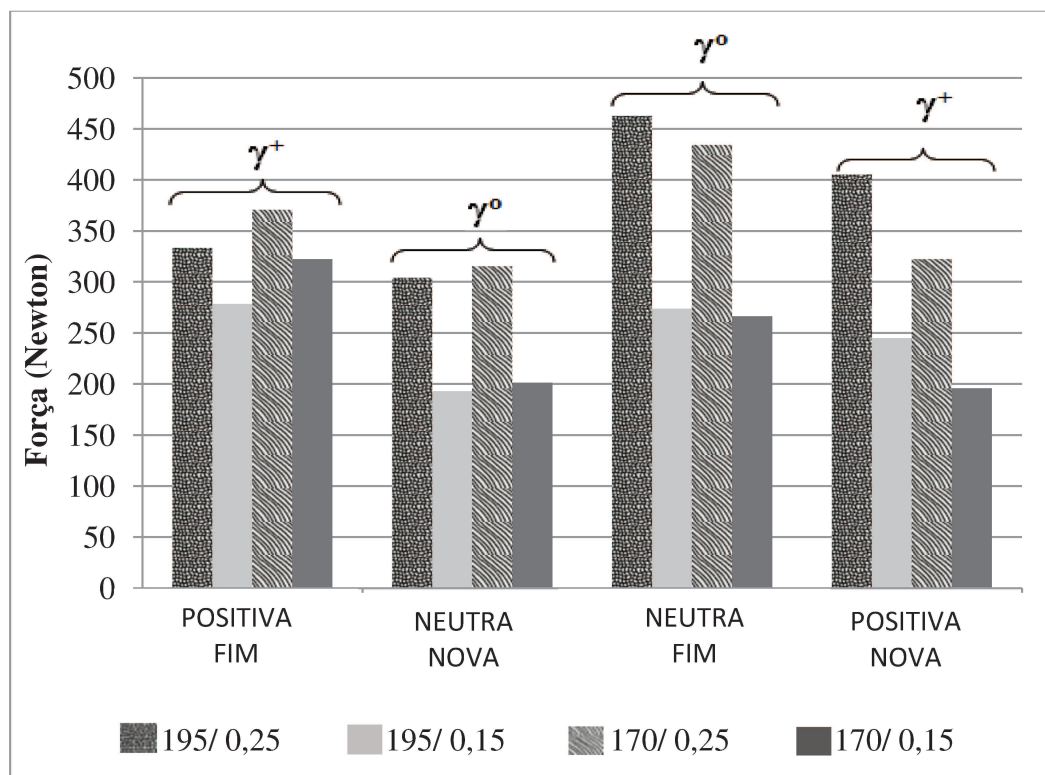


Figura 4.7 - RMS da força na direção Y para as 4 condições testadas e 2 geometrias (Neutra e Positiva)

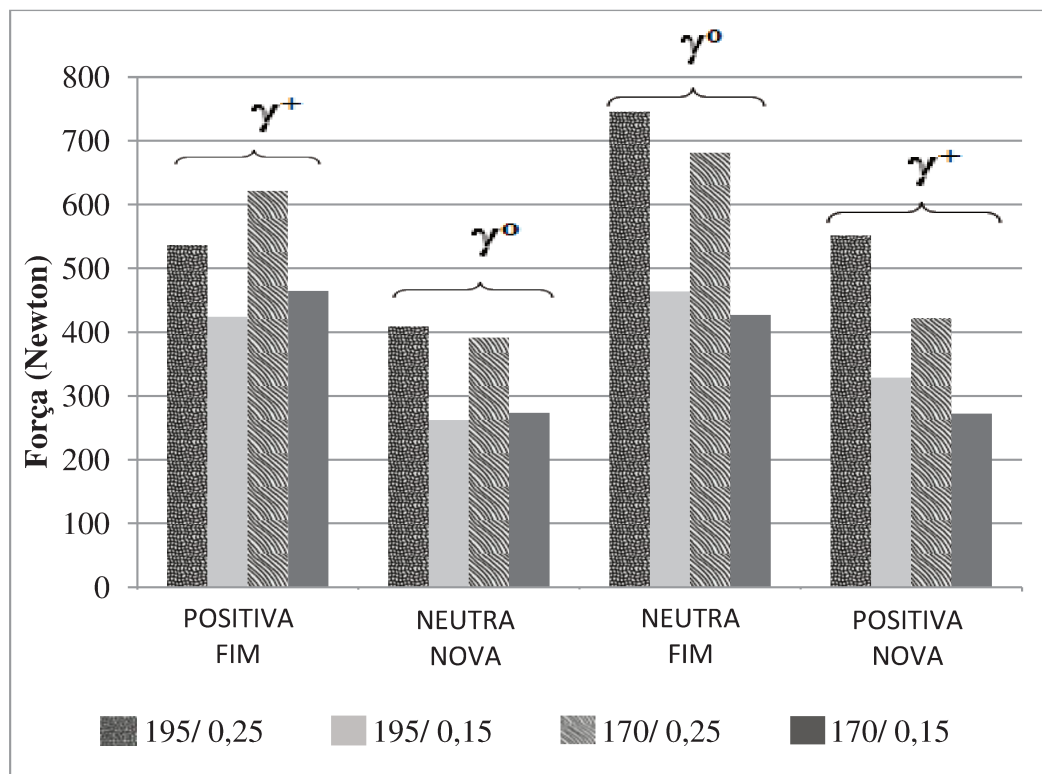


Figura 4.8 - RMS da força na direção XY para as 4 condições testadas e 2 geometrias (Neutra e Positiva)

Ainda observando os gráficos, primeiramente os insertos novos, nota-se que a intensidade dos esforços é maior para a geometria positiva. No entanto, quando se analisa os insertos fim de vida, este comportamento se inverte. Observa-se que os maiores esforços se encontram nos insertos de geometria neutra, com exceção da condição de v_c 170 m/min, com f_z de 0,15 mm.

Por fim, quanto a variação da velocidade de corte (v_c), não se encontrou uma correlação efetiva e substancial entre os esforços de corte, uma vez que ela, ora parece contribuir para o aumento dos esforços, em outros momentos parece contribuir para redução destes esforços de corte.

Analisando os esforços gerados na entrada do dente da ferramenta, observou-se que no início do corte a força na direção Y é positiva (pela orientação deveria estar contrário ao eixo Y, portanto negativa). Isso é uma evidência que inicialmente quando o h é zero, não ocorre efetivamente o corte. Entretanto, existe um esforço da ferramenta à peça. Esta é a resposta expressiva elástica/plástica do material quando a espessura do cavaco não é mínima para que ocorra efetivamente o corte, como visto anteriormente pela Figura 2.21 e Figura 2.23.

O corte, efetivamente, ocorre apenas quando o h está com uma espessura mínima necessária cuja força na direção Y é registrada na forma negativa uma vez que o corte inicialmente é discordante e devido ao fato de que as direções dos eixos do dinamômetro são contrárias ao seu sentido das forças. Esta direção foi citada anteriormente e pode ser observada no capítulo anterior na Figura 3.17.

Na Figura 4.9 está ilustrado, de forma mais evidente, este comportamento da força F_y na qual o alto atrito causado pelo $h = 0$ no início é provocado, tal atrito é causado pelas deformações plásticas/elásticas que neste momento são intensificadas devido a espessura do cavaco não ser suficientemente espessa para provocar o corte. Este gráfico foi extraído do ensaio de uma ferramenta no seu fim de vida, cujo comportamento é mais intensificado devido ao desgaste da ferramenta, pois este desgaste provoca um aumento no raio da aresta, o qual está relacionado proporcionalmente, de forma direta, à espessura mínima do cavaco para que ocorra o corte.

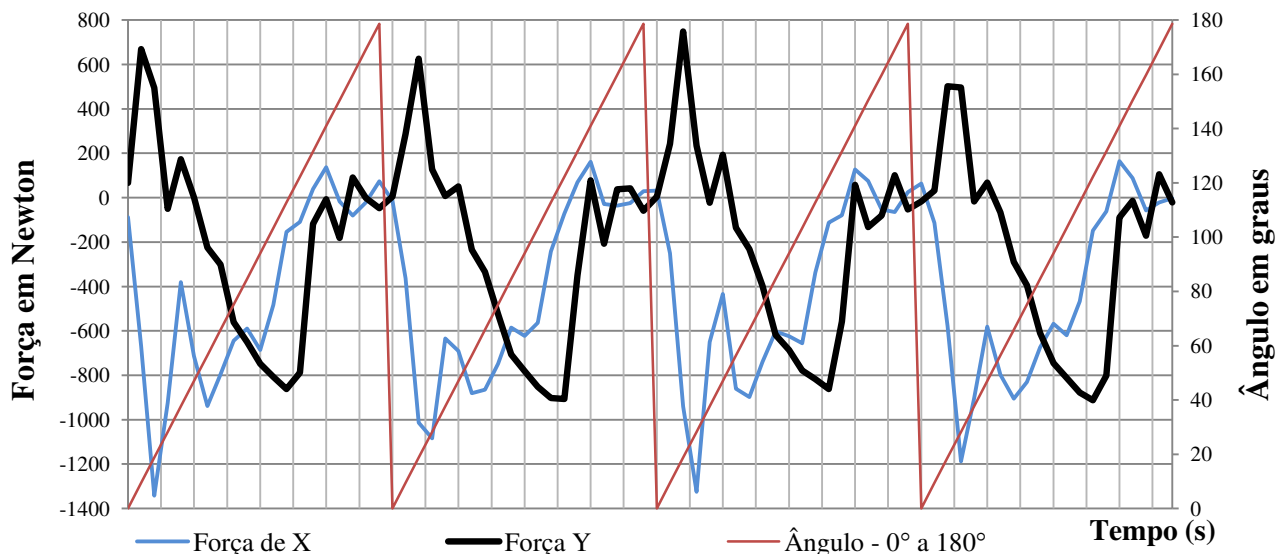


Figura 4.9 - Comportamento das forças F_x e F_y para insertos Neutra/Fim de vida v_c de 195 m/min e f_z de 0,25 mm/dente

Quando a ferramenta está nova, praticamente não há uma variação significativa na força da direção Y , evidenciando que o atrito é menor na entrada. Notou-se pelos ensaios que a aresta da ferramenta estando em boas condições, praticamente intacta, aqueles picos de forças encontrado na entrada do inserto praticamente não ocorreram, como pode ser observado pelo gráfico da Figura 4.10. Observou-se também, que neste caso, as diferenças dos picos das forças, a cada ciclo, diminuiriam.

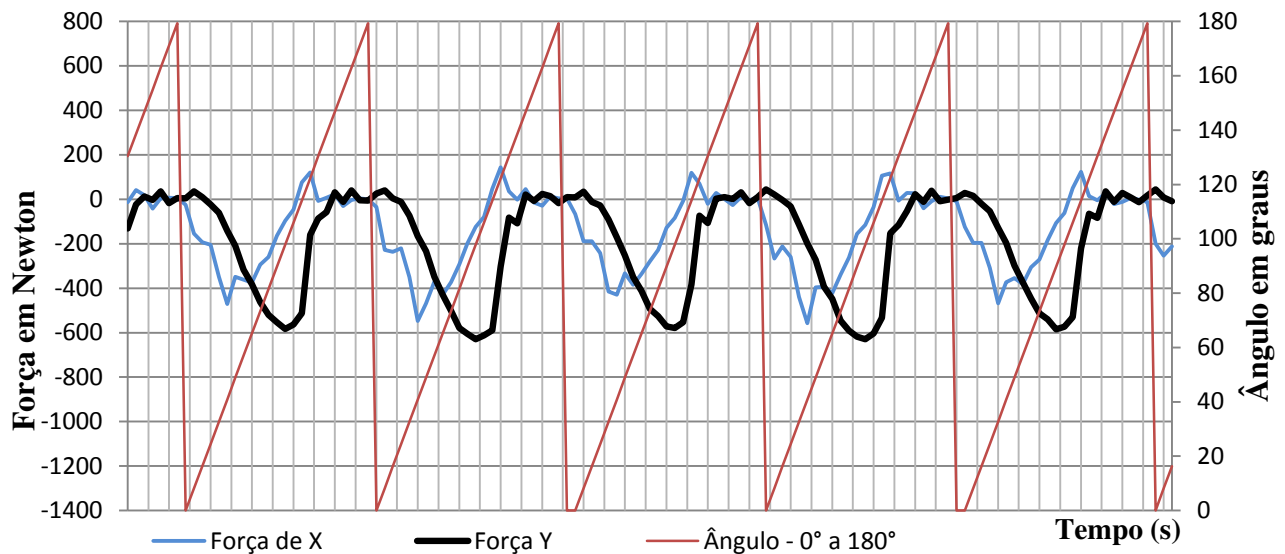


Figura 4.10 - Comportamento das forças F_x e F_y para insertos Neutra/Novo v_c de 170 m/min e f_z de 0,25 mm/dente

Desta forma, no instante em que o inserto entra em contato com a peça, no fresamento frontal, assimétrico e discordante com ângulo $\varphi = 0$, existe neste instante um grande atrito entre ferramenta e peça, evidenciado pelo aumento repentino da força na direção do eixo Y, o que vem a ocasionar desgaste da ferramenta (DINIZ, MARCONDES E COPPINI, 2010).

Este alto atrito da ferramenta com a peça é tão elevado, que deixou marcas na peça que podem ser visualizadas na Figura 4.11. Note-se que estas marcas, se encontram na transição dos passos executados entre os cortes da peça. Estas marcas provavelmente são "bordas" de material que não foram cortadas devido ao regime elástico do 15-5 PH.

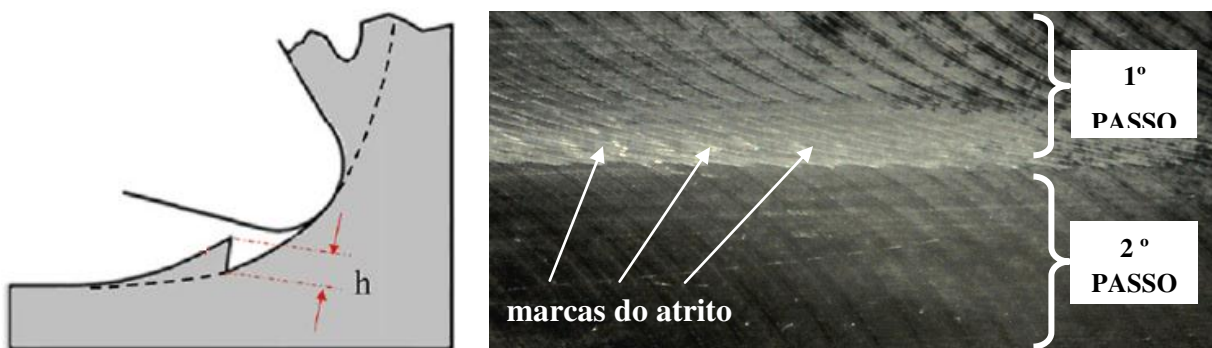


Figura 4.11 - Marcas deixada na peça devido as deformações provocada pela ferramenta na entrada da mesma a cada 180° - transição de dois passos

Outras análises foram feitas, agora observando-se as forças tangenciais e radiais, ambas derivadas da F_x e F_y . Analogamente ao processo anterior, colocou-se na forma gráfica os valores RMS destes esforços para todas as condições testadas. Na Figura 4.12 pode-se observar a RMS da força tangencial e na Figura 4.13 a força radial.

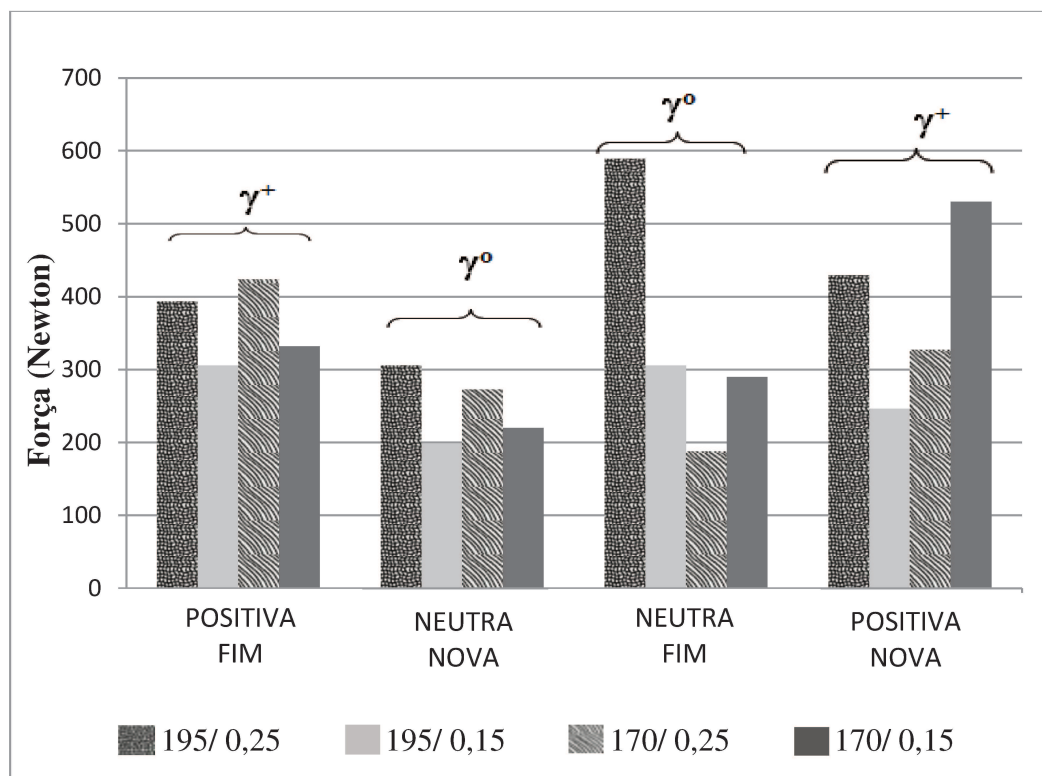


Figura 4.12 - RMS da força tangencial, para as 4 condições testadas e 2 geometrias (Neutra e Positiva)

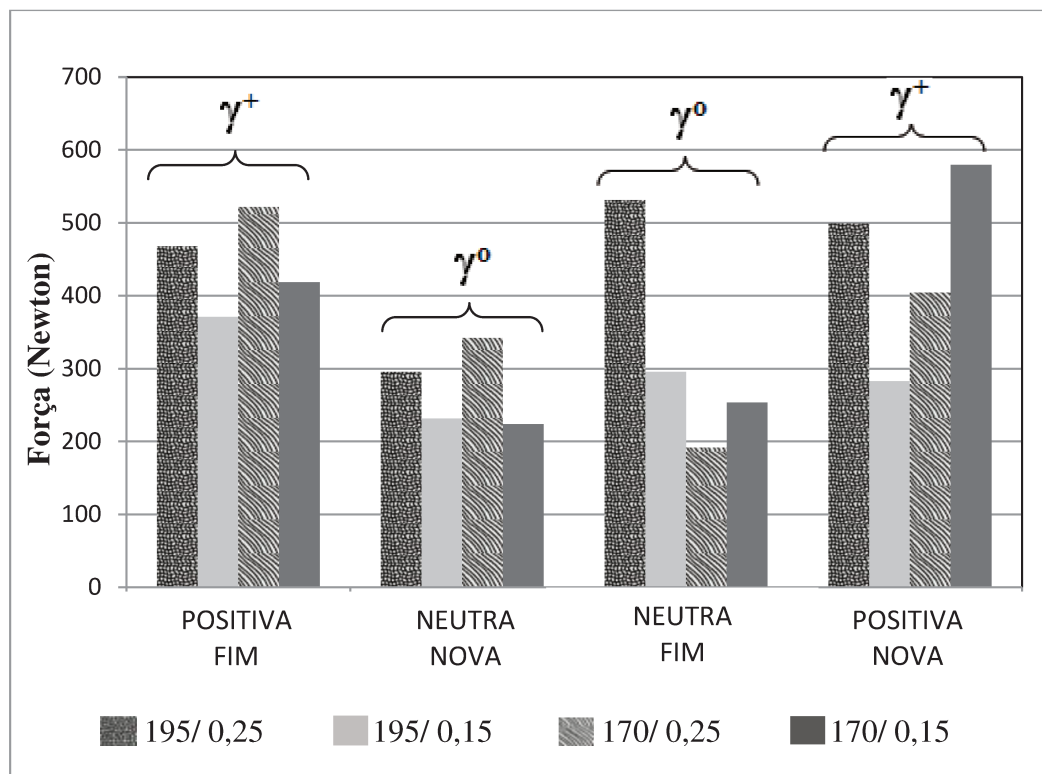


Figura 4.13 - RMS da força radial para as 4 condições testadas e 2 geometrias (Neutra e Positiva)

Na obtenção destas forças o ângulo instantâneo, posição angular em que é feita a aquisição do ponto pelo dinamômetro, está constantemente variando, conforme mencionada pela Equação 2.7 anteriormente. Desta forma, devido esta variação, teve-se certa dificuldade de ajuste destes ângulos, uma vez que a frequência de aquisição não é múltipla da frequência de entrada de dente.

Assim, optou-se em analisar 2 ciclos nas forças F_t e F_r , uma vez que, neste caso, existe maior facilidade de ajuste. A obtenção da RMS de 10 ciclos quando analisados, e 2 ciclos, praticamente, não variam significativamente, fazendo com que a análise de 2 ciclos seja confiável e atenda a necessidade.

Na análise do f_z o comportamento de seu aumento foi idêntico as forças analisadas anteriormente (F_x , F_y e F_{xy}) para o v_c de 195 m/min. No entanto, não houve o mesmo comportamento, tanto para a força tangencial quanto para a força radial, dos esforços para as ferramentas positiva/novo e neutra/fim de vida nas condições de v_c a 170 m/min.

Analisando-se os insertos novos, os de geometria positiva apresentaram sempre maiores esforços tangenciais e radiais que os insertos de geometria neutra. Na análise dos insertos no fim

de vida o mesmo comportamento se repete, com exceção da condição de v_c de 195 m/min com f_z de 0,25 mm/dente, contrapondo este comportamento, mais evidenciado na força tangencial.

O mesmo comportamento não conclusivo tirado em relação a velocidade de corte e suas influências nos esforços de corte nas direções X, Y e XY foi encontrado nesta análise. Portanto, na força radial, o comportamento é semelhante aos outros casos.

De acordo com Diniz (2010), as forças radiais possuem direção que, teoricamente, mais contribuiria para a vibração do sistema, seguido da força F_t que dependendo do ângulo de posição da fresa viria a contribuir significativamente para vibrações em altas frequências.

A fim de melhor entender os esforços de corte, foram feitos espectros da intensidade da força (N) x frequência (Hz) para todos os ensaios executados. Primeiramente insertos de geometria positiva (Novo e Fim de vida) nas condições de v_c e f_z estabelecidas. A Figura 4.14, Figura 4.15, Figura 4.16 e Figura 4.17, ilustram intensidade encontrada em referidas frequências para as forças radiais.

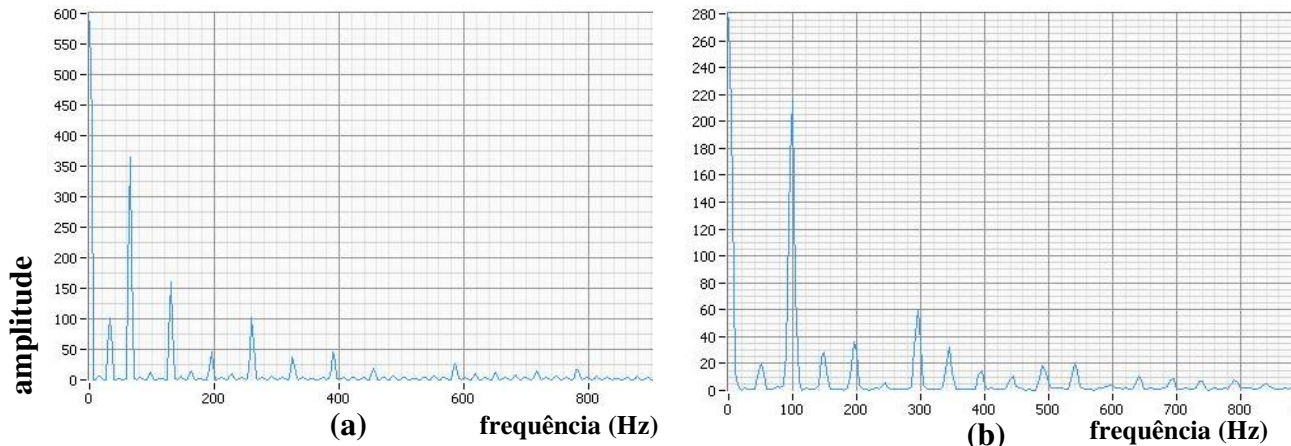


Figura 4.14 - Espectro de frequência da F_r : (a) Positiva/Novo (b) Positiva/Fim ambas nas condições de v_c 195 m/min e f_z 0,15 mm/dente

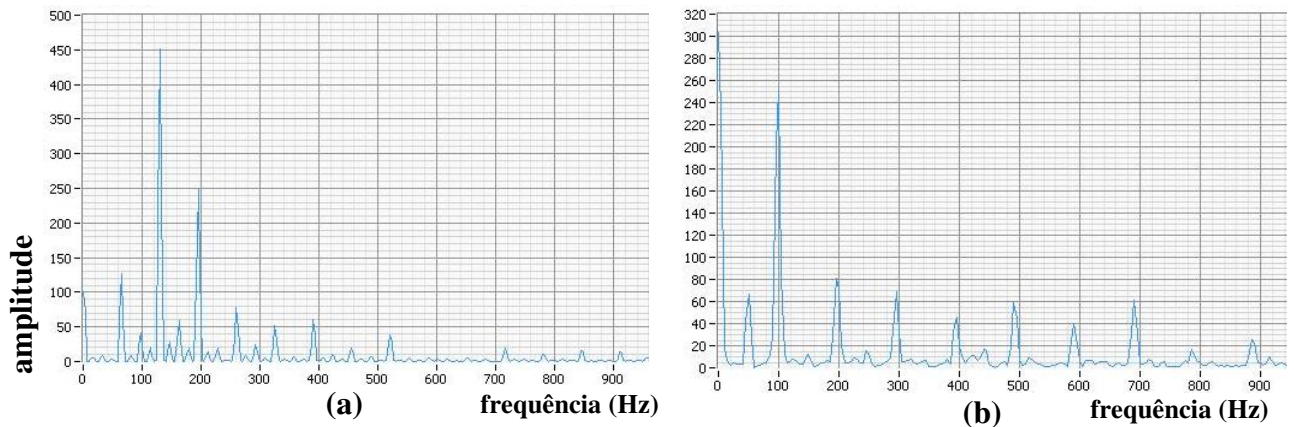


Figura 4.15 - Espectro de frequência da F_r : (a) Positiva/Novo (b) Positiva/Fim ambas nas condições de v_c 195 m/min e f_z 0,25 mm/dente

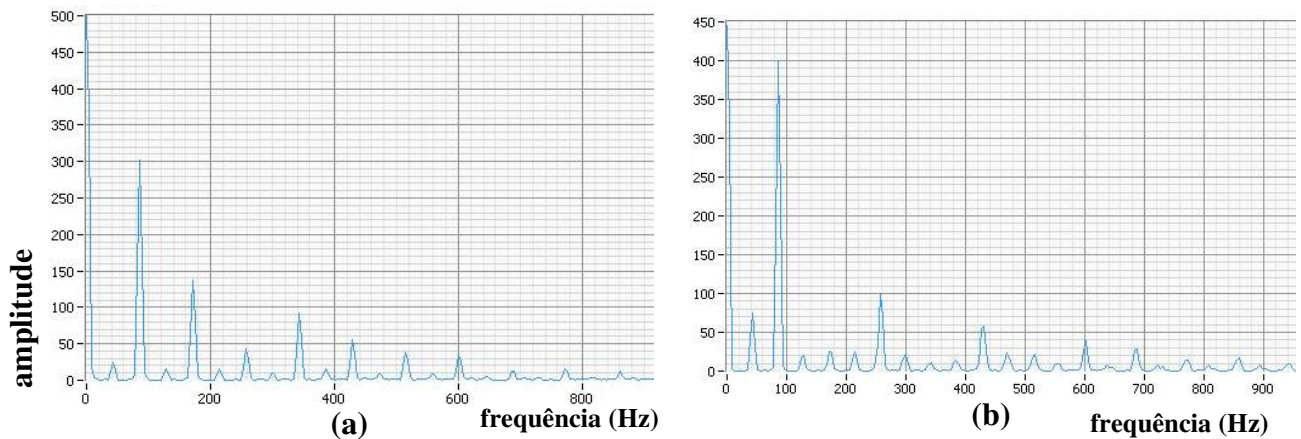


Figura 4.16 - Espectro de frequência da F_r : (a) Positiva/Novo (b) Positiva/Fim ambas nas condições de v_c 170 m/min e f_z 0,15 mm/dente

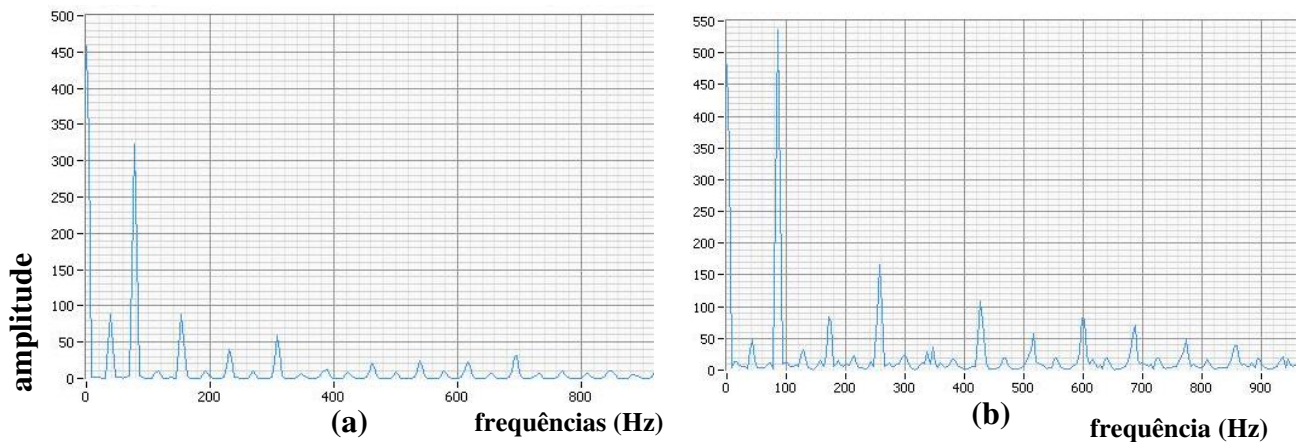


Figura 4.17 - Espectro de frequência da F_r : (a) Positiva/Novo (b) Positiva/Fim ambas nas condições de v_c 170 m/min e f_z 0,25 mm/dente

Na análise destes espectros, não foram encontradas frequências com picos elevados de força, que não sejam geradas na entrada de dente e da rotação da fresa, além dos seus harmônicos. A concentração de alta energia, picos elevados de forças, em alguma das condições testadas em frequências maiores que a gerada pela entrada de dente da fresa, da rotação da fresa e suas harmônicas, seria indícios do efeito *chatter*.

As vibrações auto-excitadas (*chatter*) que ocorrem nas máquinas-ferramenta são originadas da auto-excitação gerada durante o mecanismo de formação do cavaco na usinagem. Segundo Altintas (2000), as forças de corte inicialmente excitam um dos modos estruturais menos amortecidos do sistema máquina-ferramenta/peça. As ondulações deixadas pelo dente da fresa na superfície da peça são removidas pelo dente subsequente, o qual gera novamente uma superfície ondulada, decorrente das vibrações estruturais.

Assim, dependendo da diferença de fase entre duas ondulações sucessivas, a espessura do cavaco pode aumentar exponencialmente enquanto oscila em uma frequência de vibrações auto-excitadas, a qual é próxima a um modo dominante do sistema.

Para uma análise mais acurada, usou-se um filtro passa alta com frequência de corte de 250 Hz, objetivando analisar as frequências que poderiam contribuir para as vibrações do sistema. Os espectros da Figura 4.18, Figura 4.19, Figura 4.20 e Figura 4.21 ilustram estas frequências das forças radiais nas condições trabalhadas.

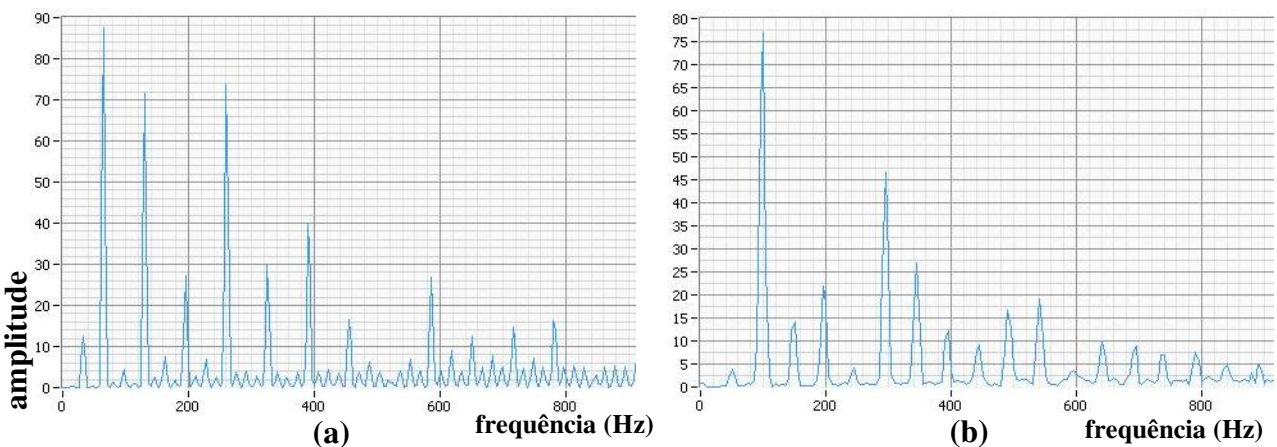


Figura 4.18 - Espectro de frequência da F_r filtrada 250 Hz :(a) Positiva/Novo (b) Positiva/Fim ambas nas condições de v_c 195 m/min e f_z 0,15 mm/dente

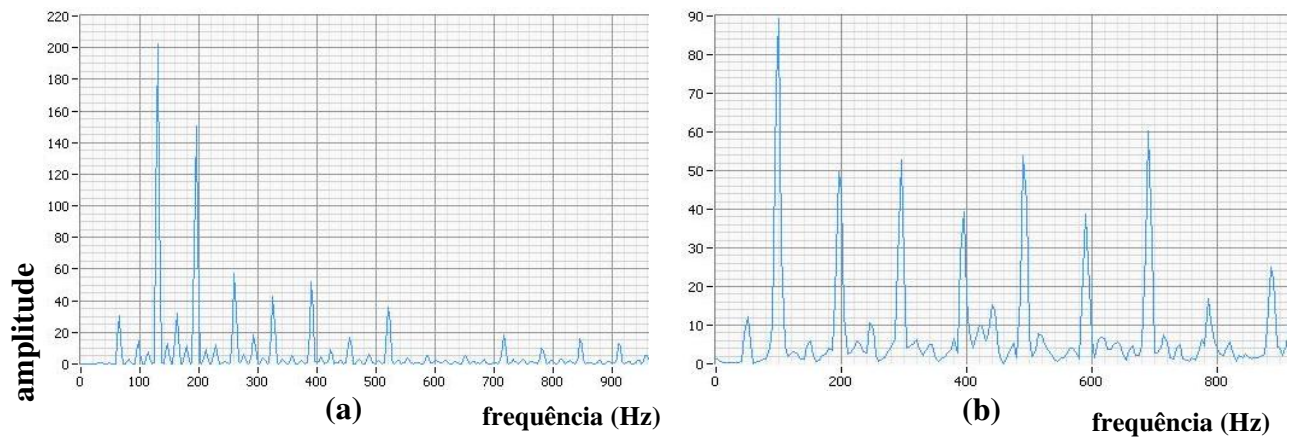


Figura 4.19 - Espectro de frequência da F_r filtrada 250 Hz: (a) Positiva/Novo (b) Positiva/Fim ambas nas condições de v_c 195 m/min e f_z 0,25 mm/dente

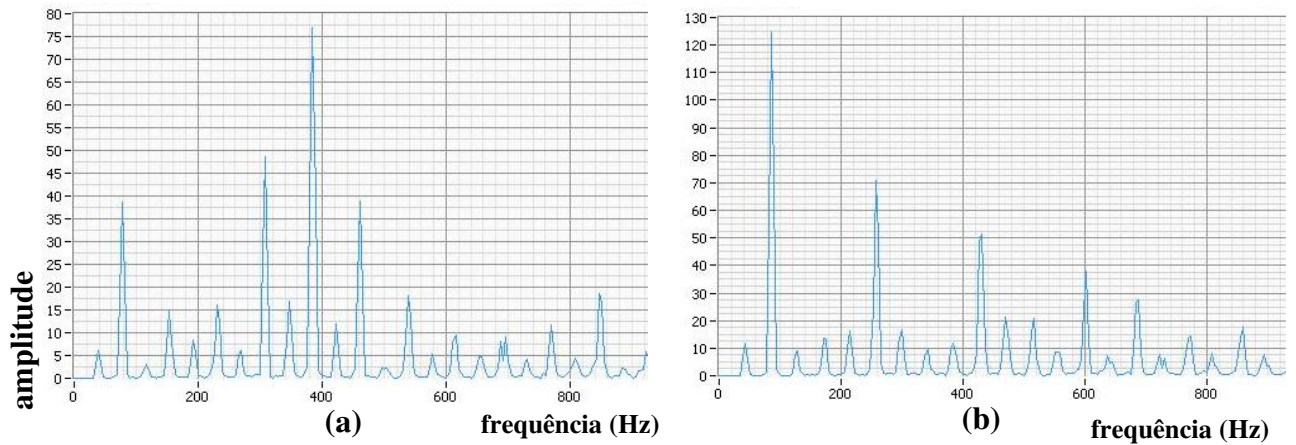


Figura 4.20 - Espectro de frequência da F_r filtrada 250 Hz (a) Positiva/Novo (b) Positiva/Fim ambas nas condições de v_c 170 m/min e f_z 0,15 mm/dente

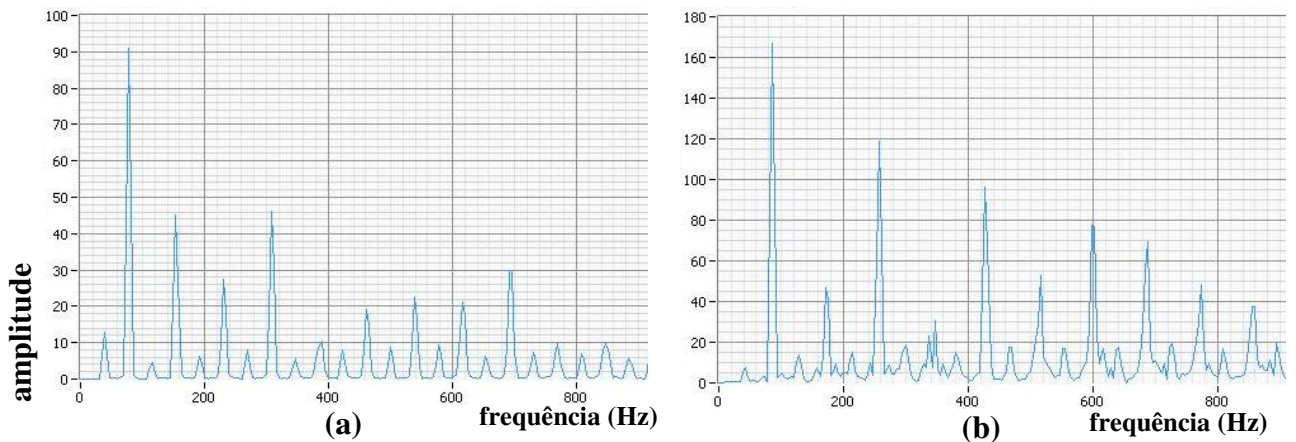


Figura 4.21 - Espectro de frequência da F_r filtrada 250 Hz (a) Positiva/Novo (b) Positiva/Fim ambas nas condições de v_c 170 m/min e f_z 0,25 mm/dente

A frequência de corte de 250 Hz foi utilizada uma vez que a resposta em frequência do porta ferramenta com haste de aço pode apresentar valores diferentes de zero em frequências acima de 250 Hz. Isso sugere que as vibrações do porta-ferramenta podem ser amplificadas quando excitadas em frequências acima desse valor (KULL, 2013)

Para estes espectros, observa-se que o inserto fim de vida nas condições de 195 m/min e avanço de 0,25 mm/dente teve alta energia em frequências mais elevadas, evidenciando possíveis vibrações do sistema. Este comportamento pode colaborar com o desgaste da ferramenta.

Estas mesmas análises de frequência, a análise do sinal sem e depois com o filtro passa alta de frequência de corte 250 Hz também foram feitas para as forças tangenciais (F_t). Os espectros da amplitude por frequência podem ser vistos pela Figura 4.22, Figura 4.23, Figura 4.24 e Figura 4.25.

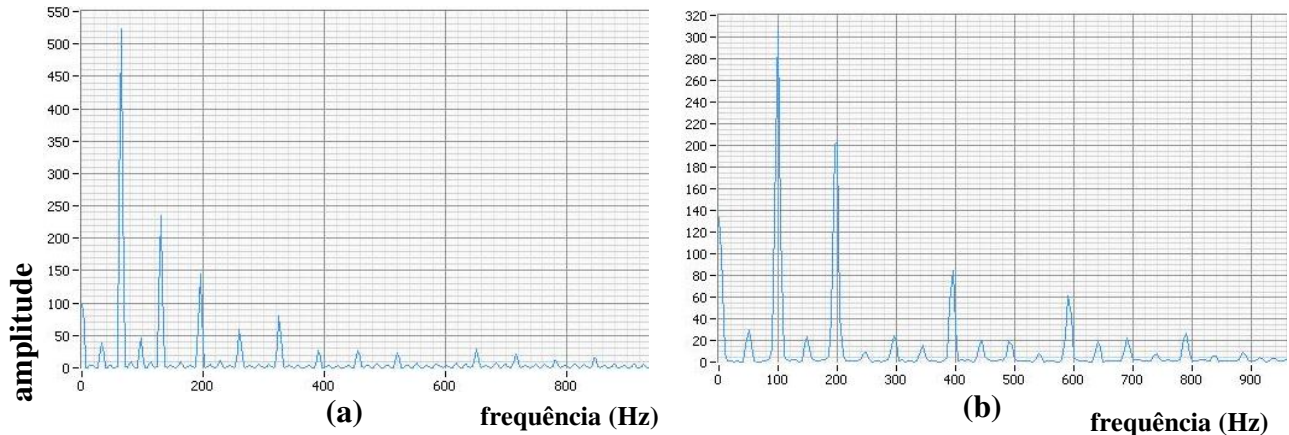


Figura 4.22 - Espectro de frequência da F_t : (a) Positiva/Novo (b) Positiva/Fim ambas nas condições de v_c 195 m/min e f_z 0,15 mm/dente

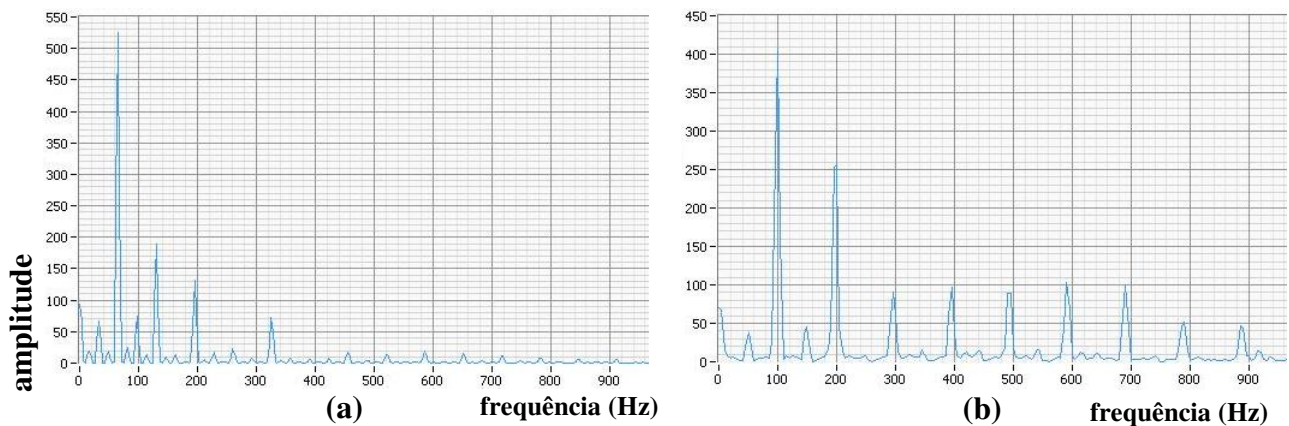


Figura 4.23 - Espectro de frequência da F_t : (a) Positiva/Novo (b) Positiva/Fim ambas nas condições de v_c 195 m/min e f_z 0,25 mm/dente

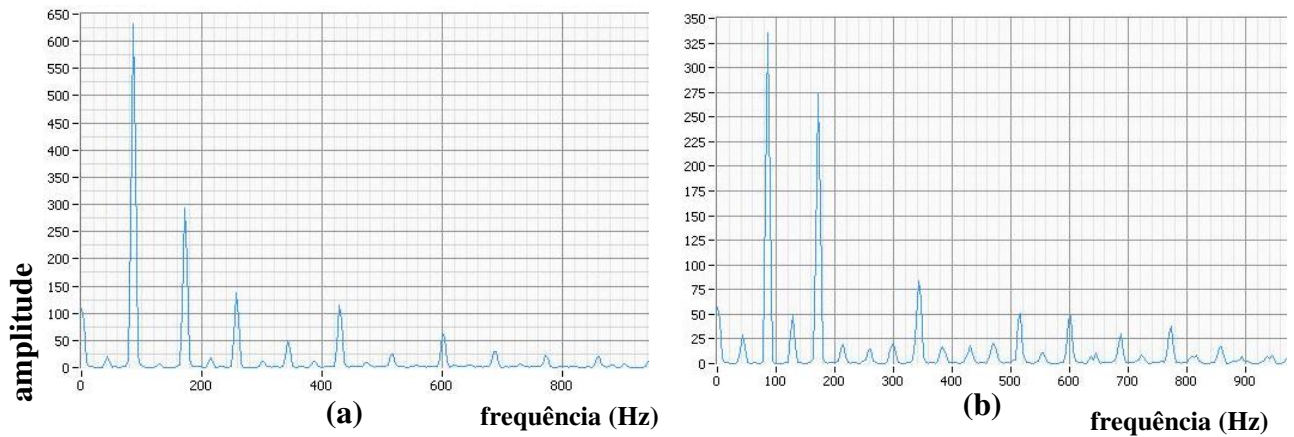


Figura 4.24 - Espectro de frequência da F_t : (a) Positiva/Novo (b) Positiva/Fim ambas nas condições de v_c 170 m/min e f_z 0,15 mm/dente

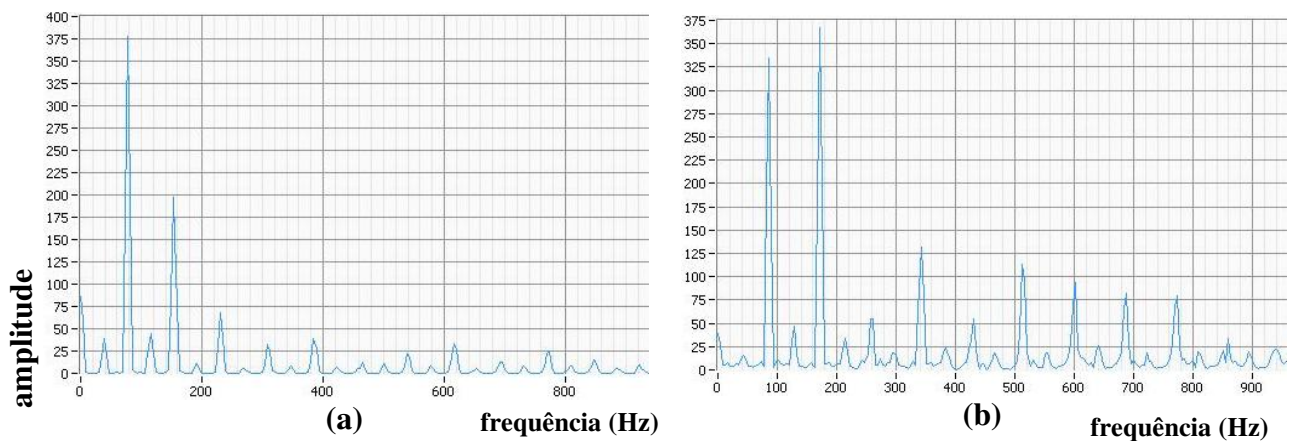


Figura 4.25 - Espectro de frequência da F_r : (a) Positiva/Novo (b) Positiva/Fim ambas nas condições de v_c 170 m/min e f_z 0,25 mm/dente

Ao comparar os espectros de frequências obtidos das forças radiais, com os gráficos das forças tangenciais, nota-se que o comportamento das frequências excitadas foi o mesmo. Isso é uma evidência de que há semelhanças entre estas forças. A diferença perceptível são as amplitudes, que nas forças tangenciais são maiores que nas forças radiais.

Esta mesma comparação também foi feita, agora se utilizando do filtro passa alta de 250 Hz. Estes espectros estão ilustrados pela Figura 4.26, Figura 4.27, Figura 4.28 e Figura 4.29.

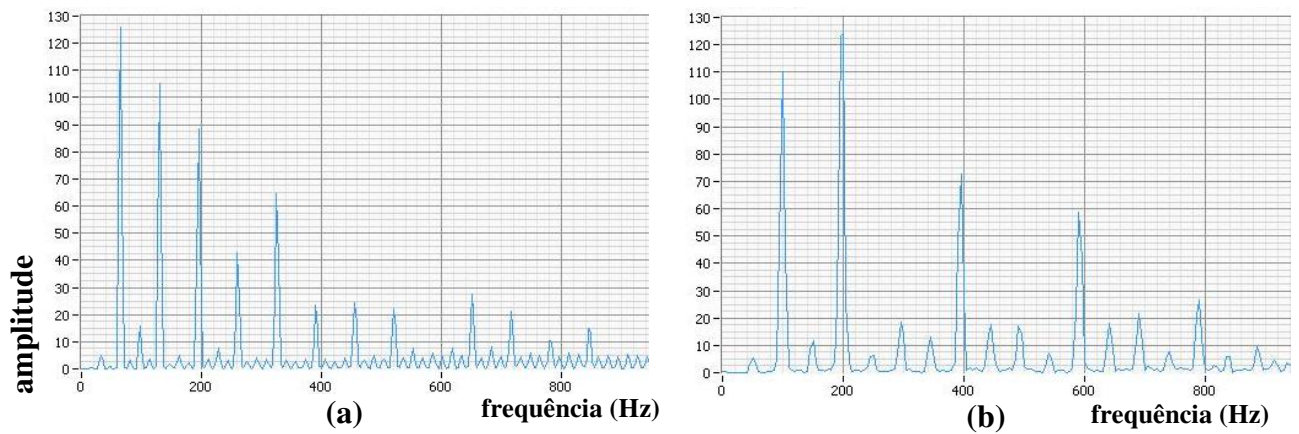


Figura 4.26 - Espectro de frequência da F_t filtrada 250 Hz: (a) Positiva/Novo (b) Positiva/Fim ambas nas condições de v_c 195 m/min e f_z 0,15 mm/dente

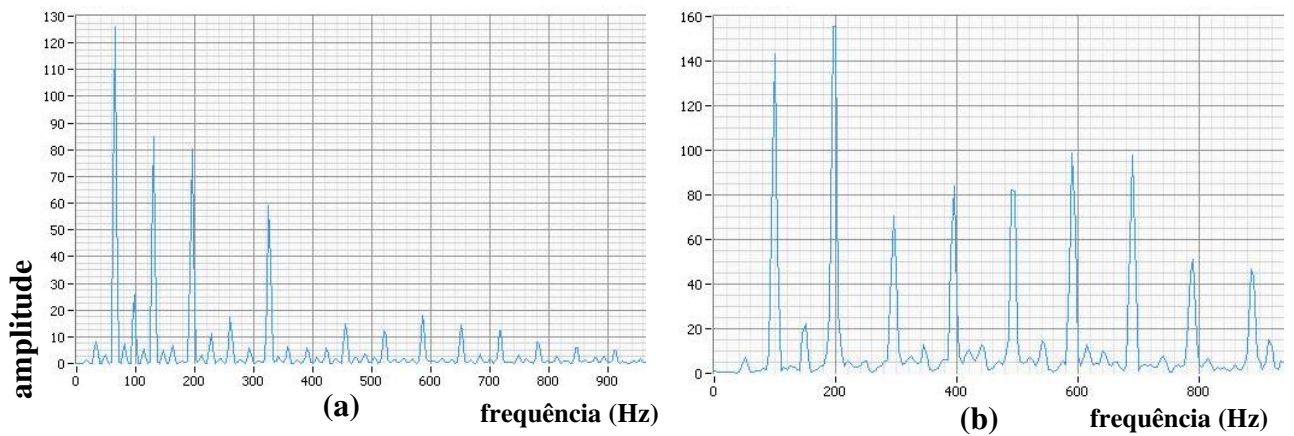


Figura 4.27 - Espectro de frequência da F_t filtrada 250 Hz: (a) Positiva/Novo (b) Positiva/Fim ambas nas condições de v_c 195 m/min e f_z 0,25 mm/dente

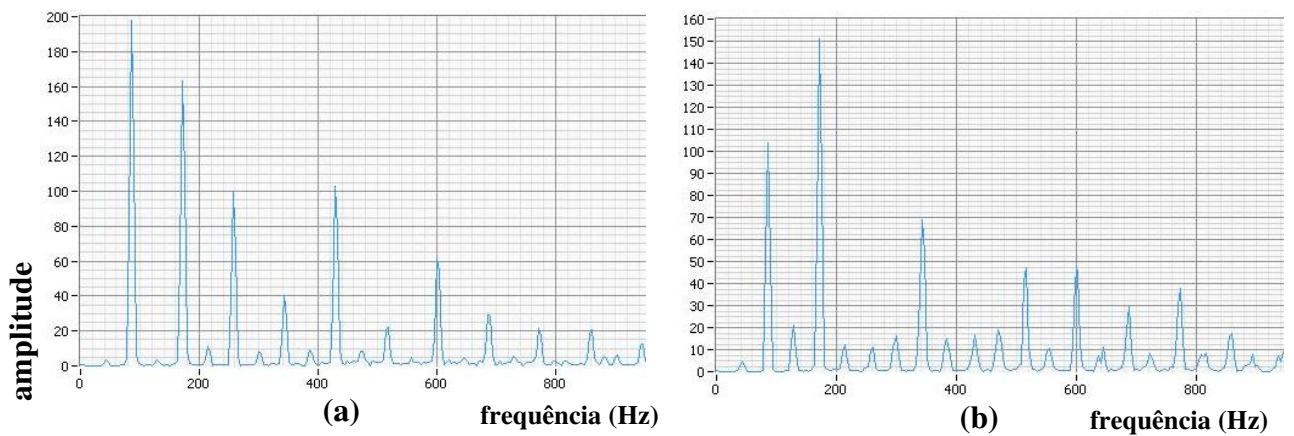


Figura 4.28 - Espectro de frequência da F_t filtrada 250 Hz: (a) Positiva/Novo (b) Positiva/Fim ambas nas condições de v_c 170 m/min e f_z 0,15 mm/dente

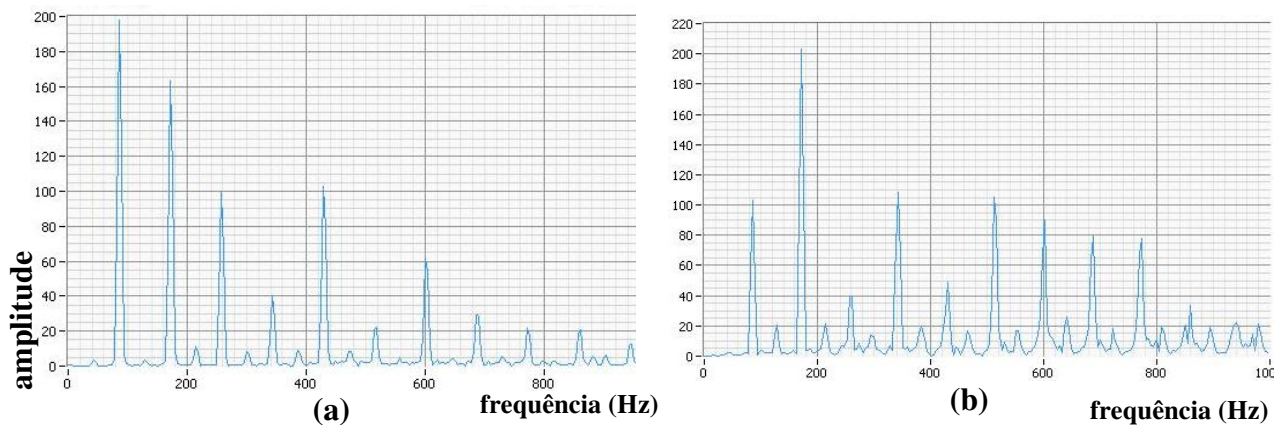


Figura 4.29 - Espectro de frequência da F_t filtrada 250 Hz: (a) Positiva/Novo (b) Positiva/Fim ambas nas condições de v_c 170 m/min e f_z 0,25 mm/dente

Pelas análises deste espectros, da mesma forma que teve-se excitações relativamente altas em frequências maiores, na força tangencial para as mesma condição anterior, na velocidade de corte de 195 m/min e avanço de 0,15 mm/dente, teve-se este comportamento para as forças tangenciais.

Todos os espectros de frequência da força radial e tangencial foram retirados dos ensaios feitos com insertos de geometria positiva. Da mesma forma, esta mesma análise foi feita para os insertos de geometria neutra. Entretanto, estão ilustrados apenas os gráficos com filtro passa alta, uma vez que não foi encontrado nenhuma excitação significativa antes da passagem do filtro. As amplitudes em funções das frequências da força radial estão ilustradas pela Figura 4.30, Figura 4.31, Figura 4.32 e Figura 4.33.

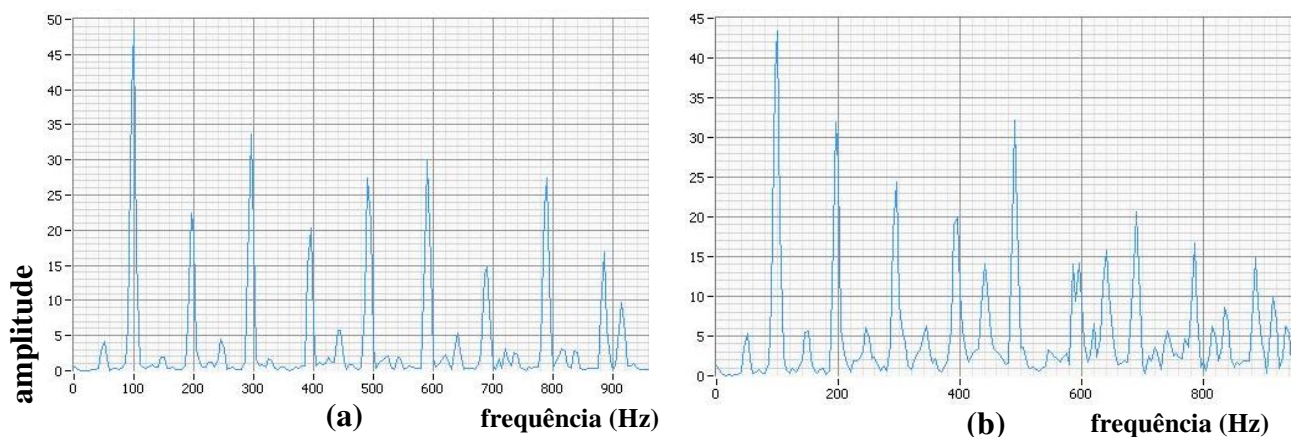


Figura 4.30 - Espectro de frequência da F_r filtrada 250 Hz: (a) Neutra/Novo (b) Neutra/Fim ambas nas condições de v_c 195 m/min e f_z 0,15 mm/dente

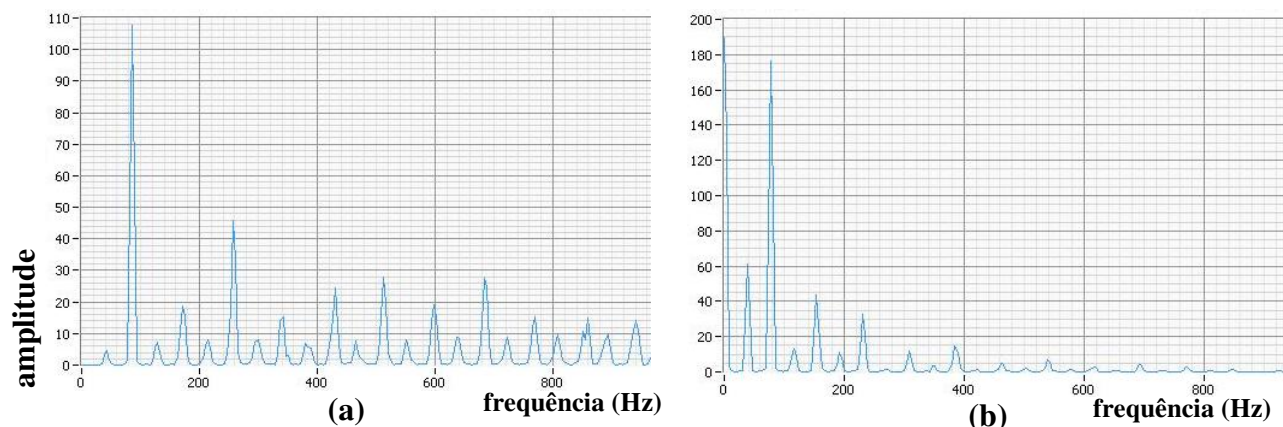


Figura 4.31 - Espectro de frequência da F_r filtrada 250 Hz: (a) Neutra/Novo (b) Neutra/Fim ambas nas condições de v_c 195 m/min e f_z 0,25 mm/dente

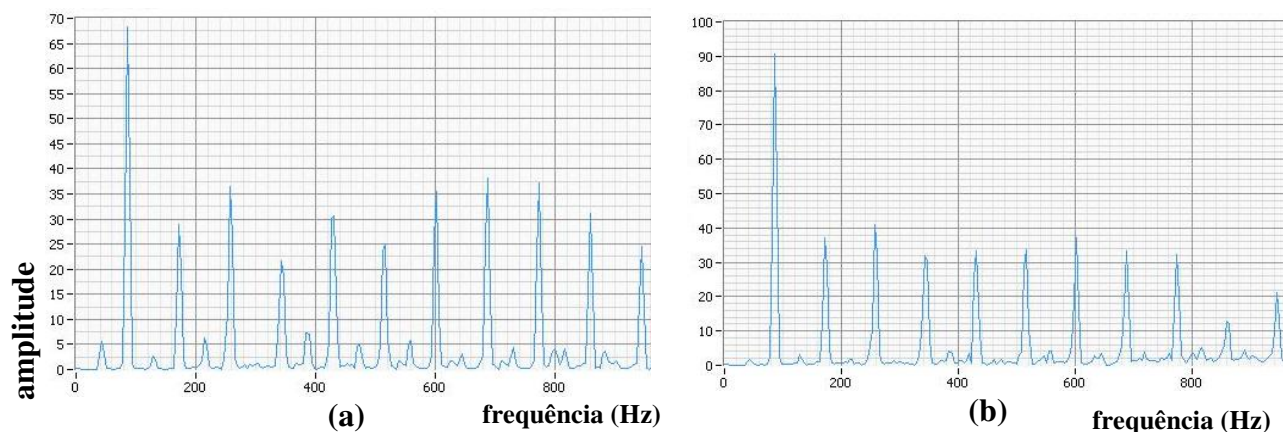


Figura 4.32 - Espectro de frequência da F_r filtrada 250 Hz: (a) Neutra/Novo (b) Neutra/Fim ambas nas condições de v_c 170 m/min e f_z 0,15 mm/dente

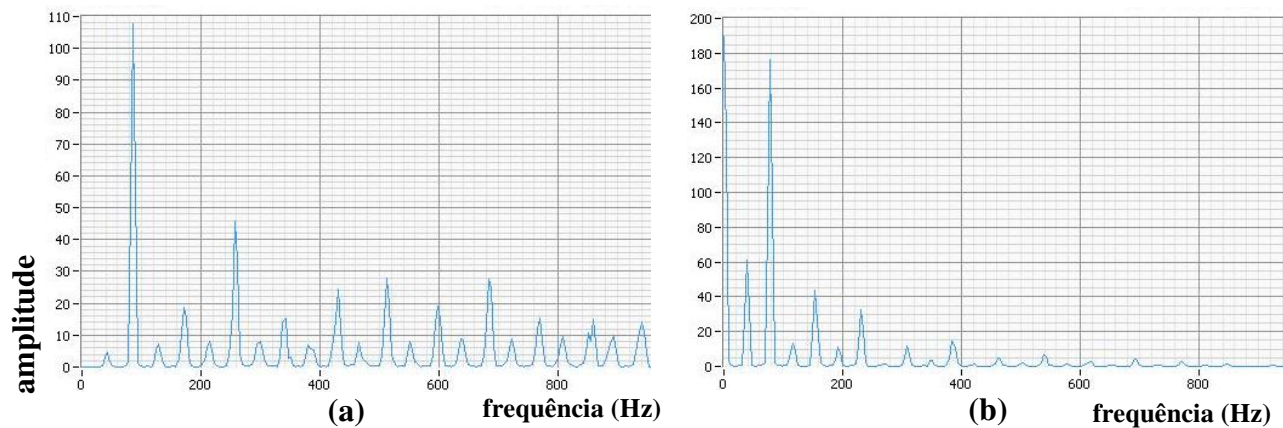


Figura 4.33 - Espectro de frequência da F_r filtrada 250 Hz: (a) Neutra/Novo (b) Neutra/Fim ambas nas condições de v_c 170 m/min e f_z 0,25 mm/dente

Na análise dos espectros, nota-se que nas condições em que o avanço de corte foi menor (0,15 mm/dente) teve-se parte da energia em maiores frequências. No entanto, as amplitudes estão relativamente baixas, mesmo nos insertos fim de vida, onde estas forças são maiores devido ao desgaste de flanco da ferramenta.

Da mesma forma, a análise da Transformada de Fourier foi feita para as forças tangenciais durante o corte com insertos de geometria neutra. A Figura 4.34, Figura 4.35, Figura 4.36 e a Figura 4.37 estão ilustrados estes espectros. Nota-se um comportamento semelhante ao das forças radiais, em que a condição de avanço de 0,15 mm/dente apresenta uma maior distribuição da energia em frequências maiores.

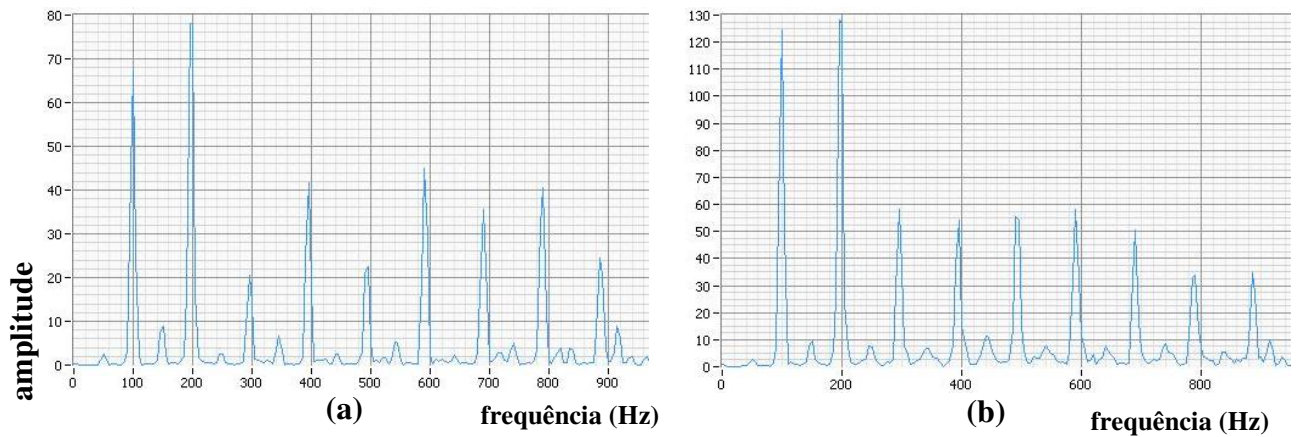


Figura 4.34 - Espectro de frequência da F_t filtrada 250 Hz: (a) Neutra/Novo (b) Neutra/Fim ambas nas condições de v_c 195 m/min e f_z 0,15 mm/dente

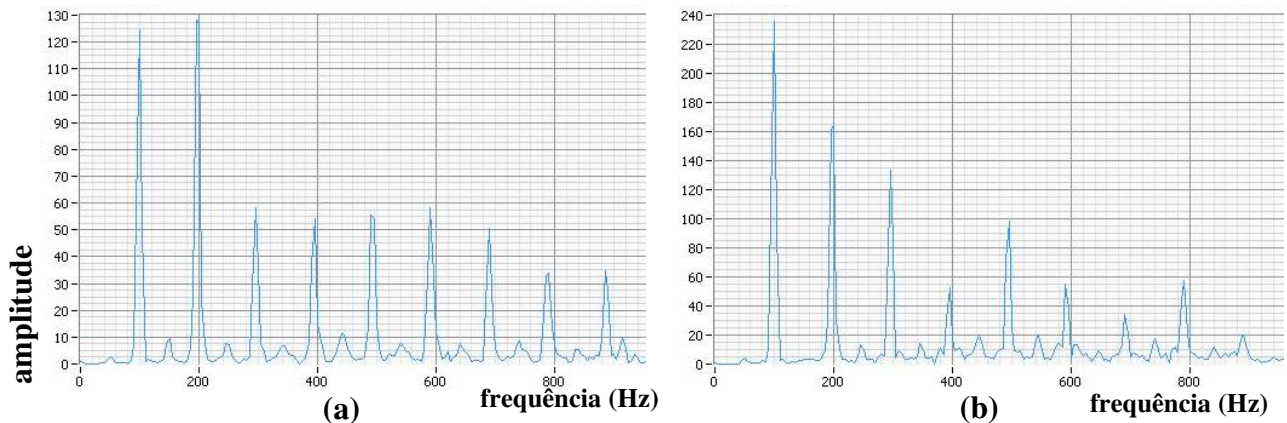


Figura 4.35 - Espectro de frequência da F_t filtrada 250 Hz: (a) Neutra/Novo (b) Neutra/Fim ambas nas condições de v_c 195 m/min e f_z 0,25 mm/dente

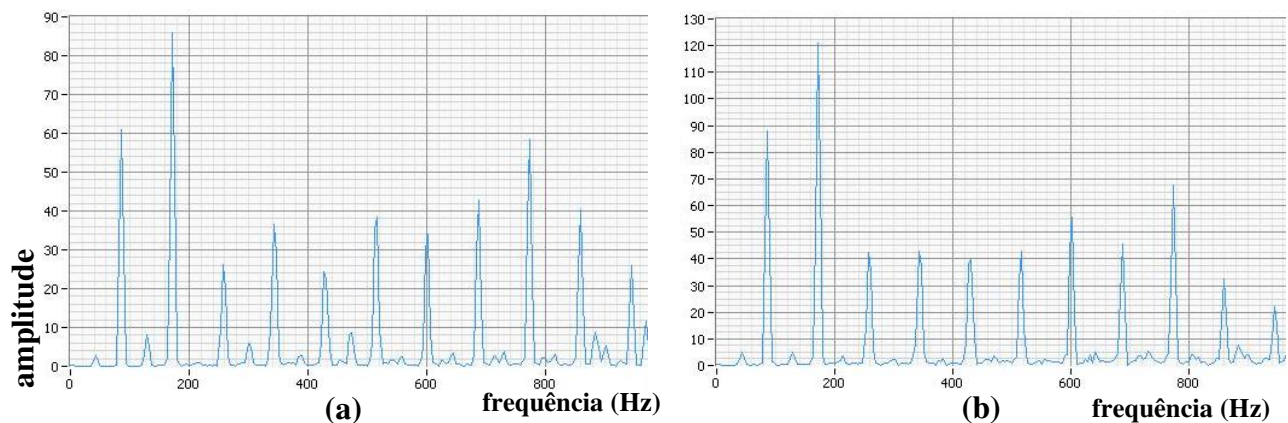


Figura 4.36 - Espectro de frequência da F_t filtrada 250 Hz: (a) Neutra/Novo (b) Neutra/Fim ambas nas condições de v_c 170 m/min e f_z 0,15 mm/dente

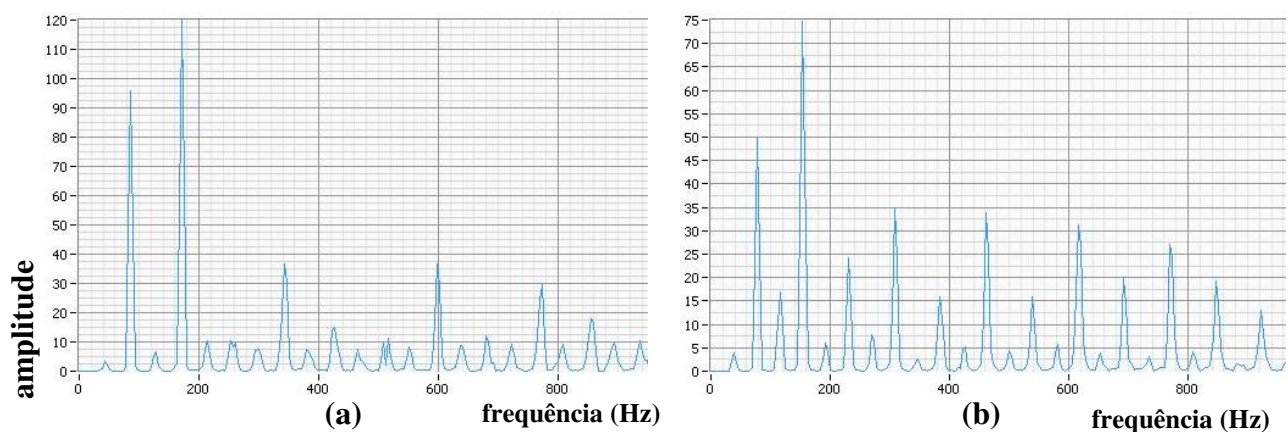


Figura 4.37 - Espectro de frequência da F_t filtrada 250 Hz: (a) Neutra/Novo (b) Neutra/Fim ambas nas condições de v_c 170 m/min e f_z 0,25 mm/dente

4.3 - Análise da vida das ferramentas de corte

Para os ensaios realizados, observou-se que o desgaste de flanco não apresentou um crescimento bem uniforme, ele foi aumentando subitamente, entre uma observação e outra. Na Figura 4.38 é mostrado imagens tiradas nos principais instantes de crescimento de um desgaste ocorrido na ferramenta.

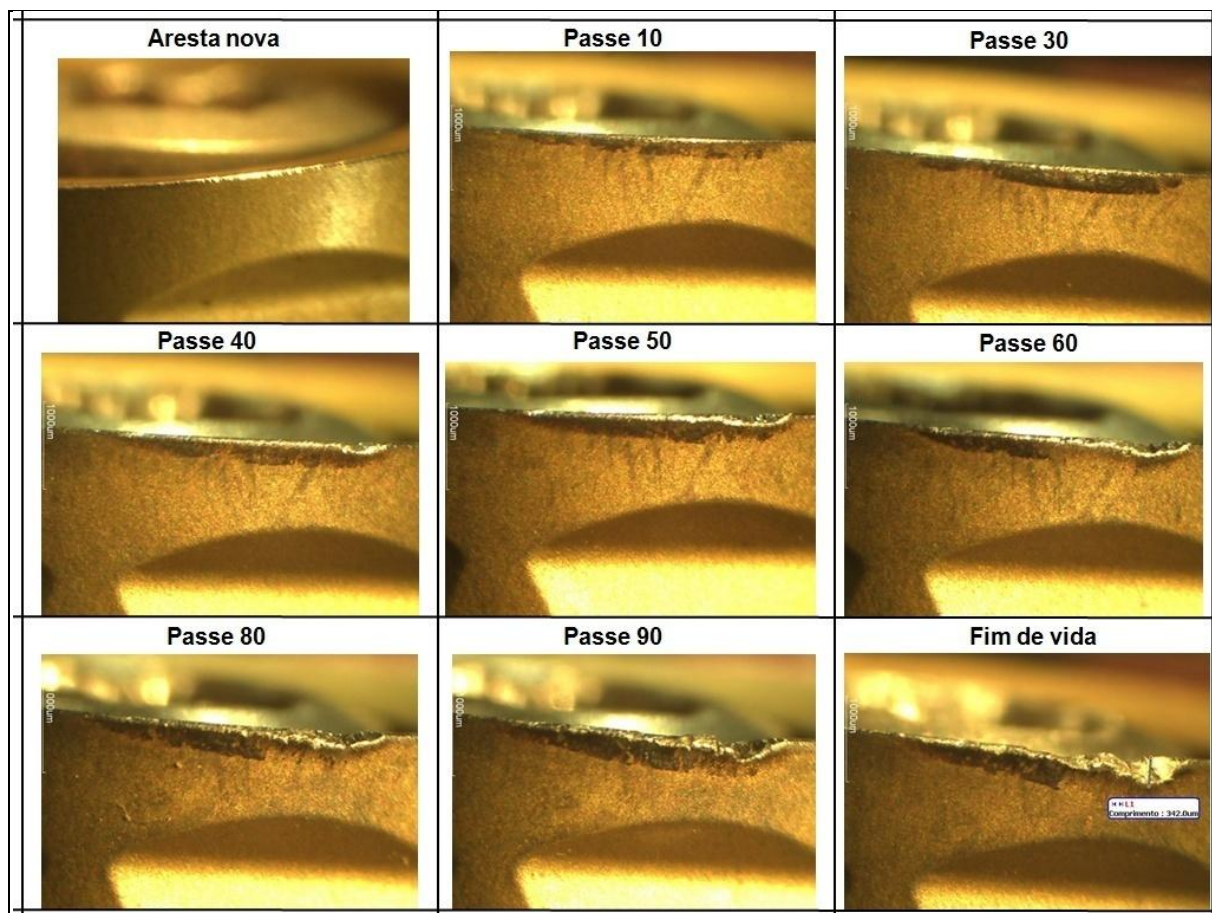


Figura 4.38 - Principais instantes do desgaste progressivo da ferramenta de corte

O gráfico da Figura 4.39, quantifica a progressão dos desgastes, em cada condição, para a inserto de geometria positiva. Nota-se pelo gráfico que o avanço por dente maior (0,25 mm/dente) apresentou vida maior em relação ao avanço menor (0,15 mm/dente).

Isso provavelmente se deu porque a deformação com o avanço de 0,25 mm/dente foi maior, gerando melhor formação do cavaco, assim como os esforços de corte foram maiores. Isso indica que a ferramenta em questão, para o material usinado, opera melhor próximo ao limite superior de avanço por dente recomendado em catálogo de seu fabricante que é 0,30 mm/dente.

Como o corte é predominantemente discordante, não existe impacto na entrada do inserto, a não ser na entrada e saída da ferramenta na peça (picos de forças ilustrados anteriormente, que foram minimizados com as entradas e saídas de avanço reduzidos). No entanto, verificou-se que para os menores avanços as forças geradas no início do corte, quando h é zero, tiveram picos maiores, que as forças geradas com avanços maiores.

Desta forma, teve-se maior atrito, quando iniciava-se o corte, com $h = 0$, para as condições de menores avanços, o que foi preponderante para o fim de vida da ferramenta. Ademais, com avanços menores, o número de vezes que este fenômeno de atrito ocorre é maior quando comparado aos avanços maiores.

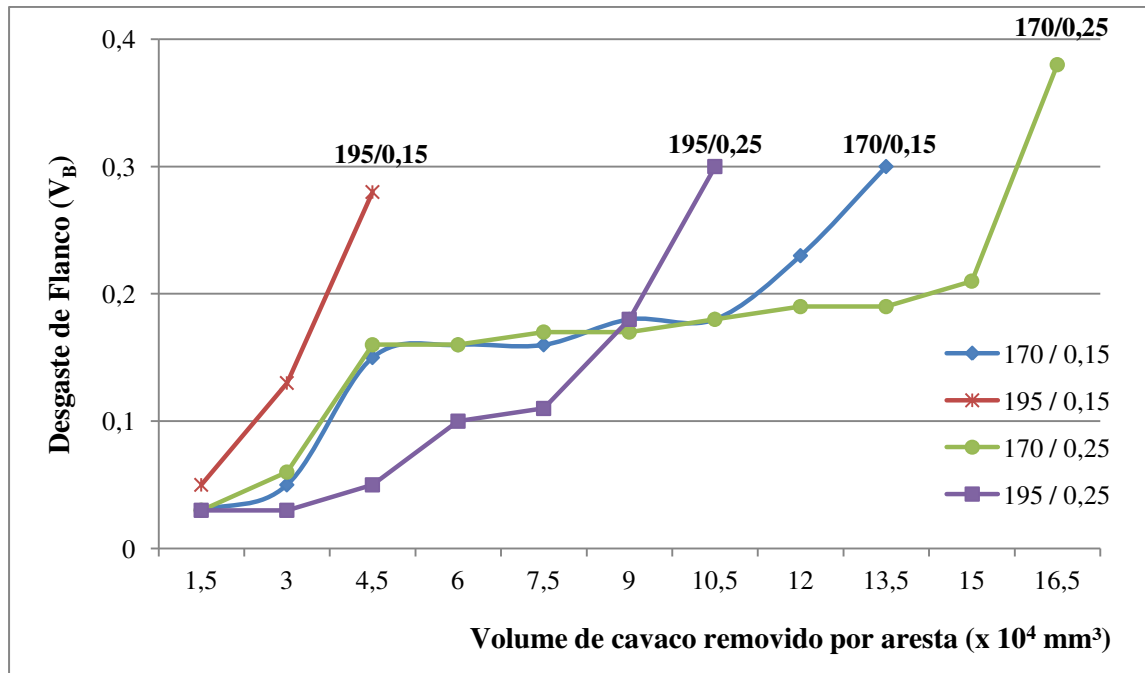


Figura 4.39 - Evolução do desgaste V_B para ferramentas de geometria positiva por volume em milímetros cúbicos usinado por aresta

Ao analisar a influência da velocidade de corte, nota-se que a mesma foi muito significativa pois seu aumento provocou uma diminuição da vida da ferramenta, tanto para os avanços de 0,25 mm/dente quanto para os de 0,15 mm/dente. Velocidades de corte maiores implicam em temperaturas maiores de corte. Portanto, desgastes maiores, confirmando, desta forma, as teorias existentes.

Outro detalhe observado nos ensaios foi a rebarba que o corte discordante deixou na peça, devido a saída do dente da peça, como pode ser visto na Figura 4 40. Fenômeno este que não seria observado caso o corte fosse concordante. Isso se dá devido ao corte discordante em que a espessura do cavaco é maior quando na saída da aresta do corte como mencionado e ilustrado no capítulo 2 pela Figura 2.12.

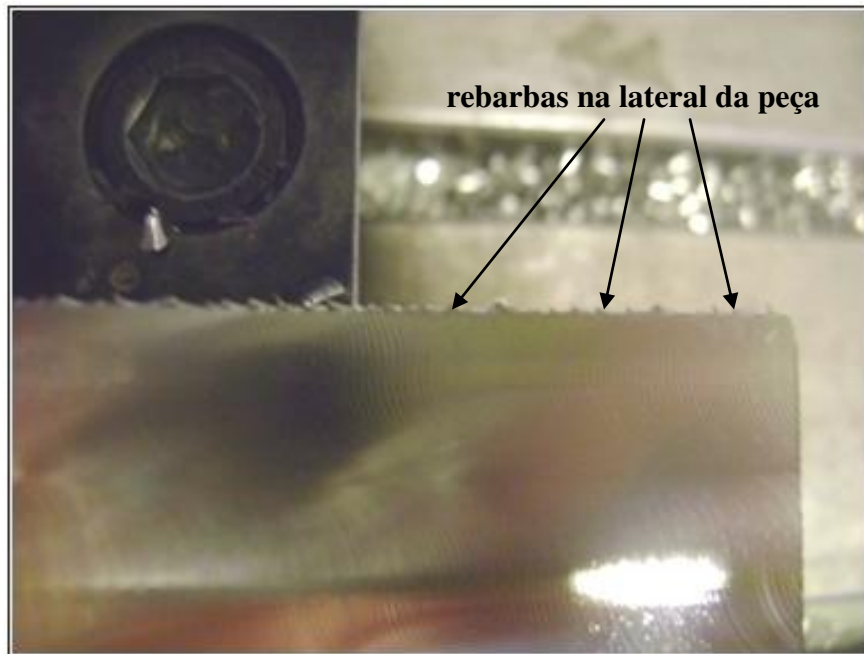


Figura 4 40 - Rebarba na lateral da peça ocasionada pelo corte discordante

4.4 - Mecanismos de desgastes

Na análise da Figura 4.41, observa-se que a aresta de corte da ferramenta apresenta pequenos lascamentos, uma vez que a forma do desgaste é irregular e não apresenta marcas de abrasão. Além disso, nota-se que nos pontos (1 e 3) o revestimento está praticamente intacto. Nos pontos (2 e 4) o substrato está exposto onde há elementos químicos da ferramenta e da peça (W e Ti elementos do substrato e cobertura da ferramenta e tem-se Fe, Cr e Ni elementos oriundos da peça).

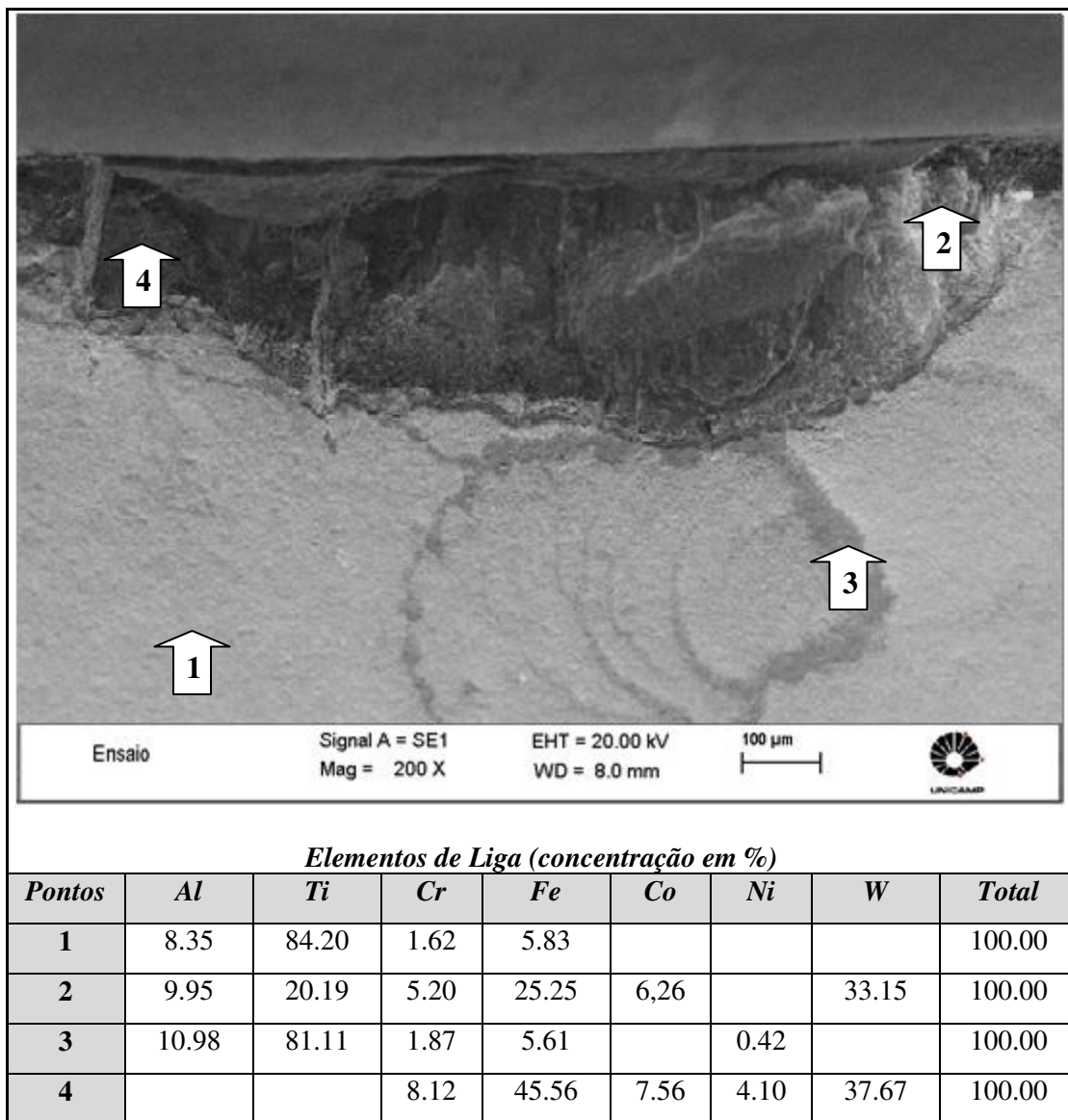
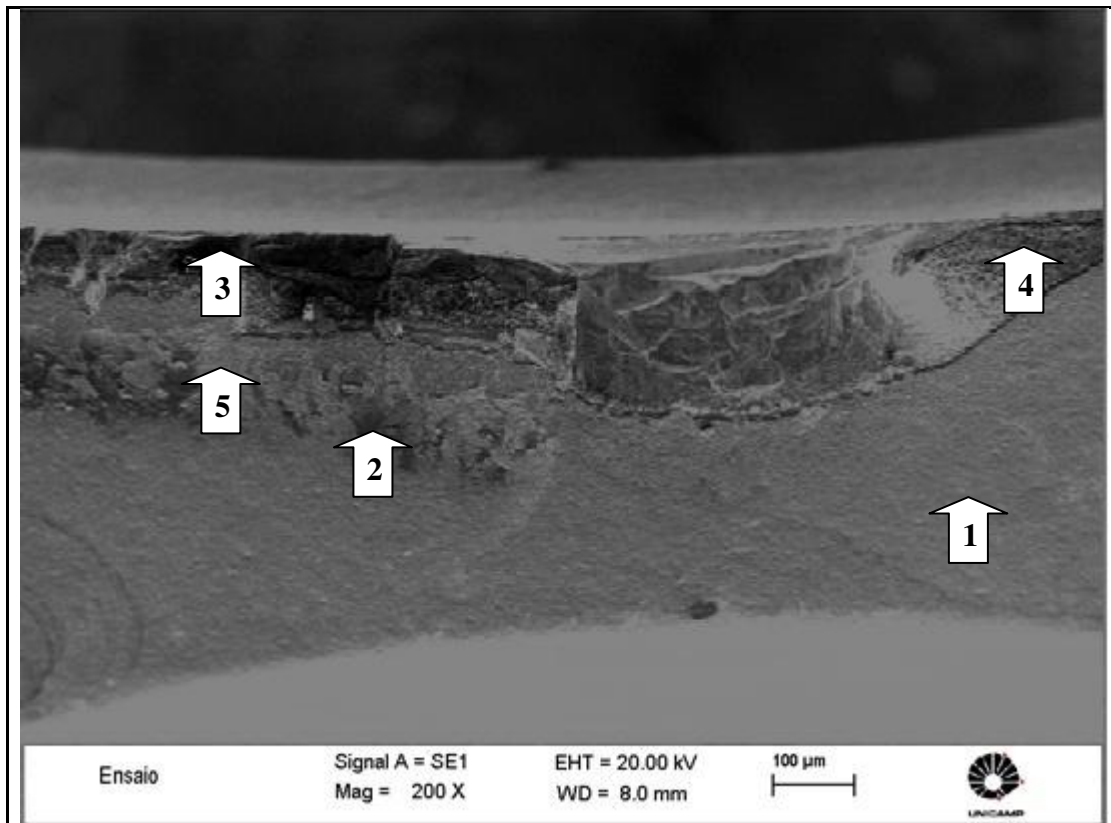


Figura 4.41 - MEV + EDS da composição da ferramenta desgastada - Para v_c de 195 m/mine f_z de 0,25 mm/dente - Inserto de geometria positiva

A presença dos elementos encontrados nos pontos 2 e 4, indica que ocorreu adesão de material da peça na ferramenta. Quando ocorre este fenômeno, posteriormente essa parcela aderida é removida, levando consigo porções do revestimento, depois o substrato exposto reage mais facilmente com o material da peça, ocorrendo nova adesão. De acordo Diniz et al (2010), apesar deste fenômeno ser característico de baixas velocidades de corte, ele pode ocorrer em velocidades maiores desde que o fluxo irregular de cavaco ocorra. Este mecanismo causador de desgaste é conhecido como aderência (*attrition*). As forças de atrito mais elevadas, quando $h=0$, principalmente nas condições de avanço de 0,15 mm/dente corrobora para tal desgaste.



Elementos de Liga (concentração em %)

<i>Pontos</i>	<i>Al</i>	<i>Ti</i>	<i>Cr</i>	<i>Fe</i>	<i>Cu</i>	<i>Ni</i>	<i>W</i>	<i>Total</i>
1	10.59	79.28	2.08	7.28		0.77		~ 100.00
2	3.97	76.09	2.25	12.53				~ 100.00
3	13.05	7.35	10.90	52.50	2.08	2.64	11.48	~ 100.00
4			3.32	14.47			82.21	~ 100.00
5	6.02	82.07	2.20	8.34	0.72	0.65		~ 100.00

Figura 4.42 - MEV + EDS da composição da ferramenta desgastada - Para v_c de 195 m/min e f_z de 0,15 mm/dente - Insertos de geometria positiva

Na análise da Figura 4.42 observa-se grandes semelhanças no tipo de mecanismos de desgastes ocorrido na condição anterior. Nesta, os pontos (1 e 2) o revestimento está praticamente intacto. Nos pontos (3 e 4) o substrato está exposto onde há elementos químicos da ferramenta e da peça. Nota-se que neste desgaste também não é evidenciado abrasão. Como é encontrado nos

pontos 3 e 4 elementos da peça, acredita-se que ocorreu adesão de material, portanto, o fenômeno conhecido como aderência.

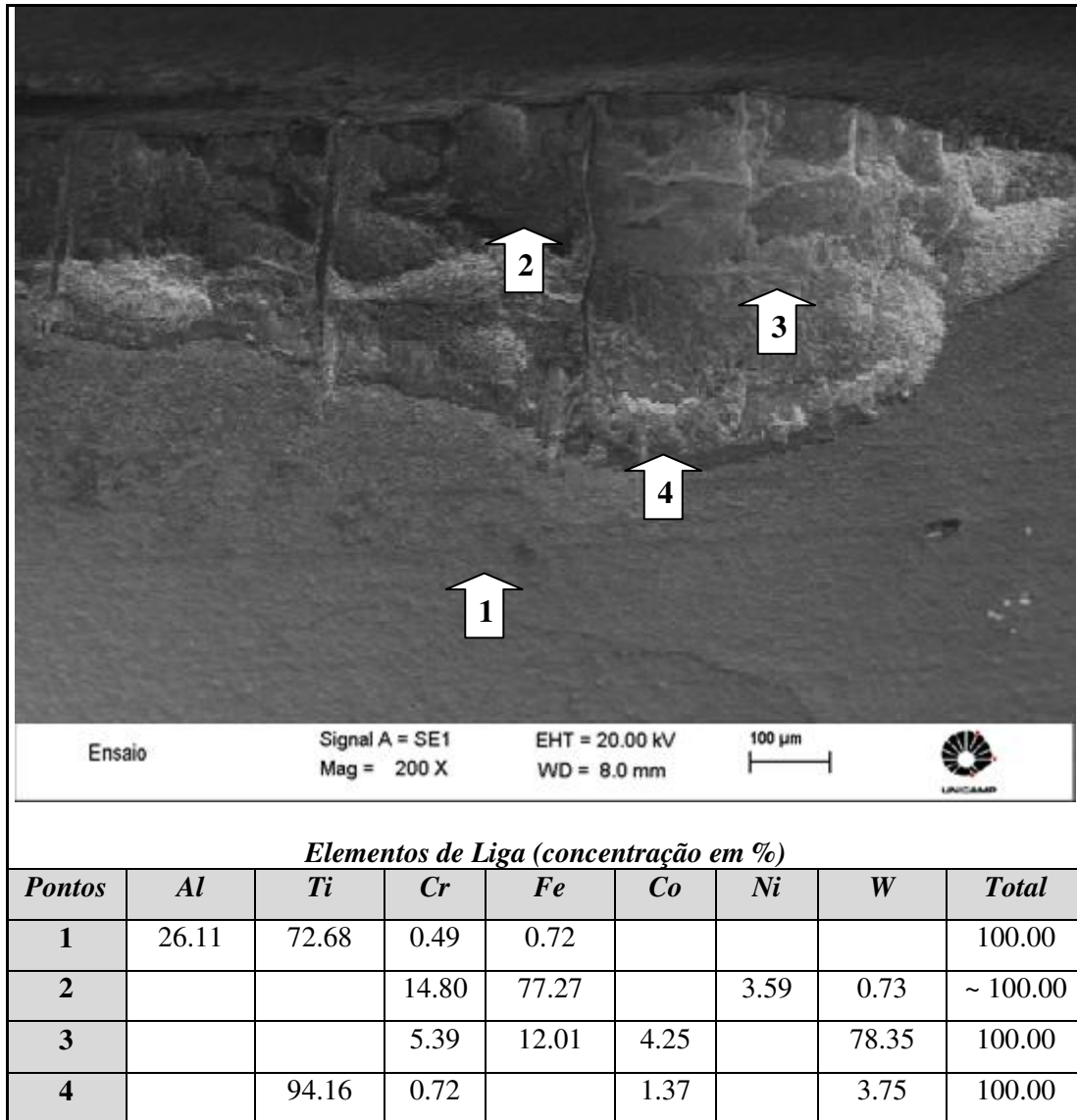


Figura 4.43 - MEV + EDS da composição da ferramenta desgastada - Para v_c de 195 m/min e f_z de 0,25 mm/dente - Inserto de geometria negativa

Para análise da Figura 4.43, as condições são de velocidade de corte de 195 m/min e avanço de 0,25 mm/dente para o inserto com geometria neutra (sem quebra cavado). Observando a imagem, nota-se que a mesma análise feita para as condições anteriores pode ser aplicada a esta geometria. Portanto, o mecanismo evidenciado neste caso é aderência (*attrition*), observados pelo ponto 2, onde encontra-se ferro e níquel em grande quantidades.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Baseado nos resultados obtidos e dentro das condições testadas no presente trabalho, pode-se chegar nas seguintes conclusões:

- No fresamento frontal assimétrico, predominantemente discordante, o principal contribuinte para o desgaste da ferramenta utilizada, na usinagem do aço inoxidável 15-5 PH, é a espessura inicial do cavaco igual a zero. Observou-se no instante da entrada do dente o alto atrito descrito pela literatura. Os esforços iniciais nesta entrada são de sentido contrário ao corte do inserto, evidenciando a deformação plástica/elástica ocorrida;
- Para os parâmetros de corte utilizados neste trabalho, os melhores resultados, quanto ao tempo de vida da ferramenta, foram obtidos quando utilizado o maior avanço. Isso ocorreu devido aos menores atritos na entrada do dente para estes avanços; ao menor número de vezes em que a ferramenta esteve nestas condições de atrito e ao melhor escoamento do cavaco, uma vez que avanços maiores geram o chamado fluxo lateral de cavaco;
- O aumento da velocidade de corte teve diminuição direta na vida da ferramenta, resultado que era esperado, uma vez que velocidades de corte maiores implicam em temperaturas maiores de corte. Portanto, desgastes maiores. Confirmando, desta forma, as teorias existentes;
- Houve aumento nos esforços de corte para as ferramentas desgastadas, quando comparadas com as ferramentas novas, uma vez que há o aumento na área de contato, que por sua vez corrobora para o aumento do atrito, de acordo com a teoria. Estes esforços também aumentaram quando os avanços foram aumentados, uma vez que a seção do cavaco é diretamente proporcional ao avanço;

- Para as velocidades de corte testadas, não encontrou-se correlação nos esforços. Comportamento semelhante foi observado para as duas geometrias testadas: inserto de geometria neutra e inserto de geometria positiva, quando no início e seu fim de vida. Portanto, a redução da vida quando aumentada a velocidade de corte, se deu, sobretudo, às temperaturas maiores geradas pelo processo;
- O mecanismo de desgaste mais comum encontrado nas ferramentas testadas foi a ocorrência de pequenos lascamentos, oriundos do fenômeno conhecido como *attrition*, uma vez que foi observado adesão de material da peça na ferramenta. Adesão que, provavelmente, teve sua maior parcela de contribuição ocorrida na entrada do dente da ferramenta, onde os atritos foram elevados;
- O comportamento das forças radiais e tangenciais quando analisadas no regime da frequência não apresentaram indícios de auto-excitações. No entanto, quando passadas por um filtro passa alta, encontrou-se algumas excitações em frequências mais elevadas. Estas, por sua vez, poderiam contribuir para vibrações que teriam reflexos diretos na vida da ferramenta.

Para trabalhos futuros pode-se citar como sugestões:

- Estudar e analisar as forças na entrada e saída do corte, onde as mesmas apresentam picos elevados, sobretudo no sentido de movimento do corte;
- Realizar testes em outro material, para averiguar o comportamento e semelhanças dos esforços na entrada de dente da ferramenta;
- Estudar os esforços de corte e sua relação com a vida da ferramenta no fresamento de faceamento, para o corte concordante.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALTINTAS, Y. *Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design*. 1 ed. New York: Cambridge University Press, 2000. 286 p.

AK STEEL, Stainless steel, 2011

Disponível em < http://www.aksteel.com/markets_products/stainless> Acesso em 7 de Novembro de 2011

ARAI, R. **Estudo teórico-experimental do efeito da flexão da ferramenta no processo de microfresamento**. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

ASM Handbook, 1997. Machining. Vol. 16, p. 681-707.

BELEJCHACK, P. Machining stainless steel. *Advanced materials and process*, n. 12, p. 23-25, 1994

BRAUN, S. **Mechanical Signature Analysis: theory and applications**. London: Academic Press, 1986. 385p.

CALLISTER, W.D. Endurecimento por precipitação. In:_____. **Ciência e engenharia de materiais**, uma introdução. 7st Ed. Utah: Livros técnicos e científicos editora S.A., 2008. Cap. 11.9, p. 292-297.

CASTELETTI, L.C. **Avaliação da resistência ao desgaste de aços inoxidáveis endurecíveis por precipitação nitretados**: In: IX SEMINÁRIO BRASILEIRO DE AÇO INOXIDÁVEL, 2008, São Paulo. Anais... São Paulo: Comitê da tecnologia, p. 179-183.

CHAE, J.; PARK, S. S. FREIHEIT, T. **Investigation of micro-cutting operations**. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. Vol 46, n. 3-4, p. 313-332, Mar. 2006.

DAHL, J.M.; MARTIN, J.W. **Stainless aerospace alloy offers superior machinability**, *Advanced Materials & Processes*, May, v.159, p.67, 2001

DINIZ, A.D.; MARCONDES, F.C.; COPPINI, N.L. **Forças e Potências de Corte**. In:_____. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 7st Ed. São Paulo: Artliber, Cap. 4, p. 57-74, 2010.

ENGIN, S.; ALTINTAS, Y. **Mechanics and Dynamics of general milling cutter**. Part I: Helical end mills. International Journal Of Machine Tool & Manufacture v.41, p.2195-2212, 2001.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo: Editora Edgard Blucher LTDA. 1977.

FERRARESI, D. Introdução. In:_____. **Usinagem dos metais**. São Paulo: Editora Edgard Blucher LTDA., 1970. V. 1

GENNARI JÚNIOR, W.; MACHADO, A.R. **Melhoria na usinabilidade dos aços inoxidáveis**, Máquinas e metais, São Paulo, n.404, p. 84-98, 1999

KRABBE, D. F., **Otimização do fresamento do aço inoxidável aeronáutico 15-5 PH. 2006**. 119 f. Dissertação (Mestrado) -Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.

KULL NETO, HENRIQUE; **Uma contribuição ao estudo do fresamento de liga de titânio: vida de ferramenta, forças de corte e rugosidade da peça**. Dissertação de Mestrado - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2013.

MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO R. T.; SILVA, M. B. **Teoria da usinagem dos metais**. São Paulo: Edgard Blucher, 2009. 371p.

MARIANO, N.A. et al. **Caracterização da temperabilidade e das curvas de transformação de fase de aços inoxidáveis martensítico do tipo FeCrNi**. Revista Escola de Minas, Ouro Preto 60(1), p.163-167, 2007.

MESQUITA, R.A. BARBOSA, **Desenvolvimento de aço com usinabilidade melhorada e aços endurecíveis por precipitação para moldes de plástico**. Tecnologia em metalurgia e materiais, v.1,n.4, p.11-15, 2005.

NBR 6162, Movimentos e relações geométricas na usinagem dos metais, 1989

NAKAYAMA, K & ARAI, M.; **On the storage of data on metal cutting forces**, annals of the CIRP, vol. 15/1/76, pp. 13-18, 1976.

NEVES, D. **Uma contribuição ao fresamento de matrizes com fresa de topo esférica**. F. 142 Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

NUNES, L.P; KREISCHER, A.T. **Introdução a metalurgia e aos materiais metálicos**. Rio de Janeiro: Editora Interciência Ltda. Cap. 4.3.3, p. 70-73, 2010.

ÖZEL, T.; LIU, X.; DHANORKER, A. **Modeling and Simulation of Micro-Miling Process**. Proceeding of the 4th International Conference and Exhibition on Design and Production of Machines and Dies/Molds, Cesme, Turkey, 21-23 Jun. 2007

QUINTANA, G.; CIURANA, J. **Chatter in machining processes: A review**. International Journal of Machine Tools & Manufacture, v. 51, p. 365-376, 2011.

ROSS, R.B. Chromium. In:_____. **Metallic materials specification handbook**. 4st ed. London: Chapman & Hall, Cap. 12, p. 83-84 e Cap. 44, p.295, 1992.

SANTOS, R.G.. Sistema ferro-carbono. In:_____. **Transformações de fases em materiais metálicos**. Campinas: Editora da Unicamp, 2006. Cap. 10, p. 363-397.

SANTOS, R.G.. Transformação martensítica. In:_____. **Transformações de fases em materiais metálicos**. Campinas: Editora da Unicamp, 2006. Cap. 11, p. 399-408.

SANDVIK CATALOG - **Milling**, 2012

SILVA, G. J. Fadiga no aço inox 15-5PH revestido por HVOF: aplicação em trem de pouso. 2011. 94f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

SOORAJ V. S., JOSE MATHEW; **An experimental investigation on the machining characteristics of microscale end milling**, Manuf Technol (2011) 56:951-958.

SHAW, M. C.; **Metal cutting principles**, Oxford : Claredon, 1986. 594p.

TEIXEIRA FILHO, F. **A utilização do fluido de corte no fresamento do aço inoxidável 15-5PH.** 206 f. Tese (doutorado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.

VENTURA, CARLOS EIJI HIRATA, **Estudo dos esforços de corte no processo HSM aplicado à abertura de cavidades.** Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

VENTURA, C.E.H.; HASSUI, A.; MARQUES, M.D. **Avaliação de diferentes entradas da ferramenta no fresamento da liga Ti-6Al-4V.** 6º Congresso brasileiro de engenharia de fabricação, Caxias do Sul, 2011.

VOSOUGH, MANOUCHEHR; SCHULTHEISS, FREDRIK; AGMELL, MATHIAS; STÅH, JAN-ERIC **A method for identification of geometrical tool changes during machining of titanium alloy Ti6Al4V.** Springer-Verlag London Limited 2011.

WAN, M. LU, M. ZHANG W. YANG, Y. **A new ternary-mechanism model for the prediction of cutting forces in flat end milling.** International Journal of Machine Tools & Manufacture 57 (2012) 34-35.

ZANUTO, R. S. **Avaliação de diferentes estratégias de entrada no fresamento do aço inoxidável 15-5 PH.** Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.

ZHENG, LU., CHIOU, Y. S., LIANG, S. Y. **Three dimensional cutting force analysis in end milling.** International Journal Of Mechanical Science, v.3, p.259-269, 1996.

ANEXO A - Espectros das forças

Nas figuras abaixo estão ilustrados os espectros de todas as condições ensaiadas.

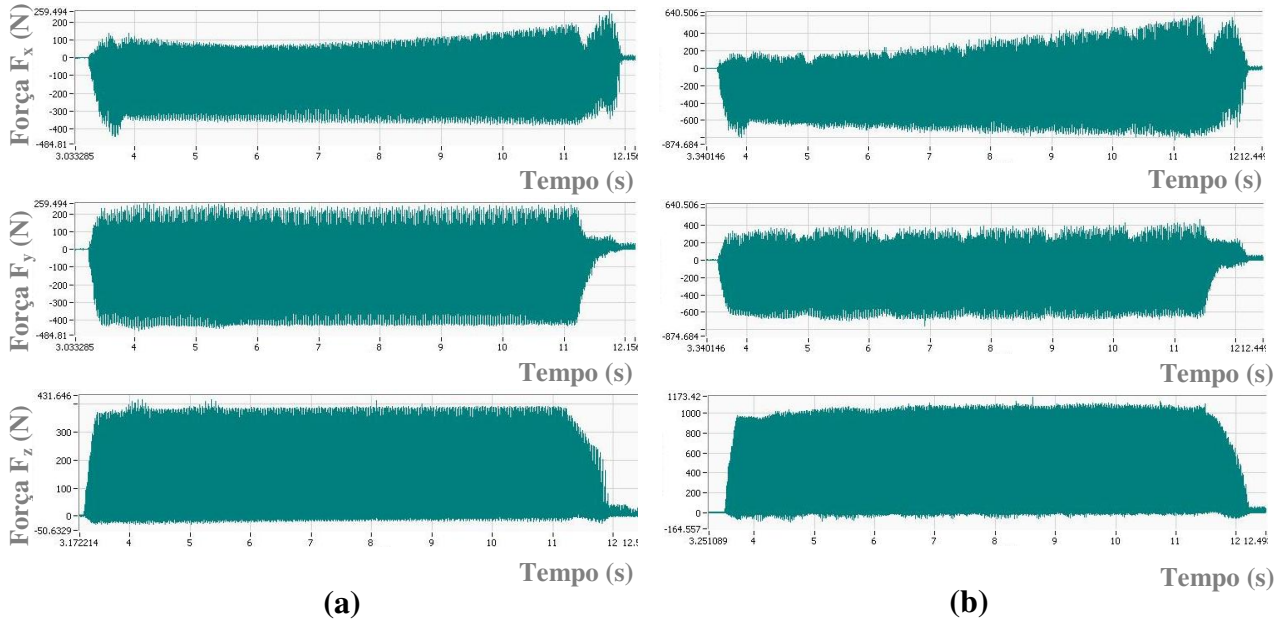


Figura 3.23 - Espectro da força (Newton): (a) Neutra/Nova e (b) Neutra/Fim ambas com v_c 195mm/min e f_z de 0,15mm/dente

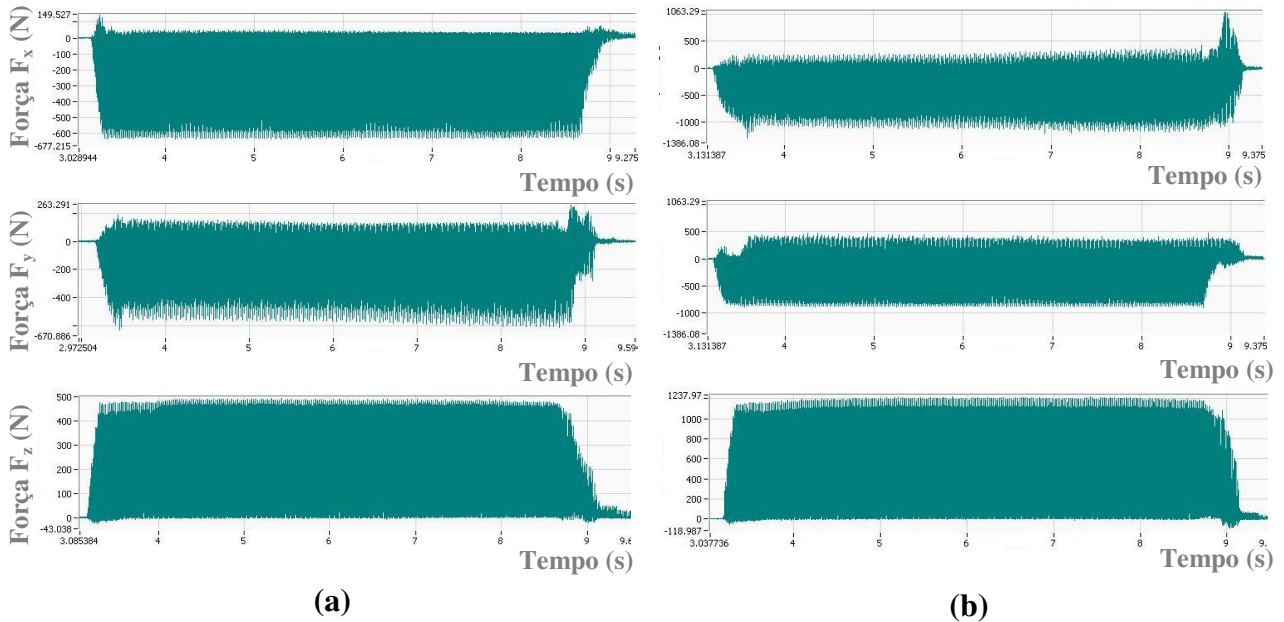


Figura 3.24 - Espectro da força (Newton): (a) Neutra/Nova e (b) Neutra/Fim ambas com v_c 170mm/min e f_z de 0,25mm/dente

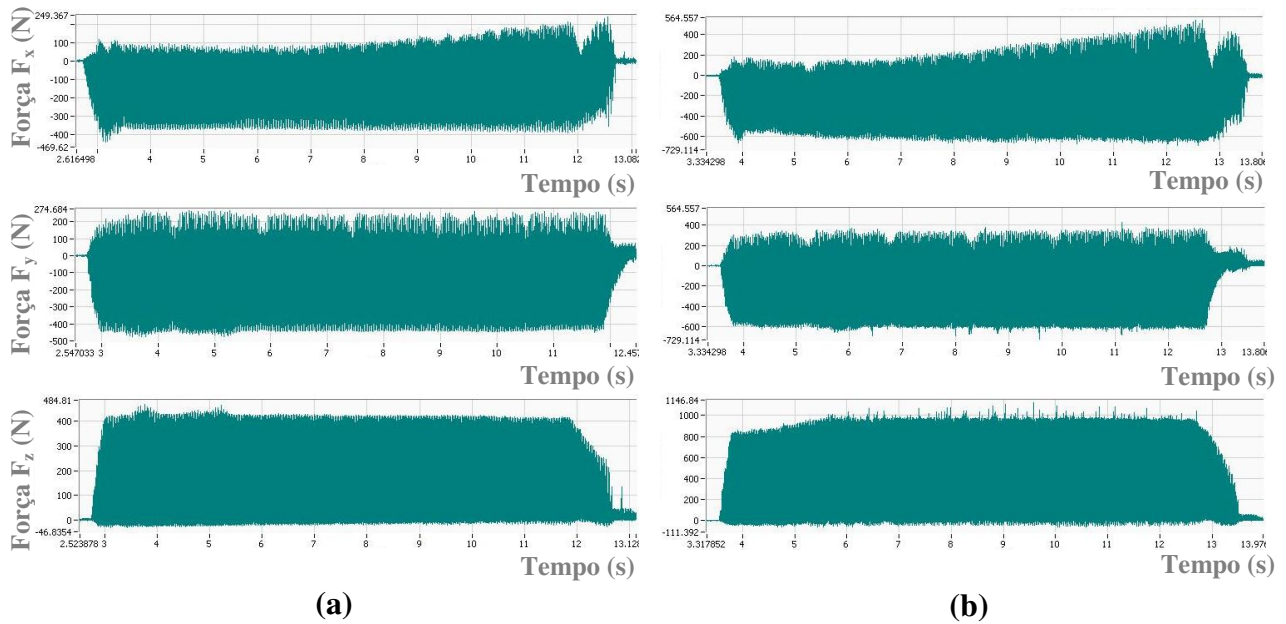


Figura 3.25 - Espectro da força (Newton): (a) Neutra/Nova e (b) Neutra/Fim ambas com v_c 170mm/min e f_z de 0,15mm/dente

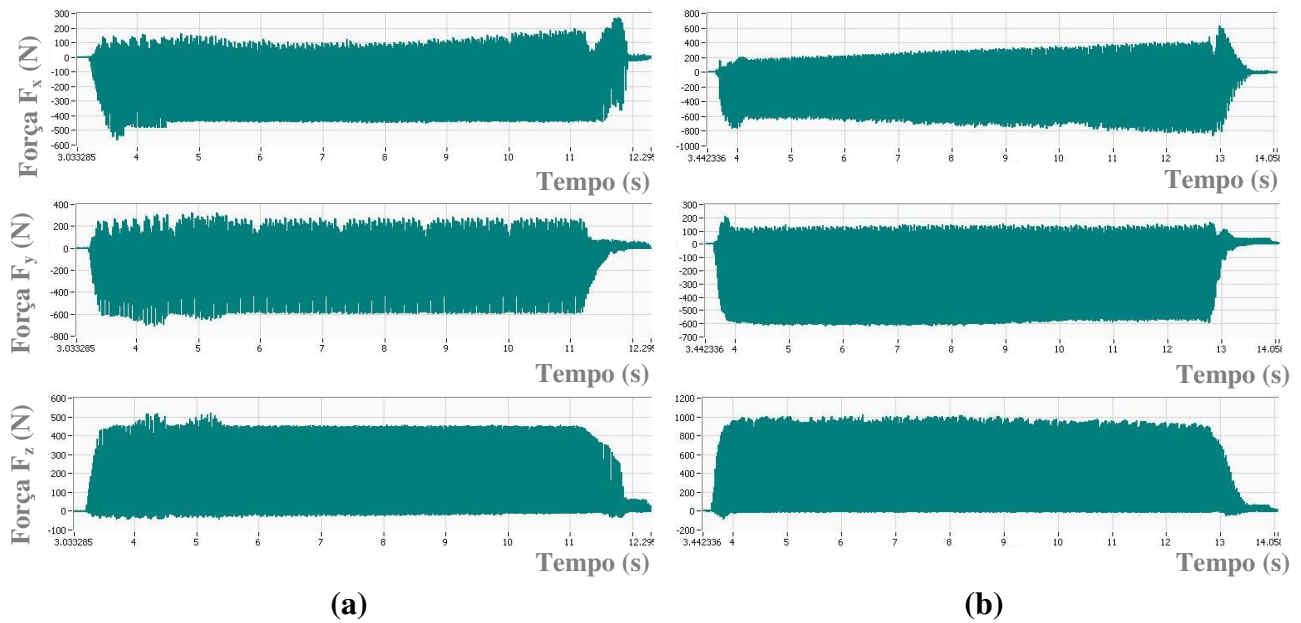


Figura 3.26 - Espectro da força (Newton): (a) Positiva/Nova e (b) Positiva/Fim ambas com v_c 195mm/min e f_z de 0,15mm/dente

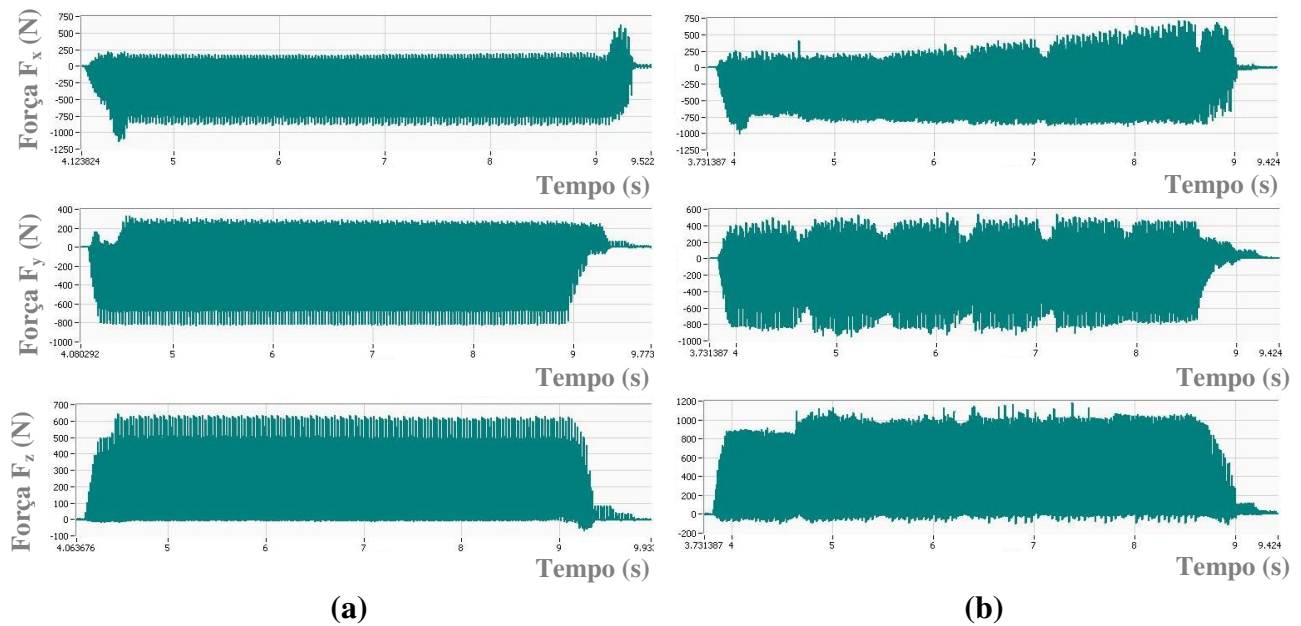


Figura 3.27 - Espectro da força (Newton): (a) Positiva/Nova e (b) Positiva/Fim ambas com v_c 195mm/min e f_z de 0,25mm/dente

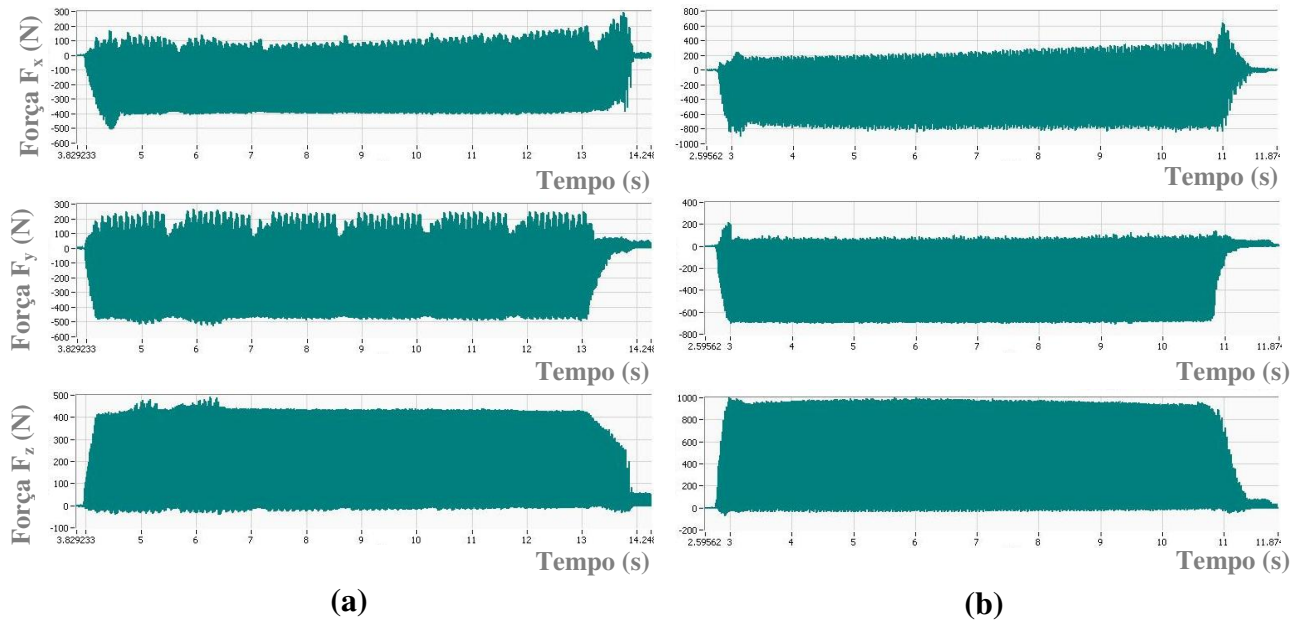


Figura 3.28 - Espectro da força (Newton): (a) Positiva/Nova e (b) Positiva/Fim ambas com v_c 170mm/min e f_z de 0,15mm/dente

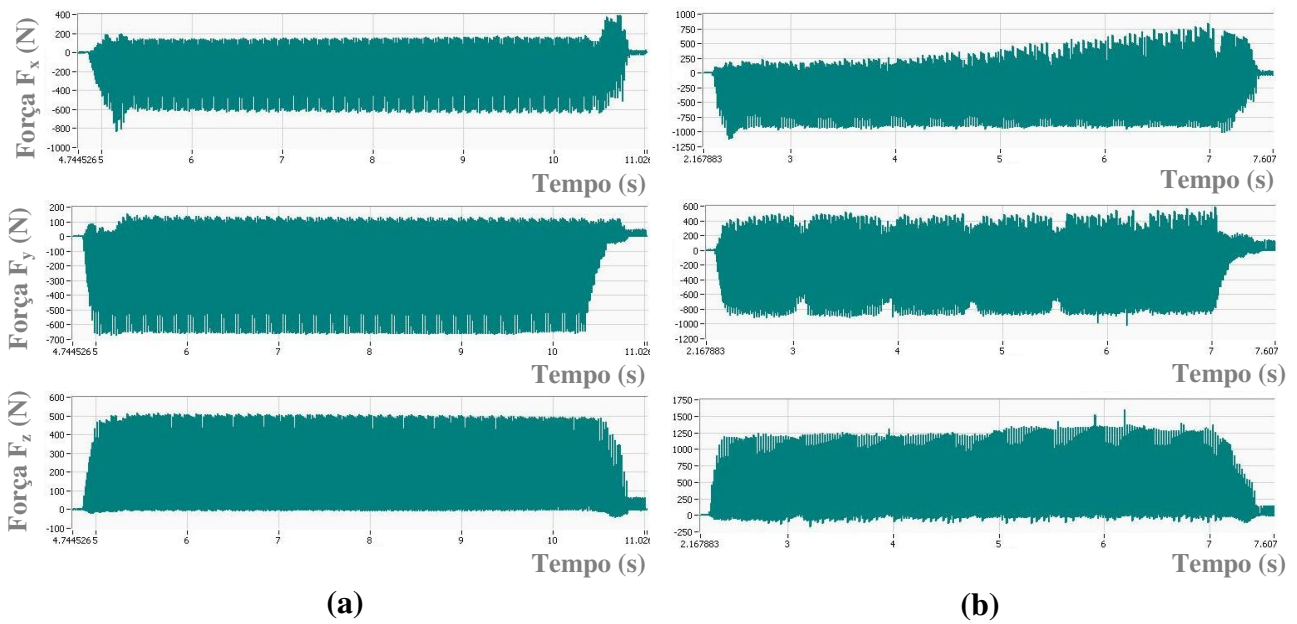


Figura 3.29 - Espectro da força (Newton): (a) Positiva/Nova e (b) Positiva/Fim ambas com v_c 170mm/min e f_z de 0,25mm/dente