



Rodolfo de Souza Zanuto

Avaliação de diferentes estratégias de entrada no fresamento do aço inoxidável 15-5 PH

112 /2012

CAMPINAS
2012



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

Rodolfo de Souza Zanuto

**Avaliação de diferentes estratégias de entrada
no fresamento do aço inoxidável 15-5 PH**

Orientador: Prof. Dr. Amauri Hassui

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.

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDA À VERSÃO
FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELO
ALUNO RODOLFO DE SOUZA ZANUTO E
ORIENTADA PELO PROF. DR. AMAURI HASSUI

A handwritten signature in blue ink, which appears to read "Amauri Hassui", is written over a horizontal line. The signature is stylized and cursive.

ASSINATURA DO ORIENTADOR

CAMPINAS, 2012

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

Z173a Zanuto, Rodolfo de Souza
 Avaliação de diferentes estratégias de entrada no
 fresamento do aço inoxidável 15-5 PH / Rodolfo de
 Souza Zanuto. --Campinas, SP: [s.n.], 2012.

 Orientador: Amauri Hassui.
 Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de
 Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

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

Título em Inglês: Evaluation of different milling entry strategies in the 15-5 PH
stainless steel

Palavras-chave em Inglês: Milling, Stainless steel

Área de concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Titulação: Mestre em Engenharia Mecânica

Banca examinadora: Iris Bento da Silva, Izabel Fernanda Machado

Data da defesa: 30-07-2012

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

**Avaliação de diferentes estratégias de entrada
no fresamento do aço inoxidável 15-5 PH**

Autor: Rodolfo de Souza Zanuto

Orientador: Prof. Dr. Amauri Hassui

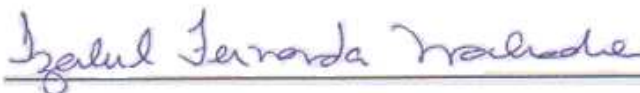
A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:



Prof. Dr. Amauri Hassui, Presidente
Universidade Estadual de Campinas



Prod. Dr. Iris Bento da Silva
Universidade Estadual de Campinas



Prof. Dr. Izabel Fernanda Machado
Escola Politécnica da USP

Campinas, 30 de Julho de 2012.

Dedicatória:

- Dedico este trabalho a meus pais, José Luiz e Cleusa, pela minha concepção e formação enquanto ser humano.
- A minha querida companheira Luciana, que me acompanhou nesta jornada, tornando-a mais colorida.
- A meu irmão de sangue Felipe e todos os demais irmãos da humanidade terrestre que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento deste.

Agradecimentos

Em primeiro lugar a Deus por permitir que até aqui eu chegasse.

Ao Prof. Dr. Amauri Hassui pela oportunidade de desenvolver este trabalho, pelos ensinamentos, pela orientação e recursos disponibilizados.

Ao Prof. Dr. Anselmo Eduardo Diniz pela disponibilização do laboratório e equipamentos de usinagem.

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

A Técnica Claudinete pela disponibilização do laboratório e realização dos ensaios de MEV e EDS que contribuíram com este trabalho.

Aos parceiros Sandvik, Villares e Blaser pelo fornecimento de ferramentas de usinagem, aço inoxidável 15-5 PH e fluido de corte respectivamente

A CAPES pela bolsa de estudos.

Aos colegas de curso, docentes e secretárias do departamento que sempre estiveram dispostos a ajudar.

À minha família pela compreensão e apoio em mais esta etapa da vida.

“Buscando a Consciência, decidi fazer com Amor...”

Resumo

Com o rápido avanço tecnológico que o mundo vem passando desde a revolução industrial, novos materiais vão sendo desenvolvidos a todo momento, sendo o aço inoxidável aeronáutico 15-5 PH um destes exemplos contemporâneos, com grande potencial de aplicações, no entanto, ainda com poucas informações de como processá-lo. Com este cenário em mente, este trabalho tem por objetivo contribuir para a compreensão do fresamento de faceamento desse material. Para isso foram feitos ensaios de vida da ferramenta com três diferentes estratégias de entrada na peça (direta, reduzida e rolagem) para os cortes predominantemente concordante e discordante. Foram avaliadas também duas geometrias (positiva e neutra) e duas classes de ferramentas (M 40 e M 25), bem como duas velocidades de corte (170 m/min e 195 m/min) e dois avanços por dente (0,15 mm/dente e 0,25 mm/dente). Por fim, foram medidos os esforços de corte e realizada a caracterização microestrutural da ferramenta (MEV e EDS) para as três estratégias de entrada. A rugosidade também foi acompanhada ao longo de todos os ensaios. Os melhores resultados foram obtidos para a estratégia de entrada por rolagem no corte discordante, já no corte concordante não houve uma melhora quando utilizada esta estratégia. Avanços maiores também propiciaram melhores vidas, mesmo com velocidades de corte mais altas. A geometria da ferramenta neutra apresentou melhor resultado quando combinado a uma classe mais tenaz, porém se a classe da ferramenta for mais dura, uma geometria mais positiva, que propicia um corte menos severo, teve desempenho melhor.

Palavras chave: Fresamento de faceamento, estratégias de entrada para o fresamento, aço inoxidável 15-5 PH, entrada por rolagem

Abstract

The world has passing through a fast technological advance since the Industrial Revolution, so new materials have been developed every moment. The 15-5 PH stainless steel is an example of one of these new materials, with great potential of applications, nevertheless with fill information about the way of processing it. With this scenario in mind the present work has the goal of contribute to the comprehension of the face milling of this material. To achieve this several tool life tests were carried out with three different tool entry strategies in workpiece (direct, reduced and rolling) to the mainly up milling and mainly down milling. They were evaluated two cutting tool geometries (positive and neutral) and two grades (M 40 and M 25), as well as two cutting speeds (170 m/min and 195 m/min) and two feed per tooth (0.15 mm/tooth and 0.25 mm/tooth). Finally, we measured the cutting forces and did the tool microstructural characterization (SEM and EDS) for the three entry strategies. The surface roughness was also monitored throughout all experiments. The best results were obtained for the rolling entry strategy in the down milling, on the other hand, no cutting improvement when utilizing this strategy for up milling. Higher feed per tooth also resulted in longer tool lives, even with higher cutting speeds. The neutral cutting tool geometry presented better result when combined with a tougher grade, but if the tool grade is harder, then a positive geometry, that generate a less severe cut, presented better performance.

Keywords: Milling, milling entry strategies, 15-5 PH stainless steel, rolling entry

Lista de Figuras

2.1	Curva Diagrama de Schaeffler para determinação da estrutura dos aços inoxidáveis	6
2.2	Curva TTT (Tempo-Temperatura-Transformação) para dois tipos de aços Martensíticos	7
2.3	Carenagem do flap de aviões	13
2.4	Diagrama de fases binário hipotético para uma liga AB de composição C_{β}	15
2.5	Diagrama de tempo x temperatura do tratamento completo de precipitação	16
2.6	Desenvolvimento da estrutura no tratamento completo de precipitação	17
2.7	Variação do K_q em função da temperatura de tratamento de precipitação	19
2.8	Comparação da condutividade térmica de diferentes famílias de aços inoxidáveis com a do aço liga 4340	22
2.9	Operação de fresamento	24
2.10	Movimentos ativos de usinagem instantâneos	25
2.11	Plano de trabalho contendo as componentes de velocidade para o fresamento	26
2.12	(a) Fresamento tangencial e (b) Fresamento frontal	27
2.13	(a) Fresamento tangencial discordante e (b) Fresamento tangencial concordante	28
2.14	Seção do cavaco no fresamento tangencial	29
2.15	Fresamento frontal: a) simétrico comum; b) simétrico de rasgo; c) assimétrico com toda a superfície sendo fresada; d) assimétrico de rasgo	30
2.16	Direção das forças radiais nos cortes sométrico (A) e assimétrico (B) e ângulo de contato do assimétrico (C)	31
2.17	Corte assimétrico mostrando dimensão j	32
2.18	Instantes do corte no fresamento	33
2.19	Posicionamento da aresta de corte na entrada do dente na peça	34
2.20	Posicionamento da aresta de corte na saída do dente na peça	34

2.21	Cunha de corte de uma ferramenta	36
2.22	Geometria de uma pastilha	36
2.23	Ângulo de posição e distribuição de forças	37
2.24	Indicação das variáveis de uma pastilha redonda com equações para cálculo de ângulo de posição e espessura do cavaco	38
2.25	Indicação das variáveis de uma pastilha redonda com equações para cálculo de diâmetro máximo de corte e velocidade de corte	39
2.26	Tipos de desgastes de ferramenta	40
2.27	a) Microlascamentos da aresta de corte e b) Trincas térmicas	40
2.28	Rugosidade máxima teórica com e sem batimento	42
2.29	Estratégias de a) Compensação; b) Zig-zag; c) Direção única	44
2.30	Entrada direta com grande espessura de cavaco na saída	45
2.31	Estratégia de entrada reduzida	45
2.32	Entrada por rolagem, espessura de cavaco na saída bem pequena	46
2.33	Entrada hipotética ideal	47
2.34	Desgaste de flanco para diferentes estratégias de entrada	48
2.35	Ciclo de avanço variado	49
2.34	Força de usinagem e suas diversas componentes para o fresamento	50
2.35	Direção da força de corte para diferentes tipos de pastilhas	51
3.1	Fixação da peça por morsa	54
3.2	Centro de usinagem Mori-Seiki SV-40	54
3.3	Fresa de topo código sandvik R300-25T12-10L	55
3.4	Rugosímetro Mitutoyo modelo SJ-201P	56
3.5	Medição do desgaste em um microscópio estereoscópio	57
3.6	Equipamentos para aquisição dos esforços de corte	58
3.7	Ajustagem do condicionador canais: a) 1 e 2; b) 3	59

3.8	Peça fixada por uma morsa no dinamômetro com direções ortogonais padronizadas de aquisição do sinal de força de corte	59
3.9	Corpo de prova para aquisição dos esforços de corte	60
3.10	Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)	61
3.11	Visualização geral do ensaio	62
3.12	Estratégia de entrada com avanço reduzido	62
3.13	Ajuste dos parâmetros R e da para a estratégia de entrada por rolagem	63
3.14	Medição de rugosidade	64
4.1	Vida da ferramenta para as três estratégias de entrada e as quatro combinações de parâmetros testados	66
4.2	Desgaste de flanco ponto a ponto para diferentes ensaios	68
4.3	Desgaste de flanco para a entrada: a) Rolagem;	69
4.3	Desgaste de flanco para a entrada: b) Reduzida	70
4.4	Rugosidade média para diferentes ensaios	71
4.5	Perfil de rugosidade obtido para um avanço de 0,15mm/dente	71
4.6	Perfil de rugosidade obtido para um avanço de 0,25mm/dente	72
4.7	Vida para o corte predominantemente concordante (A) e discordante (B) para as três estratégias de entrada	73
4.8	Entrada para o corte predominantemente: a) concordante; b) discordante	74
4.9	Desvio padrão para diferentes estratégias de entrada	74
4.10	Rebarba na lateral da peça no corte discordante	76
4.11	Vida para as quatro ferramentas testadas	77
4.12	Esforços de corte na direção x (a) e y (b) para a entrada direta	78
4.13	Esforços de corte na direção x (a) e y (b) para a entrada reduzida	78
4.14	Esforços de corte na direção x (a) e y (b) para a entrada por rolagem	79
4.15	MEV + EDS para uma entrada por rolagem	80

4.16	MEV + EDS para uma entrada reduzida	81
4.17	MEV + EDS para uma entrada direta	82

Lista de Tabelas

2.1	Composição química do aço inoxidável 15-5 PH	12
2.2	Contração devido ao tratamento de precipitação	14
2.3	Classes de tratamento do 15-5 PH	17
2.4	Propriedades mecânicas requeridas	18
3.1	Insertos utilizados nos ensaios	56

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_a – Distância de afastamento da peça	[mm]
D_{cap} – Diâmetro conforme o a _p	[mm]
D₃ – Diâmetro nominal da fresa	[mm]
F_{ap} – Força de apoio	[N]
F_c – Força de corte	[N]
F_e – Força efetiva de corte	[N]
F_f – Força de avanço	[N]
F_p – Força passiva	[N]
F_t – Força ativa	[N]
F_u – Força de usinagem	[N]
f_z – Avanço por dente	[mm/dente]
h – Espessura de cavaco	[mm]
h_{ex} – Espessura de cavaco máxima	[mm]
iC – Diâmetro da pastilha	[mm]
j – Distância de ajustagem	[mm]
k_q – Tenacidade a fratura	[ksi/in ²]
k_s – Pressão específica de corte	[N/mm ²]
l_c – Percurso de corte	[m]
l_f – Percurso de avanço	[m]
n – Rotação	[rpm]
R – Raio de rolagem	[mm]

R_t – Rugosidade teórica	[μm]
VB – Desgaste de flanco médio	[mm]
VB_B – Desgaste de flanco máximo	[mm]
v_c – Velocidade de corte	[m/min]
v_f – Velocidade de avanço	[mm/min]
v_e – Velocidade efetiva de corte	
z – Número de dentes da fresa	

Letras gregas

α – Ângulo de saída	[$^\circ$]
β – Ângulo da aresta de corte	[$^\circ$]
φ_0 – Ângulo de contato	[$^\circ$]
κ_r – Ângulo de posição da aresta principal	[$^\circ$]

Abreviações

CBN – Nitreto de Boro Cúbico
CCC – Cúbica de Corpo Centrada
CFC – Cúbica de Face Centrada
CNC – Comando Numérico Computadorizado
CVD – Chemical Vapour Deposition (Deposição química de vapor)
EDS – Espectrometria de Energia Dispersiva de Raio-X
MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura
MQF – Mínima Quantidade de Fluido
PVD – Physical Vapour Deposition (Deposição física de vapor)
TTT – Transformação-Tempo-Temperatura
UNS – Unified Numbering System
2D – Duas Dimensões

Siglas

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AISI – American Iron and Steel Institute

ASM – American Society for Materials

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

UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO	1
2.1 – Contextualização	1
2.2 – Objetivos	2
2.3 – Estrutura do trabalho	2
2 - REVISÃO DA LITERATURA	4
2.1 – Aços inoxidáveis	4
2.1.1 – Tipos de aços inoxidáveis	5
2.1.1.1 – Aços inoxidáveis ferríticos	7
2.1.1.2 – Aços inoxidáveis martensíticos	8
2.1.1.3 – Aços inoxidáveis austeníticos	9
2.1.1.4 – Aços inoxidáveis duplex	10
2.1.1.5 – Aços inoxidáveis endurecíveis por precipitação	10
2.1.2 – Aço inoxidável 15-5 PH	11
2.1.2.1 – Tratamento térmico de endurecimento por precipitação	13
2.1.2.2 – Classes de tratamento do 15-5 PH	17
2.2 – Usinagem	19
2.2.1 – Usinabilidade	20
2.2.1.1 – Usinabilidade dos aços inoxidáveis	20
2.2.1.2 – Usinabilidade dos aços inoxidáveis endurecíveis por precipitação	22
2.2.1.3 – Usinabilidade do 15-5 PH	23
2.2.2 – Fresamento	24
2.2.2.1 – Movimentos na usinagem	25
2.2.2.2 – Velocidades na usinagem	26
2.2.2.3 – Tipos fundamentais de fresamento	27
2.2.2.3.1 – Fresamento tangencial	28
2.2.2.3.2 – Fresamento frontal	30
2.2.2.3.3 – Posicionamento da ferramenta no fresamento frontal	32

2.2.2.4 – Ferramentas utilizadas no fresamento	35
2.2.2.5 – Algumas considerações sobre pastilhas redondas	37
2.2.2.6 – Desgastes e avarias de ferramenta	39
2.2.2.7 – Vida de ferramenta	42
2.2.2.8 – Acabamento de superfícies fresadas	42
2.2.2.9 – Fluido de corte	42
2.2.3 – Estratégias de usinagem	43
2.2.3.1 – Estratégias de entrada na peça	44
2.2.3.1.1 – Estratégia de entrada direta	44
2.2.3.1.2 – Estratégia de entrada reduzida	45
2.2.3.1.3 – Estratégia de entrada por rolagem	46
2.2.3.2 – Usinagem com avanço variável	48
2.2.4 – Forças e potências de usinagem	49
3 – PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	53
3.1 – Materiais e Equipamentos	53
3.2 – Métodos para execução dos ensaios	61
4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES	66
4.1 – Primeira parte: Comparação entre as estratégias de entrada	66
4.2 – Segunda parte: Comparação entre corte concordante e discordante	72
4.3 – Terceira parte: Comparação de diferentes ferramentas	76
4.4 – Quarta parte: Medição dos esforços de corte	77
4.5 – Quinta parte: Microscopia Eletrônica de Varredura	80
5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS	84
5.1 – Conclusões	84
5.2 – Sugestões para próximos trabalhos	85
REFERÊNCIAS	87

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

O processo de globalização no qual o mundo vem passando atualmente, força as empresas cada vez mais a se adequarem aos novos materiais, processos e tecnologias, para que não fiquem para trás na grande concorrência pelo mercado consumidor, que por sua vez, exige produtos com cada vez maior qualidade e menores preços. Dentro desse contexto, o setor de usinagem não poderia deixar de se adequar às novas tecnologias, além de procurar sempre desenvolver novos métodos de trabalho, que otimizem seu desenvolvimento.

O aço inoxidável aeronáutico 15-5 PH é um desses novos materiais, que ainda apresentam pouco estudo e informações disponíveis, mas que, no entanto vem ganhando mercado devido a sua elevada resistência e dureza além de excelente resistência a corrosão, sem deixar de citar a grande gama de propriedades, que se pode obter pelo tratamento térmico de envelhecimento por precipitação com pequenas variações no tempo e temperatura de tratamento.

Dentro dos processos de usinagem, o fresamento, devido a sua grande versatilidade e capacidade de proporcionar a peça praticamente qualquer forma geométrica, é um dos que apresentam também maior complexidade, devido à grande quantidade de variáveis envolvidas no processo, como máquinas, ferramentas, estratégias e parâmetros.

Nesse contexto do fresamento, de grande número de variáveis, alterar estratégias e parâmetros de usinagem são as mudanças mais simples e rápidas que se pode fazer no chão de fábrica, uma vez que necessitam apenas mudanças na programação da máquina, que podem ser feitas pelo próprio programador, enquanto que alterar máquinas ou ferramentas envolvem geralmente muitos outros setores industriais, como almoxarifado, processos, compras, o que acabam por necessitar de maiores tempos e investimentos.

1.2 Objetivos

Tendo em mente a facilidade que se é alterar estratégias e parâmetros de usinagem, que esse trabalho tem como principal objetivo, estudar as influências de três diferentes estratégias de entrada com a ferramenta na peça, que são a direta, reduzida e rolagem, na vida da ferramenta no fresamento frontal do aço inoxidável aeronáutico 15-5 PH, para o corte concordante e o discordante.

Como objetivos secundários, serão avaliadas também duas geometrias e duas classes de ferramenta, duas velocidades de corte e dois avanços por dente. As variáveis de saída avaliadas foram o desgaste de flanco v_b , a rugosidade da peça, e os esforços de corte.

1.3 Estrutura do trabalho

No Capítulo 2, Revisão da Literatura, inicia-se por fazer a introdução sobre as ligas de aços inoxidáveis e sua usinabilidade, com um destaque maior para o 15-5 PH. Numa segunda parte, serão abordados os princípios básicos do processo de fresamento, e como estes podem influenciar na vida e em outras variáveis do processo.

No capítulo 3, Procedimentos Experimentais, são descritos os materiais e equipamentos utilizados, além dos procedimentos e métodos que tiveram o objetivo de obter respostas ou indicativos ao que foi apresentado na revisão bibliográfica.

No capítulo 4, Resultados e Discussões são apresentados os resultados obtidos utilizando-se os materiais e métodos do capítulo 3, assim como as discussões pertinentes a estes.

No capítulo 5, Conclusões e Sugestões para próximos trabalhos, estão apresentadas as principais conclusões que se pode tirar com este trabalho realizado, assim como propor novos trabalhos que possam vir a contribuir com o assunto estudado.

No capítulo 6, Referências bibliográficas, estão às bibliografias citadas nesta dissertação.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Aços inoxidáveis

Aços são ligas de ferro e carbono que contém entre 0,05% e 2% de carbono; algumas adições são feitas para todos os tipos de aços, como por exemplo manganês. Ligas de aço contém um ou mais elementos adicionais para se obter propriedades não conseguidas simplesmente com ferro e carbono (ROSS, 1992).

A maioria dos componentes metálicos mais cedo ou mais tarde se deteriora com o uso, se expostos a ambientes corrosivos. Como é impraticável eliminar a corrosão, o segredo de um bom projeto de engenharia geralmente esta no controle, e não na eliminação da corrosão (COUTINHO, 1992). Um material é dito resistente à corrosão em um determinado meio, quando ele apresenta reduzidas taxas de desgaste, compatível com a vida projetada do equipamento ou instalação, isto ocorre geralmente quando o material é capaz de passivar, ou seja, formar película de produto de corrosão autoprotetora (NUNES, KREISCHER, 2010). O método mais eficiente de se proteger um material da corrosão é adicionar elementos de liga. (STAINLESS STEEL, 1999).

Aços inoxidáveis são aços de alta liga tendo como principais elementos o níquel e o cromo, sendo este em porcentagem mínima de 11% (MACHINING, 1997). 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, selênio, podem ser acrescentados para adicionar características especiais a esses aços (STAINLESS STEEL, 1999).

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 a

corrosão e oxidação em altas temperaturas (ROSS, 1992). Aços inoxidáveis possuem excelente resistência a corrosão e a oxidação, devido à ação passivante principalmente do cromo e do níquel, a formarem um filme de óxido contínuo, aderente e estável na superfície, protegendo contra ambientes corrosivos (MARIANO et al. 2007).

2.1.1 Tipos de aços inoxidáveis

Apesar de se ter o cromo como elemento de liga principal, os aços inoxidáveis constituem uma complexa família de ligas, divididas em cinco grupos, cada um com suas características de microestrutura, elementos de liga e faixas de propriedades (MACHINING, 1997).

Os cinco grupos nos quais os aços inoxidáveis podem ser divididos são: austenítico (mais comum), martensítico, ferrítico, endurecíveis por precipitação e duplex (STAINLESS STEEL, 1999). Quatro desses grupos são caracterizados pelas suas características microestruturais (austenítico, martensítico, ferrítico e duplex), enquanto o quinto, os endurecíveis por precipitação, são fundamentados mais no tipo de tratamento (MACHINING, 1997).

Uma forma de se prever a estrutura de um aço inoxidável, é utilizando o diagrama de Schaeffler (figura 2.1), desenvolvido inicialmente para solda mais atualmente sendo generalizado para outras aplicações, bastando fazer a intersecção do eixo das ordenada (cromo equivalente) versus abscissas (níquel equivalente). Para as ligas duplex em especial, onde se tem ferrita e austenita juntas, diagramas mais precisos vem sendo desenvolvidos para esta região do diagrama de Schaeffler.

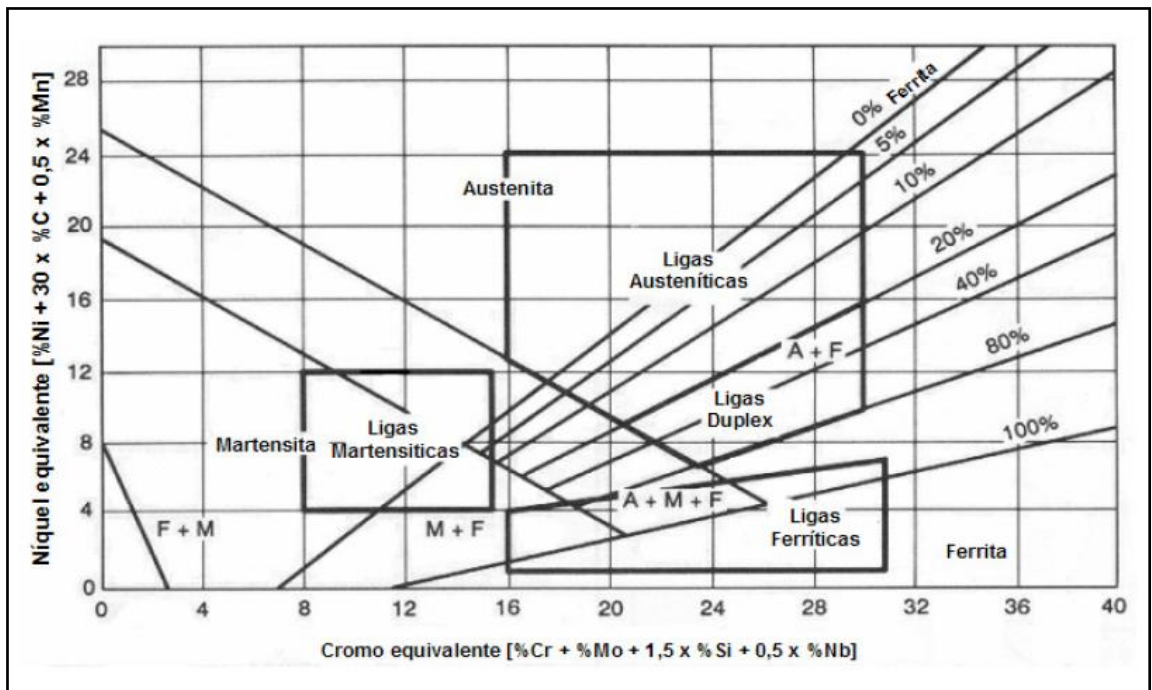


Figura 2.1 – Diagrama de Schaeffler para determinação da estrutura dos aços inoxidáveis (SCHAEFFLER, 1949; KRAUSS, 1995; MAZUROVSKY et al 2001 apud KRABBE, 2006).

Mariano et al. (2007) fizeram um estudo em dois aços inoxidáveis martensíticos com FeCrNi, procurando determinar a curva TTT (Tempo-Temperatura-Transformação) para estes, curva esta que possibilita determinar os parâmetros dos tratamentos térmicos de têmpera mais revenimento que possibilitem obter as propriedades mecânicas desejadas. Os autores concluíram que o elemento níquel teve um efeito retardador no processo de difusão do carbono e conseqüentemente na precipitação de carbonetos, deslocando o início da curva TTT para tempos maiores que 100 segundos (figura 2.2), tempo muito maior do que um aço convencional 1045, cuja curva inicia-se bem antes dos 10 segundos.

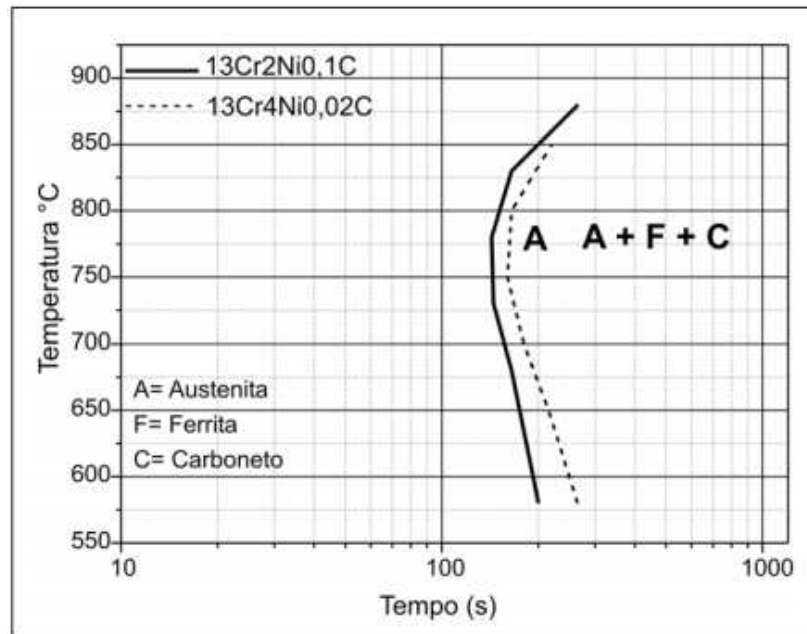


Figura 2.2 – Curva TTT (Tempo-Temperatura-Transformação) para dois tipos de aços martensíticos (MARIANO et al. 2007)

2.1.1.1 Aços inoxidáveis ferríticos

Os aços inoxidáveis ferríticos são ligas ferro-cromo contendo entre 11% e 30% de cromo e baixa porcentagem de carbono, tendo esta designação de ferrítico devido ao fato de apresentar estrutura cúbica de corpo centrada (CCC), similar a do aço em temperatura ambiente. Esses aços têm boa resistência à corrosão, são magnéticos, mas a resistência mecânica é relativamente baixa (módulo de elasticidade entre 275 e 350 MPa), não podendo ser endurecidos por tratamento térmico (STAINLESS STEEL, 1999).

A ductilidade e a tenacidade dos ferríticos são menores que a dos austeníticos, a soldagem nesses aços apresenta dificuldades associadas a sua microestrutura. A resistência à corrosão aumenta quando se aumenta seu teor de cromo e também com a de molibdênio, que torna mais estável a película passiva do aço (COUTINHO, 1992).

Dentre suas vantagens estão à resistência à corrosão e ao descascamento em temperaturas elevadas, além de apresentar também um baixo custo relativo. Alguns dos seus representantes são AISI 409, 410S, 430, 434, 436, 439, 439 aluminizado, entre outros, e suas principais aplicações estão na indústria petroquímica, de sistemas de exaustão automotivos, trocadores de calor, fornos, aparelhos e materiais alimentícios (AK STEEL, 2011).

2.1.1.2 Aços inoxidáveis martensíticos

Estes aços recebem este nome, pois através do tratamento por têmpera é possível transformar sua estrutura totalmente em martensítica (STAINLESS STEEL, 1999).

Os aços inoxidáveis martensíticos são os de maior resistência mecânica dentre os aços inoxidáveis. Estes aços têm elevados teores de carbono, o que faz com que haja a formação de carbonetos de cromo que são elementos extremamente abrasivos, influenciando assim, negativamente na vida da ferramenta de corte quando de sua usinagem (BELEJCHAK, 1997).

Na condição recozida, estes aços apresentam uma tensão de escoamento na faixa de 275 MPa, podendo ser moderadamente endurecido com trabalho a frio. No entanto, geralmente estes aços recebem tratamento térmico de endurecimento por têmpera, podendo elevar seu nível de tensão de escoamento para a faixa de 1900 MPa, dependendo do teor de carbono. Suas ligas podem apresentar também boa ductilidade e tenacidade, no entanto, menor resistência mecânica (MACHINING, 1997).

Estes aços apresentam teores de cromo na faixa de 11,5% a 18%, e teores de carbono maiores do que os ferríticos. São capazes de receberem tratamento térmico atingindo uma ampla gama de dureza e resistência. Alguns de seus representantes comerciais são os AISI 410, 410h, 420, 420HC e comercialmente são largamente utilizados em talheres e ferramentas das mais variadas utilidades (AK STEEL, 2011).

Nas últimas décadas, foram desenvolvidas novas classes de aços inoxidáveis martensíticos com baixo teor de carbono (0,01 – 0,1%), com o objetivo de atender a indústria de petróleo, por apresentarem boa resistência à corrosão em ambientes de média agressividade aliada a boa resistência mecânica, contudo, seu uso ainda é restrito pelo fato de ser um desenvolvimento recente e muitas de suas propriedades ainda serem motivo de investigação (MARIANO et al, 2007).

2.1.1.3 Aços inoxidáveis austeníticos

Esta família de aços inoxidáveis é classificada na série 20 e 30, possuem de 16% a 30% de cromo e 2% a 20% de níquel, sendo a mais popular de todas as séries. Esta popularidade é devido à sua excelente conformabilidade e resistência à corrosão, além de boa qualidade superficial e resistência ao desgaste, no entanto, não são tratáveis termicamente (AK STEEL, 2011). A presença de austenita à temperatura ambiente causa mudanças significativas de propriedades mecânicas: maior deformabilidade, tenacidade, resistência em altas temperaturas, soldabilidade e resistência à corrosão (DINIZ, MARCONDES E COPINNI, 2010). Todos os aços austeníticos são não magnéticos na condição recozida (dependendo da composição, principalmente de níquel, este aço pode-se tornar ligeiramente magnético quando trabalhado a frio). Alguns de seus representantes são os AISI 201, 301, 304, 305, 309S, 316 e tem como principais aplicações no mercado as indústrias de utensílios domésticos, guarnições automotivas, equipamentos de bebidas e alimentos (AK STEEL, 2011).

A estrutura cristalina destes aços é cúbica de face centrada (CFC) similar a do aço entre temperaturas de 900 a 1400 °C. Estes aços mantêm sua dureza em temperaturas muito abaixo de zero, como referência tem a dureza entre os aços ferríticos e martensíticos, além de poderem ser substancialmente endurecidos por trabalho a frio (STAINLESS STEEL, 1999).

Estes aços também podem ser soldados sem maiores dificuldades, não se formando estruturas frágeis (COUTINHO, 1992).

2.1.1.4 Aços inoxidáveis duplex

Ligas de aço inoxidáveis duplex possuem em sua estrutura uma mistura de ferrita e austenita, o que resulta no nome duplex, além de serem magnéticos. Na condição recozida apresentam uma tensão de escoamento na faixa de 550 MPa, ou seja, cerca de duas vezes a das ligas austeníticas padrão (MACHINING, 1997). Estes aços aliam as qualidades dos aços ferríticos e austeníticos, especialmente com relação à resistência mecânica, tenacidade e resistência à corrosão (NUNES, KREISCHER, 2010).

As ligas originais dessa classe, como a S32900, continham cromo, molibdênio e níquel o suficiente para proporcionar um equilíbrio entre as fases ferrítica e austenítica. No entanto as ligas mais recentes, como a S31803 e a S32950, também contêm nitrogênio (MACHINING, 1997).

Nitrogênio é adicionado às ligas duplex de segunda geração, o que acaba gerando soldabilidade melhorada. NITRONIC 19D e o 2205 são exemplos de aço inoxidável duplex com boa resistência a oxidação, resistência mecânica e resistência à corrosão sob tensão. Aplicações típicas para essa família de aço são trocadores de calor, tubos, vasos de pressão, tanques de petróleo, gás e produtos químicos da indústria de processamento (AK STEEL, 2011).

A produção atual dos aços inoxidáveis duplex é pequena se comparada com a dos ferríticos e austeníticos, mas é de grande importância, pois tem uma utilização bastante específica para condições severas (NUNES, KREISCHER, 2010).

2.1.1.5 Aços inoxidáveis endurecíveis por precipitação

A partir de 1945, em decorrência das necessidades das indústrias aeronáutica e aeroespacial em aços inoxidáveis com resistência mecânica e à corrosão superiores às dos aços inoxidáveis

tradicionais, aliadas a uma ductilidade adequada para operações de conformação e facilidade de soldagem, foram desenvolvidos os aços inoxidáveis endurecíveis por precipitação (CASTELETTI et al, 2008).

Essa família é assim chamada por ser capaz de passar pelo tratamento de envelhecimento por precipitação, proporcionando uma vasta gama de níveis de dureza. Essa família pode ser subdividida em austenítica, martensítica ou semiaustenítica (MACHINING, 1997).

Os semi-austeníticos são assim chamados pois apresentam-se com estrutura austenítica no estado recozido e martensítica na condição endurecida, alguns de seus representantes são o 17-7 PH, PH 15-7 Mo. Já o martensítico tem estrutura martensítica já no estado recozido, tendo como representante o 15-5 PH e o 17-4 PH. Suas principais utilizações são a indústria aeroespacial, química, petroquímica, molas planas, anéis de retenção, entre outras (AK STEEL, 2011).

As ligas mais conhecidas dessa classe apresentam em sua composição cromo e níquel, como todos os aços inoxidáveis endurecíveis por precipitação, além de cobre para ajudar no tratamento de envelhecimento e nióbio para estabilizar o carbono. Outras ligas ainda podem utilizar como agente de envelhecimento o titânio e o alumínio (MACHINING, 1997).

2.1.2 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 poderem 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), mostrado sob a designação UNS 15500.

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

Elemento	% (em massa)
Carbono	0,07 máx.
Manganês	1,0 máx.
Fósforo	0,04 máx.
Enxofre	0,03 máx.
Silício	1,0 máx.
Cromo	14,0 – 15,5
Níquel	3,5 – 5,5
Cobre	2,5 – 4,5
Nióbio + Tântalo	0,15 – 0,45

O 15-5 PH é um aço inoxidável tratável por precipitação do tipo martensítico, que possui grande alongamento e dureza, boa resistência à corrosão além de boas propriedades mecânicas em altas temperaturas. Uma vantagem é que possibilita a diminuição de empenamentos e distorção 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 tem custo menor do que as ligas de alto teor de níquel não ferrosas, encontrando como principais aplicações a indústria aeronáutica (principalmente), química, petrolífera, processamento de alimentos e papéis (AK STEEL, 2011).

Um exemplo de aplicação onde o 15-5 PH geralmente é utilizado é a carenagem do flap (flap track) de aviões, figura 2.3, onde são feitas operações de usinagem como fresamento 2D de bolsões, fresamento 2D de perfis, faceamentos e ranhuras.



Figura 2.3 – carenagem do flap de aviões (SANDVIK, 2012)

Além de uma ampla variedade de aplicações na indústria aeroespacial, como a estrutura do trem de aterrissagem de aviões, com sua elevada resistência e dureza, aliada a uma excelente resistência a corrosão, também pode ser considerados em aplicações industriais como tambor de armas, peças de válvulas, juntas, eixos, engrenagens e equipamentos de processos (DAHL E MARTIN, 2001).

Essa família de aço inoxidável é fornecida geralmente no estado recozido, no entanto, o que os torna tão especiais é a vasta gama de propriedades que se pode obter com diferentes parâmetros utilizados no tratamento térmico de endurecimento por precipitação.

2.1.2.1 Tratamento térmico de endurecimento por precipitação

Em 1906 o tratamento térmico de precipitação foi acidentalmente descoberto pelo metalurgista alemão Alfred Wilm em ligas de alumínio-cobre, chamadas também de duralumínio. Ele despendeu cerca de quinze anos até compreender completamente o processo de precipitação (ZUBEK, 2006, apud KRABBE, 2006).

O tratamento térmico por precipitação 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 haja a formação de intermetálicos (NUNES, KREISCHER, 2010).

Uma vantagem deste tratamento é o fato de apresentar distorções muito menores por não ser resfriado tão bruscamente além de variações dimensionais previsíveis (MESQUITA, BARBOSA, 2005).

Como exemplo, a tabela 2.2 mostra os valores esperados de contração para as diferentes classes de tratamento (que serão discutidas mais abaixo) que o aço inoxidável 15-5 PH pode apresentar.

Tab. 2.2 – Contração devido ao tratamento de precipitação (AK STEEL, 2011)

H 900		0.00045 (mm/mm)
H 925		0.00051 (mm/mm)
H 1025		0.00053 (mm/mm)
H 1100		0.0009 (mm/mm)
H 1150		0.0022 (mm/mm)
H 1150-M	1400 ---->	0.00037 (mm/mm)
	1150 ---->	0.00206 (mm/mm)
	∴ 1400 + 1150 -->	0.00243 (mm/mm)

Uma vez que o endurecimento por precipitação resulta do desenvolvimento de partículas de uma nova fase, a explicação do procedimento de tratamento térmico fica facilitada pelo uso de um diagrama de fases. Embora na prática, muitas ligas que podem ser endurecidas por precipitação contenham dois ou mais elementos de liga (CALLISTER, 2008), não sendo possível utilizar o diagrama de fases binário, ou seja, com apenas dois elementos.

O tratamento térmico por precipitação é constituído por duas etapas, primeiramente deve-se aplicar a solubilização, para posteriormente promover a precipitação. Para uma melhor explicação de cada etapa será utilizado o diagrama de fases binário hipotético com uma liga de composição C_0 , da figura 2.4.

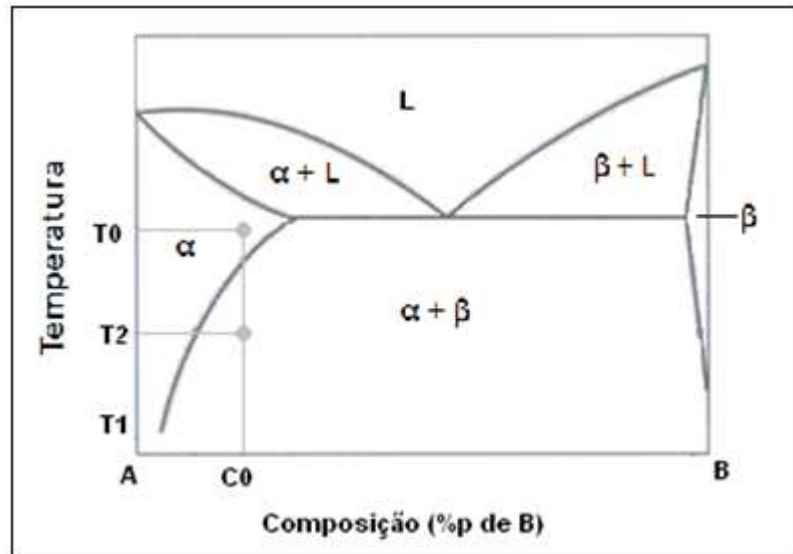


Figura 2.4 – Diagrama de fases binário hipotético para uma liga AB de composição C_0 (CALLISTER, 2008)

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 (SANTOS, 2006), para tanto, deve-se aquecer a liga até uma temperatura dentro do campo de fases α (T_0) e aguardar até que toda a fase β seja dissolvida. Esse procedimento é seguido por um resfriamento rápido até uma temperatura T_1 , o que para muitas ligas é a temperatura ambiente, na qual se previne qualquer processo de difusão e formação de fase β a ele associado (CALLISTER, 2008).

Deve-se tomar um cuidado especial apenas para que a temperatura de aquecimento não ultrapasse a temperatura eutética da liga (M), pois nas regiões entre os ramos dendríticos o teor de soluto pode atingir a composição eutética, ou seja, nessas regiões a peça funde nesta temperatura, causando a fusão parcial da peça (SANTOS, 2006).

A seguir, é feita a de precipitação, nesta etapa, visa-se promover a formação da segunda fase β na forma de partículas finas e dispersas homoganeamente no interior dos grãos cristalinos, e não mais concentradas apenas nos contornos de grão (SANTOS, 2006), para tanto, escolhe-se uma temperatura intermediária T_2 , na região bifásica $\alpha + \beta$, precipitados da fase β começam a se

formar como partículas finamente dispersas com composição C_β , após um tempo apropriado na temperatura T_2 , a liga é resfriada até a temperatura ambiente, normalmente essa taxa de resfriamento não é uma consideração importante (CALLISTER, 2008). A figura 2.5 representa o diagrama de temperatura pelo tempo do tratamento completo (solubilização + precipitação).

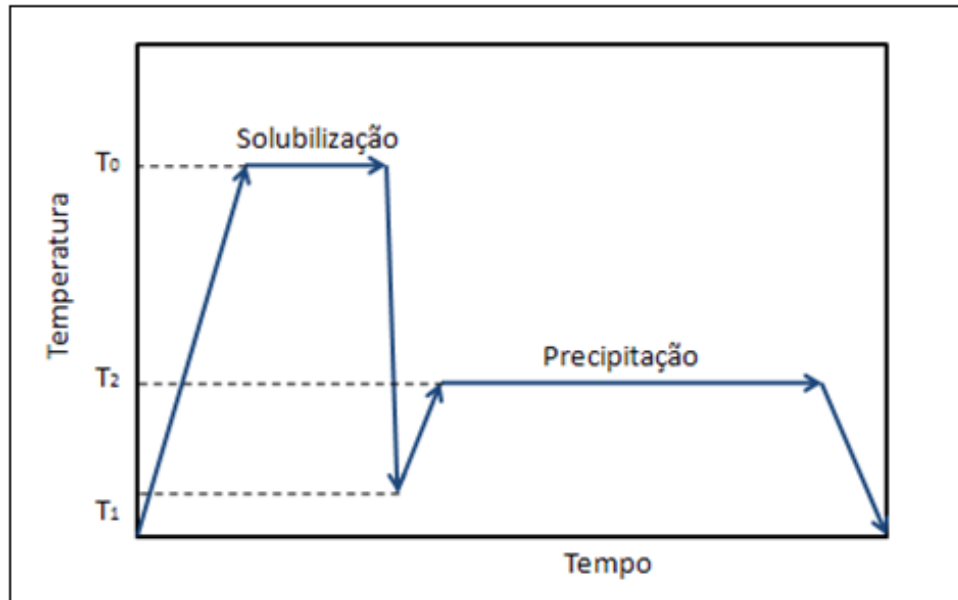


Figura 2.5 – Diagrama de tempo x temperatura do tratamento completo de precipitação

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 com a consequente deterioração das propriedades obtidas (superenvelhecimento) (SANTOS, 2006). A microestrutura representativa de todo o processo pode ser visualizado na figura 2.6.

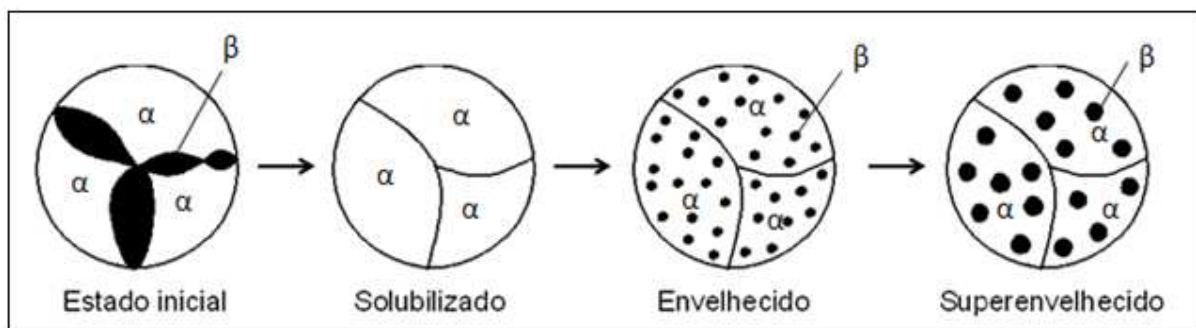


Figura 2.6 – Desenvolvimento da estrutura no tratamento completo de precipitação (SANTOS, 2006)

2.1.2.2 Classes de tratamento do 15-5 PH

Segundo o fabricante AK STEEL, 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, com diferentes tempos e temperaturas, conforme pode ser verificado na tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Classes de tratamento do 15-5 PH (AK STEEL, 2011, adaptada)

Condição	Temperatura de aquecimento	Tempo	Resfriamento
A	1038°C±14°C	Solubilização	Ar frio até < que 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 + 621°C±8°C	2 + 4 horas	Ar frio
H1150D	621°C±8°C + 621°C±8°C	4 + 4 horas	Ar frio

Quando se está trabalhando com este material, é importante ter em mente que a transformação martensítica se inicia e termina em temperaturas que são aproximadamente 132°C a 32°C respectivamente, portanto, para o tratamento de solubilização o material deve ser resfriado até abaixo de 32°C para poder se aplicar o próximo tratamento térmico (AK STEEL, 2011).

De acordo com a classe de tratamento aplicada, são requeridas como propriedades mecânicas os valores apresentados na tabela 2.4, de acordo com a SAE, (2010).

Tabela 2.4 – Propriedades mecânicas requeridas (AK STEEL, 2011, adaptada)

Condição	Tensão limite de resistência mín. (MPa)	Tensão limite de escoamento mín. (MPa)	Dureza Rockwell C
A	-	-	38 máx.
H900	1310	1170	40 mín.
H925	1170	1070	38 mín.
H1025	1170	1000	35 mín.
H1075	1000	860	32 mín.
H1100	965	790	31 mín.
H1150	930	725	28 mín.
H1150M	790	515	24 mín.
H1150D	860	725	24 mín.

No entanto, de acordo com Abdelshehid et al. (2007), o simples fato de se aplicar o tratamento térmico de solubilização nas extremidades da faixa de tolerância de temperaturas, já é suficiente para proporcionar valores de tenacidade à fratura (k_q) diferentes quando a mesma classe de tratamento de precipitação é aplicada, como verificado na figura 2.7.

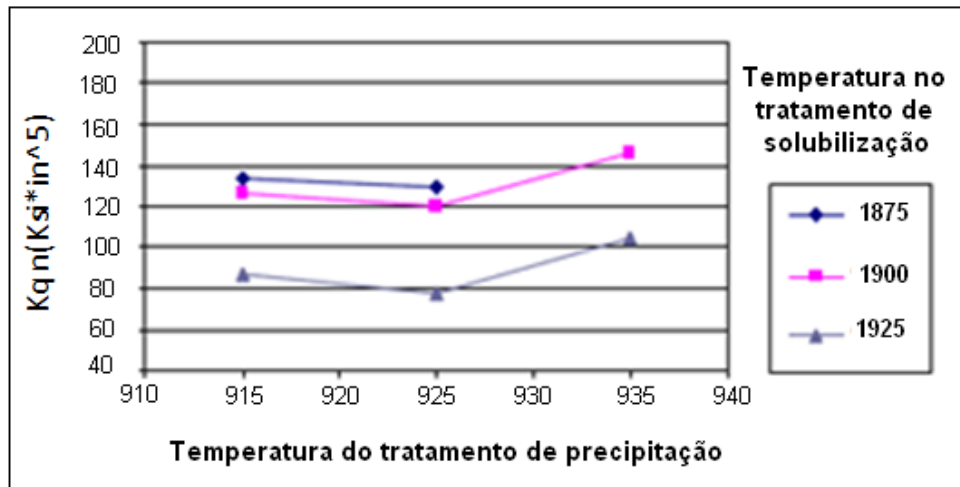


Figura 2.7 – Variação do k_q em função da temperatura de tratamento de precipitação (Abdelshehid et al, 2007)

Portanto, a característica mais importante que se pode destacar do aço inoxidável 15-5 PH é a grande gama de propriedades conseguidas com as diferentes classes de tratamentos térmicos que se pode aplicar com pequenas variações no tempo e temperatura.

2.2 Usinagem

Usinagem são processos de fabricação que ao se conferir à peça a forma, as dimensões, o acabamento, ou ainda uma combinação qualquer destes três itens, produzem cavaco. Por definição cavaco é a porção de material retirada pela ferramenta (FERRARESI, 1970).

Alguns processos de usinagem de grande utilidade na indústria são o torneamento, fresamento, furação e retificação.

Em todas as operações de usinagem, uma ferramenta em forma de cunha é forçada contra o material para remover cavaco da peça e deixar sobre esta, novas superfícies. Tudo o mais que ocorre contribui apenas para essa ação (DOYLE, 1962).

2.2.1 Usinabilidade

A usinabilidade de um metal pode ser definida como uma grandeza tecnológica, que expressa por meio de um valor numérico comparativo um conjunto de propriedades de usinagem em relação a outro tomado como padrão (FERRARESI, 1970). Ou ainda, como sendo o grau de dificuldade de se usinar um determinado material. Este grau pode ser analisado através de diversos parâmetros mensuráveis do processo, tais como vida da ferramenta, acabamento superficial da peça, esforços de corte, temperatura de corte, produtividade e características do cavaco (DINIZ, MARCONDES E COPINNI, 2010).

A usinabilidade interessa não somente aos fabricantes dos metais, como também aos consumidores, aos fabricantes de ferramenta, enfim, a todos aqueles que se envolvem na produção de peças por meio de formação de cavaco, tendo uma grande influência na produtividade de uma empresa (FERRARESI, 1970).

Diversos métodos são propostos para se medir o índice de usinabilidade de um material, sendo que o mais aceito é o chamado ensaio de longa duração, que leva em conta a vida da ferramenta. Além desse existem outros ensaios chamados de curta duração, que analisam critérios como força de usinagem e/ou acabamento superficial (DINIZ, MARCONDES E COPINNI, 2010).

2.2.1.1 Usinabilidade dos aços inoxidáveis

Segundo Villaresmetals (2009), uma das características mais valorizadas pelos consumidores de aços inoxidáveis é a sua usinabilidade. Mesquita e Barbosa (2005) atribuíram a importância da usinabilidade de um aço inoxidável endurecível por precipitação na indústria de moldes plásticos à grande quantidade de material removido, que pode totalizar mais de 6500 kg por peça.

Com o desenvolvimento tecnológico que o mercado vem exigindo, novas ligas de materiais vem sendo desenvolvidas com o intuito de se melhorar determinadas propriedades. No entanto, este desenvolvimento acaba gerando materiais de baixa usinabilidade, além disso, a tendência de se usinar componentes com maiores durezas, velocidades cada vez mais altas, e sem utilização de fluidos de corte acaba elevando os esforços de corte e a temperatura da ferramenta (MEDVEDEVA, 2008).

Os aços inoxidáveis são conhecidos por sua difícil usinabilidade, o que se traduz na usinagem com uma vida de ferramenta baixa, taxa de remoção de material limitada, forças de corte elevada, alto consumo de potência (devido à alta resistência mecânica em temperaturas elevadas) (LIN, 2002), rápido encruamento durante a usinagem e reatividade com a maioria dos materiais para ferramenta quando usinado em altas velocidades de corte. A presença de elementos como o cromo, níquel e molibdênio causa altas deformações plásticas, promovendo elevadas forças de corte e de avanço (GENNARI JUNIOR E MACHADO, 1999; BELEJCHACK, 1997).

Segundo METALS HANDBOOK (1967), algumas das características que fazem os aços inoxidáveis mais difíceis de usinar do que os aços carbono são:

- Maior limite de escoamento no estado recozido;
- Maior relação entre limite de escoamento e limite resistência;
- Maior taxa de encruamento do que dos aços carbono;
- Uma quantidade substancialmente maior de partículas de carbonetos, que causa dificuldades de usinagem devido ao aumento da dureza da matriz e grandes desgastes na ferramenta devido a partículas de carbonetos abrasivos.

Outro fator que influencia negativamente a usinabilidade dos aços inoxidáveis é a baixa condutividade térmica quando comparado com a de um aço liga ABNT 4340, como pode ser visualizado na figura 2.8. Este fator traduz-se em maiores temperaturas na região de corte, e conseqüentemente na ferramenta, acelerando fenômenos físico-químicos como difusão, perda de resistência da ferramenta, entre outros, que aumentam o desgaste da mesma.

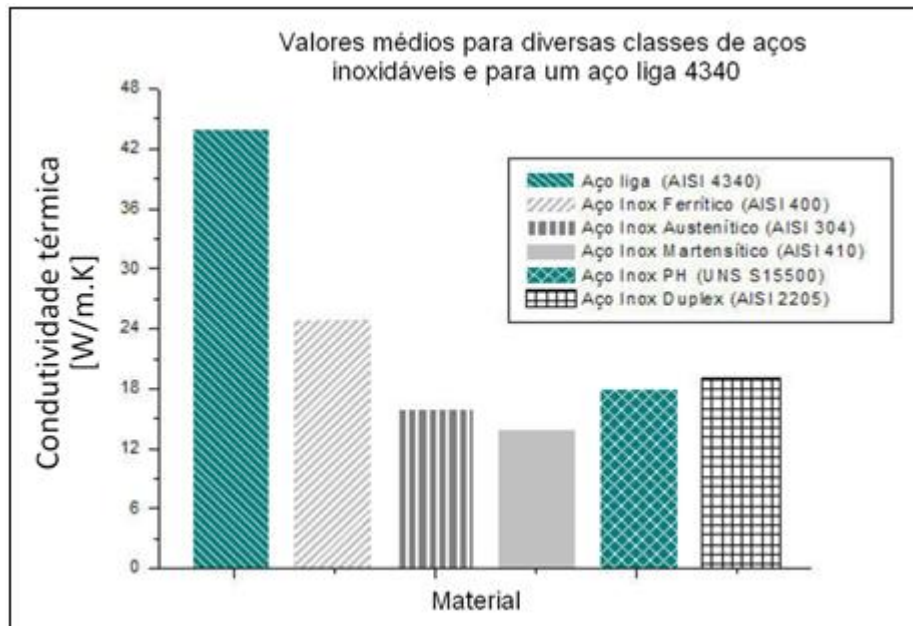


Figura 2.8 – Comparação da condutividade térmica das diversas famílias de aços inoxidáveis com a do aço liga 4340 (KRABBE, 2006)

Devido ao fato dos aços inoxidáveis não serem uma simples e bem definida liga e sim uma grande e complexa família de ligas, suas características de usinagem também variam de uma família para outra (DINIZ, MARCONDES E COPINNI, 2010).

2.2.1.2 Usinabilidade dos aços inoxidáveis endurecíveis por precipitação

Estes materiais são difíceis de serem usinados no estado recozido ou depois de tratado por solubilização. Nas suas condições de envelhecimento completo eles são ainda mais duros e resistentes à abrasão, por isso, é mais econômico usiná-los no estado solubilizado, deixando para dar o envelhecimento completo após a usinagem (ROSS, 1992).

A usinabilidade destes aços varia consideravelmente devido às diferentes estruturas que eles podem ter. As classes ferríticas são preferíveis para se usar, uma vez que possuem baixa taxa de encruamento e são relativamente frágeis, proporcionando boa quebra de cavaco. Devido

às várias classes de tratamento que se podem aplicar nesses aços, suas características de usinagem variam desde as classes ferríticas de baixo teor de cromo (de fácil usinagem) até se aproximar das classes austeníticas (mais difíceis de usinar) (METALS HANDBOOK, 1967).

A fim de se minimizar as tensões causadas pela usinagem, o material deve ser aquecido lentamente até a temperatura de envelhecimento, pois os tratamentos de alívio de tensão não se aplicam a estes aços (MESQUITA, BARBOSA, 2005).

2.2.1.3 Usinabilidade do 15-5 PH

Como visto anteriormente, o aço inoxidável 15-5PH encontra-se na família dos aços inoxidáveis que podem passar pelo tratamento térmico de endurecimento por precipitação, além disso, conforme define o fabricante AK Steel, é a versão sem ferrita do aço inoxidável 17-4 PH, apresentando no estado recozido uma estrutura martensítica.

Sabe-se também que a porcentagem de carbono neste aço é muito baixa (0,07% máximo), podendo portanto ser classificado no estado recozido como sendo um aço inoxidável martensítico de baixo carbono, ou seja, tem suas características de usinagem parecidas com as dos aços de baixo carbono, com níveis de dureza um pouco maiores.

Pouquíssimas informações se têm disponível em relação à usinabilidade deste aço, mesmo porque ainda é uma liga relativamente nova. No entanto, por se tratar de um aço martensítico de baixo carbono, caso se usine no estado solubilizado, sem presença de precipitados de outras fases, não se espera grandes dificuldades.

A usinabilidade depende do material que será usinado, bem como das condições de usinagem, características da ferramenta, condições de refrigeração e lubrificação, rigidez do sistema máquina-ferramenta-peça-dispositivo de fixação e tipos de trabalho executado pela ferramenta (operações empregadas, corte contínuo ou intermitente, condições de entrada e saída da ferramenta) (DINIZ, MARCONDES E COPINNI, 2010). Portanto, além de se conhecer o material a ser usinado, é necessário também conhecer todos estes outros fatores envolvidos no processo a fim de se obter a melhor solução.

2.2.2 Fresamento

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

A ferramenta chamada fresa é provida de arestas cortantes dispostas 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, fixa 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), a figura 2.9 mostra esquematicamente uma operação de fresamento com seus movimentos principais.

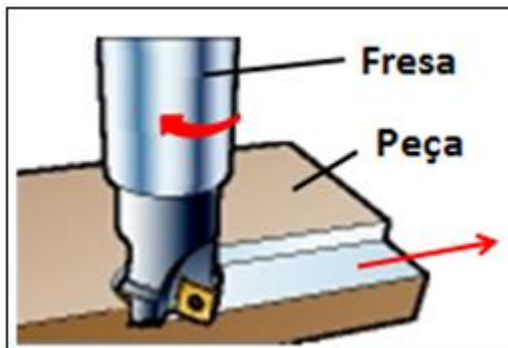


Figura 2.9 – Operação de fresamento (SANDVIK, 2012, adaptado)

O fresamento é tido como uma das mais importantes operações de usinagem, devido a sua grande versatilidade e condições de oferecer uma vasta gama 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. (SANDVIK, 2012)

2.2.2.1 Movimentos na usinagem

Os movimentos no processo de usinagem são relativos entre a peça e a aresta cortante, sendo que por convenção, sempre é considerado como a peça estática e a ferramenta realizando todos os movimentos. A associação brasileira de normas técnicas (ABNT) através da NBR 6162 é a responsável pela terminologia adotada a seguir.

Os movimentos de corte podem ser classificados como passivos ou ativos. Os ativos são aqueles que promovem remoção de material ao ocorrerem, sendo eles: movimento de corte e movimento de avanço, além do movimento efetivo de corte que é a união dos dois, como pode ser visto na figura 2.10.

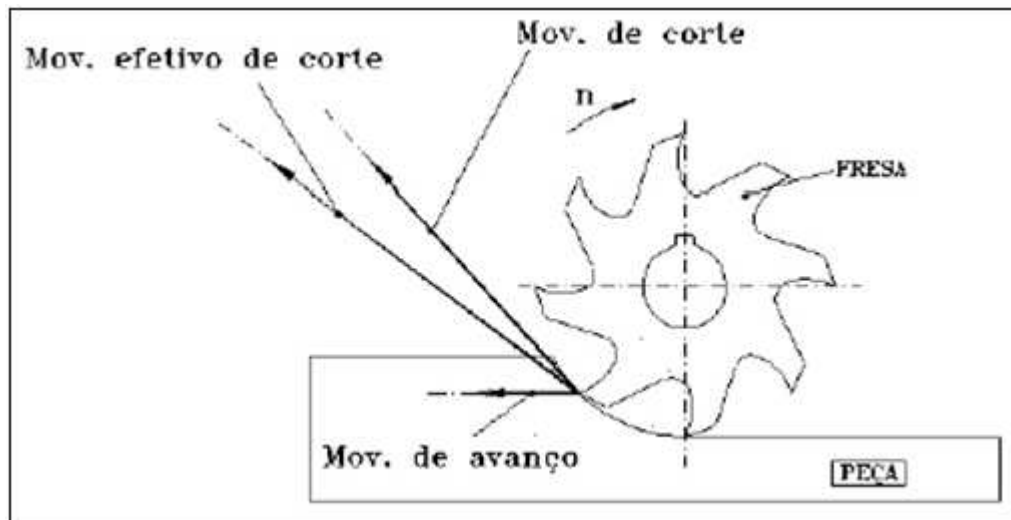


Figura 2.10 – movimentos ativos de usinagem instantâneos (FERRARESI, 1970)

Já os movimentos passivos são aqueles que apesar de fundamentais para que a usinagem ocorra, não removem material, sendo eles: movimento de ajuste, movimento de correção, movimento de aproximação e movimento de recuo.

2.2.2.2 Velocidades na usinagem

Devem-se distinguir a velocidade de corte (v_c), a velocidade de avanço (v_f) e a velocidade efetiva de corte (v_e), figura 2.11.

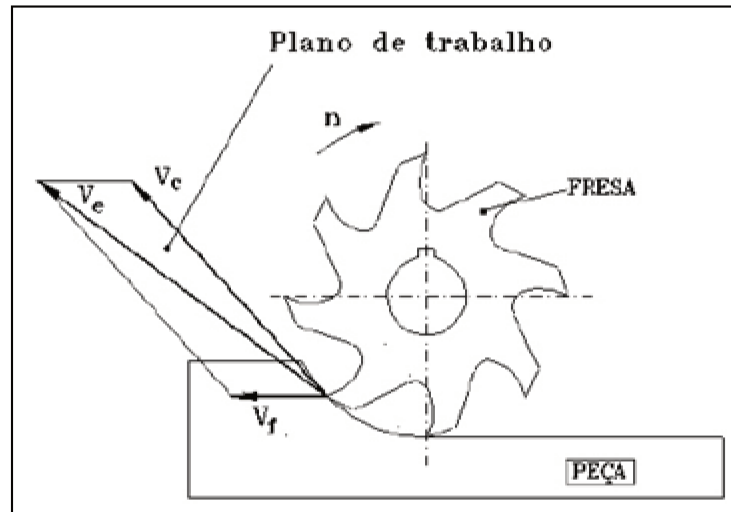


Figura 2.11 - Plano de trabalho contendo as componentes de velocidade para o fresamento (FERRARESI, 1970)

- Velocidade de corte (v_c) é a velocidade tangencial instantânea resultante da rotação da ferramenta em torno da peça, sendo dada em m/min, podendo ser determinada pela equação 2.1, onde d é o diâmetro da ferramenta (mm), n a rotação da ferramenta (rpm) e 1000 apenas para acertar a unidade.

$$v_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} \quad (2.1)$$

- Velocidade de avanço (v_f) é a velocidade instantânea da ferramenta segundo a direção e sentido de avanço, podendo ser dada diretamente em quantidade de

deslocamento (mm/min) ou no caso do fresamento, calculada pela equação 2.2, pelo produto do número de dentes da fresa (z), da rotação da ferramenta (n) e do avanço por dente (f_z), que é a distância linear entre duas superfícies em usinagem consecutivas.

$$v_f = f_z \cdot z \cdot n \quad (2.2)$$

- Velocidade efetiva de corte (v_e) é a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante, segundo a direção efetiva de corte. Ou seja, a combinação entre a velocidade de corte e a velocidade de avanço.

2.2.2.3 Tipos fundamentais de fresamento

Primeiramente, pode-se classificar o fresamento segundo a posição do eixo-árvore como horizontal (quando o eixo árvore esta na posição horizontal), vertical ou inclinado. Outra distinção pode ser feita de acordo com a disposição dos dentes ativos da fresa, classificando o fresamento em tangencial (figura 2.12a - o eixo da fresa é paralelo à superfície que está sendo gerada) ou frontal (figura 2.12b - o eixo da fresa é perpendicular à superfície que está sendo gerada), (DINIZ, MARCONDES E COPINNI, 2010).

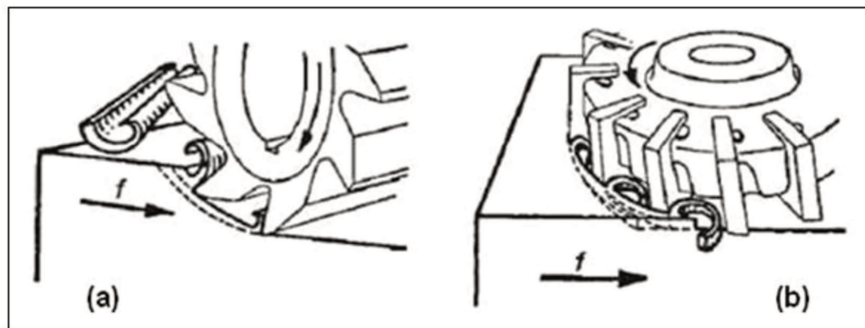


Figura 2.12 – (a) Fresamento tangencial e (b) fresamento frontal (FERRARESI, 1970)

2.2.2.3.1 Fresamento tangencial

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2010); Ferraresi (1970) e Metals Handbook (1967), o fresamento tangencial pode ser classificado em discordante (quando o sentido do movimento de avanço é contrário ao sentido do movimento de rotação da peça, figura 2.13a) ou concordante (quando o sentido do movimento de avanço é o mesmo do sentido do movimento de rotação da peça, figura 2.13b).

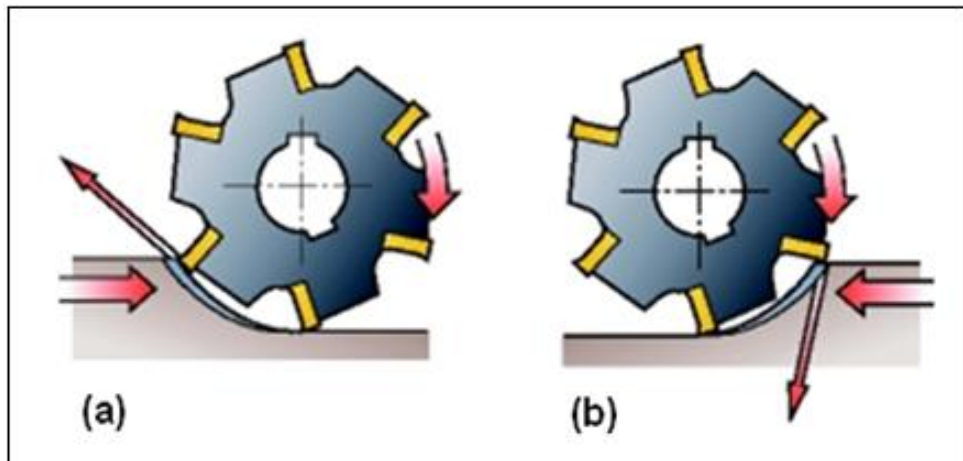


Figura 2.13 – (a) Fresamento tangencial discordante e (b) fresamento tangencial concordante (SANDVIK, 2012)

Devido à combinação do movimento de corte (rotativo) com o movimento de avanço (linear), a espessura de cavaco (h) produzido no fresamento tangencial será variável, apresentando a forma de uma vírgula. A figura 2.14 mostra a seção do cavaco para esse tipo de fresamento, no ponto “A” tem-se espessura de cavaco igual a zero, no ponto “B” tem-se espessura de cavaco máxima, e entre o ponto A e B, região conhecida como ângulo de contato (φ_0), tem-se espessura de cavaco que varia em cada ponto.

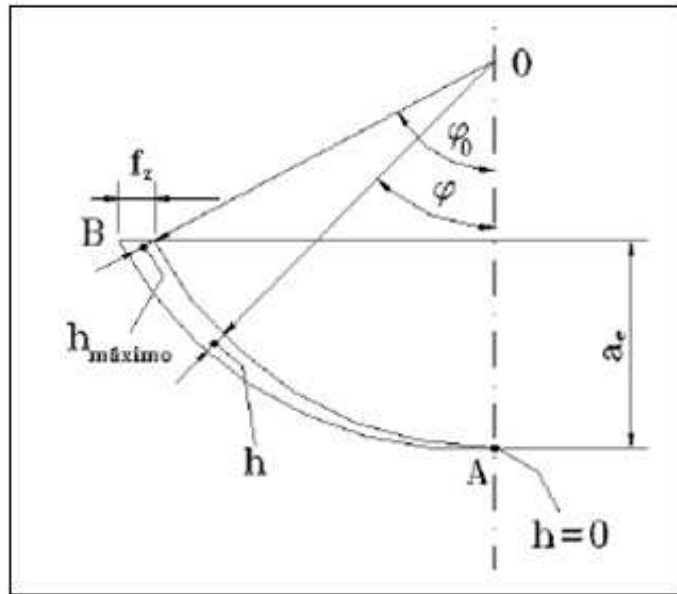


Figura 2.14 – Seção do cavaco no fresamento tangencial (DINIZ, MARCONDES E COPINNI, 2010).

No fresamento discordante, a espessura do cavaco aumenta progressivamente de zero até um valor máximo. 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 de forçar a peça contra a mesa da máquina, já 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.

No fresamento concordante esses inconvenientes são sanados, já 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 possuam muita folga (como nas fresadoras convencionais que utilizam sistema fuso-porca).

2.2.2.3.2 Fresamento frontal

O fresamento frontal pode ser classificado em simétrico comum (quando o deslocamento do eixo da fresa coincide com o eixo de simetria da ferramenta e o diâmetro da fresa é maior do que a largura da peça), simétrico de rasgo (quando o deslocamento do eixo da fresa coincide com o eixo de simetria da ferramenta e o diâmetro da fresa é menor do que a largura da peça), ou assimétrico (quando o corte não se dá sobre o eixo de simetria da peça), também podendo fresar toda a superfície da peça ou não. Aproveita-se também pela figura 2.15 para definir a largura fresada como sendo “ a_e ” (DINIZ, MARCONDES E COPINNI, 2010).

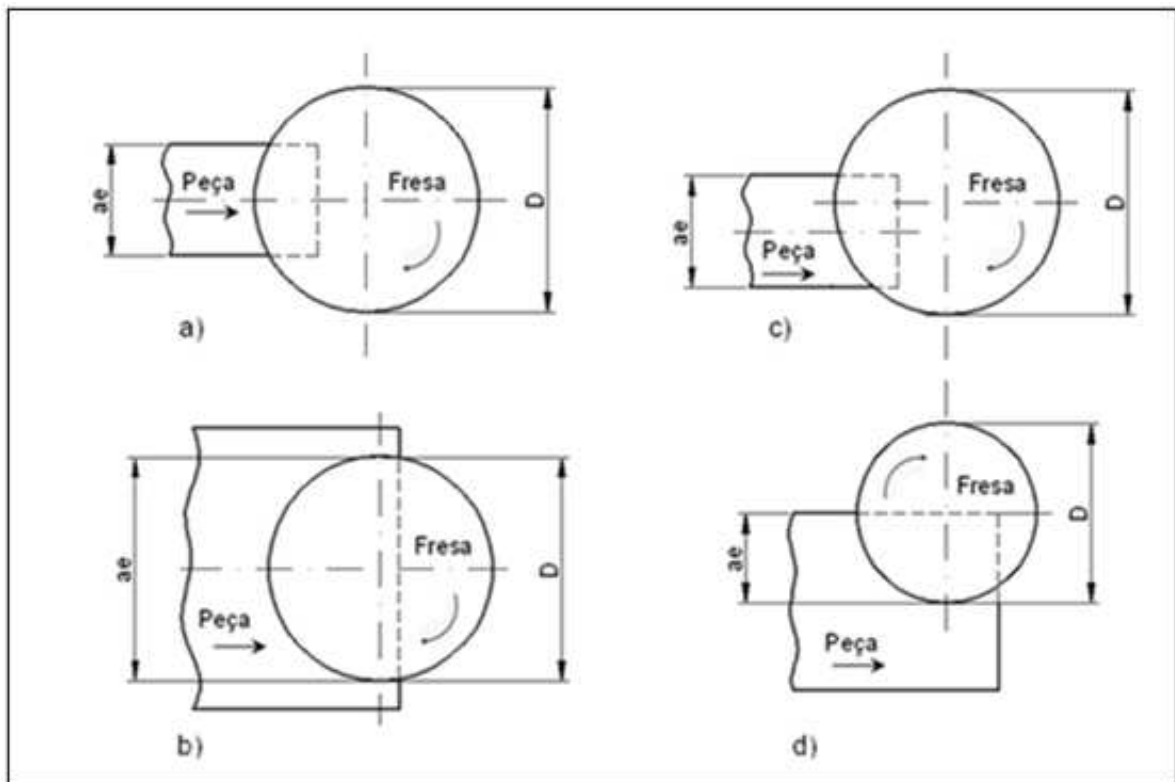


Figura 2.15 – Fresamento frontal: a) simétrico comum; b) simétrico de rasgo; c) assimétrico com toda a superfície sendo fresada; d) assimétrico de rasgo

Quando o diâmetro da fresa é grande em relação à largura da peça, o corte assimétrico é vantajoso, pois se pode ter maior número de dentes simultaneamente no corte, gerando menores esforços de corte em cada dente e corte mais suave. Outra vantagem do corte assimétrico está no fato da variação da direção da componente radial da força de usinagem ser bem menor, como pode ser mostrado na figura 2.16, diminuindo a tendência a vibrações.

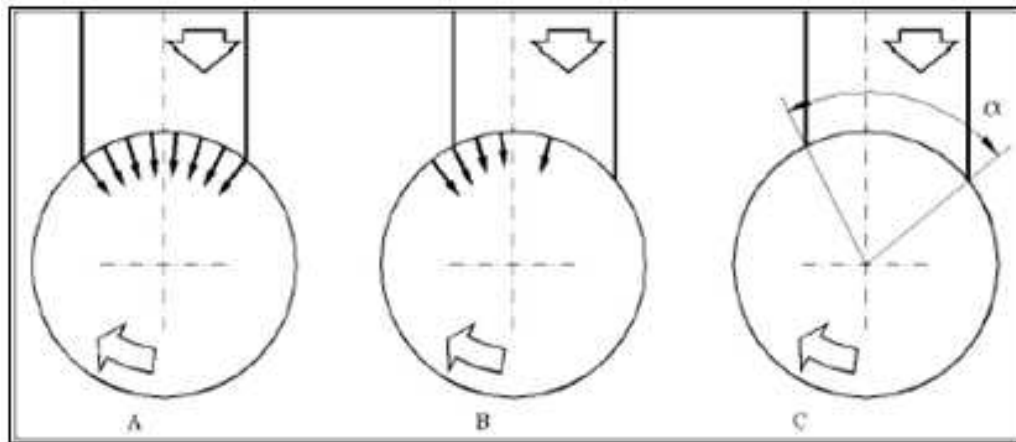


Figura 2.16 - Direção das forças radiais nos cortes simétrico (A) e assimétrico (B) e ângulo de contato do assimétrico (C) (SANDVIK, 2012).

No entanto, o corte simétrico proporciona um menor ângulo de contato, portanto, tem uma tendência a menor desgaste e maior vida de ferramenta, devido a menor atrito, o que, no entanto somente acontecerá se o fenômeno gerador de fim de vida for seu desgaste e não algum tipo de avaria, como trinca, lascamento ou quebra, o que é muito comum no fresamento. Neste caso, o corte assimétrico é mais vantajoso, pois o choque na entrada do dente é minimizado.

2.2.2.3.3 Posicionamento da ferramenta no fresamento frontal

Diniz e Caldeirani (1999), realizaram diversos ensaios variando o valor de “j” (figura 2.17) desde 3,8% até 26,2% do \varnothing da fresa, passando pelo corte simétrico.

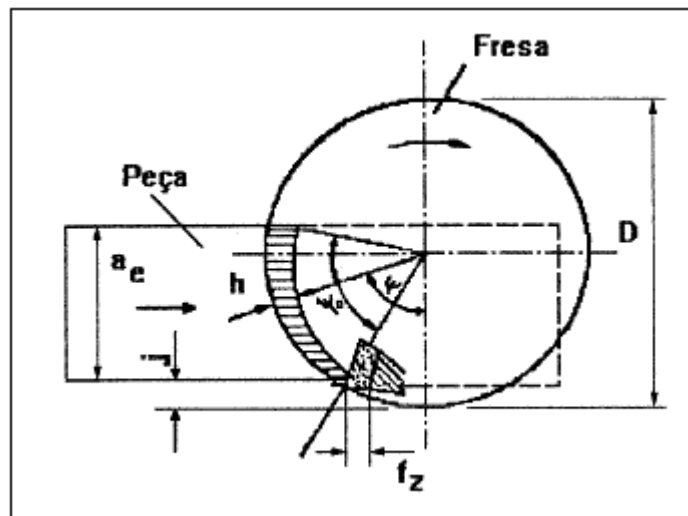


Figura 2.17 – Corte assimétrico mostrando dimensão j

O resultado desses ensaios demonstrou que a medida que j cresce, a ferramenta passa a lascas mais, e a vida da ferramenta diminui, enquanto que para baixos valores de j o desgaste da aresta predomina sobre o lascamento. Resultado muito interessante, pois mostra como uma simples modificação da fresa em relação à peça pode melhorar substancialmente a vida da ferramenta.

Para melhor compreensão dos fenômenos envolvidos durante o corte numa operação de fresamento, é possível dividi-lo em três instantes diferentes, a entrada do corte (1), o ângulo de contato (2) e a saída do corte (3), como pode ser visualizado na figura 2.18.

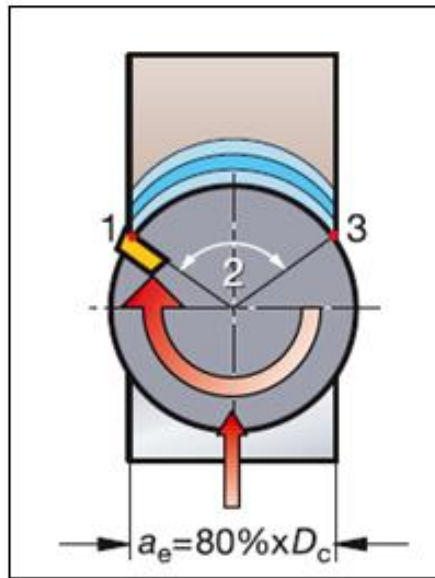


Figura 2.18 – Instantes do corte no fresamento (SANDVIK, 2012)

Nas fresas frontais com pastilha de metal duro, devido a sua sensibilidade ao choque, é necessário que se estude a posição em que a pastilha deve tocar o material quando ela entra em corte em cada rotação, para isso, o tempo de choque deve ser o maior possível, para que o efeito do choque na pastilha seja pequeno. Uma forma de se fazer isso é utilizar-se a distância de ajustagem j (vista anteriormente) da ordem de 5% do diâmetro da fresa. Valores de j menores que este podem começar causar outro inconveniente que é o de a entrada se dar com valores de espessura de cavaco muito próximos de zero, o que acaba gerando pressões específicas de corte muito altas (DINIZ, MARCONDES E COPPINI, 2010).

Quando o centro da fresa está fora da largura da peça figura 2.19a, o corte começa com a parte mais extrema da pastilha tocando a peça, o que pode causar a quebra da aresta. No caso da figura 2.19b, com o centro da peça coincidindo com a superfície lateral da peça, o choque da pastilha na peça seria instantâneo, além de espessura do cavaco máxima, causando o inconveniente citado anteriormente. Já no caso da figura 2.19c, onde a peça tem seu centro dentro da largura da peça, o contato inicial é feito com a parte interior da pastilha, onde a seção para resistir ao choque é maior, o que acaba tornando esta condição mais favorável.

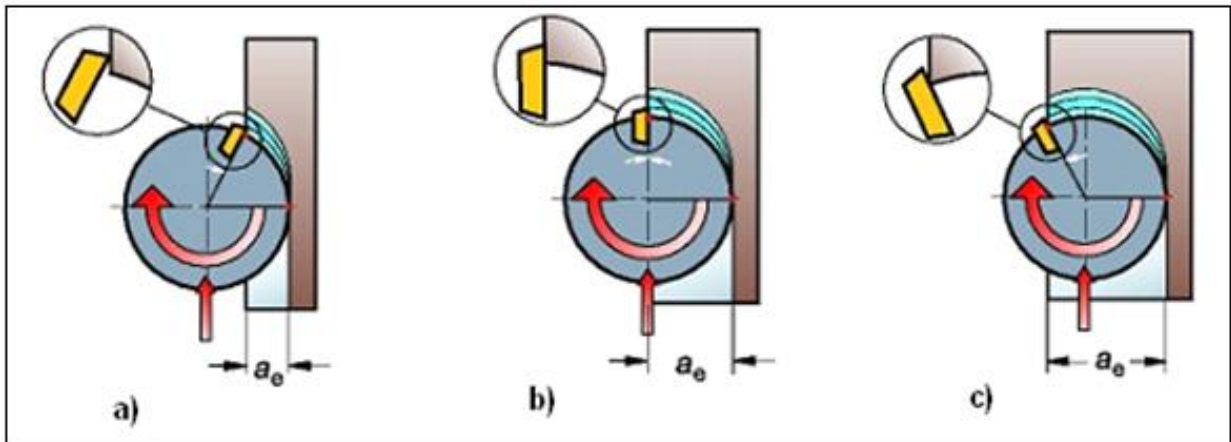


Figura 2.19 – Posicionamento da aresta de corte na entrada do dente na peça (Sandvik, 2012)

Cuidado também deve ser tomado com a saída do inserto da peça, pois haverá uma súbita diminuição dos esforços de corte, portanto, é importante que a espessura de corte (h) neste momento seja a menor possível, o que pode causar muita rebarba em aços e lascamento de canto de peça em ferros-fundidos, além de favorecer a trinca por fadiga mecânica devido a variação brusca de sollicitação sobre a ferramenta que ocorre várias vezes por segundo. Assim as posições “a” e “c” da figura 2.20 são favoráveis em relação a “b”, que tem espessura de corte máxima neste momento.

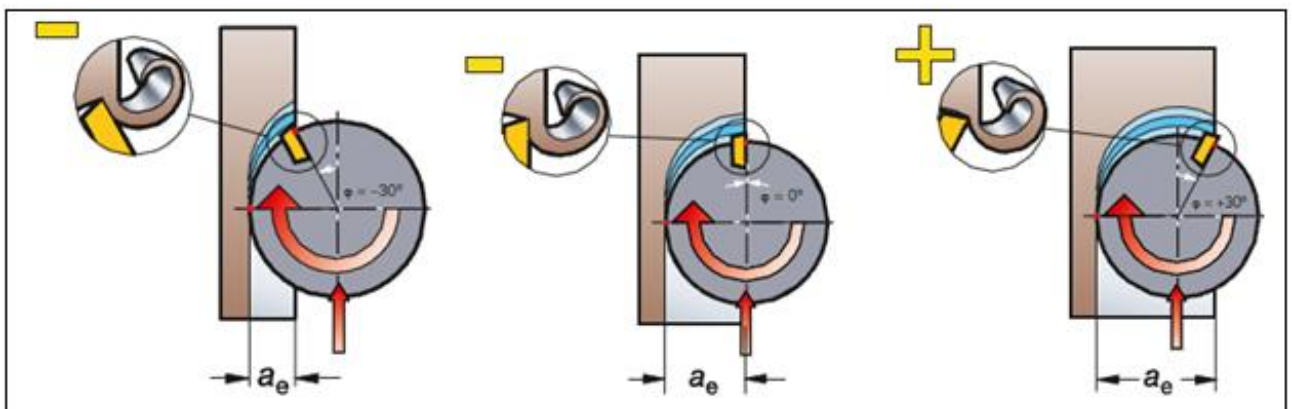


Figura 2.20 – Posição da aresta de corte na saída do dente da peça (SANDVIK, 2012)

Das três regiões de corte, a saída da peça é a mais sensível, um cavaco espesso geralmente causará uma redução drástica na vida da ferramenta, uma vez que o cavaco não tem apoio nesta região, e tenta curvar-se, gerando uma força de tração no metal duro que poderá causar a quebra da aresta de corte (SANDVIK, 2012).

Com relação ao sentido de corte concordante e discordante, as mesmas considerações feitas para o fresamento tangencial, também cabe ao fresamento frontal, no entanto, aqui em alguns casos haverá ambos coincidindo, então deverá observar-se qual predomina. A diferença neste caso será para o assimétrico usinando toda a largura da peça, pois nesse caso não haverá o problema do atrito na entrada, já que a espessura de corte na entrada é diferente de zero.

2.2.2.4 Ferramentas utilizadas no fresamento

Além das classificações básicas de fresamento, existem diversos tipos e formas de fresas para a usinagem de diversos modelos de geometria, esses diversos tipos de fresas são fabricadas principalmente de metal duro, com ou sem cobertura. Fresas de diâmetro grande, geralmente tem seu corpo fabricado de aço carbono (material barato), onde são montadas pastilhas intercambiáveis de metal duro (que é um material mais caro) apenas na região de corte. Para diâmetros pequenos são utilizadas fresas inteiriças de metal duro com ou sem cobertura (DINIZ, MARCONDES E COPPINI, 2010). Existem ainda outros materiais que podem ser utilizados em ferramentas para aplicações especiais, como o cerâmico, o Nitreto de Boro Cúbico (CBN) e até mesmo o Diamante Poli Cristalino (PCD).

A norma NBR 6163 especifica a terminologia utilizada pela associação Brasileira de normas técnicas (ABNT) referentes a toda geometria da cunha de corte, a figura 2.21 mostra a nomenclatura utilizada na parte de corte, ou seja, a parte ativa da ferramenta, também chamada de cunha de corte.

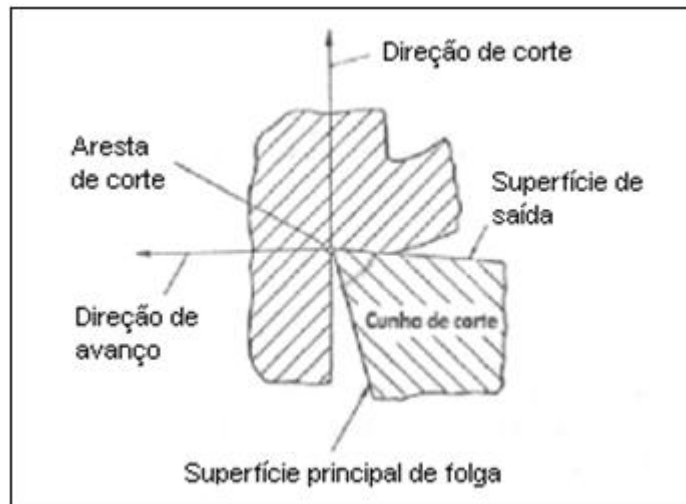


Figura 2.21 – Cunha de corte de uma ferramenta (DINIZ, MARCONDES E COPPINI, 2010)

Segundo Sandvik (2012), a macrogeometria de uma pastilha afeta muitos parâmetros no processo corte, sendo especialmente desenvolvidas para cada tipo de material e tipo de trabalho (leve, médio ou pesado), sendo que um estudo mais detalhado da aresta de corte revela ainda dois importantes ângulos da pastilha, o de saída (γ) e o de aresta de corte (β), como mostrado na figura 2.22.



Figura 2.22 – Geometria de uma pastilha (SANDVIK, 2012, adaptado)

Outro ângulo importante para se comentar é o ângulo de posição (κ_r), que é o ângulo entre aresta principal da pastilha e a superfície da peça, dependente também da configuração fresa mais

pastilha, e que afeta muito parâmetros como espessura de cavaco, forças de corte e vida de ferramenta. Diminuir este ângulo significa diminuir a espessura de cavaco, espalhando o material sobre uma grande área da aresta de corte, causando um corte gradual (mais suave), porém com maior pressão específica (k_s), além de diminuir esforços radiais e aumentar os axiais (direção que geralmente no fresamento tem maior rigidez), a figura 2.23 mostra alguns exemplos de ferramentas com seus ângulos de posição e distribuição de forças

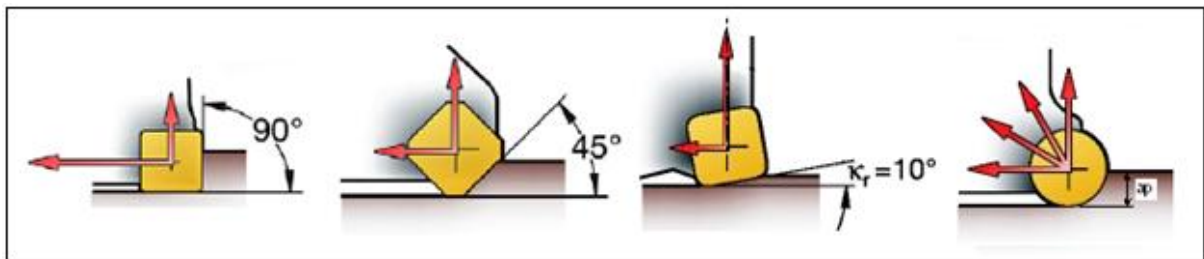


Figura 2.23 – Ângulo de posição e distribuição de forças (SANDVIK, 2012)

Um comentário especial se faz apenas à pastilha redonda, que terá um ângulo de posição e uma espessura de cavaco que varia de acordo com a profundidade usinada (a_p) e o diâmetro da pastilha (iC). Por ser a geometria que será usada neste trabalho, o tópico a seguir tratará um pouco mais de suas características.

2.2.2.5 Algumas considerações sobre pastilhas redondas

Pastilhas com geometria redonda são indicadas para uma ampla gama de operações como faceamento, abertura de bolsões e perfilamento, gerando uma ação de corte leve, proporcionando entradas e saídas suaves, resultando em baixas forças de corte e baixo calor gerado, permitindo-se utilizar altos avanços quando baixas velocidades de corte são utilizadas (SANDVIK, 2012).

Dependendo da profundidade de corte (a_p), o ângulo de posição varia de 0° até 90° , assim como a espessura de cavaco que varia de zero até um valor máximo (h_{ex}), a figura 2.24, montada com dados da Sandvik (2012), mostra as equações para se calcular o ângulo de posição (κ_r) e a espessura de cavaco (h_{ex}) destas pastilhas.

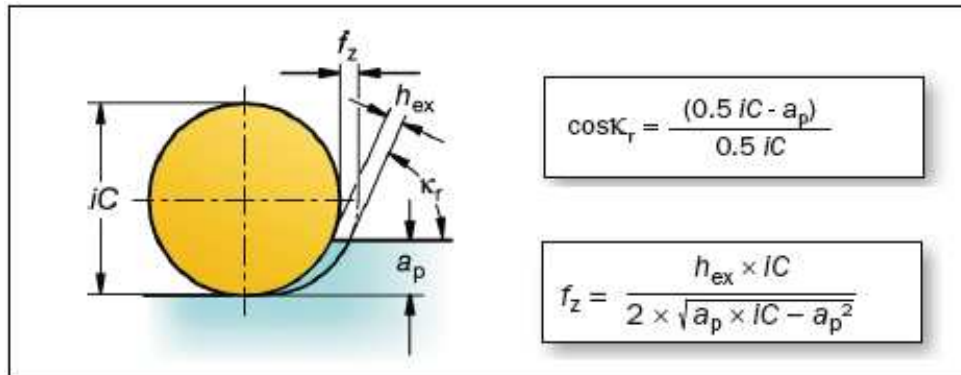


Figura 2.24 – Indicação das variáveis de uma pastilha redonda com equações para cálculo de ângulo de posição e espessura de cavaco

O melhor desempenho com uma pastilha redonda 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 da pastilha (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.

Outro cuidado que deve ser tomado com estas pastilhas é na determinação da velocidade de corte, uma vez que ela também varia de acordo com a profundidade de corte, já que o diâmetro também muda, desta forma, deve-se achar o diâmetro verdadeiro (D_{cap}) antes de se calcular a velocidade de corte. A figura 2.25, montada com dados da Sandvik (2012) apresentam as equações necessárias para sua determinação.

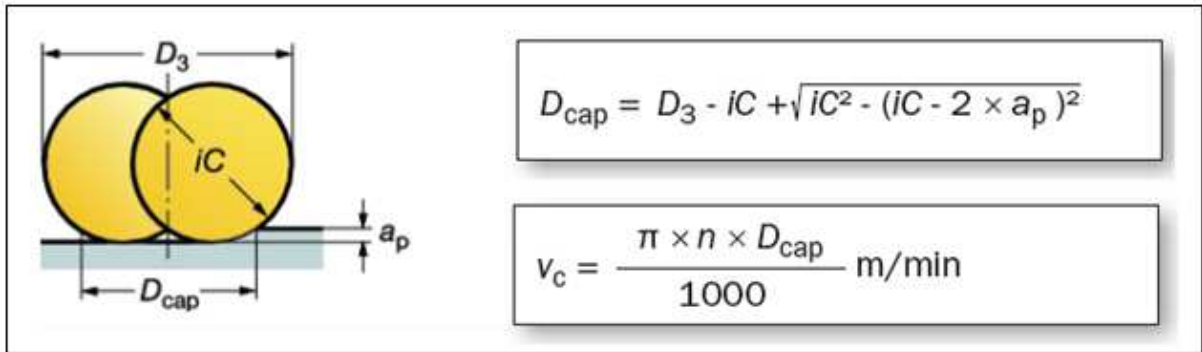


Figura 2.25 – Indicação das variáveis de uma pastilha redonda com equações para cálculo do diâmetro máximo de corte e da velocidade de corte

2.2.2.6 Desgastes e avarias de 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 mostrado na figura 2.26.

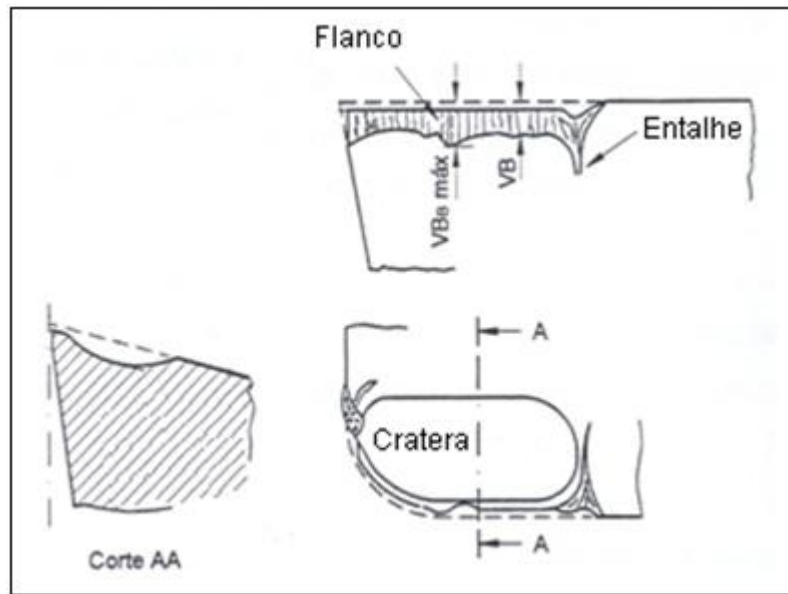


Figura 2.26 – Tipos de desgastes de ferramenta (DINIZ, MARCONDES E COPPINI, 2010)

Como avarias, podem-se destacar o lascamento, que diferentemente do desgaste frontal de cratera, é a retirada de partículas grandes subitamente da ferramenta. Outro tipo de avarias são as trincas, que aparecem devido a variações de temperaturas ou esforços mecânicos, podendo ser perpendicular (térmicas) ou paralela (mecânica) a aresta de corte. Por último tem-se a quebra, que pode ocorrer inesperadamente ou devido ao aumento excessivo dos desgastes e avarias vistos anteriormente. A figura 2.27 mostra os principais tipos de avarias.

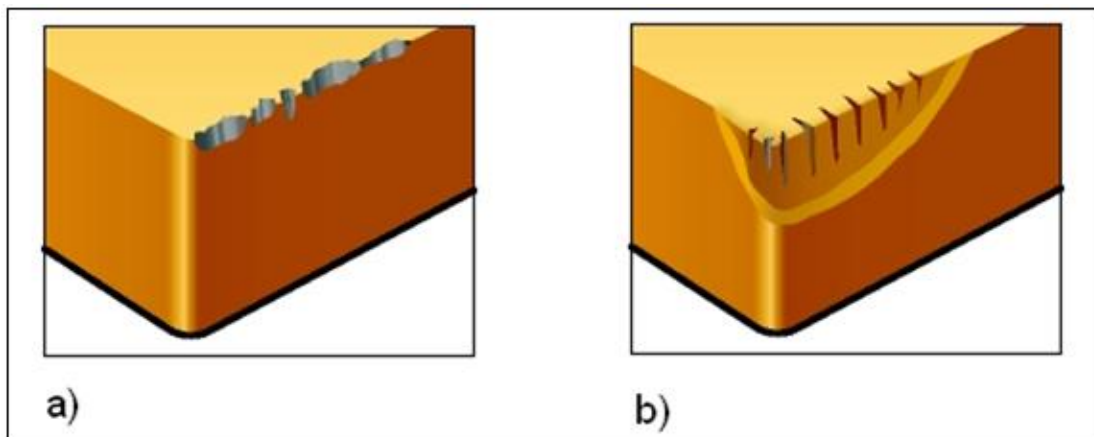


Figura 2.27 – a) Microlascamentos da aresta de corte e b) Trincas térmica (SANDVIK, 2012)

2.2.2.7 Vida de ferramenta

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.

O percurso de corte (l_c) e o percurso de avanço (l_f) para uma vida de T minutos são dados respectivamente pelas equações 2.3 e 2.4:

$$l_c = \frac{v_c \cdot T}{1000} \quad (2.3)$$

$$l_f = f \cdot n \cdot T \quad (2.4)$$

Sendo que l_c e l_f também podem ser utilizados para expressar a vida de uma ferramenta.

2.2.2.8 Acabamento de superfícies fresadas

O fresamento tangencial produz uma superfície ondulada, cuja altura define a rugosidade máxima. Esta altura pode ser estimada teoricamente a partir do diâmetro da fresa e do avanço por dente, no fresamento frontal o mesmo irá ocorrer se as pastilhas tiverem raio de ponta ou mesmo forem redondas. Ressalta-se que nem sempre as arestas de uma fresa de facear estão todas em um mesmo plano paralelo a superfície usinada, quando isto ocorre, somente a pastilha mais saliente irá gerar a superfície acabada (DINIZ, MARCONDES E COPPINI, 2010), como mostrado na figura 2.28.

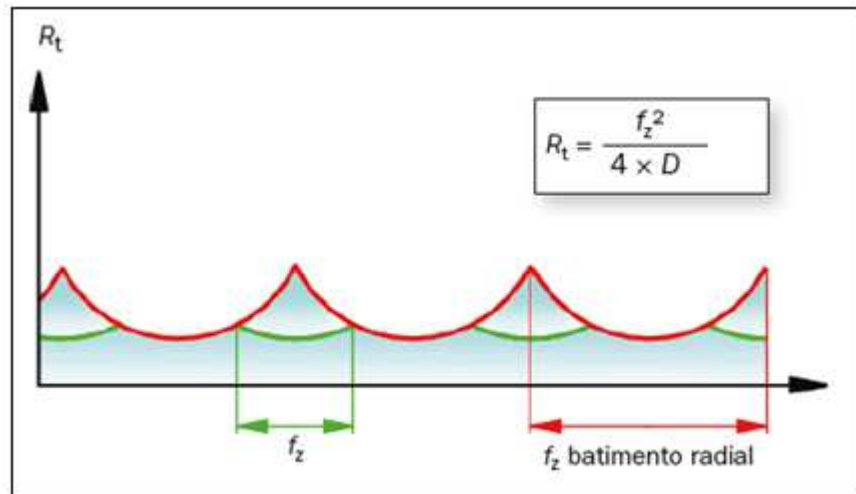


Figura 2.28 – Rugosidade máxima teórica com e sem batimento (SANDVIK, 2012)

A rugosidade máxima, no entanto é sempre maior ou igual a teórica, pois outros valores também influenciam no seu valor, como desgaste não uniforme das pastilhas, condições operacionais da máquina ferramenta, rigidez insuficiente, entre outros.

Um estudo de rugosidade foi realizado por Pivetta (2005) utilizando fresa de topo esférica no fresamento de aço endurecido, confirmando a forte influência de f_z na rugosidade final da peça, verificou também que o balanço da ferramenta não é importante no começo da vida da ferramenta, no entanto, com o aumento do desgaste da ferramenta, ele começa a ter maior influência.

2.2.2.9 Fluido de corte

A função do fluido de corte na usinagem dos metais é introduzir uma melhoria que pode ser de caráter funcional, conferindo a este um desempenho melhor, ou econômico, com redução de consumo de energia e ferramenta (FERRARESI, 1970).

Durante o corte, se desenvolve uma grande quantidade de calor devido a energia necessária para a deformação do cavaco e decorrente do atrito ferramenta-peça e cavaco-ferramenta, este calor precisa ser reduzido (lubrificação) e/ou extraído (refrigeração) da ferramenta, para se diminuir desgastes, e principalmente, para diminuir os danos térmicos na peça.

Teixeira (2006) realizou ensaios com o aço inoxidável 15-5 PH, utilizando diversas condições de refrigeração e lubrificação, além do corte a seco, e comprovou que usar sem fluido de corte gerou sempre vida de ferramenta maior do que quando utilizando fluido de corte em abundância, o que atribuiu ao fato da ferramenta trabalhar melhor com temperaturas maiores do que com muita variação térmica. Uma condição que apresentou vida de ferramenta ainda maior foi utilizar MQF (mínima quantidade de fluido) com óleo integral, pois assim reduziu-se o inconveniente do choque térmico e promoveu-se uma efetiva lubrificação. Para estes ensaios não foi analisado o dano térmico causado na peça.

2.2.3 Estratégias de usinagem

A implantação e seleção de estratégias e orientações de usinagem quando se está fresando são especialmente críticas na indústria aeroespacial e de ferramentas. Uma seleção correta pode diminuir tempos de usinagem, melhorar a qualidade superficial das peças usinadas, além de propiciar um ganho em vida de ferramenta, o que certamente trará reduções de custos significativas em alta produção (TOH, 2004).

Algumas estratégias já foram discutidas em itens anteriores, como por exemplo nas comparações entre corte concordante ou discordante, simétrico ou assimétrico e no posicionamento das fresas no fresamento frontal, agora neste item, algumas outras estratégias de usinagem serão analisadas.

2.2.3.1 Estratégias de entrada na peça

Algumas estratégias de usinagem normalmente utilizadas na indústria estão representadas na figura 2.29. Toh (2004) fez diversos estudos utilizando estas estratégias convencionais de usinagem, e percebeu que baixos valores de vida de ferramenta eram resultados de condições abruptas de usinagem, que ocorriam principalmente na entrada e saída de peça de trabalho, que foi atribuído aos altos valores de força de corte gerados com os primeiros impactos na peça.

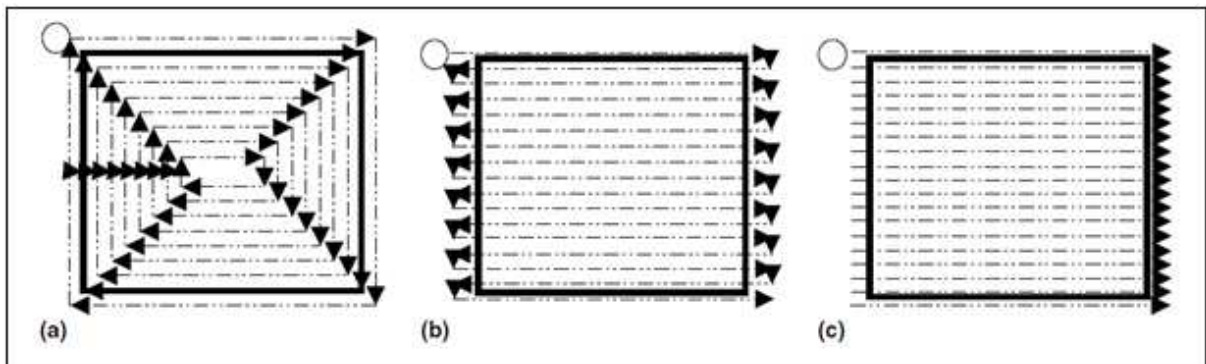


Figura 2.29 – Estratégias de: a) compensação; b) zig-zag; c) direção única (TOH, 2004)

2.2.3.1.1 Estratégias de entrada direta

Nota-se que em todas as estratégias da figura 2.29, a fresa é programada para entrar na peça em linha reta (entrada direta). Quando isto ocorre, a espessura do cavaco na entrada do corte será grande nos primeiros passes, como pode ser visualizado na figura 2.30, até que a fresa entre pelo menos até metade de seu diâmetro, o que pode acarretar redução na vida da ferramenta (SANDVIK, 2012).

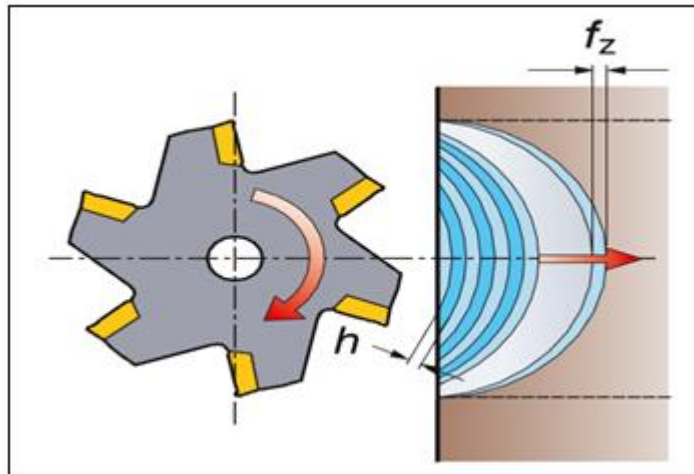


Figura 2.30 – Entrada direta com grande espessura de cavaco na saída (SANDVIK, 2012)

Para se reduzir este inconveniente, a Sandvik (2012), sugere duas formas alternativas de se entrar na peça, a entrada reduzida ou entrada por rolagem.

2.2.3.1.2 Estratégias de entrada reduzida

A estratégia de entrada reduzida consiste em reduzir a velocidade de avanço em 50% até que a fresa tenha entrado pelo menos metade do seu diâmetro na peça, o que reduzirá também a espessura de cavaco formada pela metade (figura 2.31).

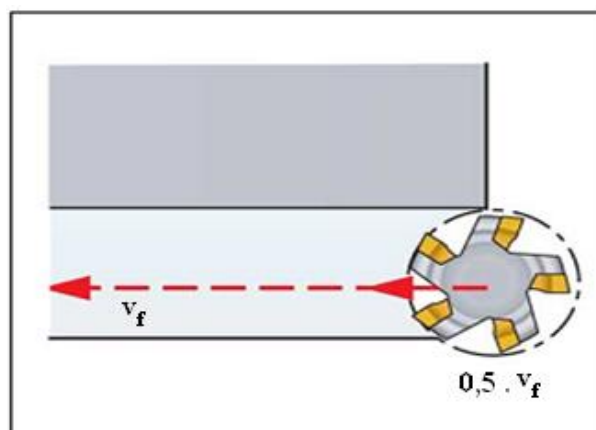


Figura 2.31 – Estratégia de entrada reduzida

2.2.3.1.3 Estratégias de entrada por rolagem

A estratégia de entrada por rolagem consiste em entrar na peça seguindo uma trajetória circular no sentido horário (no sentido anti-horário não resolverá o problema de espessura de cavaco na saída do corte), fazendo com que a espessura do cavaco na saída do inserto da peça seja bem pequeno, reduzindo vibrações causadas pela redução brusca de esforços de corte, uma vez que a ferramenta ainda não esta apoiada na peça, como mostrado na figura 2.32.

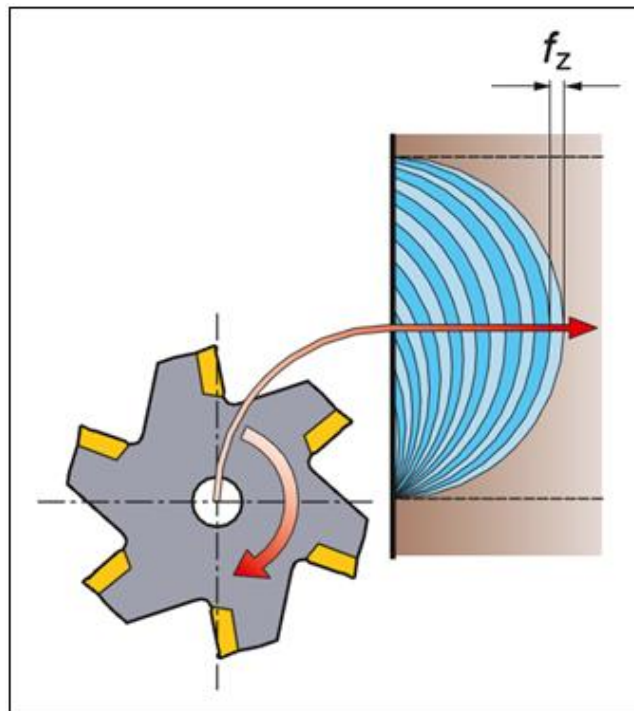


Figura 2.32 – Entrada por rolagem, espessura de cavaco na saída bem pequena (SANDVIK, 2012)

Com base no que foi discutido até agora sobre entradas na peça, conclui-se que uma entrada ideal levando-se em conta apenas a espessura de cavaco na saída do inserto da peça, seria aquela onde a ferramenta entrasse tangenciando a peça, pois assim teria o menor ângulo de entrada possível, gerando a condição com menor espessura de cavaco na saída do inserto da peça. Isso seria conseguido numa condição hipotética com a entrada por rolagem, posicionando a ferramenta tangenciando a peça, com o maior raio (R) possível como apresentado na figura 2.33.

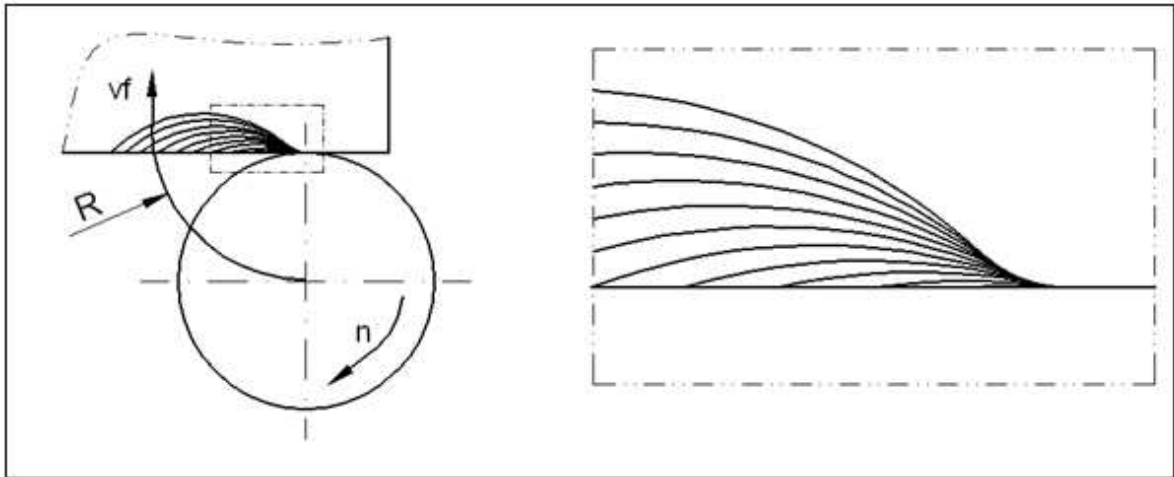


Figura 2.33 – Entrada hipotética ideal isolando-se o fenômeno da espessura do cavaco

No entanto, vale lembrar que para se chegar a esta conclusão sobre a entrada ideal, foi isolado apenas um fenômeno, que é o da espessura do cavaco na saída do inserto da peça, assim, segundo Capra (2011), é possível explicar muitos fenômenos em termos de alguns poucos, e consequentemente entender diferentes aspectos da natureza de um modo aproximado, sem ter de entender tudo de uma só vez.

A implementação prática da entrada na peça por rolagem, por sua vez, demanda no ajuste de alguns parâmetros não necessários em outras estratégias, como por exemplo, posicionamento da fresa um pouco afastado da peça para evitar o início do corte atritando a ferramenta, além de gerar espessura de cavaco muito próximo de zero, o que causaria um alto valor de pressão específica, como já discutido anteriormente, além de definição do raio de entrada.

Ventura, Hassui e Marques, (2011), realizaram ensaios utilizando-se destas entradas, além da estratégia de rampa radial, que consiste em entrar na peça segundo uma trajetória inclinada em relação à lateral da peça, no fresamento de uma liga de titânio Ti-6Al-4V, obtendo-se os resultados mostrados na figura 2.34.

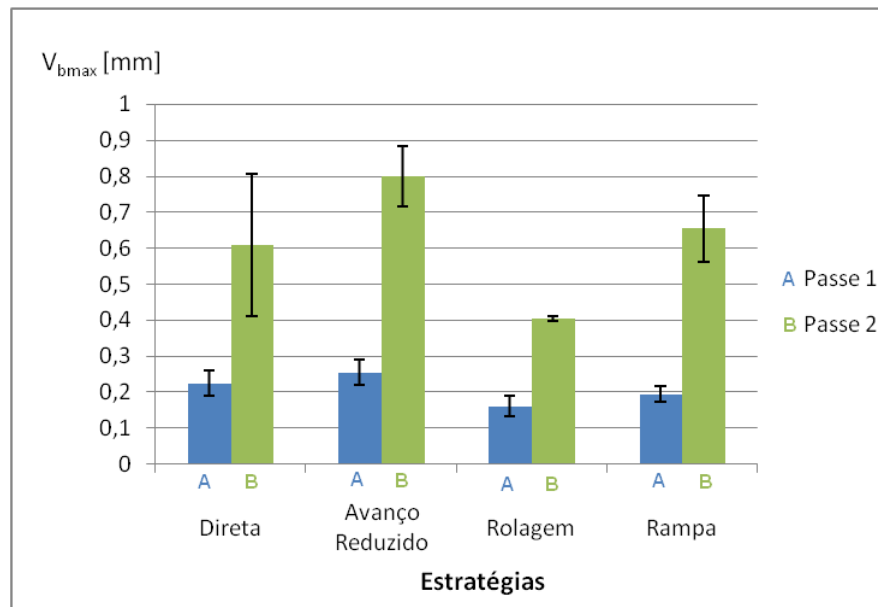


Figura 2.34 – Desgaste de flanco para diferentes estratégias de entrada (VENTURA, HASSUI, MARQUES, 2011)

Pela análise da figura 2.34, pode-se observar que a estratégia de entrada que proporcionou os melhores resultados foi a rolagem.

2.2.3.2 Usinagem com avanço variável

Usinagem com avanço variável é um método de muito fácil aplicação na indústria e que vem apresentando resultados significativos principalmente em relação a aumento de vida de ferramenta de materiais duros e de difícil usinagem, sem se perder em eficiência de usinagem (KLIN, Z. et al 1996). O ciclo de usinagem para este método está representado na figura 2.35, onde T é o tempo na peça, f é a taxa constante de avanço, ε o incremento do avanço variável e n o número de incrementos do período.

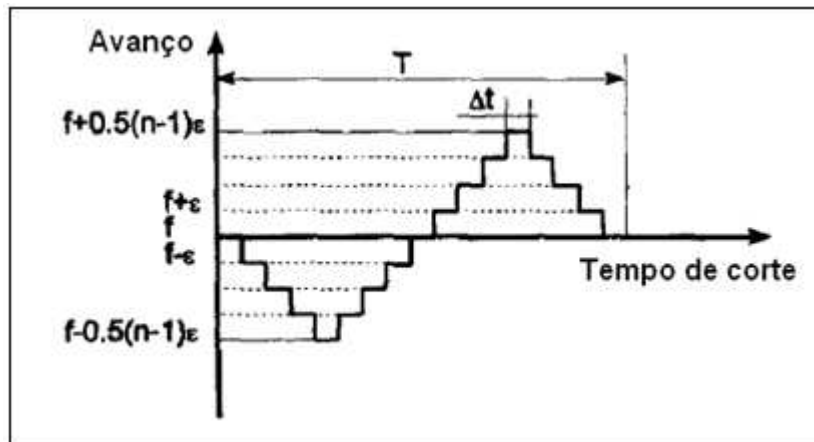


Figura 2.35 – Ciclo de avanço variado (KLIN, Z. et al. 1996)

Com essa simples mudança, Klin, Z. et al, (1996) conseguiu usinando aço inoxidável 17-4 PH aumentar o tempo de troca de ferramenta de 4 para 8 minutos, o que foi atribuído à variação da região de contato entre ferramenta e peça, uma vez que o desgaste de cratera, que era o desgaste que determinava o fim de vida da ferramenta, começou a se formar mais lentamente em 5 regiões distintas. Estudo semelhante foi realizado por Belazinsk e Ennajimi, (1994) utilizando este mesmo aço inoxidável e a estratégia de avanço variável, confirmando a melhoria conseguida em termos de vida de ferramenta.

2.2.4 Forças e potências de usinagem

O conhecimento do comportamento e da ordem de grandeza dos esforços de corte é de fundamental importância, pois deles derivam a potência necessária para o corte, capacidade de obtenção de tolerâncias apertadas, temperatura de corte e o desgaste da ferramenta.

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, onde esforços de corte são equacionados utilizando-se coeficientes retirados de procedimentos experimentais (DINIZ, MARCONDES E COPINNI, 2010).

Força de usinagem (F_u) é a força total que atua sobre uma cunha cortante durante a usinagem, sendo consideradas agindo 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, portanto, 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).

Inicialmente, F_u é decomposta em uma componente que está no plano de trabalho, chamada força ativa (F_t) e em uma componente perpendicular ao plano de trabalho, chamada força passiva (F_p). A força ativa por sua vez é decomposta em diversas outras, como força de corte (F_c), força de avanço (F_f), força de apoio (F_{ap}) e força efetiva de corte (F_e), como mostrado na figura 2.36.

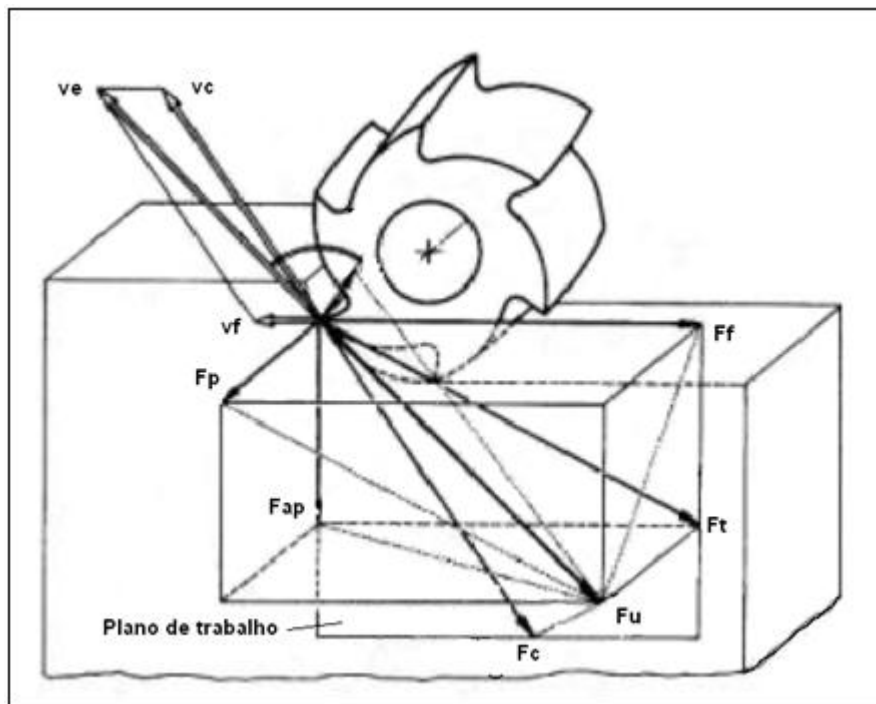


Fig. 2.36 – Força de usinagem e suas diversas componentes para o fresamento (DINIZ, MARCONDES E COPINNI, 2010)

Conhecer a geometria da ferramenta ajuda a prever como deverá se comportar a distribuição destas forças. A figura 2.37 mostra a direção da força de corte esperada de acordo com a geometria da pastilha.

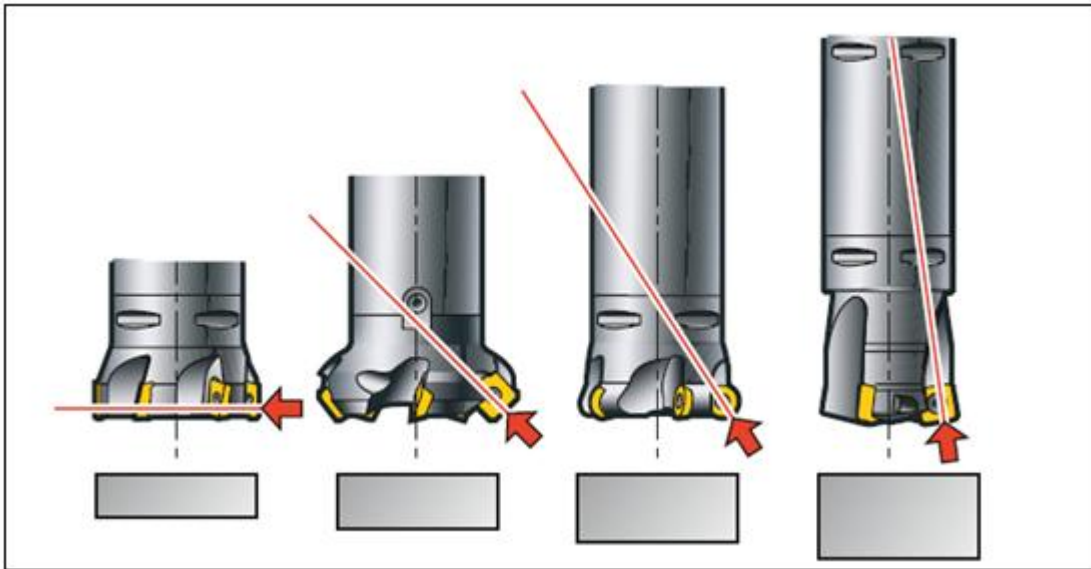


Figura 2.37 – Direção das forças de corte para diferentes geometrias de pastilha

Medir a força de corte na prática é medir suas componentes isoladamente em direções conhecidas. Assim, a força de corte pode ser expressa em relação à pressão específica de corte (k_s) e a área da seção de corte (A), como mostra a equação 2.5:

$$F_c = k_s \cdot A \quad (2.5)$$

Conhecer a área da seção de corte é relativamente simples, 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, como o material da peça, material da ferramenta, geometria da ferramenta, e até mesmo com os parâmetros de usinagem.

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).

Neves (2002) realizou experimentos onde confirmou que o parâmetro de usinagem que mais altera 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 os esforços de corte.

3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Todos os ensaios foram realizados nas instalações do Laboratório de Usinagem, do Departamento de Engenharia de Fabricação (DEF), com exceção feita ao ensaio de caracterização microestrutural (MEV), que foi realizado no laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura, do Departamento de Engenharia de Materiais (DEMA), ambos da Faculdade de Engenharia Mecânica (FEM) da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), sendo que os mesmos levaram aproximadamente dois meses para serem concluídos. Os materiais, equipamentos e métodos utilizados estão descritos a seguir.

3.1 Materiais e equipamentos

✓ Corpos de prova:

Material: Aço inoxidável martensítico endurecível por precipitação UNS – S15500 (15-5PH), solubilizado (condição A conforme norma SAE-AMS5862, vide tabela 2.3), nas dimensões de 200 x 140 x 145.

Sistema de fixação da peça: O corpo de prova foi fixado pelas laterais com uma morsa presa sobre a mesa do centro de usinagem, como pode ser visto na figura 3.1.



Figura 3.1 – Fixação da peça por morsa

✓ Máquina:

Centro de Usinagem: Vertical, 3 eixos, marca Mori Seiki, modelo SV-40 (figura 3.2), CNC GE Fanuc 18M, rotação máxima de 12000 RPM, potência de 40 CV.



Figura 3.2 – Centro de usinagem Mori Seiki SV-40

✓ Ferramenta:

Fresa: de topo Sandvik código R300-25T12-10L, com diâmetro de 25 mm, geometria neutra, fixação roscada no cone 392.140T-40 12 058 (figura 3.3), com 2 insertos intercambiáveis redondos, indicada para altos avanços e condição de semi-acabamento.

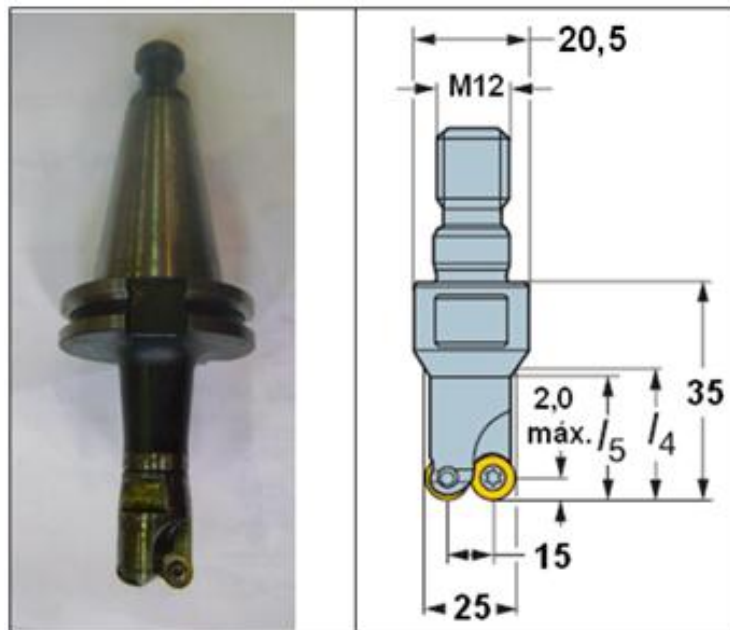


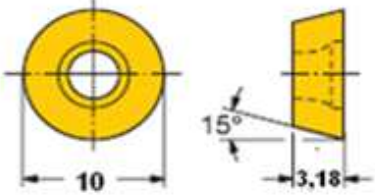


Figura 3.3 – Fresa de topo código Sandvik R300-25T12-10L

Insertos: de metal duro, redondos, códigos Sandvik R300-1032, sendo testadas duas classes e duas geometrias diferentes, conforme apresentado na tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Insertos utilizados nos ensaios

Insertos de Metal Duro			
Código		Classe	Cobertura
R300-1032	M-MM	GC2040 (ISO M40)	MT CVD
	E-MM		
R300-1032	M-PM	S30T (ISO M25)	PVD
	E-PM		

 <p>Geometria Neutra</p>	 <p>Geometria Positiva</p>	
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------

Indicações:
Classe GC240: Materiais com tendência abrasiva
Classe S30T: Condições estáveis e boa segurança da aresta

✓ Medição da Rugosidade:

Rugosímetro: Marca Mitutoyo, Modelo SJ-201P, Versão do comunicador 3.10 (Figura 3.4)



Figura 3.4 – Rugosímetro Mitutoyo modelo SJ-201P

✓ Medição do desgaste da ferramenta:

Em um microscópio estereoscópio com ampliação de 20x acoplada a uma câmera MotiCam 2000 com programa Motic Images Plus 2.0 ML (Figura 3.5).



Figura 3.5 – Medição do desgaste em um microscópio estereoscópio.

✓ Medição dos Esforços de Usinagem:

Equipamentos: Dinamômetro marca Kistler modelo 9257B; Condicionador de sinais marca Kistler modelo 5019B; Conector ligado a placa de aquisição de sinais PCI6025-E; Computador com programa Labview 8.5 esses dois últimos da National Instruments (Figura 3.6)



Figura 3.6– Equipamentos para aquisição dos esforços de corte

Antes de se iniciar a medição dos esforços de usinagem, foi necessário ajustar os parâmetros do condicionador de sinais “TS” (sensibilidade do dinamômetro), “LP” (filtro passa baixa ou taxa de amostragem) e “SC” (fator de escala N/V). Para o valor de LP, foi ajustado um valor (1kHz) que proporcionasse a aquisição de ao menos três pontos durante o corte de uma aresta com base na frequência de entrada de dentes (98,5 Hz) e ângulo de contato (109°).

Os valores de TS e SC 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.

Para determinação da grandeza da força de corte, foi necessário estimar os esforços de corte. Para tanto, foi necessário calcular a espessura máxima do cavaco (0,15 mm para $f_z = 0,25$ mm/dente) e a potência específica de corte K_s (ou K_c) (2681 N/mm²) (Sandvik, 2012).

Assim ajustou-se os canais 1, 2 e 3, como pode ser verificado na figura 3.7.

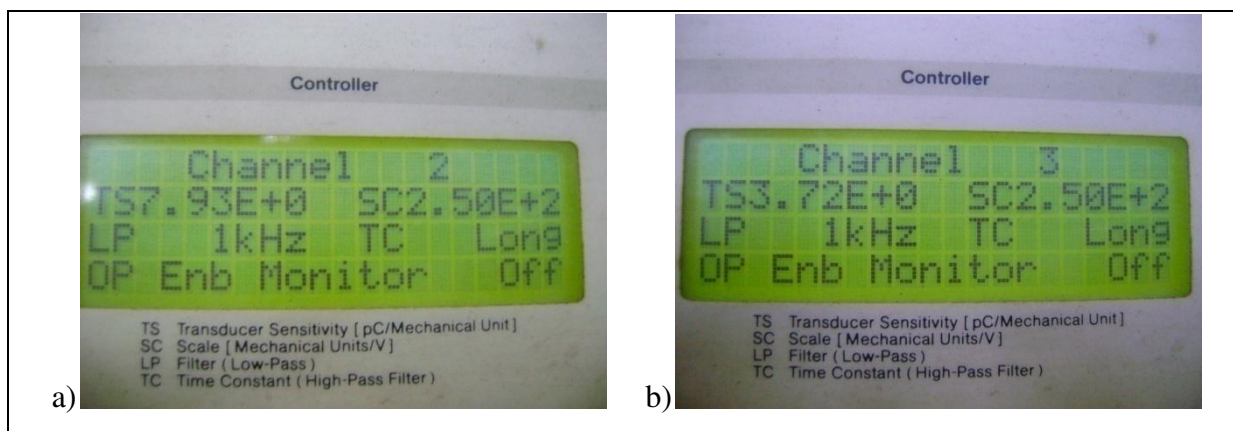


Figura 3.7 – Ajustagem do condicionador canais: a) 1 e 2 ; b) 3

Os canais ajustados são referentes às três direções ortogonais de aquisição dos sinais de força, sendo que o canal 1 é referente à direção x, o canal 2 referente a direção y e o canal 3 referente a direção z, como mostrado na figura 3.8.

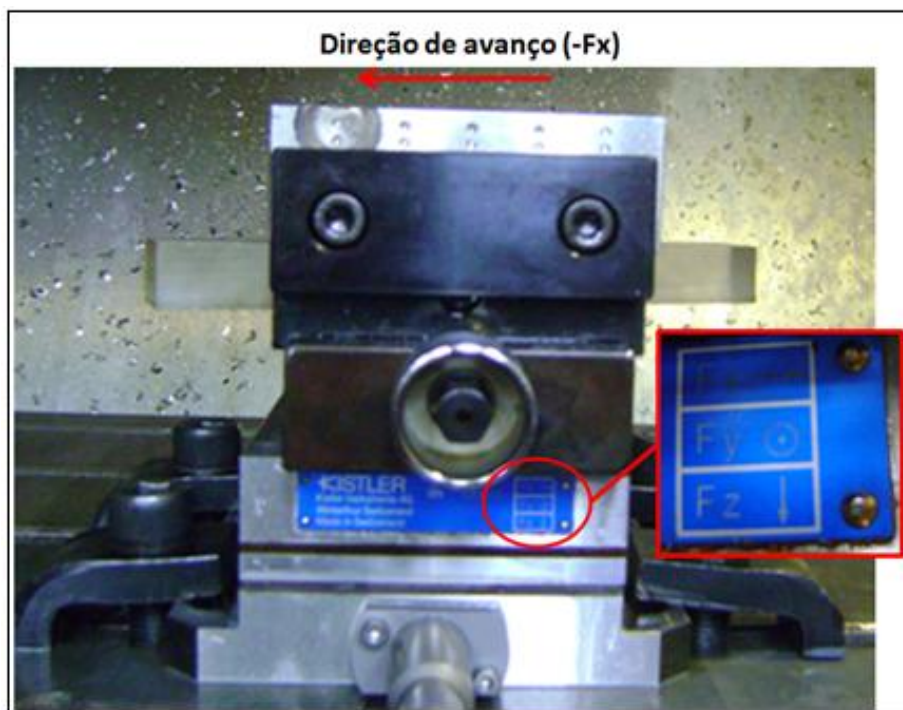


Figura 3.8 – Peça fixada por uma morsa no dinamômetro com direções ortogonais padronizadas de aquisição do sinal de forças de corte

Corpo de prova: O mesmo material (aço inoxidável 15-5 PH solubilizado), nas dimensões conforme figura 3.9:

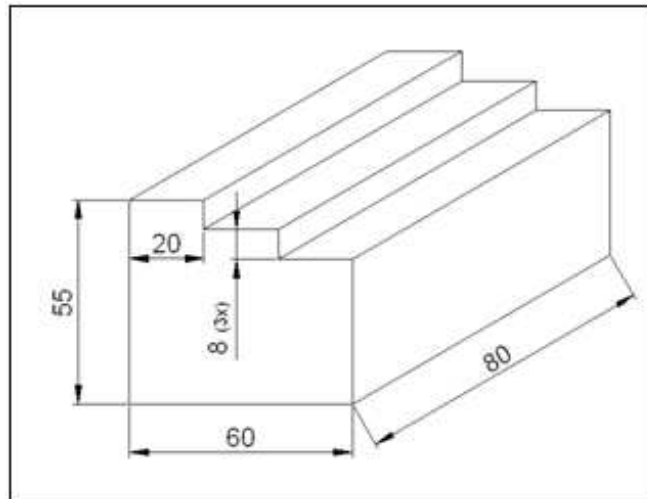


Figura 3.9 – Corpo de prova para aquisição dos esforços de corte

✓ Caracterização microestrutural:

Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV): Marca Zeiss modelo EVO MA15 com acessório de EDS (Espectrometria de Energia Dispersiva de Raios-X) conforme figura 3.10.



Figura 3.10 – Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)

3.2 Métodos para execução dos ensaios

- ✓ A realização dos ensaios baseou-se no fresamento de faceamento em linha reta, variando-se a estratégia de entrada na peça para diferentes parâmetros de usinagem (Figura 3.11).

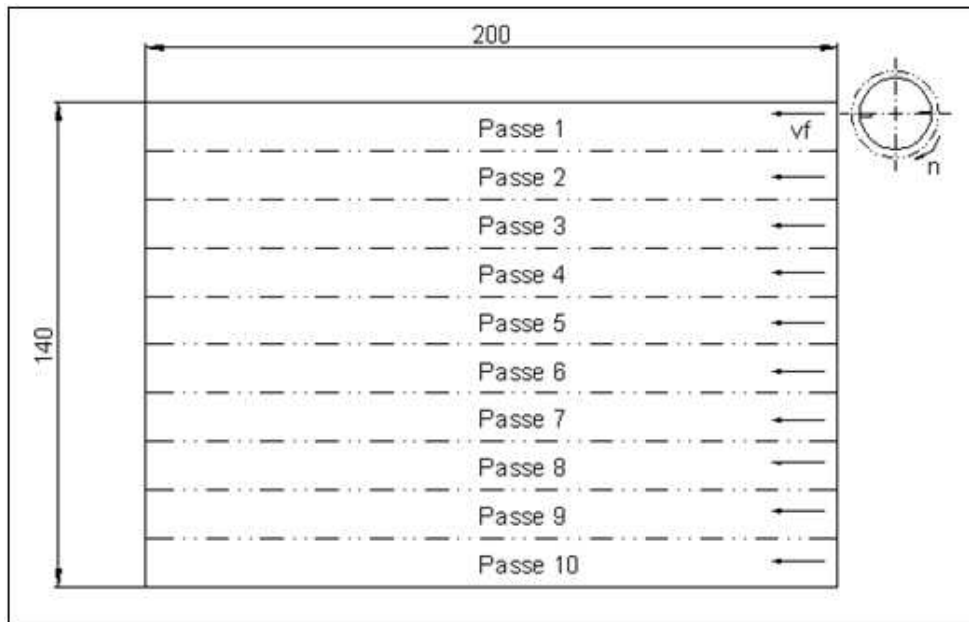


Figura 3.11 – Visualização geral do ensaio

As estratégias de entrada utilizadas foram a “direta”, “reduzida” e “rolagem”. A entrada direta como o próprio nome indica consiste em posicionar a ferramenta a 5 mm da peça e efetuar a entrada na peça em linha reta com avanço de trabalho.

Na estratégia de entrada com avanço reduzido, nos primeiros 10 mm de corte (praticamente metade do diâmetro efetivo da fresa), a velocidade de avanço (v_f) foi reduzida em 50% do seu valor (figura 3.12).

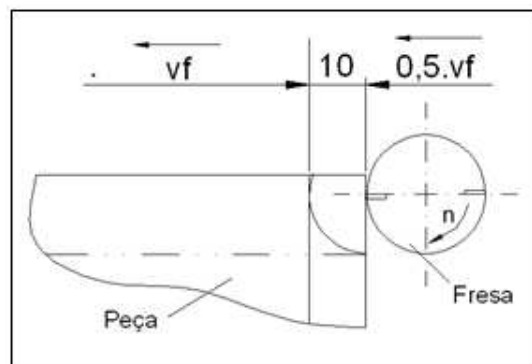


Figura 3.12 – Estratégia de entrada com avanço reduzido

Para a utilização da estratégia de entrada por rolagem, foi necessária a definição de alguns parâmetros no momento da programação, como o raio de entrada e a distância de afastamento da fresa em relação à peça (d_a). Para definição destes parâmetros, foi seguido recomendação da Sandvik (2012) para que o raio seja de aproximadamente metade do diâmetro da fresa e a distância de afastamento seja pequena, mas que não comece atritando a peça, e definiu-se a estratégia de entrada por rolagem mostrada na figura 3.13.

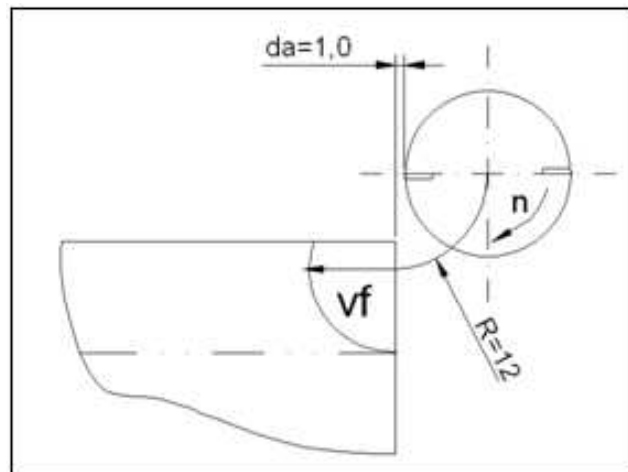


Figura 3.13 – Ajuste dos parâmetros “R” e “ d_a ” para a estratégia de entrada por rolagem

- ✓ Os parâmetros de usinagem variados neste trabalho foram o avanço por dente (f_z) e a velocidade de corte (v_c).
- ✓ Os valores de profundidade de corte (a_p) e largura fresada (a_e), foram mantidos constantes durante todos os ensaios, com os valores de 1 mm e 14 mm (cerca de 70% do diâmetro efetivo da fresa) respectivamente.
- ✓ Todos os ensaios realizados utilizaram fluido de corte miscível em água com base de óleo mineral Blaser B-Cool 655 com concentração média de 7%.
- ✓ A rugosidade foi acompanhada ao longo de todos os ensaios, sendo que a medição era realizada aproximadamente 20 mm após a entrada na peça, em pelo menos dois passes diferentes de cada superfície usinada. O comprimento de amostragem (“cut-off”) foi ajustado com 2,5 mm (figura 3.14).

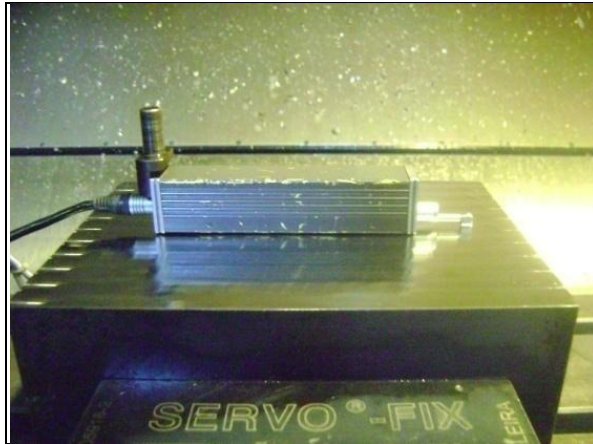


Figura 3.14 – Medição de rugosidade

- ✓ O desgaste de flanco era medido a cada 10 passes de usinagem, sendo que um 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.
- ✓ Na saída do passe de usinagem, a velocidade de avanço era reduzida em 50% nos últimos 10 mm, até que a ferramenta saísse completamente da peça. Este recurso foi utilizado para se diminuir vibrações nesta região de corte, diminuindo também o risco de lascamento na ferramenta.
- ✓ Os resultados apresentados em relação à vida de ferramenta foram referentes à média aritmética das réplicas realizadas.
- ✓ Foi selecionada a condição de usinagem com os melhores resultados ($v_c=195\text{m/min}$ e $f_z=0,25\text{mm/dente}$) e variou-se o lado de entrada da ferramenta na peça, para proporcionar o corte predominantemente concordante, testando também as três estratégias de entrada, sendo feita a análise que esta alteração proporcionou nos resultados obtidos.
- ✓ Com estes mesmos parâmetros de usinagem foram realizados ensaios de vida comparando-se os quatro tipos de ferramentas testadas (duas geometrias e duas classes) para o corte discordante.
- ✓ Para a medição dos esforços de corte, foi selecionada esta mesma condição de usinagem e realizados ensaios com as três estratégias de entrada, utilizando uma ferramenta nova. Um ensaio em cada degrau do corpo de prova.

- ✓ Por último foi realizada a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da região do desgaste de flanco para as três estratégias de entrada ($v_c=195\text{m/min}$ e $f_z=0,25\text{mm/dente}$), uma rolagem com a velocidade de 170m/min , um com o avanço de $0,15\text{mm/dente}$ além de um com a aresta nova junto com a Espectrometria de Energia Dispersiva de Raios-X (EDS).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são mostrados os resultados experimentais obtidos utilizando-se dos procedimentos descritos no capítulo anterior, conjuntamente com uma discussão item a item dos resultados.

4.1 Primeira parte: Comparação entre as estratégias de entrada

Para estes ensaios, foram testadas as três estratégias de entrada em estudo para as quatro condições de usinagem pré estabelecidas, obtendo-se os valores em forma de gráfico na figura 4.1. Decidiu-se por utilizar o parâmetro de vida “comprimento usinado”, uma vez que estão sendo comparados ensaios com diferentes parâmetros de usinagem, portanto, um mesmo tempo de vida proporciona diferentes comprimentos usinados. O inserto utilizado nestes ensaios foi o R300-1032 M-MM, sendo que o posicionamento da ferramenta proporcionou o corte predominantemente discordante.

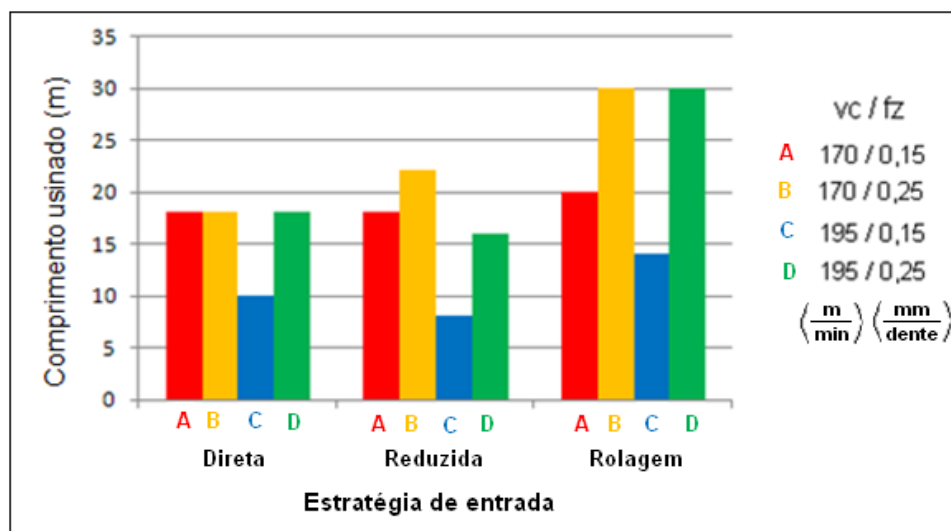


Figura 4.1 – Vida da ferramenta para as três estratégias de entrada e para as quatro combinações de parâmetros testados

Primeiramente, como destaque, observa-se que os melhores resultados foram obtidos para a estratégia de entrada por rolagem, onde quando comparadas as três estratégias para cada combinação de parâmetro pode-se observar que para todos os ensaios realizados, a vida utilizando-se a entrada por rolagem foi sempre maior do que o ensaio equivalente utilizando-se outras estratégias de entrada, evidenciando uma melhora efetiva de desempenho da ferramenta.

Em relação à estratégia de entrada reduzida, mesmo observando-se menor nível de ruído oriundo de impactos menores na região de entrada, os valores de vida da ferramenta obtidos não permitem verificar uma melhora efetiva desta estratégia em relação à entrada direta. Em alguns casos seu desempenho foi melhor, porém em outros até piores, além do inconveniente de se aumentar o tempo de usinagem nos primeiros 10 mm de corte. Cabe lembrar que essa é uma estratégia amplamente utilizada na indústria.

Pode-se notar também que o avanço por dente maior (0,25mm/dente) apresentou vida maior também em relação ao avanço menor (0,15mm/dente). Isso provavelmente se deu porque a deformação com o primeiro avanço foi maior, gerando melhor formação do cavaco. Isso indica que a ferramenta em questão, para o material usinado, opera melhor próximo ao limite superior de avanço por dente recomendado em catálogo. Vale lembrar que o corte foi predominantemente discordante, o que ameniza o impacto na entrada de cada aresta na peça, mesmo assim, com menores avanços, o número de impactos por passe é maior, favorecendo seu desgaste. Além disso, avanços maiores fazem com que o corte ocorra fora da região encruada da peça.

Analisando-se a influência da velocidade de corte, notam-se dois comportamentos distintos, a saber, com baixos avanços (0,15 mm/dente) a influência da velocidade de corte foi bastante significativa e seu aumento provocou uma diminuição da vida da ferramenta; com altos avanços (0,25 mm/dente) a influência da velocidade de corte foi menos marcante e no caso das estratégias de entrada direta e por rolagem essa influência não existiu, ou seja, a vida da ferramenta foi igual para velocidades menores (170 m/min) e maiores (195 m/min). Velocidades de corte maiores implicam num impacto maior quando da entrada da aresta no corte. Como comentado anteriormente, uma hipótese é que com avanços menores, esse impacto se dá numa região encruada, assim o aumento da intensidade desse impacto provoca menor vida da ferramenta. Por outro lado, com avanços maiores, consegue-se atingir o material numa região não encruada, com

isso, talvez a variação de velocidade testada não tenha sido suficiente para provocar diminuição da vida da ferramenta.

Foi traçado um gráfico acompanhando o desgaste de flanco das diferentes estratégias de entrada, para as velocidades de corte de 170m/min e 195m/min e o avanço de 0,25mm/dente que teve melhor desempenho, mostrado na figura 4.2.

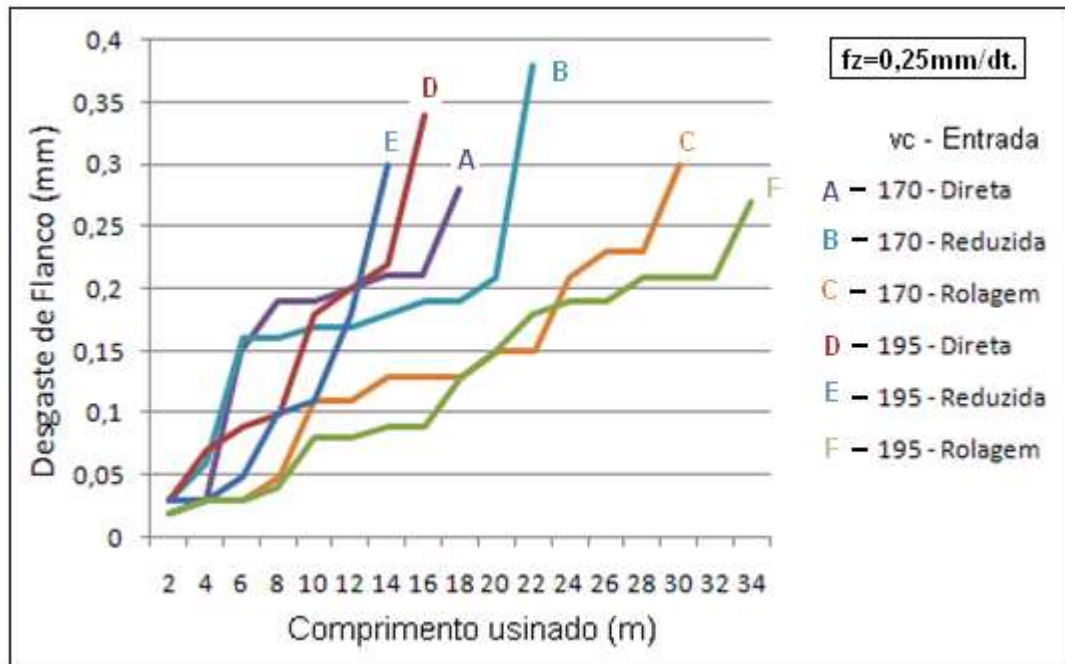


Figura 4.2 – Desgaste de flanco ponto a ponto para diferentes ensaios

Pela figura 4.2, pode-se perceber que quando a estratégia de entrada por rolagem foi utilizada, o aumento do desgaste se deu com taxas menores, mesmo com a maior velocidade de corte, aparentando que de fato o impacto da entrada é responsável por avarias na ferramenta. Vale lembrar que o objetivo da utilização da estratégia de entrada por rolagem é diminuir a espessura do cavaco e consequentemente os esforços de corte sobre a pastilha, quando da entrada da fresa no corte. Aparentemente a entrada reduzida deveria provocar o mesmo efeito, mas seu desempenho foi comparativamente ruim. Outro ponto que merece destaque é o fato de que, aparentemente avanços maiores favorecem um melhor desempenho. Isso parece indicar que

existe uma faixa de espessuras de cavaco mais apropriada para cada ferramenta. No caso em estudo, essa espessura está num patamar acima de 0,15 mm.

Outro detalhe interessante foi observado em relação à forma do desgaste da ferramenta, que quando utilizada a estratégia de entrada por rolagem se formou em uma região maior da aresta de corte, aumentando inclusive a potência consumida pela máquina, tendo por isso inclusive, em alguns casos, o ensaio terminado um pouco antes de o desgaste atingir 0,3mm, como no exemplo mostrado. A figura 4.3 compara o desgaste obtido com a entrada por rolagem (a) com o desgaste típico obtidos com outras entradas (b).

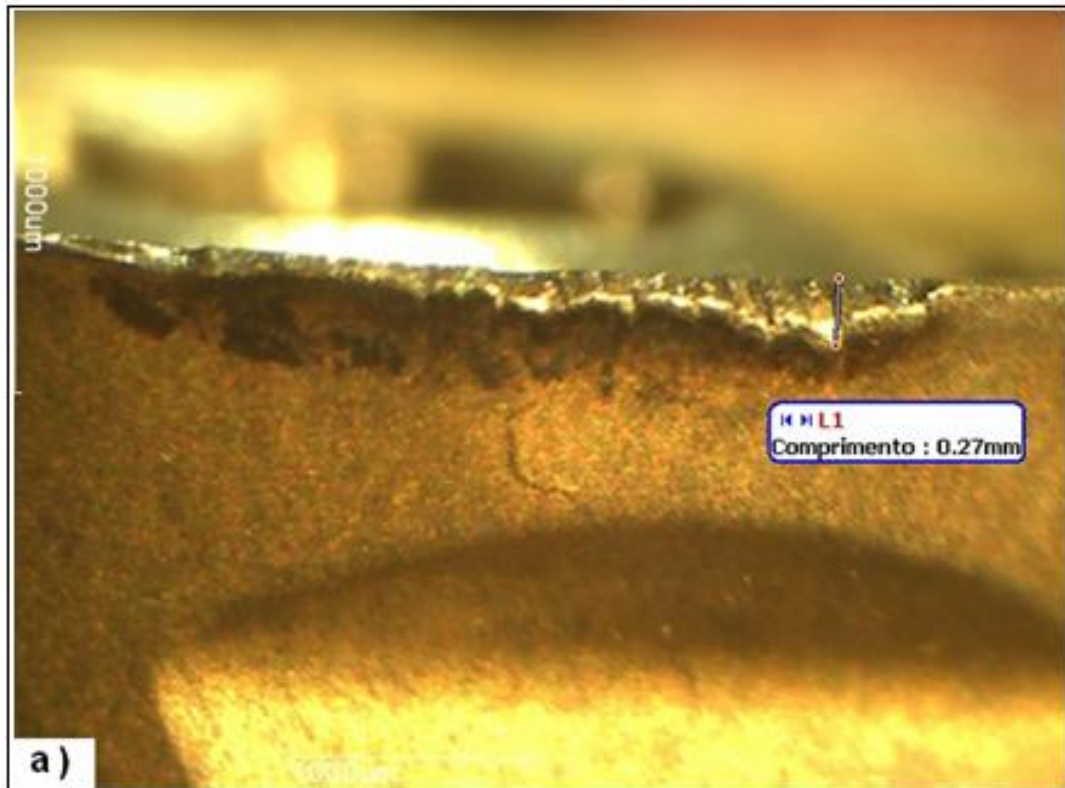


Figura 4.3 – Desgaste de flanco para a entrada: a) Rolagem

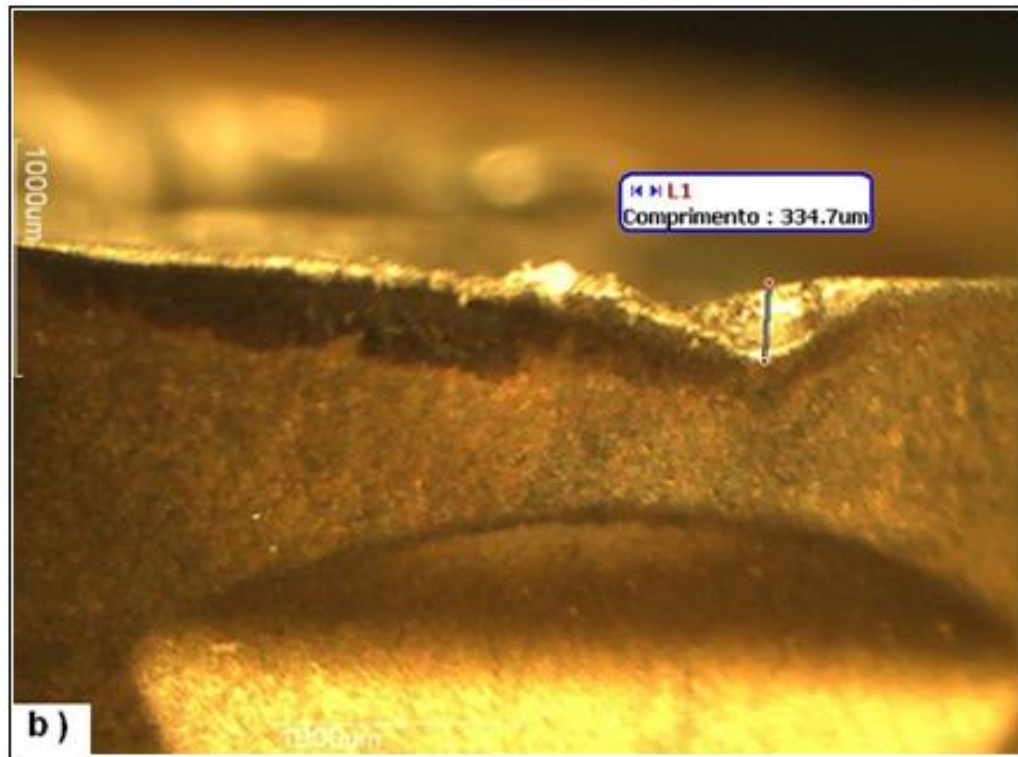


Figura 4.3 – Desgaste de flanco para a entrada: b) Reduzida

Em relação à rugosidade, confirmou-se a teoria de que maiores avanços geram maiores valores de rugosidade, a figura 4.4 mostra o valor da rugosidade média obtida para todos os ensaios de cada parâmetro testado para a entrada reduzida, evidenciando este fenômeno. Devido a este fenômeno, as regiões onde ocorrerem redução de avanço (saídas de corte ou entrada reduzida) proporcionaram rugosidade diferente do que o resto do corte. Em relação à velocidade de corte, não se observa alterações significativas entre a de 170 e 195m/min, uma vez que a velocidade de corte não consta como parâmetro significativo de alteração de rugosidade, como mostrado na figura teórica 2.28.

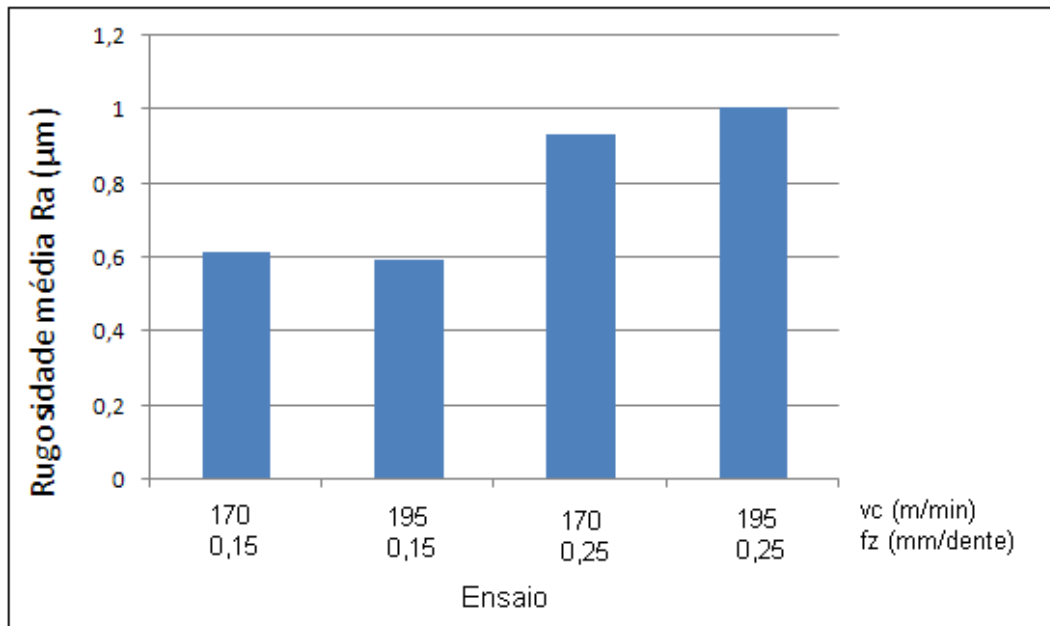


Figura 4.4 – Rugosidade média para diferentes ensaios

Outro fenômeno observado em relação à rugosidade foi em termos de desbalanceamento radial das pastilhas, uma vez que a distância entre dois picos de rugosidade, que deveria ser igual a f_z , foi o dobro deste para os 2 avanços utilizados, como mostrado nas figuras 4.5 e 4.6.

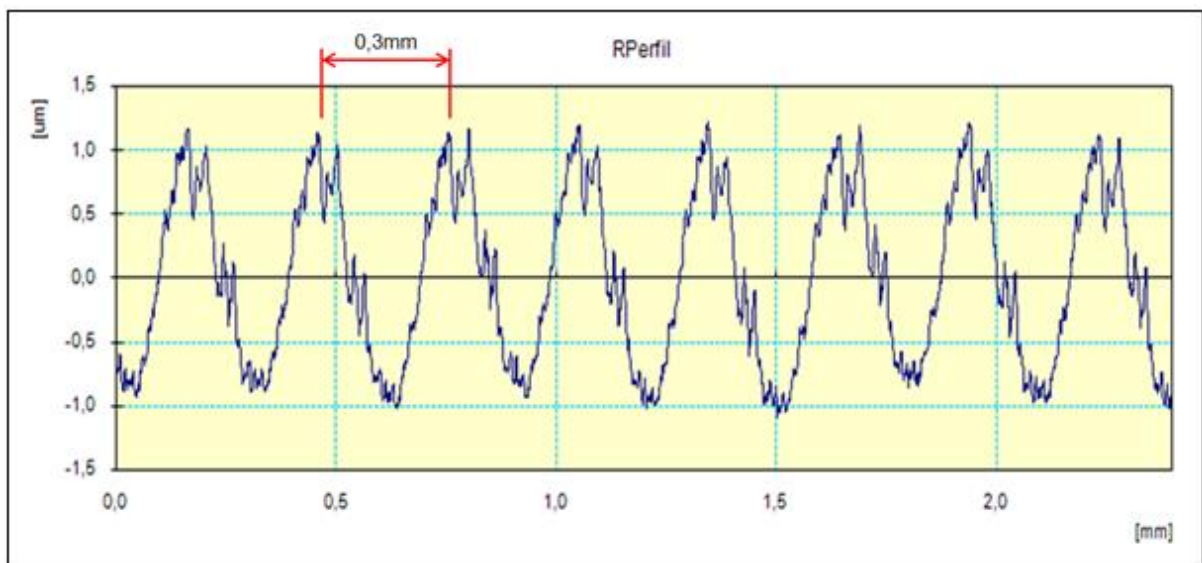


Figura 4.5 – Perfil de rugosidade obtido para um avanço de 0,15mm/dente

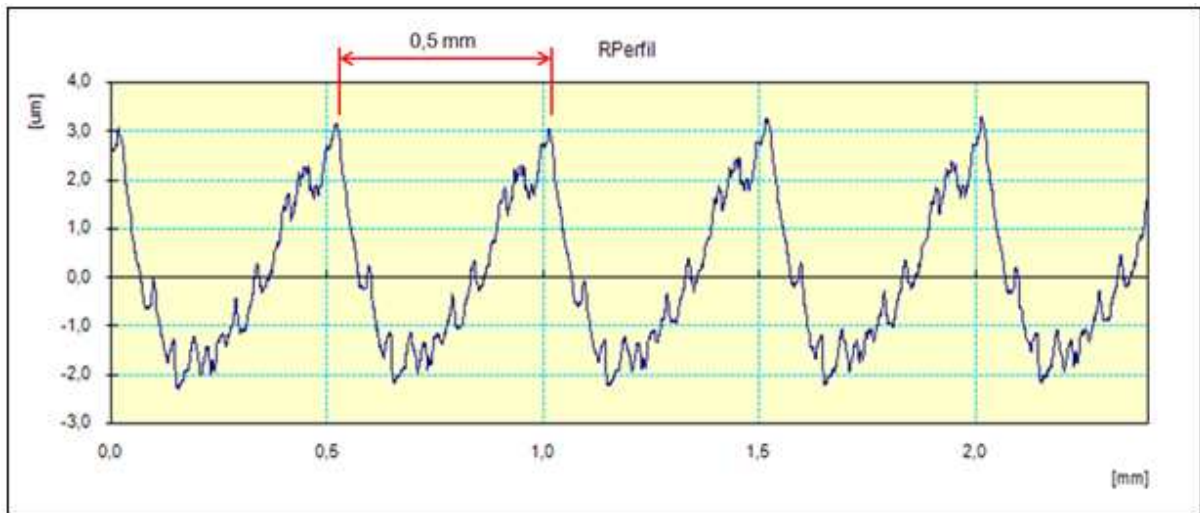


Figura 4.6 – Perfil de rugosidade obtido para um avanço de 0,25mm/dente

4.2 Segunda parte: Comparação entre corte concordante e discordante

Para esta fase dos ensaios, foram utilizados os parâmetros de usinagem de $v_c=195\text{m/min}$ e $f_z=0,25\text{mm/dente}$, que teve o melhor desempenho comparativo junto com o de parâmetros $v_c=170\text{m/min}$ e $f_z=0,25\text{mm/dente}$ em termos de vida de ferramenta, porém proporcionando corte mais rápido, uma vez que a velocidade é maior. Sendo assim, as três estratégias de entrada foram testadas para o corte predominantemente concordante e predominantemente discordante. Os resultados da comparação da vida da ferramenta estão representados na figura 4.7 para as três estratégias de entrada e os dois tipos de corte.

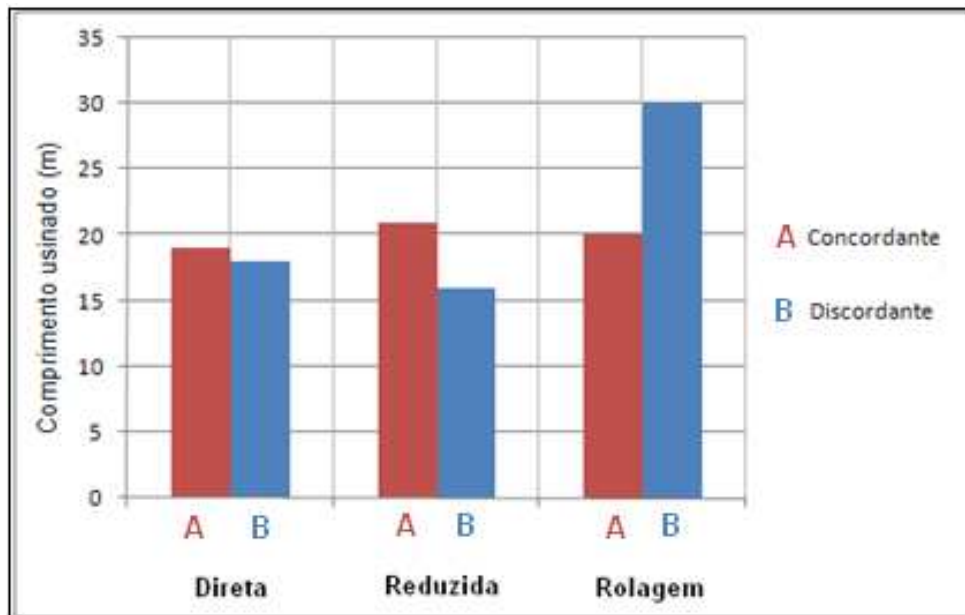


Figura 4.7 – Vida para o corte predominantemente concordante (A) e discordante (B) para as três estratégias de entrada

Por estes ensaios, observou-se que para o corte predominantemente concordante, as três estratégias de entrada resultaram em comprimentos usinados praticamente iguais, em uma região intermediária ligeiramente maior do que para as entradas direta e reduzida, mas menor do que para a entrada por rolagem do corte discordante, não evidenciando uma melhora entre uma estratégia e outra para o corte discordante.

Este fenômeno se deve provavelmente porque no corte concordante a espessura de cavaco é inicialmente elevada e vai se reduzindo gradativamente até zero. Com isso, o número de impactos ao longo do corte faz com que a redução da espessura de cavaco na entrada tenha pouca influência. Por outro lado, no corte predominantemente discordante a intensidade dos impactos devido à entrada da aresta no corte ao longo de um passe é bem menor, já que a espessura do cavaco inicia-se pequena e vai aumentando gradativamente. Assim, o impacto da entrada da aresta no corte passa a ser importante, como mostrado na figura 4.8.

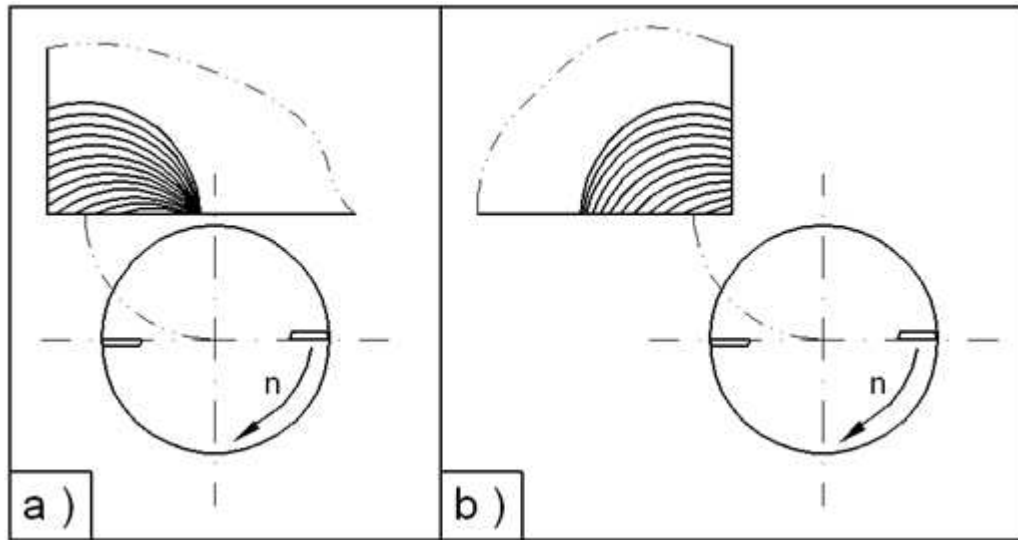


Figura 4.8 – Entrada para o corte predominantemente: a) concordante; b) discordante

Outra análise feita nesta parte dos ensaios foi sobre a dispersão dos resultados obtidos entre as réplicas realizadas, sendo que o foi calculado o desvio padrão para as três estratégias de entrada nos cortes predominantemente concordante e discordante, como mostrado na figura 4.9.

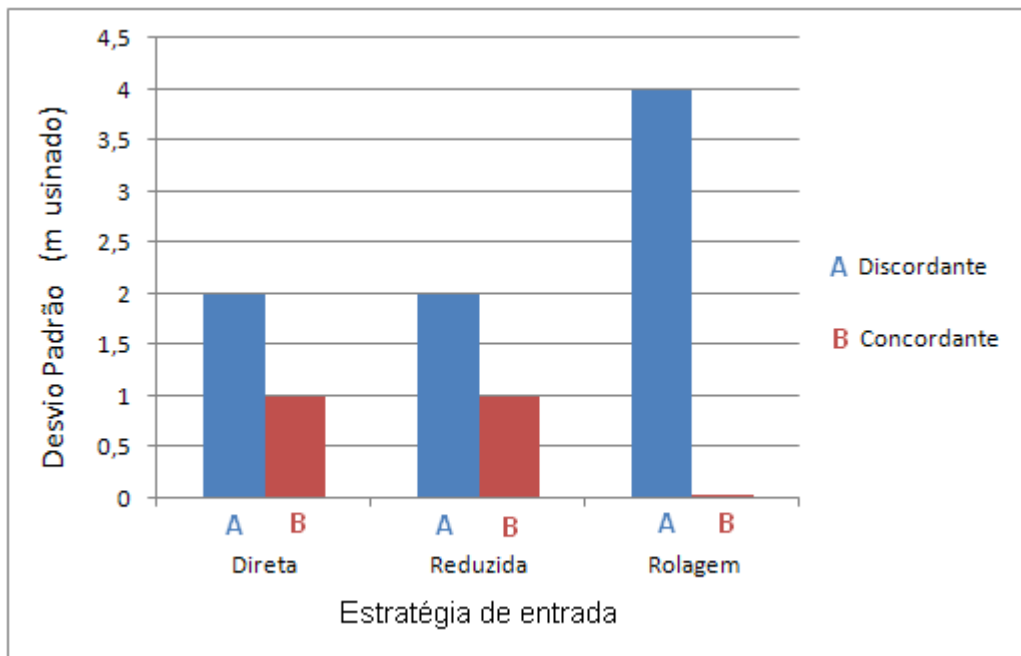


Figura 4.9 – Desvio padrão para diferentes estratégias de entrada

Os resultados mostram que a dispersão dos resultados foi menor para o corte concordante do que para o corte discordante em todos os casos, o que nos leva a concluir que o comportamento da formação do desgaste para o corte concordante seja mais uniforme do que para o corte discordante, tendo pouca influência inclusive pela alteração da estratégia de entrada, como mostrado na figura 4.7.

Para o corte concordante, a estratégia de entrada por rolagem diminuiu o desvio padrão para zero, no entanto, o desvio padrão para as outras estratégias já era baixo, pois 1 m de desvio padrão é o equivalente a distância de apenas uma parada de usinagem para medição (10 passes) entre as duas réplicas realizadas, sendo necessário portanto realizar mais réplicas para se confirmar com certeza essa melhoria na regularidade.

Para o corte discordante, conclui-se que apesar de a alteração da estratégia de entrada melhorar a vida da ferramenta, o faz de uma forma não muito uniforme. Uma possível explicação para esse fenômeno é que utilizar a estratégia de entrada por rolagem, não faz com que os lascamentos parem de acontecer, mais sim, aumentam a possibilidade de que ocorram de uma forma mais distribuída ao longo da aresta de corte, e não mais de uma forma tão localizada, como mostrado na figura 4.3, evitando que o crescimento ocorra de uma forma tão abrupta (fig. 4.2). Por sua vez, quanto maior for a distribuição do desgaste, maior será a vida da ferramenta.

Outro detalhe observado foi a rebarba que o corte discordante deixou na peça, devido a saída do dente para da peça, como pode ser visto na figura 4.10, fenômeno este não observado no corte concordante. Isso se dá porque no corte discordante a espessura do cavaco é maior quando da saída da aresta do corte, assim a tendência é que essas rebarbas sejam de maiores dimensões, além disso, o sentido de giro da fresa joga a rebarba para fora da peça no corte discordante, enquanto no corte concordante joga para dentro da peça.

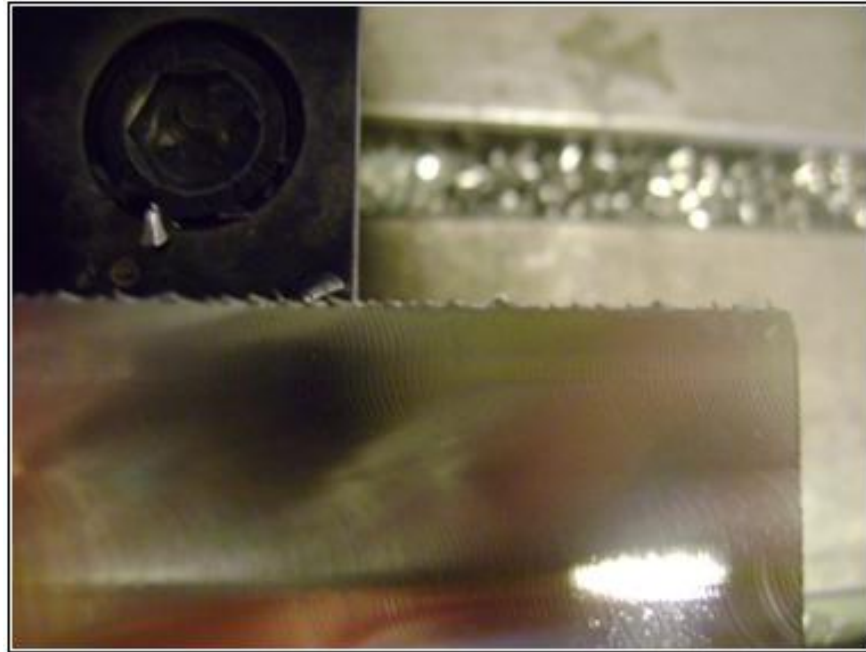


Figura 4.10 – Rebarba na lateral da peça no corte discordante

4.3 Terceira parte: Comparação de diferentes ferramentas

Os resultados destes ensaios estão mostrados em forma de gráfico de vida para as quatro diferentes ferramentas (duas geometrias e duas classes) na figura 4.11.

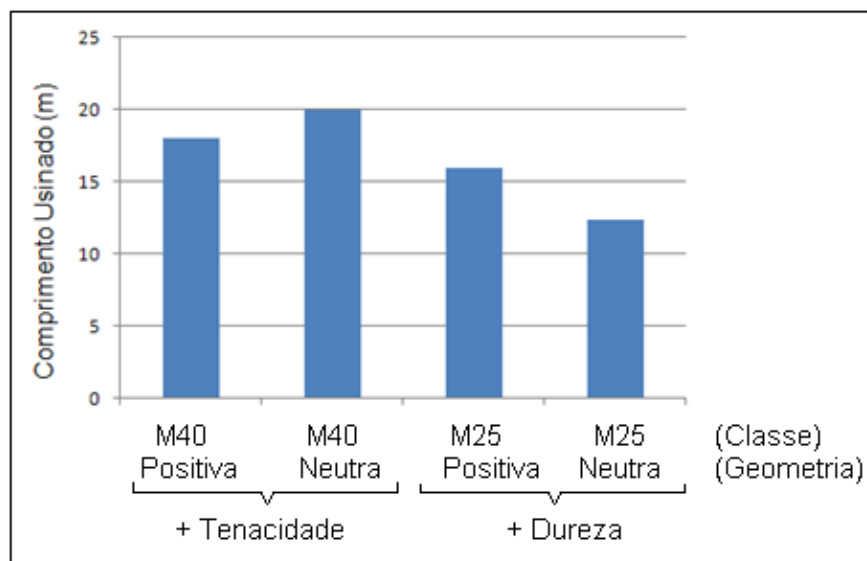


Figura 4.11 – Vida para as quatro ferramentas testadas

Analisando-se a figura 4.11 pode-se perceber que em termos de classe, a M40 apresentou melhor desempenho do que a M25, indicando que para usinagem desse material com as condições testadas, tenacidade é uma característica importante. Além disso, para ferramentas mais tenazes a geometria neutra, mais robusta teve melhor desempenho. Por outro lado, com a classe de maior dureza uma geometria que propicie um corte menos severo é mais indicada. Isso mostra que a escolha de ferramentas de corte deve levar em consideração tanto a tenacidade da pastilha quanto a sua geometria interagindo com o sistema máquina-ferramenta-dispositivos-peças.

4.4 Quarta Parte: Medição dos esforços de corte

Nestes ensaios, foram feitas as medições dos esforços de corte para as três estratégias de entrada, sendo que as figuras 4.12, 4.13 e 4.14 contêm os gráficos da força medida na entrada do corte nas direções x e y para as entradas direta, reduzida e rolagem, respectivamente.

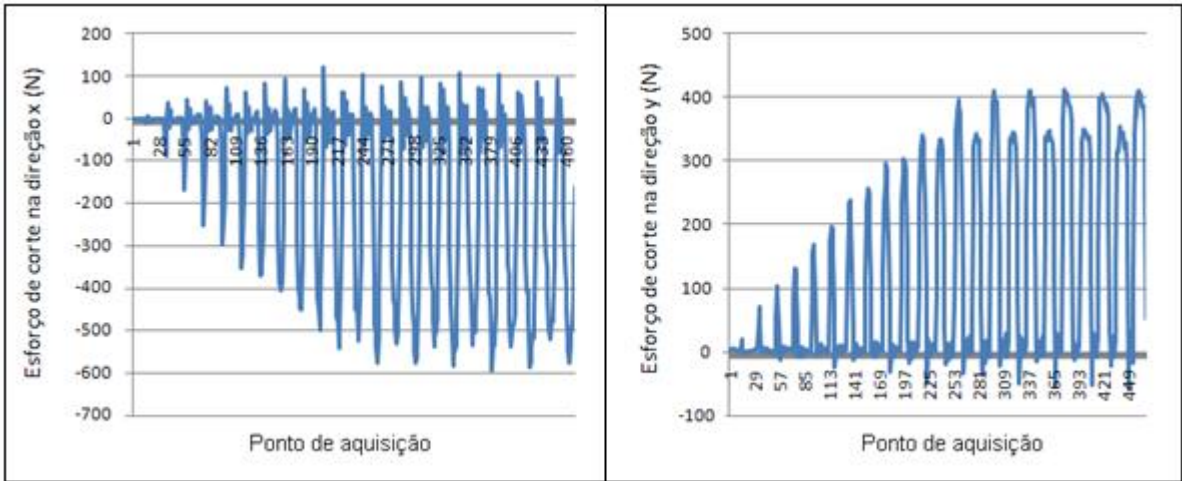


Figura 4.12 – Esforços de corte na direção x (a) e y (b) para a Entrada Direta

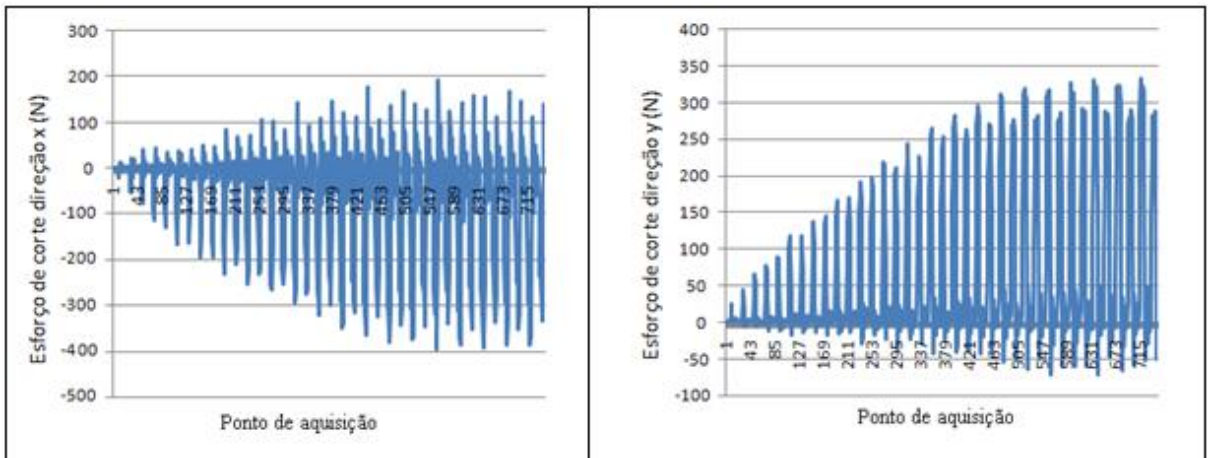


Figura 4.13 – Esforços de corte na direção x (a) e y (b) para a Entrada Reduzida

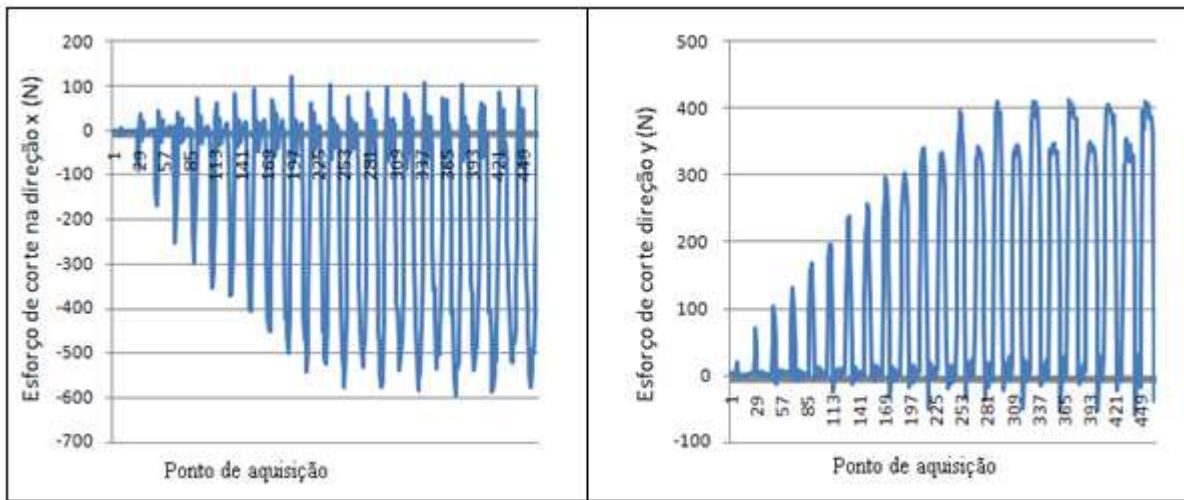


Figura 4.14 – Esforços de corte na direção x (a) e y (b) para a Entrada por Rolagem

De acordo com os gráficos gerados, pode-se notar uma grande semelhança entre a entrada direta e a entrada por rolagem, não evidenciando de fato uma redução nem na grandeza e nem na taxa de crescimento dos esforços de corte entre estas duas estratégias, eliminando a possibilidade de o motivo do aumento da vida da ferramenta ser a mudança das componentes da força de corte.

Em relação à entrada reduzida, nota-se uma redução da taxa de crescimento da força, uma vez que o avanço está reduzido pela metade até a ferramenta entrar completamente na peça, além de uma redução na grandeza dos esforços, que no entanto deveria ser de metade do valor obtido para as outras estratégias, uma vez que reduzir o avanço pela metade, reduz também a área de corte pela metade e conseqüentemente deveria diminuir o valor dos esforços de corte pela metade, o que não ocorreu, sugerindo o fato de a entrada reduzida pegar uma região do material mais encruada, portanto, podendo aumentar a pressão específica de corte.

4.5 Quinta Parte: Microscopia Eletrônica de Varredura

Por último foi realizado a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) junto com a análise química proporcionada pela Espectrometria Eletrônica Dispersiva de Raio-X (EDS), para diferentes condições, sendo que as imagens junto com a análise química estão nas figuras 4.15, 4.16 e 4.17 para as três estratégias de entrada.

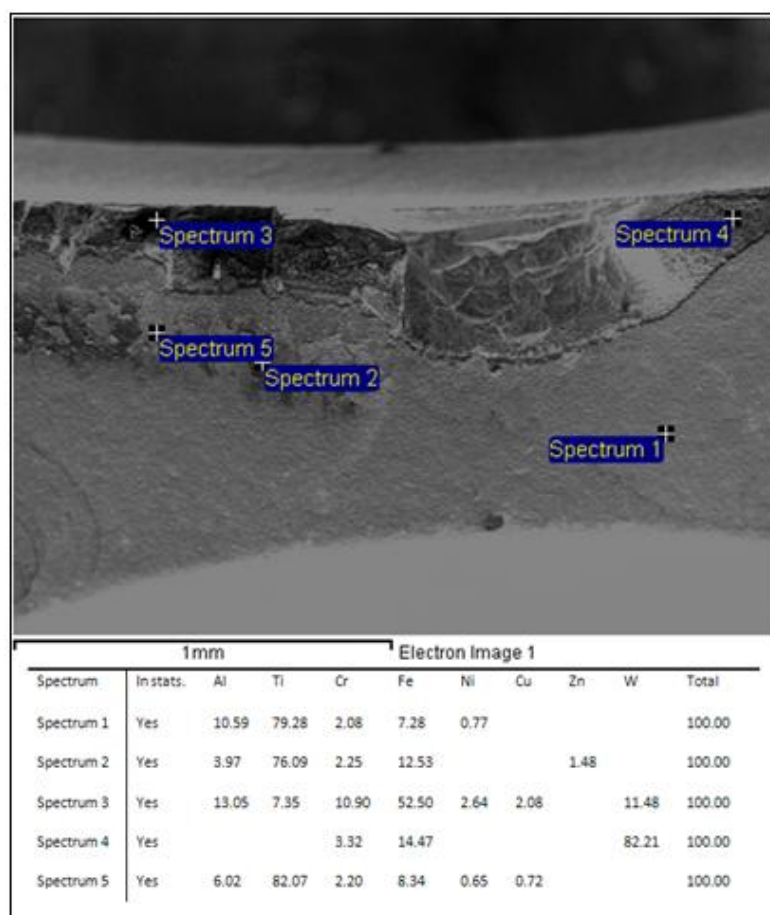


Figura 4.15 – MEV + EDS para uma entrada por rolagem

Na figura 4.15 pode-se observar que a aresta de corte apresenta um lascamento, já que a forma deste é irregular e não aparecem marcas de abrasão. Além disso, nota-se que em alguns pontos (marcados com 1 e 2) o revestimento está intacto, em outros (ponto 4) o substrato está

exposto e em outros (ponto 3) há elementos do substrato, do revestimento e da peça. Não é possível saber a ordem em que os fenômenos ocorreram, mas pode-se afirmar que ocorreu adesão de material, remoção do revestimento e remoção de parcelas do substrato. A teoria indica que geralmente ocorre a adesão de material da peça na ferramenta, posteriormente essa parcela é removida levando com si uma porção do revestimento, a seguir, o substrato exposto reage mais facilmente com o material da peça, ocorre nova adesão, nova remoção, só que agora do substrato.

A figura 4.16 mostra uma imagem obtida por MEV e um EDS de uma ferramenta desgastada em um ensaio com entrada reduzida.

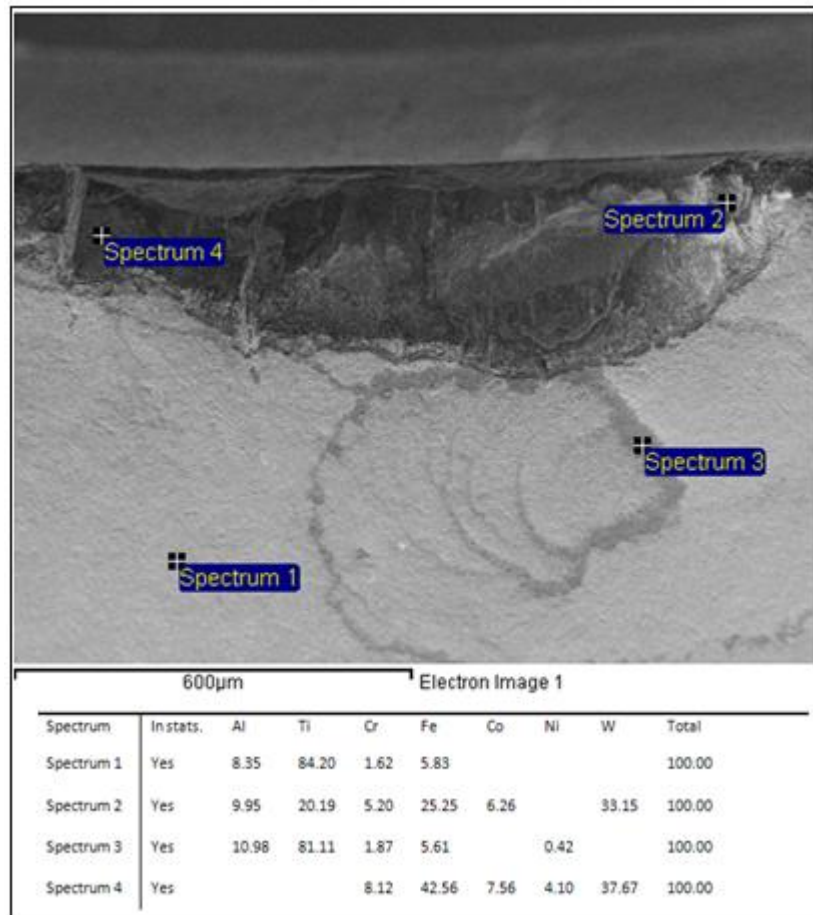


Figura 4.16 – MEV + EDS para uma entrada reduzida

Observando-se a figura 4.16 nota-se que o fim de vida foi atingido devido ao lascamento da pastilha. Novamente nota-se que há pontos (1, 2 e 3) em que o revestimento parece intacto, por outro lado, existem pontos (2 e 4) onde existe substrato e indícios do material da peça. A figura 4.16 é bastante similar à 4.15, indicando que os fenômenos de desgaste envolvidos na entrada reduzida e por rolagem são similares. Isso é razoável já que ambas apresentam espessura de cavaco reduzida na entrada.

A figura 4.17 apresenta uma MEV mais EDS para ferramenta desgastada em ensaio com entrada direta.

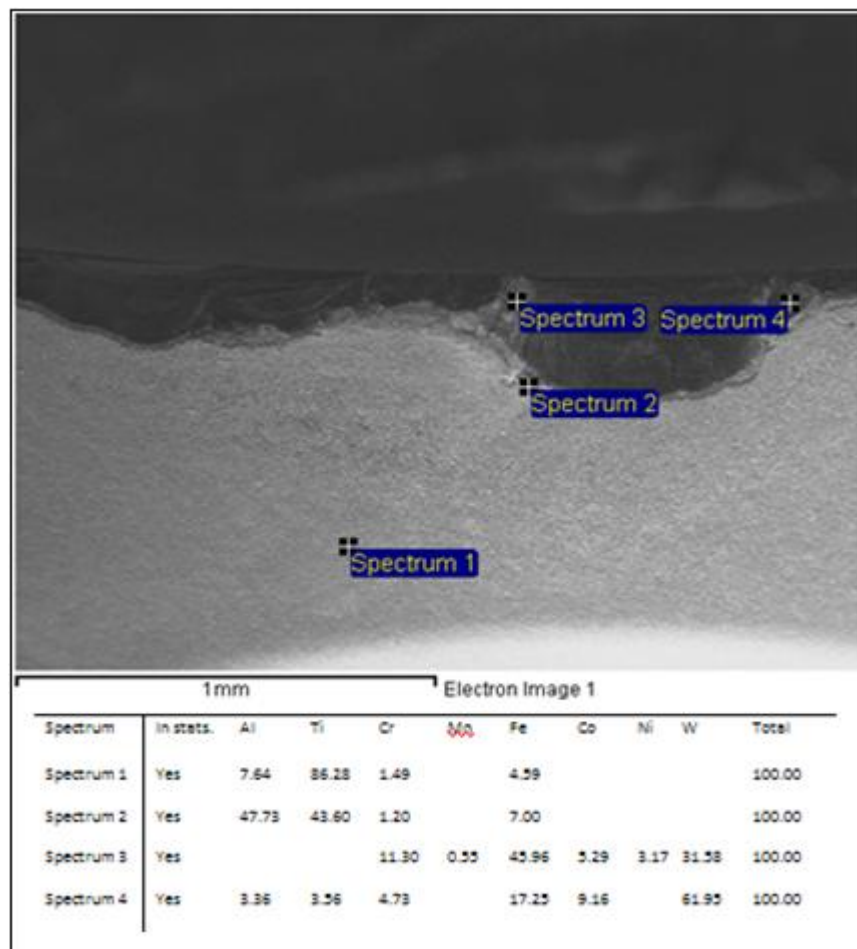


Figura 4.17 – MEV + EDS para uma entrada direta

Na figura 4.17 observa-se um desgaste similar ao das figuras 4.15 e 4.16, apresentando adesão de material, substrato exposto e porções de revestimento. A diferença situa-se na localização do desgaste, mais próximo ao final do contato ferramenta peça, similar ao que ocorre nos desgastes de entalhe. Nesse caso, como a espessura do cavaco na entrada do corte é maior, os lascamentos foram favorecidos.

As figuras 4.15, 4.16 e 4.17 possibilitam identificar portanto que para todos os casos, os lascamentos ocorridos na ferramenta, são oriundos principalmente do fenômeno conhecido como “attrition”.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS

Neste capítulo procura-se sintetizar todas as conclusões que foram possíveis de se detectar a partir do estudo efetuado neste trabalho e também a partir das conclusões sugerem-se novos trabalhos que possam ser desenvolvidos no futuro para que os mesmos possam completar as informações aqui conseguidas.

5.1 Conclusões

- Os melhores resultados em termos de vida de ferramenta foram obtidos para a estratégia de entrada por rolagem, no corte discordante, proporcionando uma melhora na vida da ferramenta de até 50%, evidenciando uma melhora efetiva quando utilizada esta estratégia. Já as estratégias de entrada reduzida e direta apresentaram resultados semelhantes neste corte.
- Para o corte concordante, não observou-se diferenças significativas quando utilizado uma estratégia de entrada ou outra, obtendo-se resultados num patamar mediano entre a estratégia de entrada por rolagem e as outras para o corte discordante, além de não gerar rebarba na peça e proporcionar uma dispersão dos resultados menor.
- Para os parâmetros de corte utilizados neste trabalho, os melhores resultados foram obtidos para o avanço de 0,25mm/dente, sendo que para esse, as velocidades de 170m/min e 195m/min tiveram desempenho semelhante.

- O desgaste típico apresentado pela ferramenta foi de pequenos lascamentos, oriundos do fenômeno conhecido como attrition, uma vez que foi observado adesão de material da peça na ferramenta.
- A classe de ferramenta mais tenaz (M40) apresentou os melhores resultados, sendo que para estes a geometria neutra foi um pouco melhor que a positiva. Para a classe M25 a geometria positiva teve melhor desempenho.
- Um avanço 40% mais baixo proporcionou uma rugosidade média também cerca de 40% mais baixa, confirmando a teoria.
- Reduzir a velocidade de avanço pela metade reduz a área do cavaco pela metade, porém os esforços de corte em apenas 25%, apontando para um encruamento da peça.

5.2 Sugestões para próximos trabalhos

- Realizar ensaios com um número maior de entradas por comprimento usinado, para se verificar o quanto essa influencia na vida da ferramenta.
- Fazer um estudo mais detalhado sobre a saída da ferramenta da peça, pois este instante também apresentou um aumento dos esforços de corte, mostrando também ser crítico.
- Realizar mais ensaios com a ferramenta de geometria neutra para confirmar o seu melhor desempenho que a positiva.
- Testar parâmetros de usinagem maiores, principalmente a v_c que aparentou poder ser aumentada mais, uma vez que os ensaios correram muito bem, não ocorrendo nenhuma quebra significativa da ferramenta.
- Variar o Raio (R) e a distância de afastamento (da) da peça para a estratégia de entrada por rolagem para verificar a influência destes.

- Realizar mais ensaios de vida com a estratégia de entrada por rolagem, para diferentes parâmetros de usinagem, para o corte concordante, a fim de se comprovar sua real ineficiência, uma vez que este resolve o problema da rebarba na peça.
- Realizar ensaio de dureza na peça usinada, a fim de se verificar o seu real encruamento.

Referências

ABDELSHEHID, M. et al. On the correlation between fracture toughness and precipitation hardening heat treatments on 15-5 PH stainless steel. *Engineering failure analysis*, v.14, p. 626-631, 2007

AK STEEL, Products data bulletin, 2011

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

AK STEEL, Stainless steel, 2011

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

AMERICAN SOCIETY FOR METALS (ASM). Handbook, Machining of stainless steel, *machining*, v.16, p. 681-707, 1997

AMERICAN SOCIETY FOR METALS (ASM). Handbook, Binary Alloy Phase Diagrams, *Alloy Phase Diagrams*, v.03, 1992

AMERICAN SOCIETY FOR METALS (ASM). Specialty Handbook, *Stainless steel*, 3rd 1999.

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

BELAZINSKI, M.; ENNAJIMI, E. Influence of feed variation on tool wear when milling stainless steel 17-4 PH. *Journal of engineering for industry*, v. 116, p. 516-520, 1994

CALLISTER, W.D. *Ciência e engenharia de materiais, uma introdução. 7st Ed.* Utah: Livros técnicos e científicos editora S.A., 2008.

CAPRA, F. O futuro da nova física. In: _____. *O Tao da física*. São Paulo: Editora Cultrix, 2011. Posfácio a quarta edição, p. 332-352.

- 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.
- CALDEIRANI FILHO, J. *Estudo e monitoramento do processo de fresamento frontal com fresas de insertos intercambiáveis*. 147 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1998.
- COUTINHO, C.B. Materiais resistentes a corrosão e a oxidação. In:_____. *Materiais metálicos para engenharia*. Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, 1992. Cap. 1, p. 1-75.
- 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. *Tecnologia da usinagem dos materiais*. 7st Ed. São Paulo: Artliber, 2010.
- DOYLE, L.E. Como são usinados os metais. In:_____. *Processos de fabricação e materiais para engenheiros*. São Paulo: Editora Edgard Blucher LTDA., 1962. Cap. 16, p. 334-358.
- ENGİN, 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. *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
- KLIN, Z. Cutting tool reliability analysis for variable feed milling of 17-4PH stainless steel. *Wear*, 195, p.206-213, 1996.
- KOTTHAUS, H. Materiais ferrosos. In:_____. *Materiais metálicos. Materiais auxiliares*. São Paulo: Editora Polígono, 1972. Cap. 1, p. 1-43.

- 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.
- KUMAR, A.S.; DURAI, A.R.; SORNAKUMAR, T. *The effect of tool wear on tool life of alumina-based ceramic cutting tools while machining hardened martensitic stainless steel – Journal of materials processing technology*, 173, p.151-156, 2006.
- LIN, T.R. Experimental Design and performance analysis of TiN – coated carbide tool in face milling stainless steel. *Journal of material processing technology*, n.127, p.1-7, 2002.
- MARIANO, N.A.; Pereira, V.F.; Rodrigues, C.A.D.; Lorenzo, P.L.; Rollo, J.M.D.A. 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.
- MEDVEDEVA, A.; BERGSTROM, J.; GUNNARSSON, S.; KRAKHMALOV, P.; NORDH, L.G. Influence of nickel content on machinability of a hot-work tool steel in prehardened condition. *Material and design*, 32, p.706-715, 2011.
- 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.
- METALS HANDBOOK – Machining – Machining of stainless steel, v.3, ed.8, p.375-398, 1967
- METALS HANDBOOK – Machining – Machining processes and their application to steel and cast iron - milling, v.3, ed.8, p.169-193, 1967
- 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. 2010. Cap. 4.3.3, p. 70-73.

PADILHA, A.F. Estrutura Cristalina. In:_____. *Materiais de engenharia*. São Paulo: Ed. Hemus, 2007. Cap. 4, p. 59-76.

PIVETTA, C.S., *Uma contribuição ao estudo do fresamento de aço endurecido com fresa de topo esférica*. 110 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

ROSS, R.B. *Metallic materials specification handbook*. 4st ed. London: Chapman & Hall, 1992.

SANDVIK CATALOG – Milling, 2012

SANDVIK COROMANT AB.

Disponível em < <http://www.sandvik.coromant.com/br> > Acesso em 20 de Janeiro de 2012

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.

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS. SAE – A564/A564M-10

SREEJITH, P.S.; NGOI, B.K.A . Dry machining, machining of the future. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 101, p. 287-291, 2000

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.

TOH, C. K. A study of the effects of cutter path strategies and orientations in milling. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 152, p. 346-356, 2004

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

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

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

VILLARES METALS, Aços inoxidáveis

Disponível em: <http://www.villaresmetals.com.br/portuguese/1016_PTB_HTML.htm>. Acesso em 8 de Novembro de 2011.